ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

RELATÓRIO FINAL

Livro das Pesquisas desenvolvidas durante 20 anos do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra, com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico

CCR NovaDutra

30/11/2021

Sumário

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO 5
1.1. Título do projeto 5
1.2. Resumo 5
1.3. Palavras chave 5
1.4. Justificativa 5
1.5. Objetivos 6
1.5.1. Objetivo Geral 6
1.5.2. Objetivos Específicos 6
1.6. Organização do trabalho 6
1.7. Período de execução 6
1.8. Cronograma de execução 6
1.9. Local de execução 8
1.10. Equipe executora 8
2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS 8
3. ETAPAS 11
3.1. Etapa A - Redação de capítulos do livro, para cada pesquisa 11
3.1.1. Elaboração de especificações particulares de serviço 12
3.1.2. Treinamento e desenvolvimento de profissionais na área de pavimentação 14
3.1.3. Avaliação da utilização da cal hidratada para combater susceptibilidade de misturas betuminosas à ação da água e melhorar a adesividade do ligante ao agregado 16
3.1.4. Avaliação de danos por umidade induzida, módulo de resiliência e fadiga em misturas confeccionadas com diversos polímeros 21
3.1.5. Comparativo da qualidade entre misturas betuminosas executadas em usinas gravimétricas e drum mixers 37
3.1.6. Análise dos métodos DNER e ASTM para o ensaio de densidade de corpos de prova Marshall 40
3.1.7. Utilização do Elvaloy como aditivo ao ligante no CBUQ 41
3.1.8. Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação no Brasil 46
3.1.9. Avaliação do equipamento “Grip Tester” para medição de atrito 54
3.1.10. Relação de óxido de cálcio na cal hidratada para efeito de Adesividade 60
3.1.11. Avaliação do teor de asfalto em volume dos projetos de misturas utilizados na Rodovia Presidente Dutra 61
3.1.12. Avaliação da necessidade de aplicação do método Rice para controle do volume de vazios de ar obtido no campo em misturas asfálticas 62

3.1.13. Determinação em laboratório da resistência à fadiga de misturas asfálticas 64

3.1.14. Avaliação do desempenho de camadas de mistura asfáltica reforçada com geogrelha flexível, com relação à trincamento por fadiga e reflexão de trincas de camadas inferiores do pavimento.....70

3.1.15. Avaliação do comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos, projetados pelos métodos Marshall e Superpave, sob ação de tráfego simulado em modo acelerado por Heavy Vehicle Simulator, em conjunto com os laboratórios da USP e da UFRJ 75

3.1.16. Estudo da sensibilidade do teor e do tipo de ligante em misturas asfálticas no comportamento de fadiga.....92

3.1.17. Estudo da sensibilidade do teor e do tipo de ligante em misturas asfálticas à deformação permanente 114

3.1.18. Critério de otimização de projetos de ponte a partir de espectros de acelerações induzidas por veículos nos tabuleiros 123

3.1.19. Ensaios para avaliação dos concretos moldados em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfegos de veículos 126

3.1.20. Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes 140

3.1.21. Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfáltica de elevado módulo 148

3.1.22. Avaliação da pesagem de veículos em movimento com cargas líquidas.....154

3.1.23. Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária NovaDutra.....159

3.1.24. Elaboração do projeto funcional da nova pista de subida da Serra das Araras e adequação do projeto funcional da pista ascendente existente em pista descendente 168

3.1.25. Capacitação da Equipe Técnica do CPR com uso dos novos equipamentos adquiridos 174

3.1.26. Capacitação da equipe técnica – Método Superpave 175

3.1.27. Free Flow - Implantação De Pontos Com Novo Sistema Automático De Arrecadação Para Testes (1ª Etapa) 177

3.1.28. Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados com cal hidratada ...179

3.1.29. Revestimentos asfálticos sustentáveis: estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas.....187

3.1.30. Estudos para incorporação de conceitos de sustentabilidade em passarelas ao longo da rodovia Presidente Dutra.....196

3.1.31. Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados.....199

3.1.32. Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas a partir de dois métodos de ensaio com diferentes tipos de asfalto 206

3.1.33. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland – Desenvolvimento de método de dimensionamento e avaliação de processos construtivos 219

3.1.34. Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade 236

3.1.35. Materiais de Sinalização Horizontal: Avaliação do desempenho para elevados volumes de tráfego 247

3.1.36. Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e flow number de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas. 255

3.1.37. Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da BGTC 263

3.1.38. Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas 274

3.1.39. Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto. Etapa 1: Estudo Laboratorial 284

3.1.40. Modelo de Serviço de Telemedicina para atendimento emergencial em rodovia baseada em Centro de Apoio Referenciada para encaminhamentos 293

3.1.41. Treinamento e Capacitação Técnica em Pavimentação 297

3.1.42. Ecodriving BR – reduzindo custos e ampliando benefícios socioambientais na principal rodovia brasileira 301

3.1.43. Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto e cimento Portland, Construção e Monitoramento de um Trecho Experimental 309

3.1.44. Dosagem de Misturas Asfálticas com Energias Distintas no Compactador Giratório Superpave 320

3.1.45. Avaliação da Aderência entre Camadas Asfálticas 325

3.1.46. Avaliação do Emprego de Polímeros do tipo RET em Misturas Asfálticas 331

3.1.47. Emprego de Perfis de Fibras de Carbono na Recuperação de Placas de Concreto Fissuradas 338

3.1.48. Vídeo Registro dos Ensaios Realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias 345

3.1.49. Livro: Pesquisas desenvolvidas durante 20 anos do Centro de Pesquisas Rodoviárias 348

3.2. Etapa B - Revisão final e formatação 348

3.3. Etapa C - Edição e impressão do livro e e-book 348

3.4. Etapa D - Elaboração de relatórios 349

4. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS GERADOS 349

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 350

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1.Título do projeto

Livro das Pesquisas desenvolvidas durante 20 anos do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra, com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico

1.2.Resumo

O Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra desenvolve pesquisas há 22 anos empregando os Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), disponibilizados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Durante esses anos até o presente, foram desenvolvidas mais de 40 pesquisas relacionadas ao pavimento, obras de arte, operação, tecnologia da informação e tráfego. Neste estudo o objetivo está sendo realizar uma compilação dessas pesquisas em um Livro e em um e-book, no qual serão apresentados os resultados mais importantes obtidos nessas pesquisas. O Livro apresentará de forma clara e direta, as informações que poderão ser úteis no futuro para o meio rodoviário nacional.

1.3.Palavras chave

Livro; e-book; Centro de Pesquisas Rodoviárias; Recursos para Desenvolvimento Tecnológico

1.4.Justificativa

A Concessão Rodovia Presidente Dutra deu a origem em 1999 à formação de um Centro de Pesquisas Rodoviárias com o objetivo de intensificar o processo de melhoria contínua das condições de segurança, conforto, economia e durabilidade da Rodovia. Desde seu primeiro ano, se desenvolvem pesquisas que beneficiam todas as rodovias brasileiras, empregando os Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), disponibilizados pela ANTT.

Durante esses anos, até 2021 foram desenvolvidas quarenta e nove pesquisas, em assuntos relacionados ao pavimento, obras de arte, operação, tecnologia da informação e tráfego.

Considera-se importante registrar de forma simplificada todas essas pesquisas em um único documento, como um livro e um e-book. Esse livro e e-book conterão todas as informações relevantes de cada uma das pesquisas.

1.5.Objetivos

1.5.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é resumir em uma única publicação, todas as pesquisas desenvolvidas no Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra com Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), durante mais de 20 anos.

1.5.2. Objetivos Específicos

Para poder atender ao objetivo geral deste estudo definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar todas as pesquisas desenvolvidas no CPR e seus objetivos;
- Redigir um resumo objetivo dos principais resultados e conclusões da pesquisa, para o formato de um capítulo de livro;
- Formatar os capítulos para a elaboração de um livro, no formato de apresentação impresso e de um e-book.

1.6.Organização do trabalho

Para atingir o objetivo geral e os objetivos específicos, a pesquisa foi realizada em etapas, descritas na continuação.

- Etapa A) Redação de capítulos do livro, para cada pesquisa
- Etapa B) Revisão final e formatação
- Etapa C) Edição e impressão do livro e e-book
- Etapa D) Elaboração de relatórios

1.7.Período de execução

O estudo teve início em abril de 2018 e término em novembro de 2020.

1.8.Cronograma de execução

O cronograma físico-financeiro aprovado pelo ofício n° 077/2018/GEFOR/SUINF está apresentado nos Quadros 1.1 a 1.3.

Quadro 1.1. Cronograma Físico-Financeiro do Projeto para o Ano 2018

ANEXO R Livro das Pesquisas desenvolvidas durante 20 anos do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra, com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico		2018								
		abr-18	mai-18	jun-18	jul-18	ago-18	set-18	out-18	nov-18	dez-18
ETAPA A) Redação de Capítulos do Livro, para cada pesquisa	Custo Mão de Obra (R$)	646	1,404	4,431	9,078	13,727	13,501	19,016	15,233	15,233
	TOTAL (R$)	**646**	**1,404**	**4,431**	**9,078**	**13,727**	**13,501**	**19,016**	**15,233**	**15,233**
ETAPA B) Revisão Final e Formatação	Custo Mão de Obra (R$)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TOTAL (R$)									
ETAPA C) Edição/Diagramação e Impressão do Livro(*)	Custo Mão de Obra (R$)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Custo Gráfica (R$)									
	TOTAL (R$)									
ETAPA D) Elaboração de Relatórios	Custo Mão de Obra (R$)	-	-	-	-	-	6,265	-	-	-
	TOTAL (R$)						**6,265**			
Total ANEXO R		**646**	**1,404**	**4,431**	**9,078**	**13,727**	**19,767**	**19,016**	**15,233**	**15,233**

(*) Os valores referentes à Edição/Diagramação e Impressão do Livro serão atualizado no ano de finalização do projeto com empresas terceirizadas

Quadro 1.2. Cronograma Físico-Financeiro do Projeto para o Ano 2019

2019											
jan-19	fev-19	mar-19	abr-19	mai-19	jun-19	jul-19	ago-19	set-19	out-19	nov-19	dez-19
8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	8,752
8,752	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	6,265	-	-	-	-	-	6,265	-	-	-
		6,265						**6,265**			
8,752	**8,752**	**15,018**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**15,018**	**8,752**	**8,752**	**8,752**

Quadro 1.3. Cronograma Físico-Financeiro do Projeto para o Ano 2020

2020								TOTAL (R$)	
jan-20	fev-20	mar-20	abr-20	mai-20	jun-20	jul-20	ago-20		
8,752	8,752	8,752	8,752	8,752	6,724	5,835	8,752	Custo Ensaios (R$)	262,369
8,752	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**8,752**	**6,724**	**5,835**	**8,752**	TOTAL (R$)	262,369
-	-	-	8,752	8,752	8,752	8,752	-	Custo Ensaios (R$)	35,009
				8,752	**8,752**	**8,752**	**-**	TOTAL (R$)	26,257
-	-	-	-	-	-	-	9,398	Custo Ensaios (R$)	9,398
							16,223	Custo Mão de Obra (R$)	16,223
							25,621	TOTAL (R$)	25,621
-	-	6,265	-	-	-	-	6,265	Custo Ensaios (R$)	31,327
		6,265						TOTAL (R$)	31,327
8,752	**8,752**	**15,018**	**8,752**	**17,504**	**15,476**	**14,587**	**34,373**	TOTAL (R$)	**345,574**

1.9.Local de execução

Este projeto foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária CCR NovaDutra, localizado em Santa Isabel, SP.

1.10. Equipe executora

A pesquisa foi desenvolvida pela Equipe do CPR, apresentada no Quadro 2.

Quadro 2. Equipe do CPR da CCR NovaDutra

Função	Título	Nome	Empresa
Engenheira/Coordenadora	Engenheira	Valéria C. de Faria	CPR-NovaDutra
Pesquisador	Doutor	Luis Miguel Gutiérrez Klinsky	CPR-NovaDutra
Engenheira	Mestre	Lenice Mirian da Silva	CPR-NovaDutra
Engenheiro	Engenheiro	Tiago Simione Azzoni	CPR-NovaDutra
Engenheiro	Engenheiro	Márcia Helena Leal	CPR-NovaDutra
Agente de Serviço Administrativo	Administrativo	Adriana C.R.L. Gonçalves	CPR-NovaDutra

2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

O método empregado no desenvolvimento deste projeto foi resumir todas as pesquisas realizadas pelo CPR desde sua implantação em 1999. Estas pesquisas foram realizadas empregando os

Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), disponibilizados pela ANTT, listadas no Quadro 1.

As pesquisas foram resumidas e registradas em quatro relatórios parciais e um relatório final.

O CPR se responsabilizou pelo registro de forma simplificada de todas essas pesquisas em um único documento, sendo um livro e um e-book. O livro apresenta na forma de capítulo cada pesquisa, resumindo introdução, objetivos, metodologias e principais resultados e conclusões. Além disso, após a escrita dos capítulos realiza-se a revisão e formatação final do livro. Enquanto que a empresa terceirizada se responsabilizou pela impressão do livro de uma tiragem de 1.000 cópias.

Quadro 1. Pesquisas Desenvolvidas no CPR desde 1999, com RDT

ID	Título da Pesquisa
1	Elaboração de especificações particulares de serviços
2	Treinamento e desenvolvimento de profissionais na área de pavimentação
3	Avaliação da utilização da cal hidratada para combater susceptibilidade de misturas betuminosas à ação da água e melhorar a adesividade do ligante ao agregado
4	Avaliação de danos por umidade induzida, módulo de resiliência e fadiga em misturas confecionadas com diversos polímeros
5	Comparativo da qualidade entre misturas betuminosas executadas em usinas gravimétricas e drum mixers
6	Análise dos métodos DNER e ASTM para o ensaio de densidade de corpos de prova Marshall
7	Utilização do Elvaloy como aditivo ao ligante no CBUQ
8	Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação no Brasil
9	Avaliação do equipamento “Grip Tester” para medição de atrito
10	Determinação em laboratório da lei da Fadiga para misturas asfálticas
11	Avaliação do desempenho de camadas de mistura asfáltica reforçada com geogrelha flexível, no que se refere ao trincamento por fadiga e reflexão de trincas de camadas inferiores do pavimento
12	Avaliação do comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos, projetados pelos métodos Marshall e Superpave, sob ação de tráfego simulado em modo acelerado por Heavy Vehicle Simulator, em conjunto com os laboratórios da USP e da UFRJ
13	Estudo da sensibilidade do teor de ligante em misturas asfálticas na formação de afundamentos de trilhas de roda, em conjunto com os laboratórios da USP e UFRJ
14	Estudo comparativo do comportamento de fadiga de misturas betuminosas com diferentes teores de asfalto (borracha , polímeros e convencional)
15	Ensaios para avaliação dos concretos moldados em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfegos de veículos
16	Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes
17	Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfálticas de elevado módulo
18	Pesquisa de Carga Líquida
19	Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária NovaDutra
20	Elaboração do projeto funcional da nova pista de subida da Serra das Araras e adequação do projeto funcional da pista ascendente existente em pista descendente
21	Capacitação da Equipe Técnica do CPR com os novos equipamentos adquiridos
22	Implantação de pontos com novo sistema automático de arrecadação para testes (1ª etapa)
23	Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados com cal hidratada
24	Revestimentos asfálticos sustentáveis: estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas
25	Estudos para incorporação de conceitos de sustentabilidade em passarelas ao longo da rodovia Presidente Dutra
26	Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados
27	Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas a partir de dois métodos de ensaio com diferentes tipos de asfalto
28	Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland – Desenvolvimento de método de dimensionamento e avaliação de processos construtivos
29	Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade
30	Materiais de Sinalização Horizontal: Avaliação do desempenho para elevados volumes de tráfego
31	Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e *flow number* de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas.
32	Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da BGTC
33	Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas
34	Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto. Etapa 1: Estudo Laboratorial
35	Modelo de Serviço de Telemedicina para atendimento emergencial em rodovia baseada em Centro de Apoio Referenciada para encaminhamentos
36	Treinamento e Capacitação Técnica em Pavimentação
37	*Ecodriving* BR – reduzindo custos e ampliando benefícios socioambientais na principal rodovia brasileira
38	Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto e cimento Portland, Construção e Monitoramento de um Trecho Experimental

3. ETAPAS

3.1.Etapa A - Redação de capítulos do livro, para cada pesquisa

Nesta etapa descrevem-se os capítulos do Livro, pesquisa a pesquisa, conforme o histórico de execução no CPR da CCR NovaDutra, contendo introdução, objetivos, metodologias utilizadas, resultados e conclusões (Quadro 2).

Quadro 2. Pesquisas RDT desenvolvidas no CPR

ID	Título da Pesquisa
1	Elaboração de especificações particulares de serviços
2	Treinamento e desenvolvimento de profissionais na área de pavimentação
3	Avaliação da utilização da cal hidratada para combater susceptibilidade de misturas betuminosas à ação da água e melhorar a adesividade do ligante ao agregado
4	Avaliação de danos por umidade induzida, módulo de resiliência e fadiga em misturas confecionadas com diversos polímeros
5	Comparativo da qualidade entre misturas betuminosas executadas em usinas gravimétricas e drum mixers
6	Análise dos métodos DNER e ASTM para o ensaio de densidade de corpos de prova Marshall
7	Utilização do Elvaloy como aditivo ao ligante no CBUQ
8	Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação no Brasil
9	Avaliação do equipamento “Grip Tester” para medição de atrito
10	Relação de óxido de cálcio na cal hidratada para efeito de Adesividade
11	Avaliação do teor de asfalto em volume dos projetos de misturas utilizados na Rodovia Presidente Dutra
12	Avaliação da necessidade de aplicação do método Rice para controle do volume de vazios de ar obtido no campo em misturas asfálticas
13	Determinação em laboratório da lei da Fadiga para misturas asfálticas
14	Avaliação do desempenho de camadas de mistura asfáltica reforçada com geogrelha flexível, no que se refere ao trincamento por fadiga e reflexão de trincas de camadas inferiores do pavimento
15	Avaliação do comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos, projetados pelos métodos Marshall e Superpave, sob ação de tráfego simulado em modo acelerado por Heavy Vehicle Simulator, em conjunto com os laboratórios da USP e da UFRJ
16	Estudo da sensibilidade do teor e do tipo de ligante em misturas asfálticas no comportamento de fadiga
17	Estudo da sensibilidade do teor e do tipo de ligante em misturas asfálticas à deformação permanente
18	Critério de otimização de projetos de ponte a partir de espectros de acelerações induzidas por veículos nos tabuleiros
19	Ensaios para avaliação dos concretos moldados em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfegos de veículos
20	Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes
21	Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfálticas de elevado módulo
22	Avaliação da pesagem de veículos em movimento com cargas líquidas
23	Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária NovaDutra
24	Elaboração do projeto funcional da nova pista de subida da Serra das Araras e adequação do projeto funcional da pista ascendente existente em pista descendente
25	Capacitação da Equipe Técnica do CPR com os novos equipamentos adquiridos
26	Capacitação da equipe técnica – Método Superpave
27	Free Flow - Implantação de pontos com novo sistema automático de arrecadação para testes (1ª etapa)
28	Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados com cal hidratada
29	Revestimentos asfálticos sustentáveis: estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas
30	Estudos para incorporação de conceitos de sustentabilidade em passarelas ao longo da rodovia Presidente Dutra
31	Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados
32	Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas a partir de dois métodos de ensaio com diferentes tipos de asfalto
33	Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland – Desenvolvimento de método de dimensionamento e avaliação de processos construtivos

34	Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade
35	Materiais de Sinalização Horizontal: Avaliação do desempenho para elevados volumes de tráfego
36	Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e *flow number* de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas.
37	Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da BGTC
38	Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas
39	Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto. Etapa 1: Estudo Laboratorial
40	Modelo de Serviço de Telemedicina para atendimento emergencial em rodovia baseada em Centro de Apoio Referenciada para encaminhamentos
41	Treinamento e Capacitação Técnica em Pavimentação
42	*Ecodriving* BR – reduzindo custos e ampliando benefícios socioambientais na principal rodovia brasileira
43	Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto e cimento Portland, Construção e Monitoramento de um Trecho Experimental
44	Dosagem de Misturas Asfálticas com Energias Distintas no Compactador Giratório Superpave
45	Avaliação da Aderência entre Camadas Asfálticas
46	Avaliação do Emprego de Polímeros do tipo RET em Misturas Asfálticas
47	Emprego de Perfis de Fibras de Carbono na Recuperação de Placas de Concreto Fissuradas
48	Vídeo Registro dos Ensaios Realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias
49	Livro: Pesquisas desenvolvidas durante 20 anos do Centro de Pesquisas Rodoviárias

3.1.1. Elaboração de especificações particulares de serviço

A Concessionária da Rodovia Presidente Dutra, iniciou seus serviços de manutenção do pavimento no ano 1996. Durante as primeiras intervenções realizadas por empresas terceiras, contratadas pela Concessionária, observou-se que o mercado da construção e manutenção de pavimentos tinha desconhecimento de boas práticas para a dosagem e execução desses serviços. Assim, conclui-se já nos primeiros meses de atividades que havia a necessidade de criar especificações particulares de serviço, para as atividades listadas na continuação:

- Concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ);
- Micro-revestimento asfáltico à frio (MRAF);
- Micro-revestimento betuminoso à quente (MRBQ);
- Pré-misturado à quente tipo macadame (PMQM);
- Concreto Asfáltico à Quente tipo Stone Matrix Asphalt (SMA);
- Tratamento superficial duplo (TSD) e capa selante com asfalto modificado por polímero;

Para elaboração dessas especificações de serviço foi realizada a consulta de Manuais, Guias e Normas Nacionais e Internacionais, das quais valem destacar as seguintes:

- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER);
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- American Society for Testing and Materials (ASTM);
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO);

- International Slurry Surfacing Association (ISSA);
- British Standards (BS);

As especificações particulares redigidas pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra, buscavam otimizar os serviços dos terceiros. Assim, além de disponibilizar estes documentos às empresas executoras dos serviços no pavimento da Rodovia, realizaram-se treinamentos para conscientizar engenheiros, técnicos e auxiliares. Foi uma atividade precursora no meio, com objetivo de obter pavimentos mais duráveis, seguros e econômicos, para atender com maior qualidade o usuário da rodovia.

Basicamente, essas especificações foram organizadas para poder orientar as empresas em todas as atividades relacionadas à aplicação de materiais asfálticos. A estruturação utilizada foi a seguinte:

- Estabelecimento dos critérios, normas e ensaios para a seleção dos materiais minerais e dos ligantes asfálticos, constituintes das diversas misturas asfálticas, sejam usinadas à frio ou à quente.
- Definição dos equipamentos necessários para a produção e aplicação dessas misturas asfálticas.
- Aplicação do conceito de controle de qualidade em todas as atividades realizadas pela empresa terceirizada.
- Definição dos critérios de medição e pagamento.

A aplicação dessas especificações particulares foi no início um pouco difícil, já que algumas empresas não tinham incorporado dentro das suas atividades o conceito de controle de qualidade em cada uma das atividades realizadas. Assim, houve a necessidade de realizar treinamentos constantes e repetitivos, para conscientizar todos os atores responsáveis das obras. No entanto, essa conscientização foi ficando cada vez mais fácil, já que as empresas terceirizadas começaram a perceber que, com pequenas mudanças de hábitos nas atividades realizadas, obtiveram-se resultados satisfatórios do ponto de vista da qualidade.

Pode-se concluir que o investimento realizado neste estudo foi muito bem aplicado, já que os resultados foram satisfatórios para todos os participantes na execução de obras de manutenção no pavimento rodoviário, devido principalmente ao maior índice de aceitação dos serviços e à menor necessidade de retrabalhos, observados nos meses e anos seguintes.

Também concluiu-se que se obteve uma conscientização do meio da construção rodoviária, que atendia e atende à Rodovia Presidente Dutra e as especificações particulares de serviço facilitaram a disseminação das boas práticas para atividades com misturas asfálticas.

3.1.2. Treinamento e desenvolvimento de profissionais na área de pavimentação

Ao iniciar as atividades de manutenção do pavimento da Rodovia Presidente Dutra, o mercado rodoviário nacional apresentou diversas soluções possíveis. A adoção de novas tecnologias para aplicação de soluções inovadoras conduz a necessidade de garantir a qualidade das obras para obter os resultados previstos. Além disso, é necessário também acompanhar o desempenho a longo prazo das soluções adotadas. Para análise técnica das propostas e seu acompanhamento era necessário criar uma equipe técnica capacitada e com ferramentas adequadas. Assim, foi proposta a criação de um Centro de Pesquisas Rodoviárias para poder executar essas atividades.

Os objetivos do Centro de Pesquisas Rodoviárias foram estabelecidos para:

- Pesquisar novas tecnologias na área de pavimentação;
- Monitorar diversos trechos experimentais executados;
- Assegurar a qualidade dos serviços de pavimentação, através da coleta de amostras, aleatoriamente, nas diferentes frentes de trabalho;
- Treinar engenheiros e técnicos das empresas terceirizadas contratadas, para aumentar o padrão de qualidade das obras de pavimentação.
- Acompanhar o desenvolvimento técnico na área de pavimentação, através de congressos e troca de experiências com diversos consultores e agências de pesquisas internacionais;
- Atualização de métodos de ensaio, especificações, publicações de interesse.

Uma das atividades iniciais do Centro de Pesquisas Rodoviárias foi desenvolver treinamentos para os técnicos das empresas contratadas para execução dos serviços de pavimentação. Nas primeiras obras, notou-se baixo desempenho e até conhecimento das atividades que deveriam ser realizadas pelos técnicos e auxiliares. Assim, identificou-se a necessidade de desenvolver palestras de instrução para a operação adequada dos equipamentos associados à pavimentação de rodovias. A seguir são listadas as palestras realizadas com uma breve descrição dos tópicos abordados.

- *Curso de dosagem de misturas asfálticas*

Este curso teve por objetivo desenvolver um treinamento relacionado aos ensaios e procedimentos necessários para realizar a dosagem completa de uma dosagem de misturas asfálticas usinadas à quente.

Foi realizada toda a abordagem referente aos estudos nos agregados minerais, introduzindo os conceitos de absorção de asfalto em agregados com elevada absorção de água. Posteriormente

foram descritos os ensaios relacionados à caracterização de ligantes asfálticos e à compactação da mistura asfáltica com equipamento Marshall.

- *Curso de operações de caminhões*

Neste curso foi realizado um treinamento padrão por meio de cartilhas para serem distribuídas aos motoristas dos caminhões que fazem o transporte das misturas asfálticas desde as usinas de asfalto até os locais das obras. É importante utilizar este curso continuamente, já que os motoristas nem sempre estão conscientes da importância do trabalho deles na cadeia produtiva de um pavimento asfáltico, devido à rotatividade destes colaboradores nas empresas terceirizadas.

No curso foram abordados os temas de controle de qualidade e segurança durante as operações realizadas dentro das usinas de asfalto relacionadas ao carregamento, no trajeto e na região da obra de pavimentação asfáltica, onde é realizado o descarregamento da mistura asfáltica na vibro acabadora.

- *Curso de operações da acabadora com qualidade*

Desde o início das atividades da Concessionária da Rodovia Presidente Dutra, considerou-se a qualidade como um esforço conjunto com as empresas terceirizadas. Um dos aspectos mais importantes durante os serviços com misturas asfálticas é o seu espalhamento adequado. Assim, neste curso realizou-se uma abordagem sobre as atividades que devem ter atenção adequada e que são descritas suscintamente na continuação:

  - Condições do greide existente: relacionado à verificação da necessidade de regularizar áreas com reparos, as transições e superelevações e se existe subleito com suporte adequado.
  - Configuração da acabadora: relacionado à largura da acabadora, uso de extensões da mesa, emprego de extensões do sem-fim e aplicação de extensões do túnel do sem-fim.
  - Automação: verificação do emprego e comprimento dos skis, uso de linhas fixas ou aplicação de sapatas de juntas.
  - Descarga da massa na acabadora: item que demanda de especial cuidado e compatibilidade com a capacidade da usina de asfalto, a distância de transporte, as condições de tráfego, a quantidade de caminhões basculantes e o tipo de caminhões.
  - Especificações da obra: verificação da localização de juntas longitudinais e transversais, especificações com relação ao coeficiente de irregularidade, uniformidade na textura e na aparência.

Por intermédio da identificação dos parâmetros listados anteriormente, a empresa terceirizada pode efetivamente planejar cada fase do trabalho para atingir o balanço ideal entre alto índice de produtividade, operações econômicas, máxima remuneração e alta qualidade do pavimento.

- *Curso de operação de rolos com qualidade*

Este treinamento teve como foco o processo de compactação visando assegurar as melhores condições disponíveis de operação dos rolos para garantir acabamento e densidade dentro dos padrões especificados. Para o treinamento elaborou-se um documento com as descrições dos fatores chaves envolvidos na execução da camada de revestimento de alta qualidade, desempenada e que atenda às densidades específicas.

Constatou-se durante o treinamento a importância de obter rolagem correta, para garantir uma melhor durabilidade do pavimento de CBUQ. Os participantes foram lembrados de que focar no processo de compactação também significa que as melhores condições possíveis estão disponíveis para a equipe atender às especificações. Isso inclui gerenciamento tanto na produção da usina como nos caminhões de transporte para que a acabadora possa rodar continuamente para executar uma camada de massa uniforme para ser compactada.

No treinamento foram considerados os fatores de seleção de equipamento para cada tipo de mistura asfáltica, além de sua adequada, inspeção, manutenção e operação. Temas relacionados ao controle dos custos também tiveram um amplo escopo no material de treinamento.

Finalmente trataram-se os fatores que influenciam no procedimento de compactação, tais como os materiais, espessuras de trabalho e condições climáticas no dia da compactação. Além disso foi dada ênfase ao emprego de trechos experimentais no início das obras e quando acontecerem mudanças de materiais.

3.1.3. Avaliação da utilização da cal hidratada para combater susceptibilidade de misturas betuminosas à ação da água e melhorar a adesividade do ligante ao agregado

A cal hidratada é um aditivo bastante utilizado na composição de misturas asfálticas. Seu uso e os benefícios decorrentes são bem referenciados há muitas décadas, mas adquiriu especial atenção a partir da década de 1970 nos Estados Unidos, como consequência da redução da qualidade dos ligantes asfálticos, por sua vez, devido à crise do petróleo de 1973. Nessa década foi notório o incremento de defeitos em pavimentos asfálticos, atribuídos à falta de aderência do ligante asfáltico nos agregados. A cal hidratada foi considerada o aditivo mais eficaz para reverter essas

deficiências e hoje em dia muitos países e agências rodoviárias recomendam seu emprego para essa finalidade.

Na atualidade uma porcentagem considerável das misturas asfálticas produzidas nos Estados Unidos utiliza a cal hidratada, já que a experiência de mais de 40 anos demonstrou que a cal hidratada não é somente um aditivo melhorador de adesividade (EULA, 2011). Pesquisas de laboratório e de campo indicam que a cal hidratada também reduz a taxa de envelhecimento de ligante asfáltico, incrementando a durabilidade e a resistência à fadiga dos revestimentos asfálticos.

A cal hidratada atua de duas formas para melhorar a adesividade do ligante asfáltico nos agregados minerais. Por um lado, este aditivo modifica as propriedades de superfície dos agregados, mudando sua composição e rugosidade para promover a adesão do ligante asfáltico. Por outro lado, a cal hidratada reage quimicamente com ácidos do ligante asfáltico, reduzindo a taxa de envelhecimento e neutralizando os agentes promotores de má adesividade.

Nesta pesquisa foi utilizado o procedimento da AASHTO T283, para prever a susceptibilidade ao descolamento de película de asfalto em longo prazo e para avaliar aditivos melhoradores de adesividade.

Nesta metodologia corpos de prova cilíndricos de aproximadamente 6cm de altura e 10cm de diâmetro são compactados no Marshall com 75 golpes por face. Após compactação, três corpos de prova são saturados até preencher 70% a 80% dos vazios com água, e são condicionados durante 18horas na temperatura de -18°C e após esse período, mais 24horas no banho Maria a 60°C. Imediatamente os CPs são resfriados até temperatura constante de 25°C para execução do ensaio de compressão diametral e obtenção do parâmetro de Resistência à Tração por compressão diametral (RT). Também são empregados três corpos de prova sem esse condicionamento para efeitos comparativos. Na Figuras 3.1 e 3.2 apresenta-se um fluxograma que ilustra a execução desse ensaio.

Figura 3.1. Fluxograma da execução do ensaio de dano por umidade induzida em misturas asfálticas, primeira parte

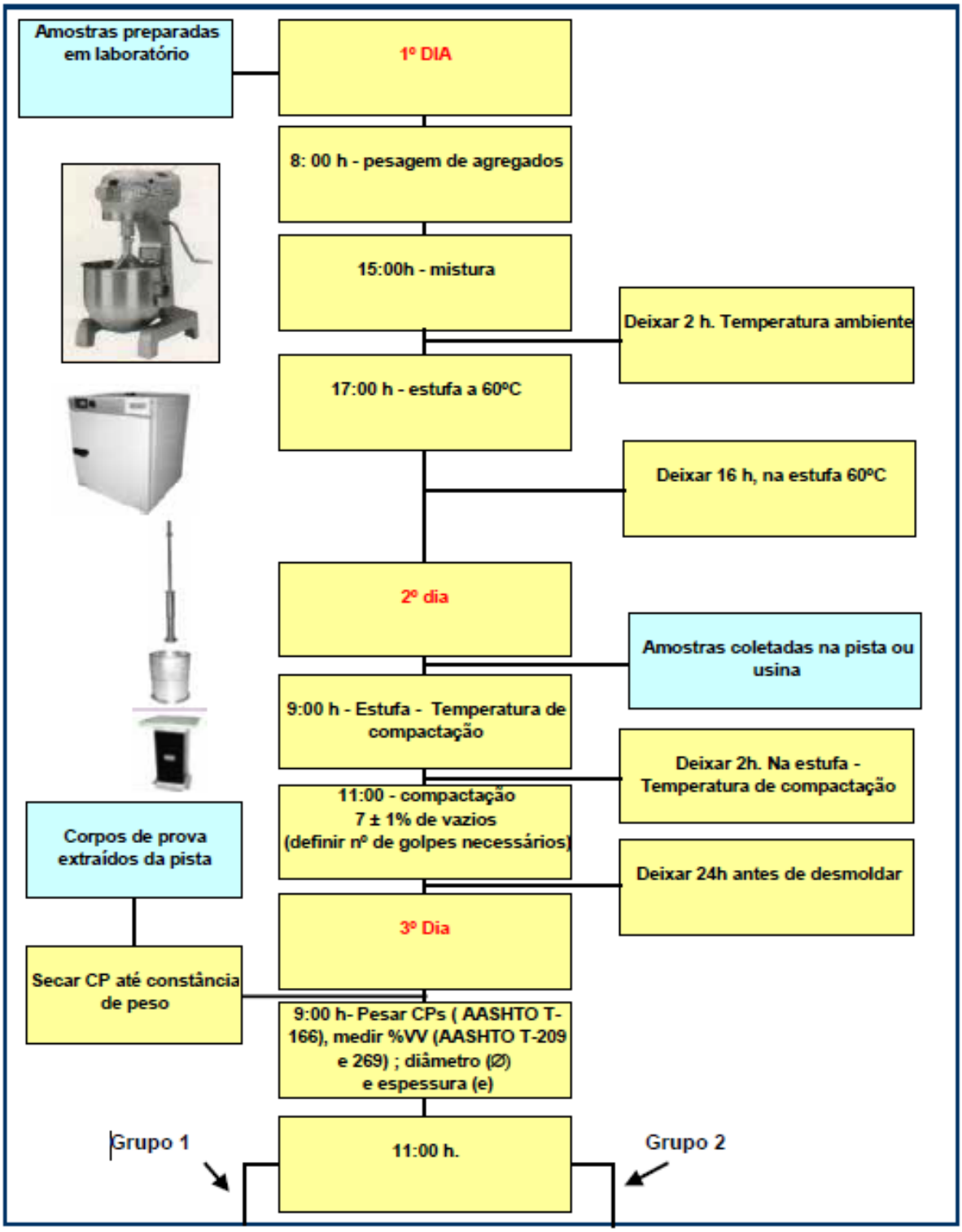
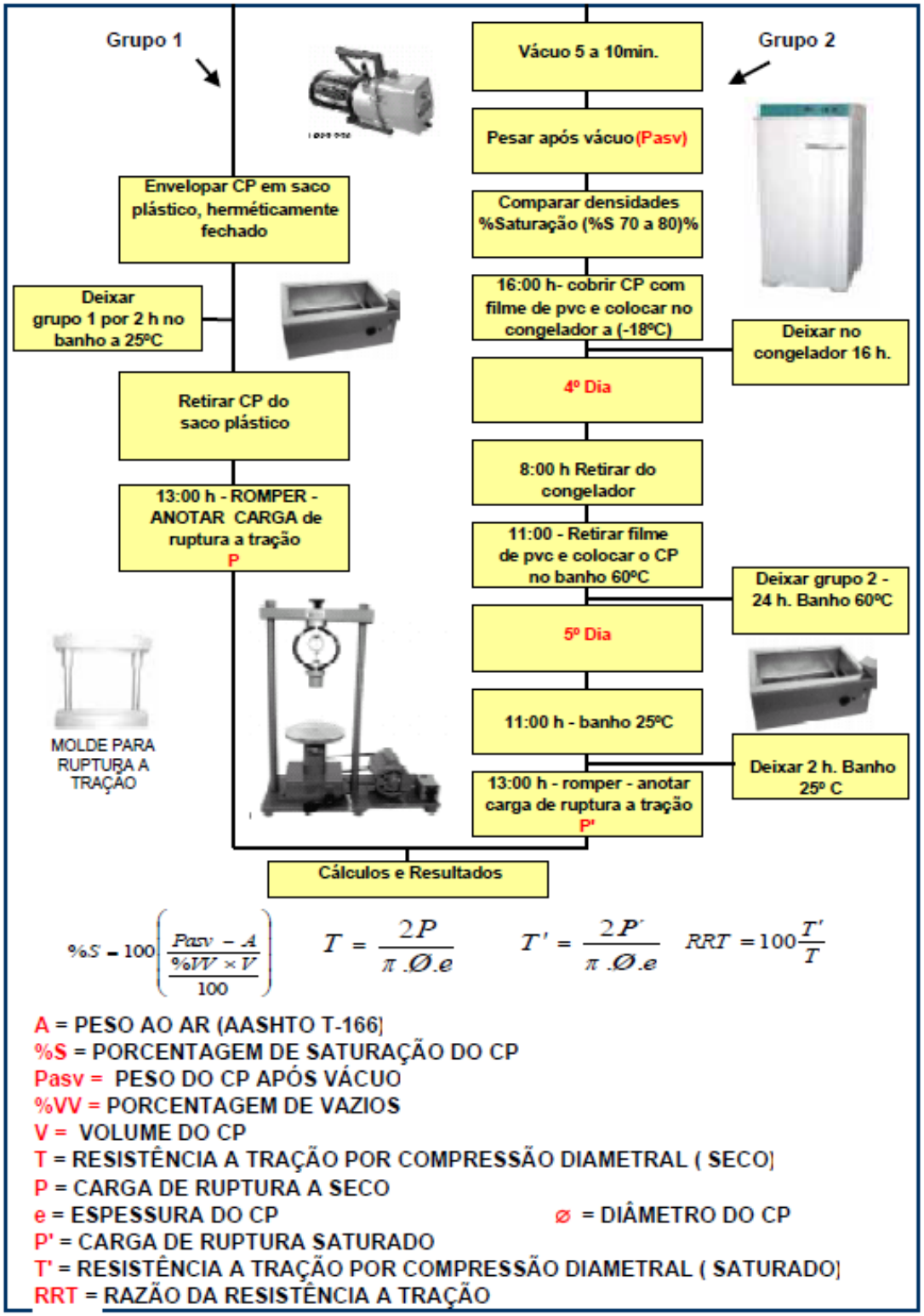


Figura 3.2. Fluxograma da execução do ensaio de dano por umidade induzida em misturas asfálticas, primeira parte

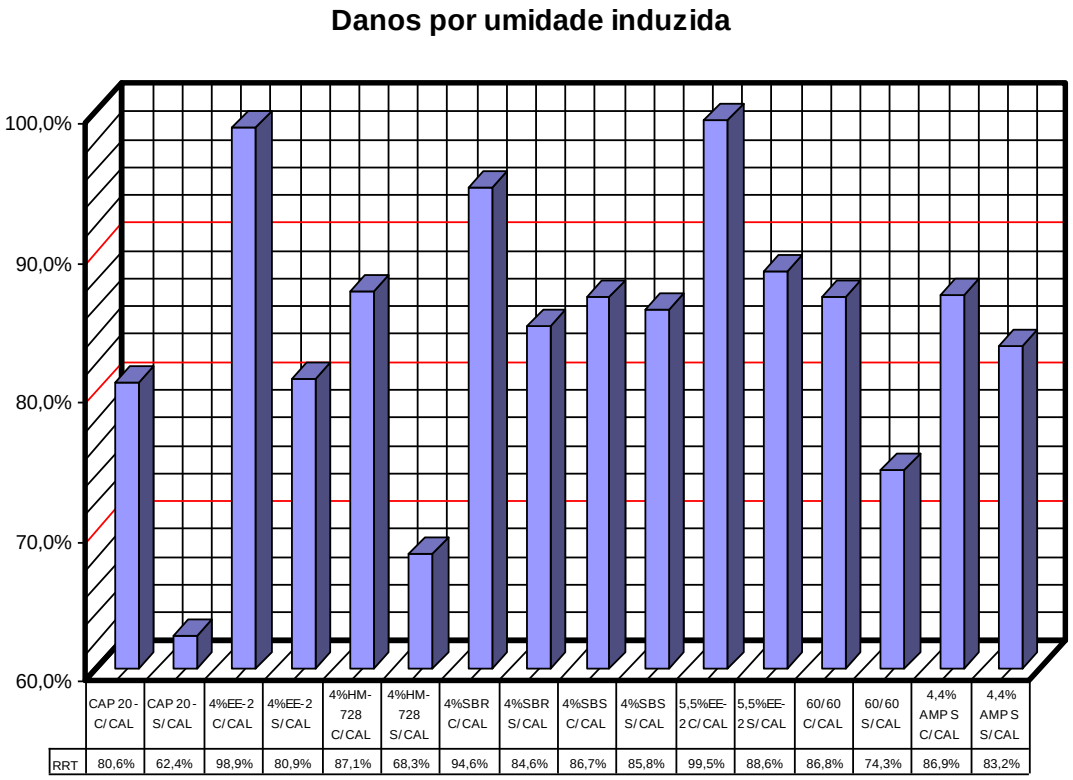


Os corpos de prova condicionados devem apresentar resistência retida à tração (RRT) de no mínimo 70% de acordo com a norma do DNIT 031/2006-ES, com relação aos CPs não condicionados. Vale salientar que a norma DNIT 031/2006 – ES, especifica no mínimo valores de 0,65MPa para concreto asfáltico convencional.

Nesta pesquisa o objetivo foi verificar os benefícios trazidos pelos diferentes tipos de polímeros (SBS, SBR, EVA) disponíveis na época com relação ao Dano por Umidade Induzida. Esta avaliação foi realizada para a granulometria do micro revestimento asfáltico usinado à quente. Todas as misturas avaliadas utilizaram a mesma fonte de agregados e o mesmo teor de ligante asfáltico

A Figuras 3.3 mostra os resultados obtidos para as misturas que foram ensaiadas e nota-se claramente que os valores de relação de resistência à tração (RRT) são inferiores a 75% quando as misturas asfálticas não fizeram o uso de cal hidratada.

Figura 3.3. Resultados da relação de resistência à tração nas misturas asfálticas com distintos ligantes asfálticos e teores



Na Figura 3.4 também se apresentam imagens de corpos de prova condicionados sem a adição (a) e com a incorporação de 1,5% de cal hidratada (b), após ruptura por compressão diametral. Nota-se os corpos de prova sem adição de cal apresentam descolamento do ligante asfáltico dos agregados minerais mais graúdos, constatando a má adesividade dos agregados utilizados neste estudo. Já a imagem dos corpos de prova com a adição de cal hidratada indica que não houve um comportamento similar na ruptura, e que o ligante asfáltico manteve-se aderido aos agregados minerais mais graúdos.

Figura 3.4. Aparência dos corpos de prova condicionados após ruptura por compressão diametral



a) Mistura asfáltica sem adição de cal hidratada b) Mistura asfáltica com adição de cal hidratada

Os resultados desta pesquisa indicaram que a adição da cal hidratada nas misturas asfálticas melhora suas características de adesividade. O teor de 1,5% de cal hidratada, utilizado neste estudo, mostrou-se adequado para alcançar resultados satisfatórios que atendam aos parâmetros mínimos de qualidade. Considerou-se que teores inferiores podem não ser adequadamente homogeneizados nas usinas de produção de misturas asfálticas.

A experiência no Grupo CCR, tanto em obras de conservação como na construção de novos pavimentos, indica excelentes resultados quanto à durabilidade e resistência à ação deletéria da água nas misturas asfálticas que fizeram uso da cal hidratada na sua composição.

3.1.4. Avaliação de danos por umidade induzida, módulo de resiliência e fadiga em misturas confeccionadas com diversos polímeros

Esta pesquisa foi desenvolvida em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-PTR-EPUSP), com o objetivo de avaliar a durabilidade de misturas asfálticas quando submetidas à ação da água. As misturas asfálticas utilizadas foram características da região da divisa entre o Estado de São Paulo e o Estado do Rio de Janeiro, onde na época, haviam problemas recorrentes associados à adesividade.

Para desenvolvimento desse estudo foi realizado um planejamento laboratorial para a execução de ensaios com diferentes tipos de ligantes asfálticos, conteúdos de cal e melhoradores de adesividade adicionados ao ligante asfáltico, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Planejamento laboratorial das misturas asfálticas avaliadas neste estudo

Serie	Ligante Asfáltico	Melhorador de Adesividade	Teor do Melhorador de Adesividade (%)
1	CAP-20	Cal Hidratada	1.00
1	CAP-20	Dope	0.25
2	CAP Polímero SBS	Cal Hidratada	1.00
2	CAP Polímero SBS	Dope	0.25
3	CAP Polímero SBR	Cal Hidratada	1.00
3	CAP Polímero SBR	Dope	0.25
4	CAP Polímero EVA	Cal Hidratada	1.00
4	CAP Polímero EVA	Dope	0.25

Os ensaios realizados pelo LTP da EP-USP, nas misturas asfálticas produzidas conforme a Tabela 2.1, são apresentados a seguir:

- *Deformação permanente em trilhas de roda em equipamento tipo LCPC* para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- *Módulo de Resiliência* de corpos de prova extraídos (broqueados) de placas compactadas em mesa compactadora tipo LPC com aproximadamente 4% de vazios para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- *Resistência à tração por compressão diametral* de corpos de prova extraídos (broqueados) de placas compactadas em mesa compactadora tipo LPC com aproximadamente 4% de vazios para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- *Módulo de Resiliência* de corpos de prova compactados no Marshall com aproximadamente 4% de vazios para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias)
- *Resistência à tração por compressão diametral* de corpos de prova compactados no Marshall com aproximadamente 4% de vazios para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- *Resistência ao desgaste no ensaio Cantabro* de corpos de prova extraídos (broqueados) de placas compactadas em mesa compactadora tipo LPC com aproximadamente 4% de vazios para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (condicionamento AASHTO T-283).
- *Resistência ao desgaste no ensaio Cantabro* de corpos de prova extraídos (broqueados) de placas compactadas em mesa compactadora tipo LPC e ensaiadas em simulador de tráfego para deformação permanente em trilha de rodas com

aproximadamente 4% de vazios para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60oC por 4 dias).

- *Resistência à tração por compressão diametral* de corpos de prova compactados no Marshall com aproximadamente 8% de vazios para todas as séries sem condicionamento e com condicionamento (condicionamento AASHTO T-283).

3.1.4.1.Materiais utilizados na pesquisa

Na Figura 3.5 apresenta-se a faixa granulométrica e a granulometria obtida para a moldagem das misturas asfálticas neste estudo. Já na Tabela 3.2 apresentam-se as características dos ligantes asfálticos utilizados para composição dessas misturas asfálticas.

Figura 3.5. Faixa granulométrica e granulometria obtida para a composição dos corpos de prova

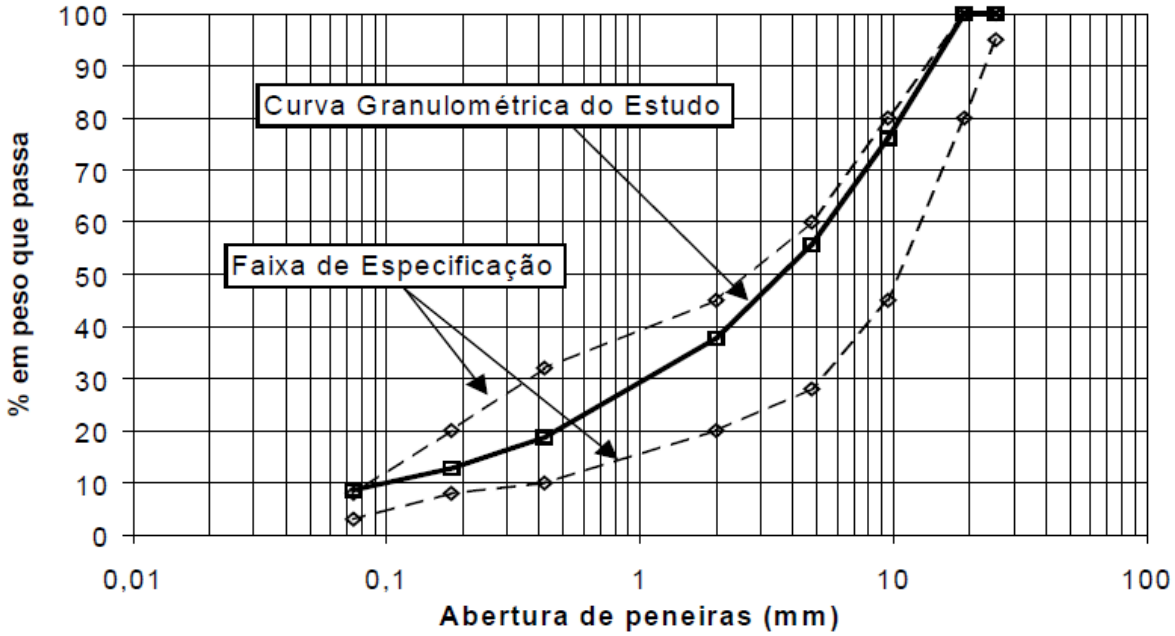


Tabela 3.2. Características dos ligantes asfálticos utilizados no estudo

Característica	CAP 20	CAP Polímero SBS	CAP Polímero SBR	CAP Polímero EVA
Ponto de Amolecimento (°C)	-	75	58	64
Penetração (cmm)	53	52	52	50
Ductilidade (cm)	>20	>100	91	27
Viscosidade Saybolt Furol 135°C (s)	191.9	-	468	254
Viscosidade absoluta 135°C (Cst)	-	1177	-	-
Recuperação elásltica a 25°C (%)	-	90.9	78	50

3.1.4.2.Resultados do ensaio de deformação permanente

Os resultados de deformação permanente de todas as misturas, de uma maneira geral, mostraram-se bastante satisfatórios. A norma francesa estabelece a porcentagem aceitável de deformação

permanente de até 10% em 30.000 ciclos, sendo que esta condição correlaciona-se com camada de rolamento de até 5,0cm de espessura para tráfego pesado.

Nas Figuras 2.6 e 2.7 apresentam-se os resultados de deformação permanente para as amostras condicionadas a seco e condicionadas em água com temperatura de 60°C durante 96 horas, respectivamente. Nota-se, ao comparar ambas figuras que, tal condicionamento teve pouca ou nenhuma influência nos valores de deformação permanente.

Figura 3.6. Deformação Permanente na trilha de roda a seco (sem condicionamento) após 30.000

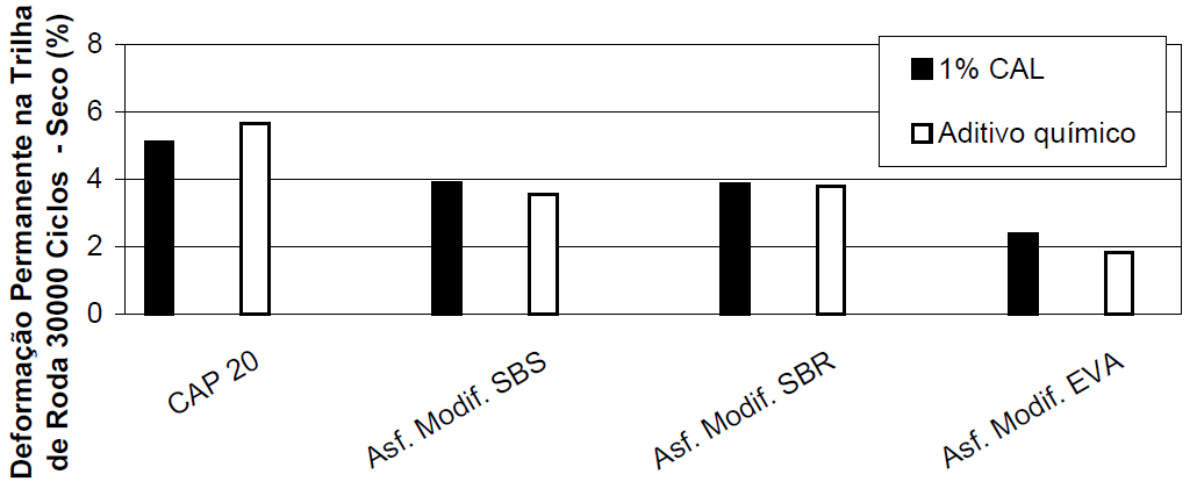
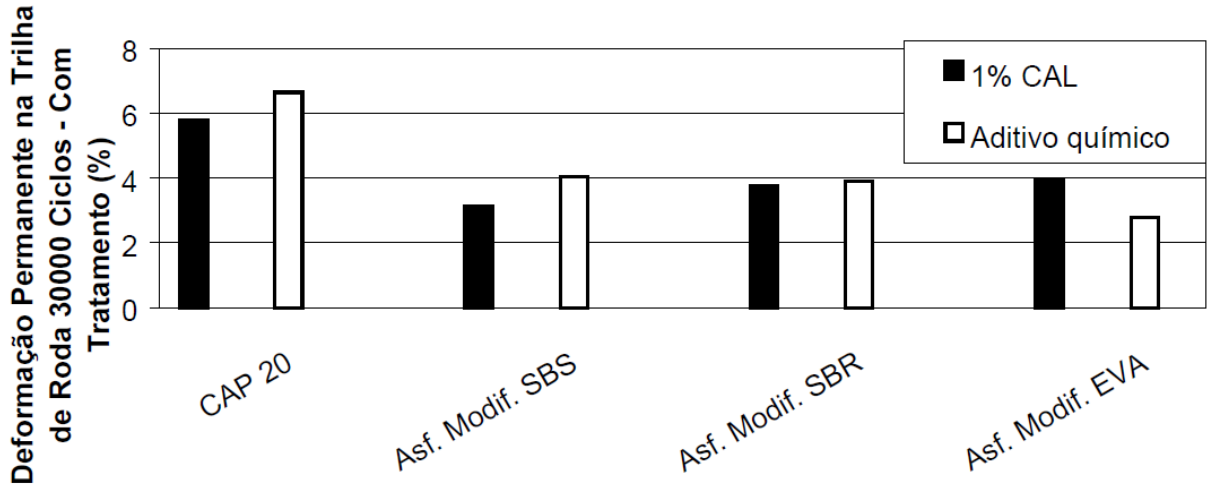


Figura 3.7. Deformação Permanente na trilha de roda com condicionamento prévio das placas



À luz desses resultados concluiu-se que condicionamento por imersão durante 96 horas com temperatura de 60°C não foi suficiente para alterar a adesividade nas misturas asfálticas. Talvez algum enrijecimento superficial possa ter ocorrido, devido ao envelhecimento do ligante, mas nada que pudesse alterar significativamente os valores de deformação permanente. A porcentagem de vazios na mistura está em torno de 4%, o que dificulta a entrada da água nas placas. Portanto, o efeito da água foi somente superficial.

3.1.4.3.Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado em corpos de prova extraídos das placas moldadas na mesa compactadora tipo LCPC e em CPs moldados no compactador Marshall, com e sem condicionamento. Nas Figuras 3.8 e 3.9 apresentam-se os resultados desse ensaio e observa-se que os ligantes asfálticos modificados com EVA e SBS apresentaram valores de resistência à tração na ordem de 0,8 a 1,0 MPa, tanto para CPs com cal como aditivo químico (dope), como melhoradores, e também com ou sem condicionamento. Nos casos em que foi utilizado o asfalto modificado com SBR, obtiveram-se valores de RT de 0,6 até 0,8MPa, e com CAP-20 esse parâmetro variou de 0,8 até 1,3MPa, sendo que os maiores valores foram obtidos para corpos de prova extraídos de placas. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram os resultados desse ensaio na compactação Marshall com ou sem condicionamento.

Figura 3.8. Resistência à tração de CPs moldados em placas e extraídos por broqueamento, sem condicionamento prévio

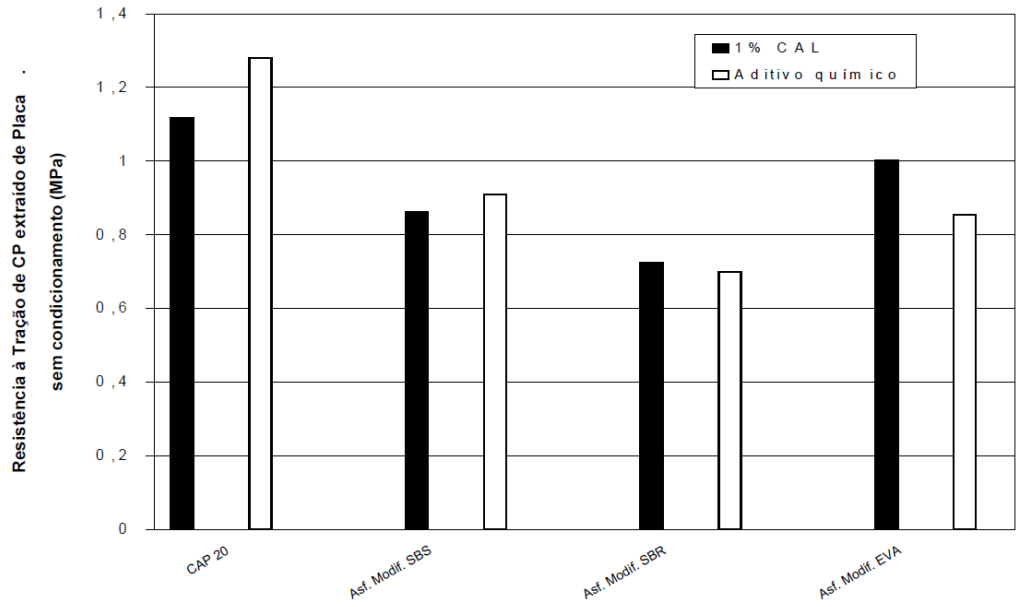


Figura 3.9. Resistência à tração de CPs moldados em placas e extraídos por broqueamento, com condicionamento prévio constituído por imersão em água a 60°C por 96 horas

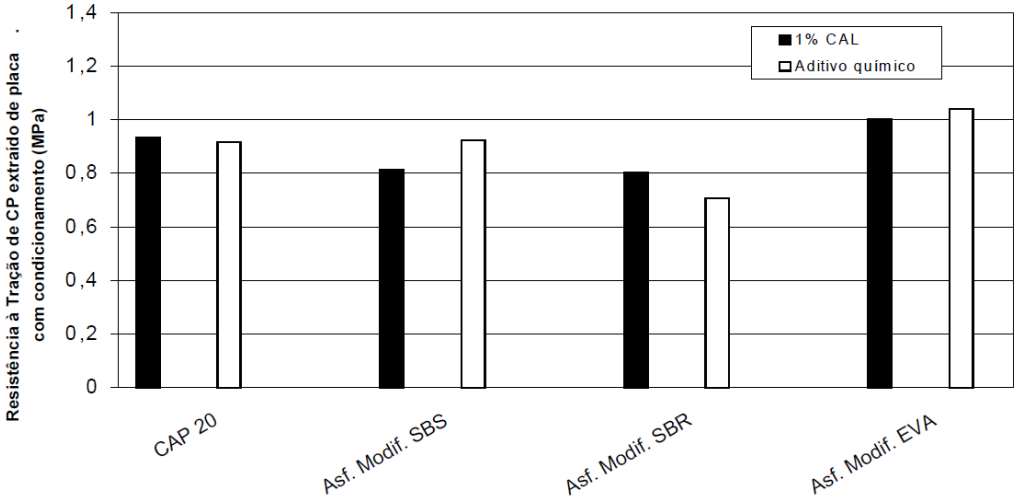


Figura 3.10. Resistência à tração de CPs moldados com o compactador Marshall, sem condicionamento prévio

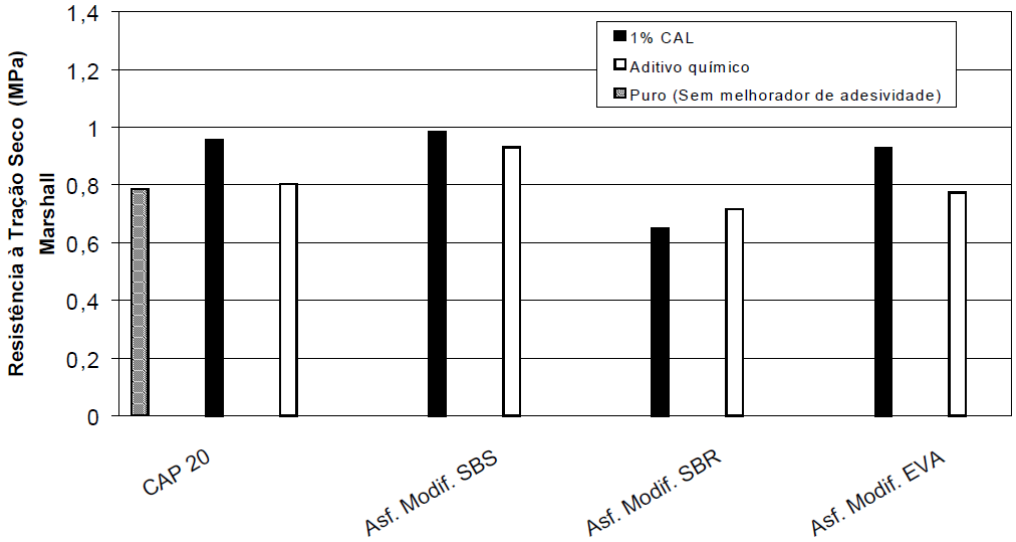
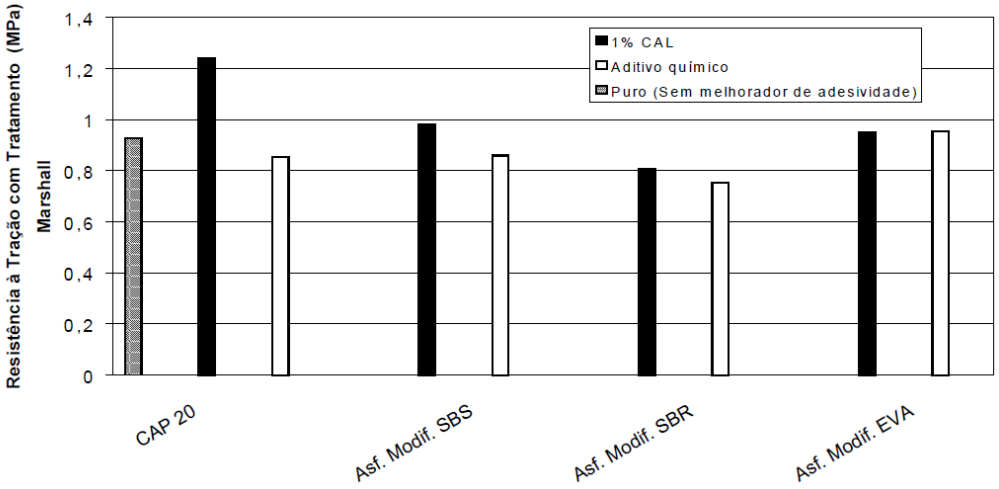


Figura 3.11. Resistência à tração de CPs moldados com o compactador Marshall, com condicionamento prévio constituído por imersão em água a 60°C por 96 horas



Considerando os valores de RT obtidos em CPs extraídos de placas, pode-se observar que não há praticamente perdas em presença de águas, constatadas neste ensaio, principalmente para os asfaltos modificados. O CAP-20, apresenta uma perda de RT de 20 a 30%, comparada com a RT de CPs sem condicionamento prévio. Notou-se que por meio do condicionamento aplicado em CPs com ligantes asfálticos modificados para o ensaio de RT não foi possível detectar problemas de adesividade ligante/agregado.

3.1.4.4.Resultados do ensaio de módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados na temperatura de 25°C na frequência de 1Hz, sendo 0,1s o tempo de aplicação da carga e 0,9s o tempo de repouso entre as aplicações, de acordo com a então norma DNER-ME 133/94. Os ensaios foram efetivamente realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV-UFRGS). Na Figura 3.12 apresenta-se o equipamento utilizado nesse laboratório.

Figura 3.12. Equipamento para o ensaio de MR na LAPAV-UFRGS



Os valores de MR foram realizados tanto em CPs moldados no compactador Marshall como em CPs obtidos de placas e estes, por sua vez, foram divididos em dois grupos, a saber:

- Sem condicionamento;
- Com condicionamento por imersão em água à temperatura de 60°C, durante 96 horas.

Nas Figuras 3.13 e 3.14 apresentam-se os resultados de MR sem e com condicionamento prévio, para CPs obtidos da extração de placas e para CPs moldados no Marshall, respectivamente.

Figura 3.13. Resistência à tração de CPs moldados com o compactador Marshall, sem condicionamento prévio

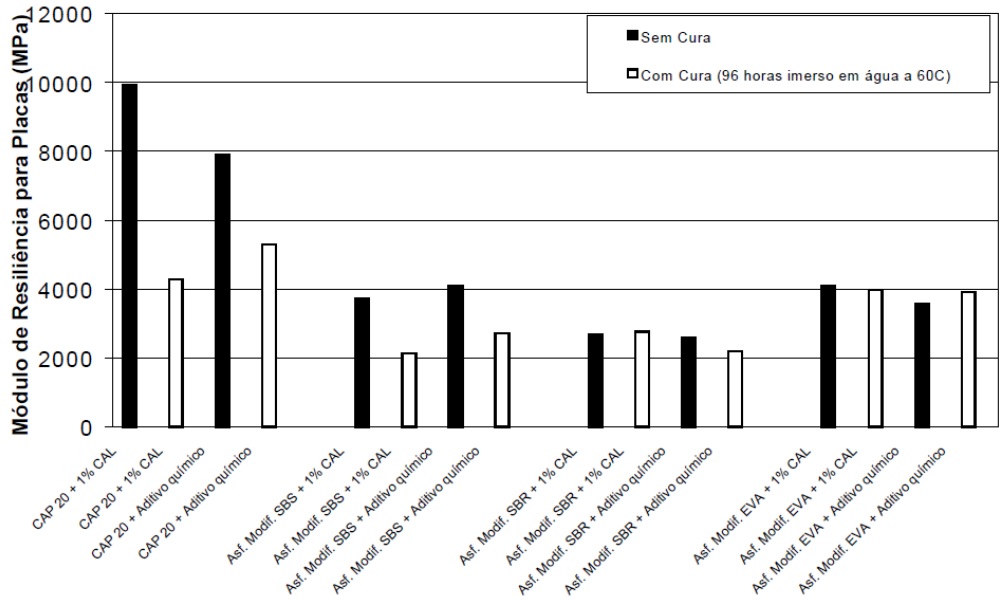
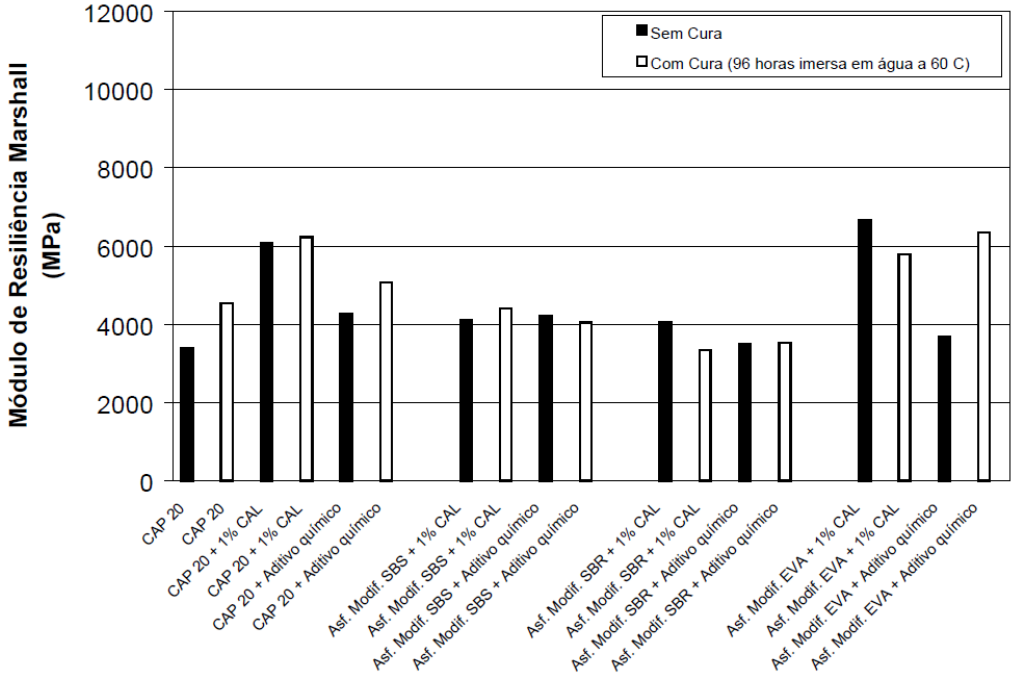


Figura 3.14. Resistência à tração de CPs moldados com o compactador Marshall, com condicionamento prévio constituído por imersão em água a 60°C por 96 horas



Tem-se utilizado como recurso para estudo de problemas de adesividade as relações entre propriedades obtidas sem condicionamento prévio e com condicionamento. Estas relações procuraram detectar o efeito da água e da temperatura principalmente na queda de resistência, consequente da desagregação ou do desprendimento do ligante da parede do agregado.

A seguir são apresentadas essas relações obtidas para os corpos de prova extraídos de placas – Figura 3.15, e para os corpos de prova moldados por impacto no Marshall – Figura 3.16.

Figura 3.15. Relação entre o módulo de resiliência obtido com condicionamento prévio ao ensaio constituído de 96 horas de imersão em água a 60°C e o módulo de resiliência obtido sem condicionamento prévio – Corpos de prova extraídos de placas

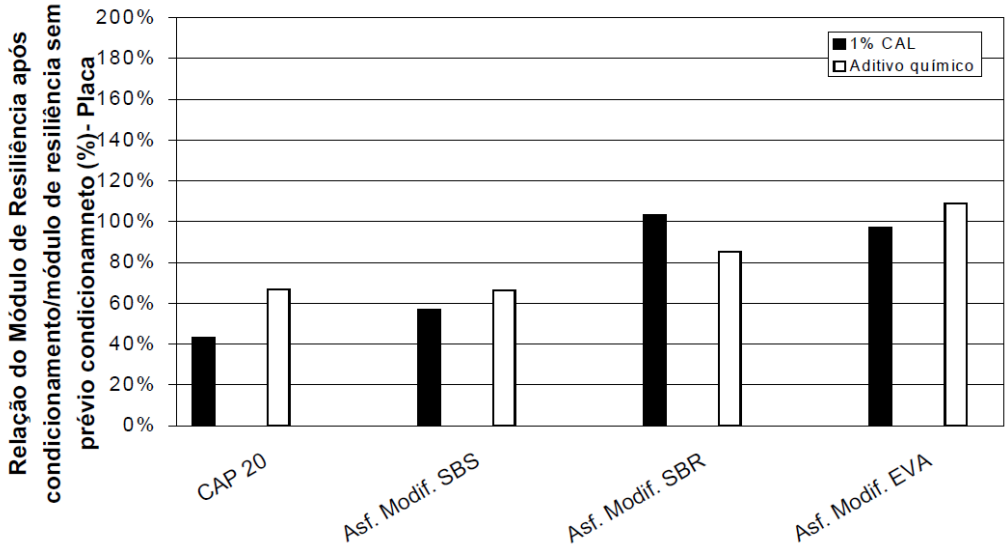
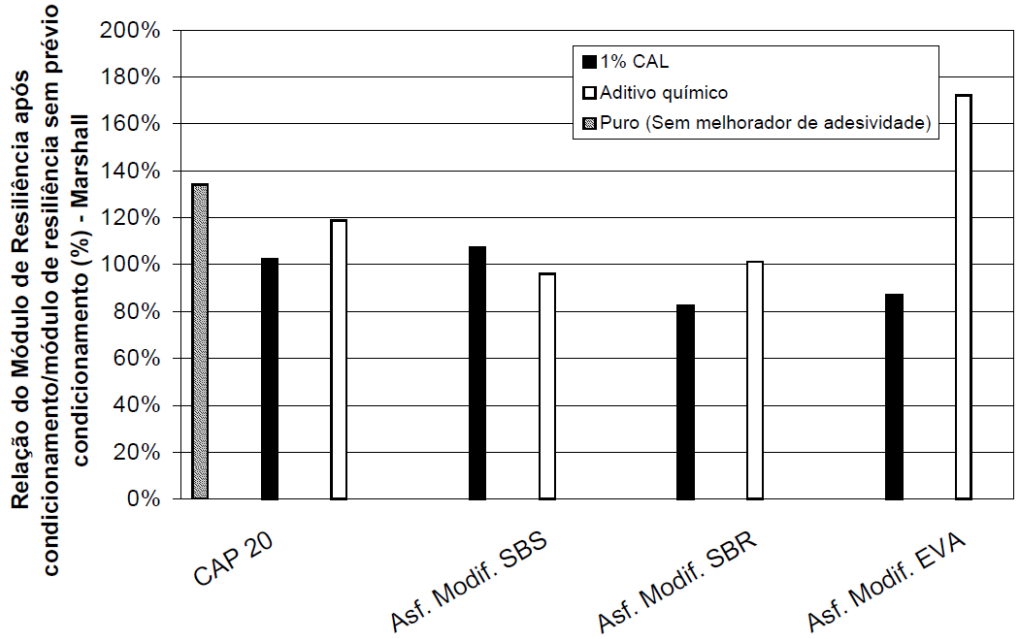


Figura 3.16. Relação entre o módulo de resiliência obtido com condicionamento prévio ao ensaio constituído de 96 horas de imersão em água a 60°C e o módulo de resiliência obtido sem condicionamento prévio – Corpos de prova moldados no Marshall



Os valores de módulo de resiliência obtidos para o ligante CAP-20, tanto com uso de aditivo químico como o uso da CAL, como melhoradores de adesividade ligante/agregado, mostraram-se bastante elevados para corpos de prova extraídos de placas quando não submetidos previamente ao condicionamento. Os valores de módulo de resiliência de corpos de prova extraídos de placas dosadas com CAP-20 e submetidos previamente ao condicionamento – 96 horas de imersão em água à temperatura de 60°C – apresentaram valores inferiores. Isso demonstra que o CAP-20 dosado com aditivo químico ou CAL mostrou-se bastante sensível ao condicionamento.

A perda no valor de módulo de resiliência, para o ligante CAP-20, quando submetido previamente ao condicionamento foi da ordem de 60% para misturas dosadas com CAL e de 35% para misturas dosadas com aditivo químico. Isso demonstra que o aditivo químico, como melhorador de adesividade, ligante/agregado, trabalhou melhor.

Com os demais ligantes modificados com SBR, SBS e EVA, os resultados de módulo de resiliência sem condicionamento não foram tão elevados se comparados com o valor de módulo de resiliência do CAP-20, mostrando a flexibilidade e retorno elástico melhor conferido às misturas asfálticas pelos ligantes modificados. Quando submetidos previamente ao condicionamento os valores se mantiveram, exceto para o ligante modificado por SBS, que apresentou um módulo de resiliência mais baixo.

Os valores de módulo de resiliência exprimem uma ordem de grandeza da rigidez do material (expresso em MPa ou kgf/cm2), quando submetidos ao ensaio cíclico não destrutivo. Afirmar que, quanto maior o valor de módulo de resiliência, melhor a mistura betuminosa e essas misturas betuminosas em campo possam vir a ter bom desempenho, pode não ser verdadeiro.

As camadas de rolamento constituídas por misturas asfálticas devem possuir mobilidade suficiente para suportar a flexibilidade exigida, compatível com toda a estrutura e magnitude das cargas. Misturas betuminosas com valores de módulo de resiliência elevados, portanto bastante rígidas, podem vir a desenvolver rapidamente trincamento por fadiga se a espessura e compatibilização estrutural não suportarem as amplitudes dos deslocamentos impostos. As misturas betuminosas, como utilizadas no Brasil em pavimentos flexíveis na maior parte das rodovias, devem possuir flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego, caracterizando-as como não tão rígidas.

3.1.4.5.Resultados do ensaio de dano por umidade induzida

O ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI), realizado de acordo com a AASHTO – T283/89, consiste em determinar a resistência à tração de corpos de prova de misturas asfálticas, moldadas no equipamento Marshall com poucos golpes de maneira a obter corpos de prova com 7% + 1% de volume de vazios, submetidos a uma saturação de 55% à 80% de seus volumes de vazios de ar com água. Resfria-se o corpo de prova a uma temperatura de –18°C por um período de 16 horas; os corpos de prova saturados, após este período, imediatamente devem ser colocados em banho-maria à 60°C por mais 24 horas; depois deste período os corpos de provas são removidos e colocados em outro banho-maria à 25°C por mais duas horas.

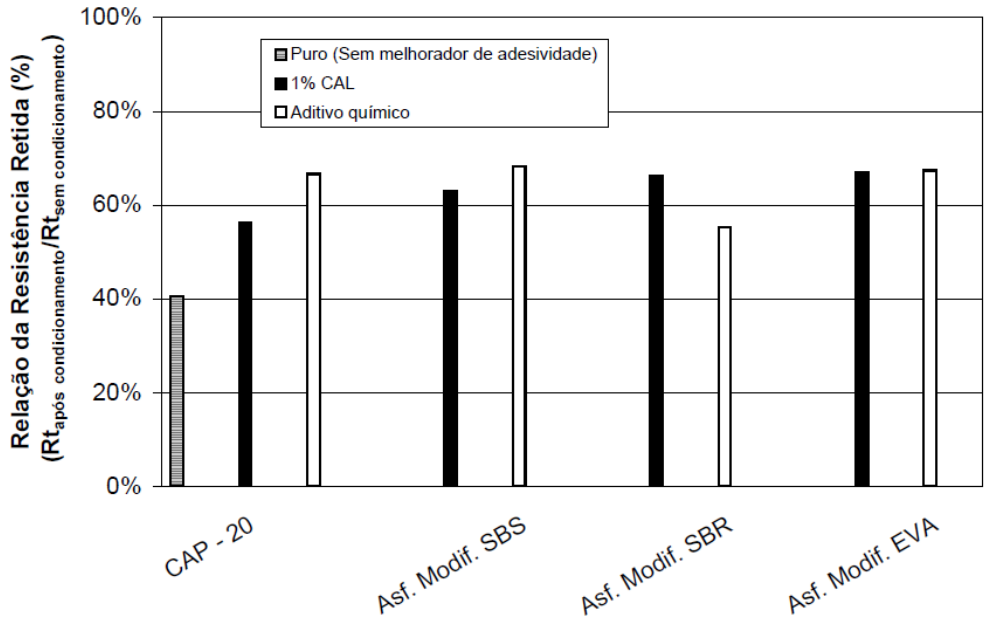
Para saturação dos corpos de prova em 55% a 80% dos volumes de vazios com água, foi necessário utilizar uma bomba de vácuo e um dessecador, cuja montagem pode ser vista na Figura 3.17.

Figura 3.17. Equipamento de saturação dos corpos de prova de mistura asfáltica: dentro do dessecador (à esquerda) os corpos de prova se encontram imersos em água a 25oC e o vácuo aplicado pela bomba (à direita) é utilizado para provocar a entrada de água nos corpos



Os resultados desses ensaios, realizados na mistura asfáltica sem melhorador de adesividade, com cal e com aditivo químico são apresentados na Figura 3.18. Observa-se que para o CAP-20 sem nenhume agente melhorador de adesividade, as perdas ocasionadas pelo condicionamento foram de aproximadamente 60%, e a adição de cal e o aditivo químico reduzira essa penda, incrementando o valor da relação da resistência à tração retida (RTR).

Figura 3.18. Valores de resistência à tração retida de corpos de prova obtidos pela normativa AASHTO T-283



As misturas asfálticas moldadas com os ligantes asfálticos modificados de SBR e EVA, a apresentaram perdas de resistência à tração na ordem de 30% a 40%. Notou-se que as condições impostas neste condicionamento são bastante severas, o que permite prever em laboratório, as

ocorrências em pista com a mistura asfáltica em estudo, face à adesividade ligante/agregado, ao longo da vida útil da camada rolante do pavimento.

A relação da resistência retida das misturas asfálticas dosadas com ligantes modificados e com CAP-20 com cal e com aditivo químico apresentaram valor de relação de resistência retida da ordem de 60 a 70%. O valor de 70% é considerado como sendo o limite inferior recomendável para misturas asfálticas com bons desempenho de campo.

Assim, conclui-se que a mistura estudada com CAP-20, sem melhoradores de adesividade não deve ser utilizada. Já as misturas com melhoradores de adesividade estudadas, seja com CAP-20 como com os ligantes modificados com polímeros, mostram-se com comportamento quanto à adesividade ligante/agregado melhor que o CAP-20 puro, porém não atingem valores de relação resistência retida considerados bons. Ou seja, seria recomendável nesses casos um aumento da porcentagem de cal ou de aditivo químico líquido, embora nada se possa afirmar sem resultados de ensaios. Dependendo dos valores obtidos, poder-se-ia rejeitar a pedreira em questão.

3.1.4.6.Resultados do ensaio de perda de massa Cântabro

A determinação de perda de massa no ensaio Cântabro consiste basicamente em colocar corpos de prova moldados no Marshall ou extraídos de pista de misturas asfálticas dentro de um equipamento de abrasão Los Angeles, sem as esferas metálicas.

Aciona-se o equipamento e após determinado número de rotações retiram-se os corpos de prova, mede-se a massa resultante do corpo de prova e, numa relação com massa inicial, tem-se o valor de perda de massa no ensaio Cântabro.

A determinação da perda de massa no ensaio Cântabro tem origem Espanhola e foi desenvolvida para ser aplicado em misturas betuminosas abertas, ou seja, misturas betuminosas com elevado volume de vazios.

O valor de perda de massa, estimado como sendo um valor aceitável para misturas betuminosas abertas, é de no máximo 25% de perda. mOcorre que, os corpos de prova deste trabalho, submetidos a perda de massa no ensaio Cântabro, possuíam cerca de 4% de volume de vazios de ar. Logo, o valor de 25%, estimado como sendo aceitável de perda tende a ser muito elevado quando aplicado sobre resultados de corpos de prova com cerca de 4% volume de vazios.

Os corpos de prova utilizados neste ensaio foram obtidos da seguinte maneira:

a) corpos de prova, extraídos de placas virgens (não testadas no simulador de tráfego), sem nenhum processo de condicionamento;

b) corpos de prova, extraídos de placas virgens (não testadas no simulador de tráfego), submetidos previamente ao condicionamento AASHTO T-283;

c) corpos de prova, extraídos de placas já submetidas ao simulador de tráfego, sendo que os corpos de prova foram extraídos na região da trilha de roda, sem nenhum processo de condicionamento; e,

d) corpos de prova, extraídos de placas submetidas ao condicionamento de imersão em água, à temperatura de 60°C, por um período de 96 horas e ensaiadas no simulador de tráfego, sendo que os corpos de prova foram extraídos na região da trilha de roda.

As Figuras 3.19 e 3.20 mostram os resultados obtidos após o ensaio de Cântabro de corpos de prova que foram retirados de placas virgens – sem submissão ao simulador de tráfego. Após extração e antes do ensaio Cântabro, metade dos corpos de prova foram submetidos ao condicionamento segundo a AASHTO T-283. A Figura 3.19 traz os resultados obtidos com aditivo químico líquido como melhorador de adesividade e a Figura 3.20 com a cal.

A Figura 3.21 mostra os resultados após ensaio Cântabro de corpos de prova retirados de placas e submetidos ao condicionamento segundo a AASHTO T283, de modo a comparar o efeito dos dois tipos de melhoradores de adesividade utilizados no trabalho.

Figura 3.19. Resultados de ensaio Cântabro sem e com condicionamento segundo a AASHTO T-283 dos corpos de prova extraídos de placas virgens, sem serem submetidas ao simulador de tráfego – uso de aditivo químico líquido como melhorador de adesividade

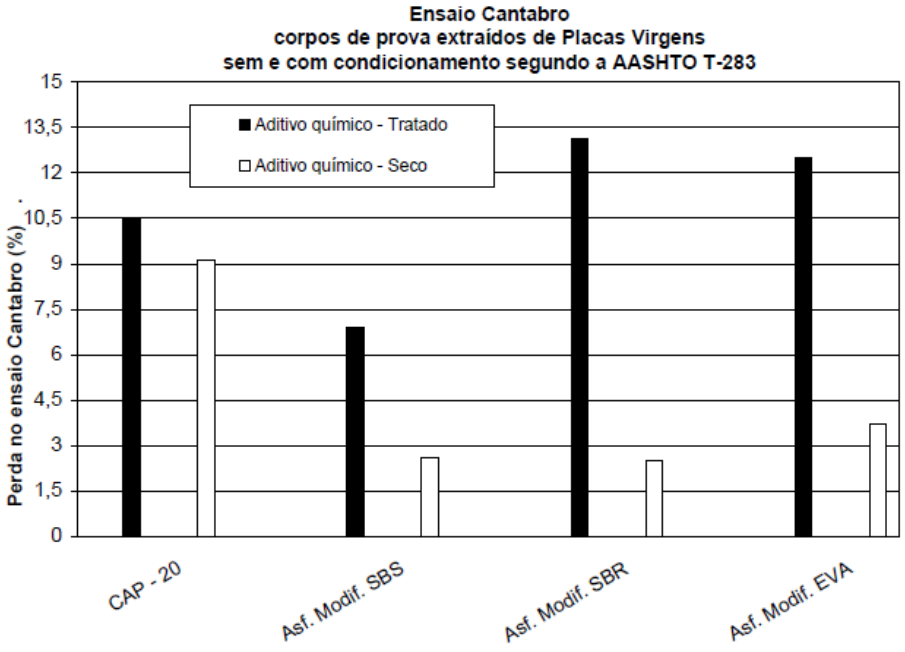


Figura 3.20. Resultados de ensaio Cântabro sem e com condicionamento segundo a AASHTO T-28 dos corpos de prova extraídos de placas virgens, sem serem submetidas ao simulador de tráfego – uso de cal como melhorador de adesividade

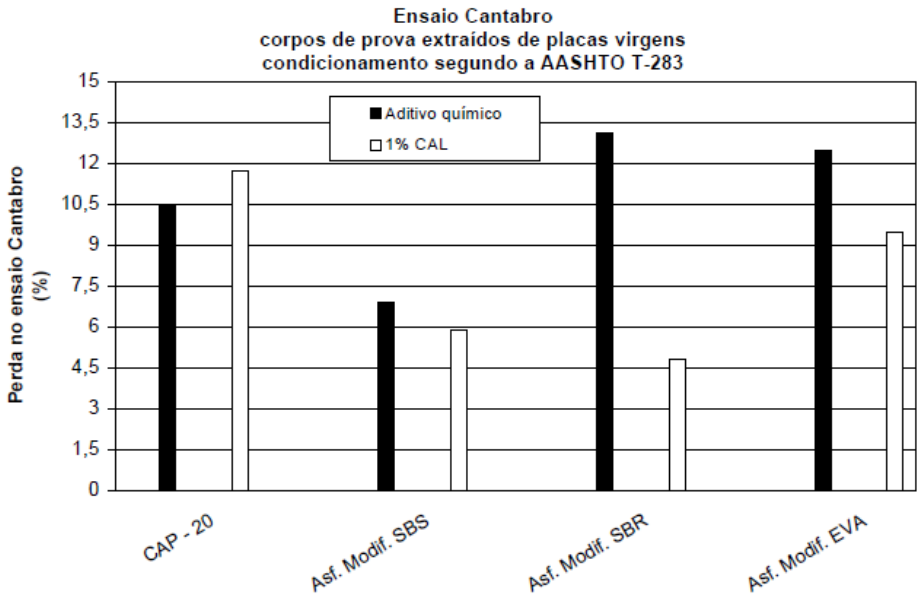
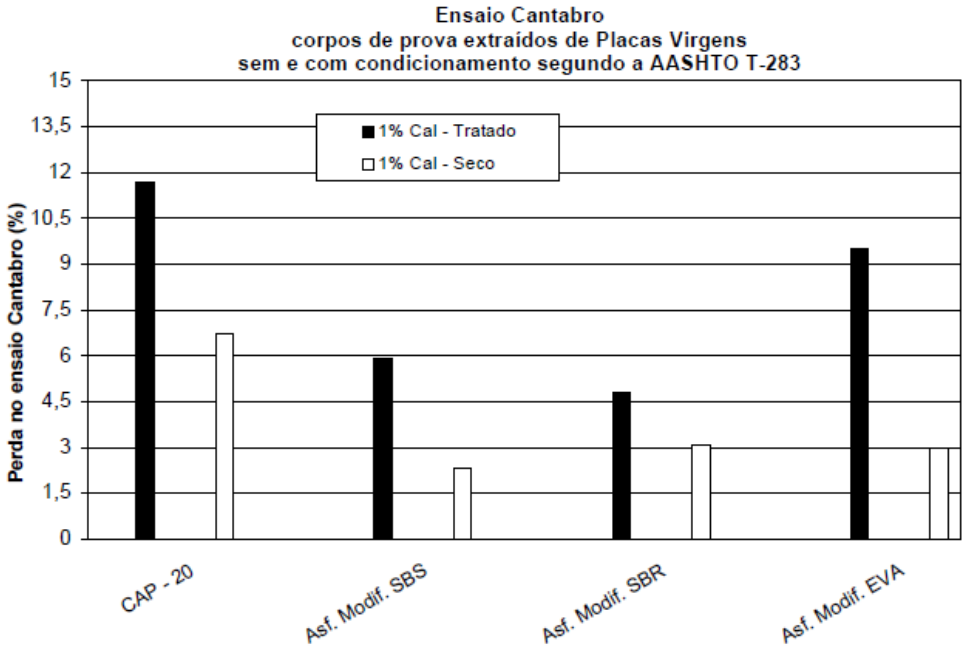


Figura 3.21. Resultados comparativos do efeito dos melhoradores de adesividade pela perda após o ensaio Cântabro de corpos de prova extraídos de placas virgens e submetidos ao condicionamento segundo a AASHTO T-283



As Figuras 3.22 e 3.23 mostram os resultados obtidos após o ensaio Cântabro de corpos de prova que foram retirados de placas após submissão no simulador de tráfego. Metade das placas haviam sido submetidas ao condicionamento em água a 60°C por 96 horas antes do ensaio no simulador de tráfego. A Figura 3.22 traz os resultados obtidos com aditivo químico líquido como melhorador de adesividade e a Figura 3.23 com a cal.

A Figura 3.24 mostra os resultados após ensaio Cântabro de corpos de prova retirados de placas já submetidas ao condicionamento e simulação de tráfego, de modo a comparar o efeito dos dois tipos de melhoradores de adesividade utilizados no trabalho.

Figura 3.22. Resultados de ensaio Cântabro sem e com condicionamento dos corpos de prova extraídos de placas já submetidas ao simulador de tráfego – uso de aditivo químico líquido como melhorador de adesividade

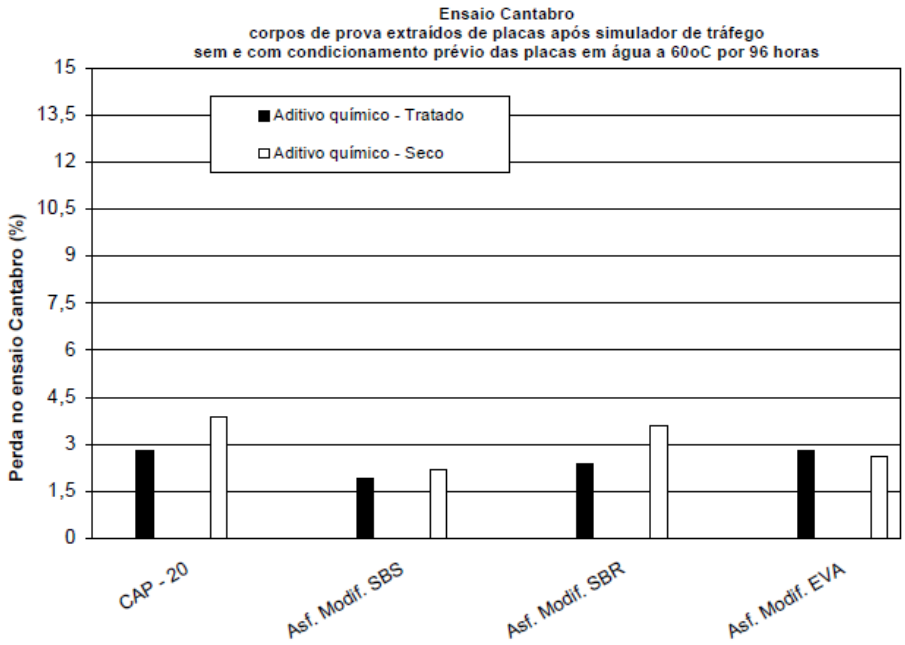


Figura 3.23. Resultados de ensaio Cântabro sem e com condicionamento dos corpos de prova extraídos de placas já submetidas ao simulador de tráfego – uso de cal como melhorador de adesividade

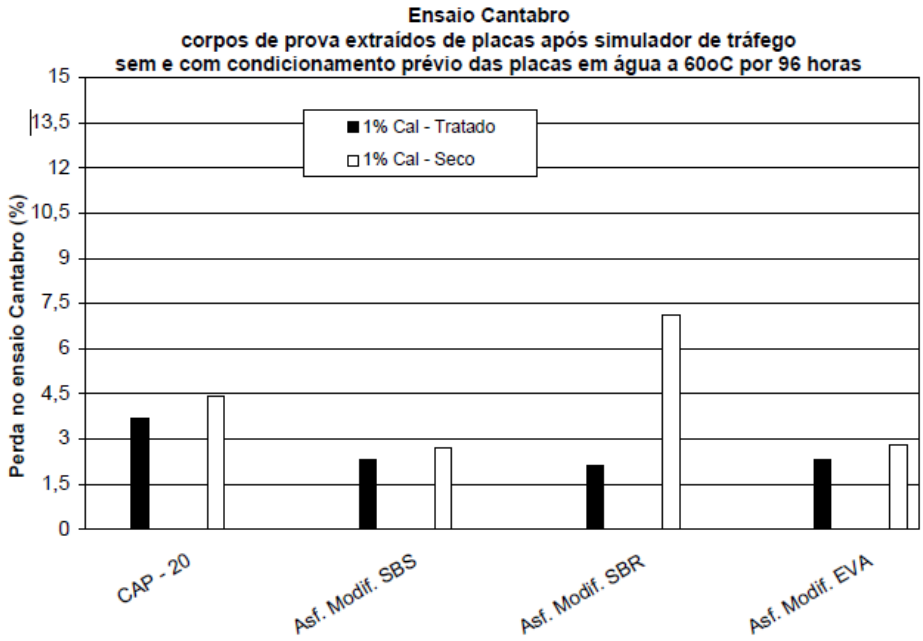
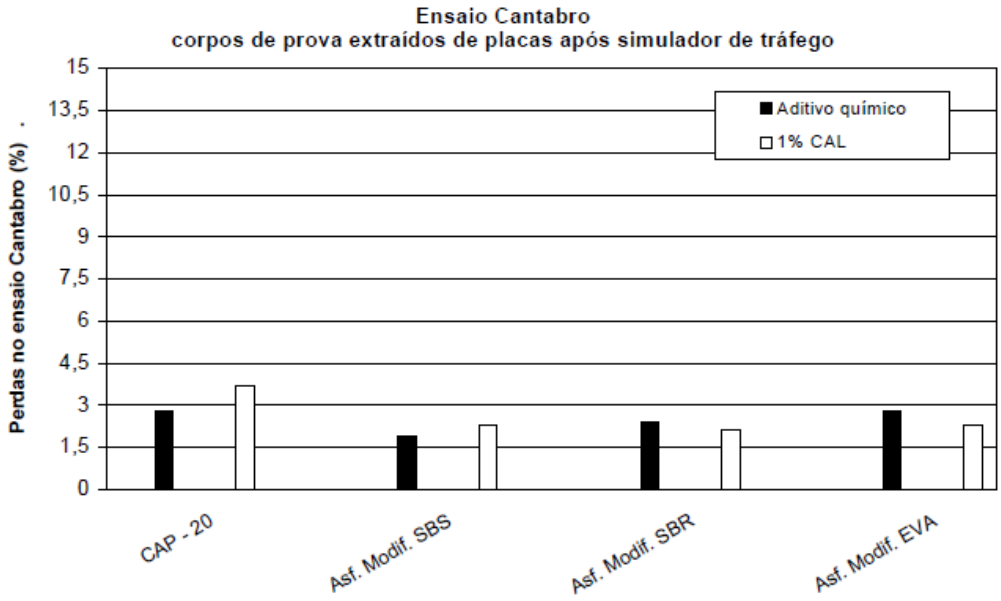


Figura 3.24. Resultados comparativos do efeito dos melhoradores de adesividade pela perda após o ensaio Cântabro de corpos de prova extraídos de placas já submetidas ao condicionamento em água a 60°C por 96 horas e posterior simulação de tráfego



- *Corpos de prova extraídos de placas virgens*

Para os ligantes modificados com SBR e EVA, os corpos de prova broqueados de placas virgens, com aditivo químico como melhorador de adesividade e submetidos ao condicionamento ASSHTO T-283, apresentaram uma resistência inferior quanto à perda de massa no ensaio Cântabro se comparado com os corpos de prova broqueados de placas virgens, submetidas ao condicionamento ASSHTO T-283, que utilizaram a CAL como melhorador de adesividade.

Para o ligante modificado com SBS, os corpos de prova, broqueados de placas virgens, tanto com aditivo químico como a CAL: como melhoradores de adesividade ligante/agregado, submetidos ao condicionamento ASSHTO T-283, apresentaram valores iguais entre si, e se comparados com o valor de perda, obtida para os ligantes modificados com SBR e EVA, com aditivo químico como melhorador de adesividade ligante/agregado, ficaram inferiores.

Para o ligante CAP-20, os corpos de prova, broqueados de placas virgens, tanto com aditivo químico como a CA, como melhoradores de adesividade ligante/agregado, submetidos ao condicionamento ASSHTO T-283, apresentaram valores iguais entre si, embora, seus valores absolutos se equiparam com os valores dos ligantes modificados com SBR e EVA, que utilizaram o aditivo químico como melhorador de adesividade ligante/agregado.

Para os ligantes modificados com SBR, SBS e EVA, os corpos de prova, broqueados de placas virgens, tanto com aditivo químico como a CAL, e sem nenhum tipo de condicionamento, apresentaram valores de perda de massa no ensaio Cântabro bastante baixos.

Já para o ligante CAP-20, sem nenhum tipo de condicionamento, o valor de perda de massa no ensaio Cântabro para corpos de prova com aditivo químico, foi superior, se comparado com corpos de prova que utilizaram a CAL como melhorador de adesividade ligante/agregado.

Conclui-se, portanto, que pelo ensaio Cântabro o CAP-20 apresenta-se menos eficiente do ponto de vista de evitar a desagregação que as misturas com asfaltos modificados. Os corpos de prova submetidos ao condicionamento mostraram que a cal é em geral mais eficiente como melhorador de adesividade que o aditivo químico líquido.

- *Corpos de prova extraídos de placas após simulador de tráfego*

Os valores de perda de massa no ensaio Cântabro para os corpos de prova broqueados de placas previamente ensaiadas no simulador de tráfego LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées – França), tanto para a CAL como o aditivo químico como melhoradores de adesividade ligante/agregado, e também com ou sem condicionamento (imersão em água à 60°C por um período de 96 horas) foram bastante baixos, na ordem de 3%.

Exceto para o ligante modificado com SBR, sem condicionamento e dosado com CAL como melhorador de adesividade, que apresentou um valor acima de 7%. O condicionamento de imersão em água à 60°C por um período de 96 horas, não alterou a adesividade ligante/agregado, para nenhum tipo de ligante. Os corpos de prova de placas que foram submetidas ao simulador de tráfego, foram extraídos onde se formou a trilha de roda – local da deformação permanente. Os volumes de vazios iniciais da placa são da ordem de 4%; após o ensaio de deformação permanente, no local onde se formou a trilha de roda, os vazios sofreram uma redução substancial, tornando essa região da placa mais compacta. Isso explicar os valores tão baixos de perda de massa para esses corpos de prova. No entanto, se houve deformação tipo plástica, com compensação de volume nas laterais da trilha, nesses locais a desagregação poderia ser maior.

3.1.5. Comparativo da qualidade entre misturas betuminosas executadas em usinas gravimétricas e drum mixers

A produção de uma mistura asfáltica está relacionada à mistura de agregados minerais com um ligante asfáltico em proporções predeterminadas no projeto de dosagem laboratorial, para produzir uma massa homogênea. Antes da mistura com o ligante asfáltico, o agregado é composto na graduação especificada por meio de mistura de diferentes frações granulométricas, disponíveis comercialmente pelas pedreiras. Para as misturas asfálticas que fazem uso do cimento asfáltico de petróleo (CAP), o agregado deve ser aquecido previamente para remoção de umidade e para incrementar sua temperatura para que seja possível o seu envolvimento completo com o ligante

asfáltico. Esses procedimentos todos são realizados em instalações apropriadas com equipamentos adequados, conhecidos como usinas de asfalto, simplificação da designação, visto que se trata de usinas para a produção de misturas asfálticas a quente. Caso o ligante utilizado seja emulsão asfáltica, as usinas são para misturas a frio.

De acordo com Bernucci et al. (2008), existem dois tipos básicos de usina de asfalto que são: a usina de produção por batelada ou gravimétrica, conforme princípio geral exposto na Figura 3.25, que produz quantidades unitárias de misturas asfálticas, e a usina de produção contínua ou *drum-mixer*, conforme a Figura 3.26, cuja produção é contínua, como a própria designação classifica.

Figura 3.25. Esquema de uma usina asfáltica por batelada. FONTE: Bernucci et al. (2008)

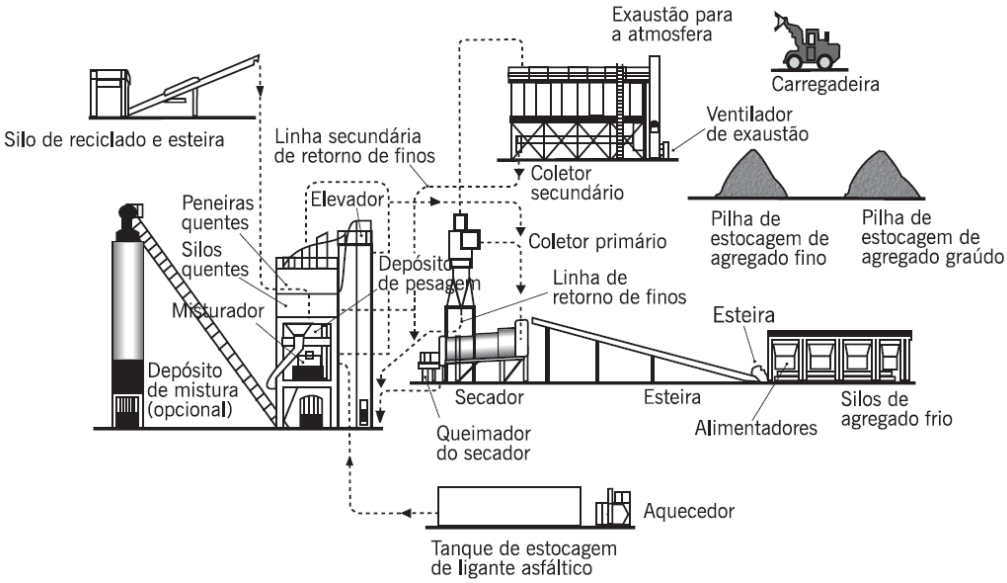
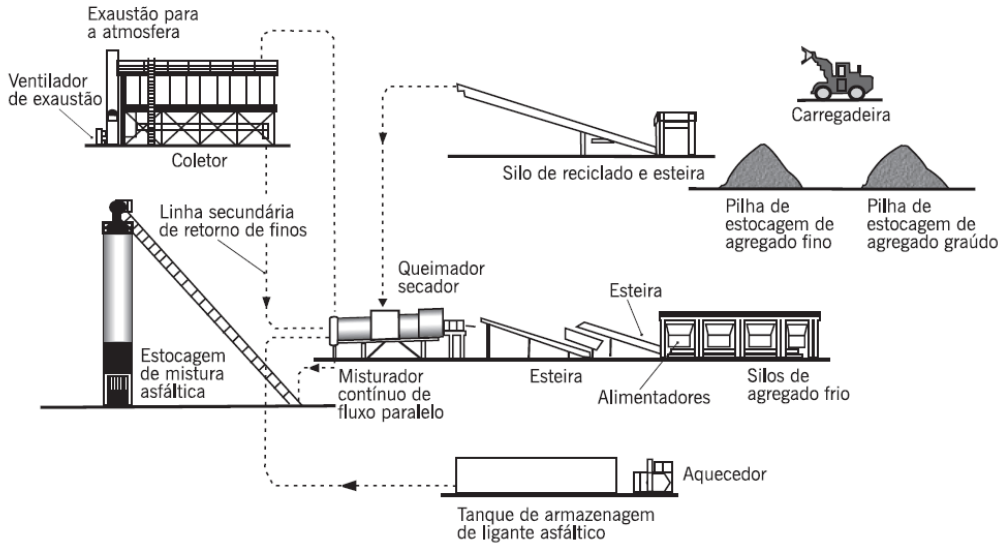


Figura 3.26. Esquema de uma usina asfáltica contínua FONTE: Bernucci et al. (2008)



Os dois tipos de usinas têm condições de produzir as misturas asfálticas em uso corrente no país. Ao longo da Rodovia Presidente Dutra, existem diversos fornecedores que fazem uso de ambas as

tecnologias e o objetivo deste estudo foi verificar se haveria diferenças significativas no produto final, obtido por um ou outro tipo de usina.

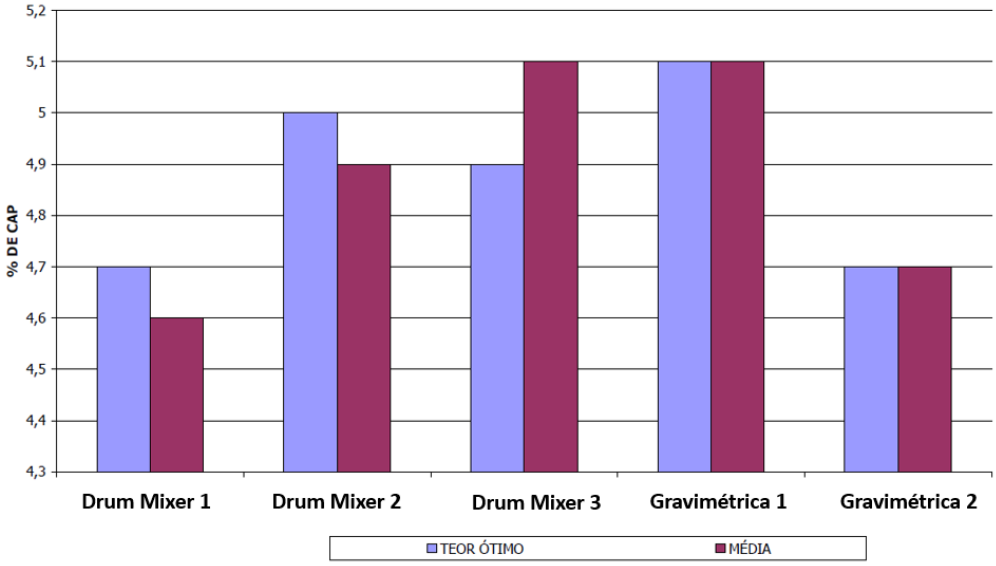
Assim, foi realizada a aferição do desvio do teor de ligante asfáltico aplicado por usinas Drum mixer ou contínuas e por usinas por bateladas ou gravimétricas. A seleção das usinas foi definida em função do fornecimento de misturas asfálticas à CCR NovaDutra na época de realização da pesquisa. Os dados foram coletadas de todas as usinas que fornecem misturas asfálticas para as atividades de conservação do pavimento da Rodovia Presidente Dutra. Ao todo foram três usinas Drum Mixer e duas usinas do tipo gravimétrica. Na Tabela 3.3 apresentam-se os resultados estatísticos do teor de ligante asfáltico adicionado nas misturas asfálticas coletadas nas usinas.

Na Figura 3.27 apresenta-se um comparativo do teor ótimo de ligante asfáltico e do teor médio obtido para o número de amostras observado. Nota-se que houve pouca variação em todas as usinas asfálticas, sejam do tipo drum mixer ou gravimétrica. Assim, conclui-se que o tipo de usina utilizada na produção de misturas asfálticas não influencia significativamente na precisão do teor de ligante asfáltico adicionado nas misturas asfálticas. Pelo que foi percebido durante o monitoramento desta pesquisa, o fator humano é mais significativo neste parâmetro, que é influenciado diretamente pelo treinamento adequado dos operadores e sua experiência.

Tabela 3.3. Resultados estatísticos do teor de ligante asfáltico adicionado nas misturas asfálticas coletadas nas usinas

Usina	Teor Ótimo de Ligante Asfáltico (%)	Número de Amostras	Mínimo Estatístico (%)	Máximo Estatístico (%)	Média (%)
Drum Mixer 1	4.7	25	4.11	5.15	4.63
Drum Mixer 2	5	19	4.56	5.23	4.9
Drum Mixer 3	4.9	16	4.8	5.33	5.07
Gravimétrica 1	5.1	6	4.94	5.27	5.11
Gravimétrica 2	4.7	47	4.5	4.94	4.72

Figura 3.27. Resultados estatísticos do teor de ligante asfáltico médio e ótimo adicionado nas misturas asfálticas coletadas nas usinas



3.1.6. Análise dos métodos DNER e ASTM para o ensaio de densidade de corpos de prova Marshall

A diferença básica entre os dois métodos (DNER e ASTM) está no procedimento para determinação da densidade sem capeamento com parafina. No método do DNER, o capeamento com parafina é obrigatório, quando o índice de vazios ultrapassa 7%. No método da ASTM, o uso de parafina é recomendado quando a absorção de água pelo corpo de prova ultrapassa 2%.

Para este estudo, foram analisados 469 corpos de prova extraídos da pista das rodovias Anhanguera/Bandeirantes e Dutra. Novos corpos de provas foram também moldados em laboratório, utilizando-se os diferentes métodos de ensaio. As Figuras 9 e 10 mostram os resultados encontrados.

Figura 3.28. Comparação entre porcentagem de vazios determinados pelos métodos DNER e ASTM.

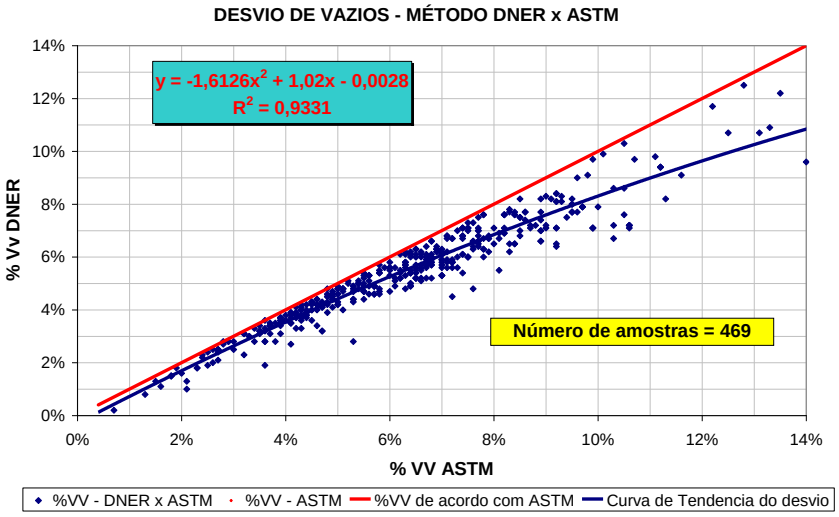
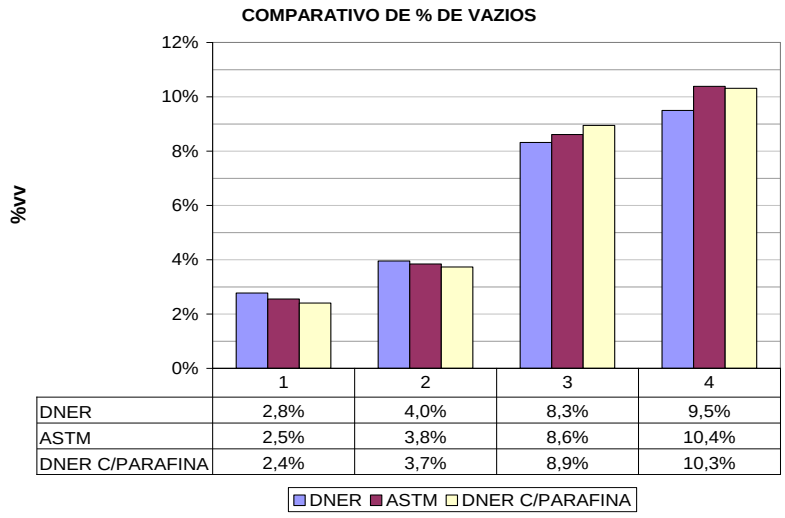


Figura 3.29. Comparativo entre porcentagem de vazios determinados pelos diferentes métodos.



	1	2	3	4
DNER	2,8%	4,0%	8,3%	9,5%
ASTM	2,5%	3,8%	8,6%	10,4%
DNER C/PARAFINA	2,4%	3,7%	8,9%	10,3%

Pode-se constatar pelos gráficos das Figuras 9 e 10 que o método adotado atualmente pela ASTM tem uma precisão maior do que o adotado pelo DNER. Vale ressaltar que o ensaio feito com corpos de prova com volume de vazios com parafina é necessário, pois não permite a entrada de água dentro dos mesmos.

3.1.7. Utilização do Elvaloy como aditivo ao ligante no CBUQ

A evolução das tecnologias de materiais rodoviários traz para o mercado diferentes métodos e soluções que podem ser aplicados na construção e manutenção dos pavimentos. Nesta pesquisa especificamente foi avaliada a utilização do polímero do tipo “Elvaloy” em ligantes asfálticos para a produção de misturas asfálticas. Durante o estudo foi avaliado desde a produção do ligante asfáltico modificado nos tanques das usinas asfálticas, passando pela produção de misturas asfálticas e finalizando na sua aplicação.

- *Produção do ligante asfáltico modificado*

A incorporação do polímero Elvaloy foi realizada diretamente em um tanque da usina de asfalto, que contava com um sistema de aquecimento por óleo térmico. Neste tanque foram colocados dois eixos misturadores, situados em seu quartil longitudinal, de maneira a garantir uma agitação completa do ligante asfáltico, conforme é ilustrado na Figura 3.28. Também foi montado um sistema de alimentação para a introdução, no tanque, do polímero Elvaloy e ácido polifosfórico, conforme apresenta a Figura 3.29.

Figura 3.30. Tanque horizontal de asfalto com os eixos misturadores

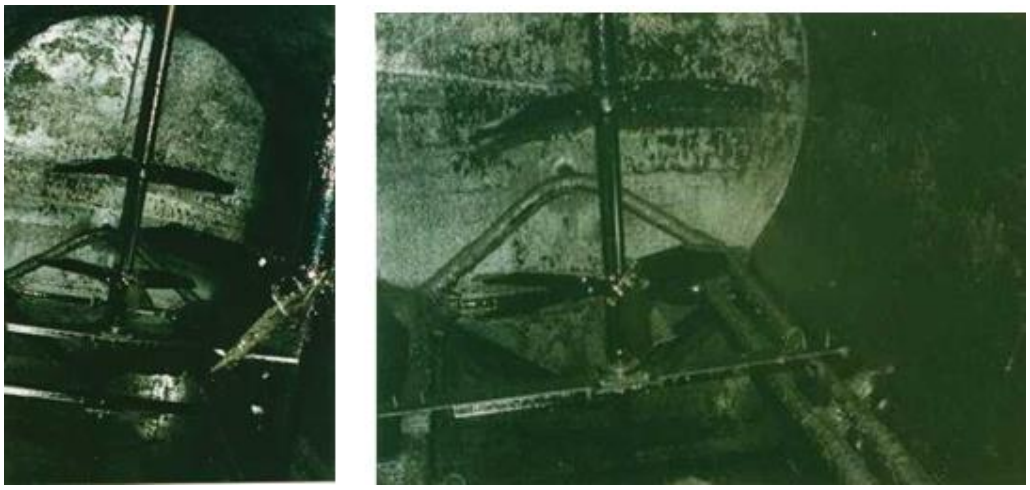


Figura 3.31. Sistema de alimentação do ácido polifosfórico e do polímero Elvaloy



Antes de se iniciar os trabalhos de incorporação, o tanque sofreu uma limpeza meticulosa para retirar todo o asfalto oxidado existente em seu interior, garantindo assim que a incorporação fosse bem sucedida. Este trabalho consumiu mais de uma semana, com recirculação de CAP aquecido seguido de raspagens da tubulação e paredes do tanque.

A incorporação do polímero Elvaloy, fabricado pela DUPONT, ao CAP 40 foi realizada na usina de asfalto da Construtora Estrutural, situada nas proximidades de Campinas (SP), conhecida como BASALTO 6. A incorporação, orientada pelos técnicos da DUPONT e DYNATEST, foi na proporção de 1,5% Elvaloy mais 0,2% de ácido fosfórico, usado como catalizador, em relação ao peso do CAP. A temperatura do ligante para poder incorporar o Elvaloy é de 185oC 5oC.

O CAP 40 foi trazido da refinaria de Duque de Caxias (REDUC), considerado pelos químicos da área de pavimentação como o asfalto mais adequado para se fazer incorporação de polímeros no Brasil. A razão para tal informação é que a REDUC é a única refinaria que processa produtos para óleos lubrificantes. Portanto, o blending de petróleos é pouco alterado nesta refinaria, o que não acontece com as demais.

A colocação do polímero foi realizada de maneira bastante simples, manualmente, como pode ser observado nas Figuras 3.30 e 3.31. A agitação para homogeneização foi de aproximadamente 3 horas, sendo que o ensaio de retorno elástico do ligante foi utilizado como o parâmetro de controle para verificar a completa incorporação do polímero no ligante asfáltico.

Figura 3.32. Incorporação do polímero Elvaloy no tanque de asfalto da usina



Figura 3.33. Detalhe da incorporação do polímero Elvaloy na abertura do tanque



- *Dosagem das misturas asfálticas*

Para a execução dos serviços, foram elaboradas duas dosagens de misturas asfálticas no CPR, sendo uma com o então CAP 40, usado como dosagem de controle, e outra com o CAP 40 modificado com 1,5% de Elvaloy. A faixa granulométrica adotada foi a Faixa III do DERSA, correspondente também à Faixa Mix IVb do Instituto de Asfalto dos Estados Unidos. Os resultados dessas dosagens são apresentados na Tabela 3.4 e observa-se que não houveram variações significativas com relação aos parâmetros de dosagem. No entanto, vale destacar que a mistura

asfáltica com CAP 40 + 1,5% de Elvaloy, a estabilidade Marshall foi maior, indicando uma melhor resistência à deformação permanente, à luz desse ensaio empírico, quando comparado com a mistura asfáltica de controle, com CAP 40.

Tabela 3.4. Resultados das dosagens das misturas asfálticas realizadas no CPR

ENSAIOS	**CAP 40**	**CAP 40 + 1,5% Elvaloy**
Agregados – Origem da pedra	Granito	Granito
Agregados – Abrasão Los Angeles (%)	16	16
Energia utilizada (golpes por face)	75	75
Ligante asfáltico de projeto (%)	5,3	5,9
Ligante asfáltico efetivo (%)	5,1	5,7
Absorção de ligante (%)	0,2	0,2
Massa específica do ligante (g/cm3)	1,018	1,019
Diâmetro máximo efetivo do agregado (mm)	17,1	17,1
Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm3)	2,725	2,729
Massa específica máxima teórica (g/cm3)	2,503	2,484
Massa específica aparente da mistura (g/cm^3)	2,404	2,387
Resistência à tração em compressão diametral (7 ± 1%VV) (MPa)	1,2	1,6
Danos por umidade induzida – AASHTO T 283 (%)	89,0	79,0
Volume de vazios (Vv) (%)	3,9	3,9
Vazios do Agregado Mineral (VAM) (%)	16,1	17,2
Relação Betume x Vazios (RBV) (%)	75,6	77,5
Estabilidade Marshall (kgf)	1.444	2.073
Fluência (pol)	15,2 x 0,01	19,9 x 0,01
Relação Fíler x Betume	1,4	1,3
Cal hidratada CH-1 (% da mistura total)	1,4	1,4

- *Execução de trechos experimentais*

Para avaliação da aplicação desta tecnologia foram executados trechos experimentais em segmentos contínuos de comportamento estrutural similar e solicitados pelo mesmo volume de tráfego, com o objetivo de não introduzir outras variáveis no experimento. Os trechos foram divididos da seguinte maneira:

- *Pista de referência*

Nesta pista foi feito serviço de reparos localizados, fresando-se 4 cm, que foram preenchidos com CBUQ, faixa III do DERSA, usando como ligante CAP-20. Neste segmento foi então prevista a execução de CBUQ faixa III do DERSA, porém usando CAP-40 na espessura de 4 cm.

- *Trecho experimental*

Para comparar com a pista de referência e com o mesmo tipo de pavimento, houve fresagem de 4 cm e preenchimento com CBUQ, estando previsto também um reforço de 4 cm, a ser executado com CAP 40 modificado com 1,5% de Elvaloy, conforme orientação da DYNATEST, responsável pela pesquisa.

- *Trecho para avaliar ganho de vida útil*

Neste quilômetro foi projetado um reforço de 8 cm, que foi dividido em duas camadas, a primeira com 4 cm executada com CBUQ usando como ligante CAP 20 e a segunda com outros 4 cm com CAP 40 modificado com 1,5% de Elvaloy.

- *Trecho com espessura maior para avaliar ganho de vida útil*

Neste trecho foi projetado um reforço de 6 cm, todo ele executado com CBUQ, usando como ligante CAP 40 modificado com 1,5% de Elvaloy.

Antes da aplicação das misturas asfálticas em estudo, A pista foi cuidadosamente preparada, sendo todos os reparos localizados checados quanto à compactação. A pista foi varrida, não se deixando nenhum material estranho solto, e então foi aplicada uma pintura de ligação com emulsão RR-2C na faixa a ser pavimentada.

Os equipamentos utilizados para a construção dos trechos experimentais foram os seguintes:

- 1 Carregadeira de Pneus Caterpillar CAT 966
- 1 Usina Drum mixer Barber Greene – 120 t/h
- 15 Caminhões Basculantes
- 1 Acabadora de esteiras VÖGELLE modelo
- 2 Rolo de pneus Dynapac CP-30
- 1 Rolo tandem Dynapac CC-43
- 1 Rolo tandem Dynapac CG-11

Visando atingir a compactação necessária, o processo de compactação adotado foi o seguinte:

- Para a camada de 4cm foi utilizado o rolo de pneus com 16 fechos, com pressão variando entre 100 e 120 psi, seguidas de quatro fecho por rolo tandem liso, sendo as duas primeiras vibrando e as duas últimas sem vibrar.
- Para a camada de 6cm foi utilizado o rolo de pneus com 18 fechos, com pressão variando entre 100 e 120 psi, seguidas de quatro fecho por rolo tandem liso, sendo as duas primeiras vibrando e as duas últimas sem vibrar.

A temperatura de mistura na usina variou de 170 a 185oC, para garantir uma boa compactação da mistura asfáltica na pista. Na pista, a temperatura de descarga na acabadora sempre foi superior a 165oC. Com isto, garantiu-se a compactação sem problemas, com o índice de vazios inferior a 7%, previsto pela especificação, no caso das misturas asfálticas densas com asfalto modificado. A Figura 3.32 apresenta algumas imagens da aplicação das misturas asfálticas nos trechos experimentais.

Figura 3.34. Construção dos trechos experimentais



O controle de execução, realizado pelo laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias, da CCR NovaDutra, indicou que os serviços atenderam os parâmetros de qualidade, para produção, aplicação e compactação. Devido a sua maior flexibilidade, retorno elástico por torção maior que 60%, o trecho experimental com o ligante asfáltico modificado pelo polímero Elvaloy, apresentou maior vida de fadiga, quando comparado com o trecho executado com a mistura asfáltica de controle.

3.1.8. Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação no Brasil

Esta pesquisa teve como objetivo verificar, por meio de coletas de amostras de ligantes asfálticos, a qualidade e o atendimento desses materiais às normas vigentes. As amostras foram coletadas nas refinarias da Petrobrás, nos caminhões transportadores e nos tanques das usinas produtoras de misturas asfálticas.

No plano de trabalho, estabeleceu-se que as amostras coletadas nas refinarias serviriam de referência para os ensaios realizados no estudo, e para verificar se o material atendia à especificação técnica, já na saída das refinarias.

A coleta nos caminhões transportadores teve como objetivo verificar a presença de contaminações por resíduos de produtos anteriormente transportados, se o tempo de permanência do CAP no caminhão, desde o carregamento na refinaria até o descarregamento na usina e o aquecimento do material antes do descarregamento, alteraram a consistência do material.

Com o material coletado dos tanques das usinas produtoras verificou-se se ocorreu alteração do CAP durante a estocagem.

Misturas asfálticas preparadas em usinas gravimétricas e Drum – Mixer foram recolhidas nos locais de aplicação, para análise em laboratório de possíveis alterações nas características do CAP.

As amostras coletadas foram ensaiadas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT, no Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, no CENPES, na COPPE, na Concessionária CCR NOVADUTRA e na Ipiranga Asfaltos.

A programação estabelecida para realização dos ensaios foi a seguinte:

a) Amostras coletadas nas Refinarias

- Caracterização completa de acordo com a Norma DNC 01/92
- Curva de Heukelon
- Fracionamento químico Rostler-Sternberg – método ASTM D 2006
- Cromatografia IATROSCAM – método ASTM D 4124 - (SARA)
- Perda por aquecimento (RTFOT) – método ASTM D 2872
- Viscosidade absoluta após o RTFOT
- Penetração após o RTFOT
- Ponto de amolecimento após o RTFOT
- Destilação por arraste – método ASTM D 255 (modificado)
- Cromatografia IATROSCAM – método ASTM D 4124 - (SARA) sobre a fração leve extraída no ensaio de destilação por arraste
- Penetração do resíduo do ensaio de destilação por arraste
- Ponto de amolecimento do resíduo do ensaio de destilação por arraste
- Viscosidade Saybolt-Furol do resíduo do ensaio de destilação por arraste

b) Amostras coletadas nos caminhões transportadores

- Viscosidade absoluta a 60°C

c) Amostras coletadas nos tanques das usinas

- Viscosidade absoluta a 60°C

d) Mistura asfáltica recém-produzida

- Extração do CAP
- Recuperação do CAP (Método de Abson, com determinação do teor de cinzas)
- Viscosidade absoluta do resíduo
- Penetração do resíduo
- Ponto de amolecimento do resíduo
- Dutilidade do resíduo
- Viscosidade Saybolt-Furo do resíduo
- Fracionamento químico Rostler-Sternberg – método ASTM D 2006
- Cromatografia IATROSCAM – método ASTM D 4124 - (SARA)
- Granulometria dos agregados isentos de CAP

e) Amostra extraída da Rodovia

- Massa específica aparente
- Tração indireta
- Módulo resiliente
- Extração e recuperação do CAP
- penetração do CAP extraído
- Ponto de amolecimento do CAP extraído
- Viscosidade absoluta do CAP extraído
- Viscosidade Saybolt-Furol do CAP extraído
- Granulometria dos agregados isentos de CAP

As Figuras 3.33 a 3.35 ilustram alguns exemplos, das coletas de amostras realizadas na refinaria, no caminhão transportador e em um trecho da rodovia, durante a aplicação, respectivamente.

Figura 3.35. Coleta de amostras na refinaria. FONTE: Relatório INPERPAV (2003)

	Coleta da Amostra quando do carregamento da carreta (REVAP)
Medida da temperatura do CAP no momento da coleta (REVAP)	
	Enchimento das embalagens com volume de 900ml (REVAP)

Figura 3.36. Coleta de amostras no caminhão transportador. FONTE: Relatório INPERPAV (2003)

	Aquecimento do CAP antes do descarregamento na usina.
Coleta da amostra no caminhão transportador no momento do descarregamento da usina.	
	Medida da temperatura do CAP, no tanque da usina, no momento da usinagem.
Coleta do CAP, no tanque da usina, no momento da usinagem.	

Figura 3.37. Coleta de amostras em um trecho da rodovia. FONTE: Relatório INPERPAV (2003)



Procurando se fixar na importância da qualidade do ligante betuminoso sem entrar em detalhes em outros fatores que interferem no comportamento da mistura asfáltica, o trabalho desenvolvido apresenta as conclusões e sugestões a seguir. Essas conclusões foram baseadas na caracterização completa, inclusive fracionamento químico e destilação por arraste, em amostras de asfalto coletadas em diversas refinarias no período de março de 2002 a abril de 2003.

Considera-se que o asfalto satisfaz às especificações vigentes, muito embora alguns resultados encontrados nos ensaios realizados estejam muito próximos ou algumas vezes ultrapassando os limites.

Apesar do ligante asfáltico satisfazer as atuais especificações não elimina a constatação de heterogeneidade do produto face aos resultados dispersos encontrados em amostras de uma mesma refinaria ou em refinarias distintas. A heterogeneidade se apresenta bem evidente quando comparados os resultados do fracionamento químico (Anexo n.º 7). É preocupante constatar que quando na falta de asfalto na região de abrangências de uma refinaria, a região é atendida por outra, cujo material pode apresentar característica química e reológica muito diferentes. Essa ocorrência pode provocar consequências drásticas no abastecimento das usinas de misturas asfálticas (problemas de tancagem, mistura de asfaltos diferentes, dosagem), podendo comprometer seriamente a qualidade do serviço. Exigir do fabricante do asfalto, certificado de análise contendo resultados de caracterização, determinados pela especificação, correspondente a data de fabricação ou ao dia de carregamento e transporte para o canteiro de serviço. Se o período entre essas duas datas exceder a 5 dias novas análises de confirmação deverão ser realizadas.

À medida que se deseja assegurar à uma mistura asfáltica um bom nível de desempenho é importante avaliar as propriedades que contribuem para uma melhor previsão de comportamento sob trafego. O asfalto dentro da mistura é, dentre outros, um dos parâmetros condicionantes da deformação permanente e de trincamento. Devem constituir elementos de especificação as correlações entre propriedades do asfalto medidas através de ensaios de laboratórios (ponto de amolecimento, penetração, viscosidade, módulos) que permitem indicar a possibilidade de ocorrência de degradação proveniente do ligante.

A classificação por viscosidade absoluta a 60°C, nas atuais especificações, não traz nenhuma vantagem ou benefício. É somente uma medida que se realiza numa faixa de temperatura onde a estrutura do asfalto evolui de maneira importante em função da temperatura, tensões mecânicas e do tempo. A cinética de desestruturação e de estruturação do sistema coloidal, é lenta e variável de um produto para outro e também pode ocorrer influência acentuada do fenômeno de histerése térmica. A repetitividade da medida fica comprometida pelas variações importantes causadas na estrutura coloidal. Estas variações de estruturas conduzem a flutuações de viscosidade. Junte-se o fato que a medida da viscosidade à 60ºC além de delicada é complexa, pois necessita a utilização de aparelhos de difícil manejo e de elevado custo. A adoção de classificação por penetração à 25°C é válida para todo o país.

Entre as medidas de consistência do asfalto, a penetração à 25ºC, apresenta satisfatória precisão, é bastante difundida mundialmente e mais se aproxima da nossa realidade, pois diz respeito a

simplicidade, custo e possibilidade de estabelecer correlações com a evolução do ligante durante a aplicação.

A *priori* estabelecer o valor da relação (penetração antes e após o teste RTFOT), um mínimo de 60% para penetração residual para os CAP 30/45 e 50/60 e 55% para o CAP 85/100 (excluir da especificação o CAP 150/200). Essa relação possibilita limitar a degradação do ligante sofrida durante o processo de usinagem, sendo um dos fatores importante na ocorrência de desordens em revestimentos betuminosos.

Limitar o Índice de Suscetibilidade Térmica aos valores de –1 a +1. Estreitando esse índice pode-se excluir petróleos que produzam asfaltos com acentuada suscetibilidade à variações de temperatura. Contribui-se assim para diminuir a incidência à formação de trilha de rodas em revestimentos asfálticos submetidos ao trafego pesado e temperatura elevada.

Limitar em 8°C a diferença do ponto de amolecimento antes e após RTFOT. Essa diferença contribui para diminuir os riscos de fissuramento, por fadiga térmica, permanecendo viva a propriedade auto-reparadora em revestimentos expostos à grandes variações de temperaturas diurnas e noturnas.

Determinação da viscosidade técnica (SSF ou Brookfield). É uma medida que deverá ser realizada a várias temperaturas em regime lamelar. Essa medida tem por finalidade conhecer a temperatura ótima para bombeamento e estocagem, além de possibilitar a construção da curva de viscosidade *versus* temperatura com a finalidade de indicar a faixa de temperatura para o projeto de mistura asfáltica.

Limitar a perda por aquecimento em 0,5% em massa, determinada no ensaio RTFOT. Essa redução na perda por aquecimento promove uma melhoria ao meio ambiente e uma resistência ao envelhecimento precoce do asfalto.

Adotar o ensaio de destilação por arraste limitando o valor da perda em massa em 1%. Isto minimizará o aumento da consistência do CAP durante a usinagem em usina tipo “drum mixer”.

Uma indicação quanto a natureza química dominante (aromático ou naftênico) poderá constar no certificado emitido pelo fabricante. Esta indicação tem por objetivo auxiliar o projetista da mistura asfáltica na seleção mais adequada do ligante betuminoso para o serviço a que se propõe (misturas densas ou misturas com elevado teor de vazios) visando maior resistência ao envelhecimento.

Excluir o emprego de asfaltos obtidos de misturas de resíduos em unidades de refino com diluentes, tais como extrato aromáticos e óleos de xisto sem comprovação prática. O desequilíbrio

do sistema coloidal do asfalto pode acarretar fenômenos drásticos como por exemplo a exsudação ou espelhamento em revestimentos asfálticos.

O asfalto deve possuir características que permitam apresentar condição para usinagem na temperatura mais baixa possível e que corresponda a viscosidade 80 ± 5 SSF.

A ação da insolação e temperatura ambiente elevada (o Brasil é considerado em termos genéricos um pais de clima tropical, por conseguinte sob a influência dominante de temperaturas elevadas) exercem modificações significativas nas características do asfalto aplicado. A reprodução desses efeitos em laboratório permanece ainda no campo duvidoso, muito embora uma infinidade de trabalhos tenha sido feita, alguns com boa aproximação e aceitação para climas continental e temperado. Entre esses trabalhos de pesquisa, o teste RTFOT+ PAV, desenvolvido no projeto SRHP é adotado na especificação do Superpave. Da mesma forma, o LCPC em trabalhos de avaliação do asfalto em serviço, tem adotado o teste RTFOT+PAV como sendo o único parâmetro que correlaciona o ligante envelhecido artificialmente com a rodovia. Para as nossas condições de clima, torna-se imprescindível a confirmação dessa correlação através da realização de trechos experimentais devidamente monitorados ao longo do tempo em serviço.

Não obstante, o asfalto pode não representar mais do que 2% do consumo total dos produtos de petróleo, porém é um material de grande importância e suficientemente oneroso para a construção rodoviária devendo ser tratado como um bem durável e reciclável. Qualquer tentativa no sentido de garantir resistência ao envelhecimento é compensada.

3.1.9. Avaliação do equipamento “Grip Tester” para medição de atrito

Foi introduzido no Brasil um equipamento para medição de resistência à derrapagem do pavimento “*Grip Tester*” pela “COPAVEL”. Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o emprego deste equipamento em diferentes trechos da Rodovia Presidente Dutra, com texturas superficiais distintas.

O “*Grip Tester*” mede a resistência à derrapagem do revestimento por meio do coeficiente de atrito determinado na pista, chamado de “*Grip Number*” (GN).

Nos pavimentos rodoviários, os pneumáticos de borracha rodam sobre superfícies pavimentadas, o atrito ou aderência pneu-pavimento é imprescindível para garantir a segurança dos usuários desse meio de transporte e dos bens através dele transportados. Na prática, qualquer revestimento de pavimento apresenta valores suficientes de Resistência à Derrapagem enquanto seco e sem outro elemento lubrificante sobre si. Isso equivale a dizer que só haverá problemas de insuficiência de

atrito que possam causar um acidente, se algum outro líquido for acidentalmente espargido, ou na presença de um filme de água sobre a superfície do revestimento do pavimento que lubrifique o contato pneu-pavimento.

Nos ensaios de atrito, monitora-se, portanto, a situação menos favorável que é a situação de chuva, simulada no caso da medição do atrito pelo "*Grip Tester*", pelo espargimento de água com vazão constante na frente da roda teste do equipamento. A vazão utilizada é proporcional à velocidade de deslocamento do equipamento suficiente para criar uma película de água com espessura de 0,25mm.

O atrito, ou fricção, ou a aderência pneu-pavimento, ou ainda a resistência à derrapagem, devem ser garantidas segundo as condições operacionais da via, normalmente em duas situações:

- na frenagem e
- na manutenção da trajetória dos veículos em curvas

Ambas as situações, no entanto, se resumem à existência de uma mesma única textura, apropriada para a superfície do pavimento nas dadas condições operacionais, independente de se ocorrentes longitudinalmente (no caso da frenagem) ou transversalmente (no caso das curvas horizontais) ao sentido de deslocamento do veículo.

O atrito presente no contato pneu-pavimento pode ser classificado em uma escala, em função da segurança que ele garante, de insuficiente a suficiente conforme as rampas, as curvas e as interseções em nível presentes na via, e a velocidade diretriz preconizada. Assim, as situações extremas de necessidade de aderência pneu-pavimento são:

- *mínimas:* no caso de via expressa (sem interseções em nível), com rampas pouco acentuadas e raios de curvas horizontais grandes, permitindo velocidade diretriz alta; e
- *máximas:* no caso de via urbana com abordagem à travessia de pedestres em nível.

O equipamento utilizado neste trabalho foi um "*Grip Tester*" disponibilizado pela COPAVEL Consultoria de Engenharia Ltda. O "*Grip Tester*" opera segundo o princípio de roda freada e arrasto fixo, com as forças vertical e horizontal sendo continuamente medidas e totalizadas a cada dez metros do levantamento.

O Coeficiente de Atrito entre duas superfícies é determinado pela natureza de cada uma das superfícies em atrito e pela força normal atuando no contato. A fórmula utilizada pelo "*Grip Tester*" para cálculo do Coeficiente de Atrito, no caso o valor do "*Grip Number*" é dado pela Equação 2.1.

$$GN = \frac{Fv}{Fh}$$ Equação 2.1

Onde:

GN = Grip Number (Coeficiente de Atrito)
Fv = Força Vertical
Fh = Força Horizontal

Vale notar que as forças vertical e horizontal são as atuantes no "Grip Tester" no momento da medida da superfície do pavimento no campo. Os aparelhos medidores de atrito funcionam de modo a equacionar as incógnitas (variáveis) presentes no processo de medição - e o "Grip Tester" não é uma exceção - resumindo-se a medir o Coeficiente de Atrito (Grip Number) devido à superfície do revestimento em relação à roda teste do equipamento.

A borracha do pneu da roda teste é padronizada segundo normas internacionais – ASTM E 2340. As forças vertical e horizontal são medidas continuamente por tensiômetros - "strain gages" - e os valores médios calculados são salvos a cada dez metros do levantamento em um sistema computorizado, juntamente com os valores médios da velocidade desenvolvida pelo veículo trator do equipamento. Neste estudo empregou-se uma caminhonete Ford Courier equipada com um tanque de 400 litros de água e equipamento controlador de vazão desta, espargindo-a sob a roda teste proporcionalmente para cada velocidade de levantamento, de modo a garantir um filme de água de espessura fixa igual a 0,25 mm. Na Figura 3.36 apresenta-se o equipamento utilizado neste estudo.

Figura 3.38.Equipamento utilizado no monitoramento do coeficiente de atrito



Essa espessura do filme, bem como o próprio "*Grip Tester*" e os valores de Coeficiente de Atrito (Grip Number), são reconhecidos internacionalmente e aprovados pela "*International Civil Aviation Organization* - ICAO" (Organização de Aviação Civil Internacional - OACI) e pela "*Permanent International Association of Road Congresses* - PIARC", Associação Internacional Permanente de Congressos Rodoviários - AIPCR.

No Brasil ainda não existem normativas para este levantamento Resistência à Derrapagem ou para Coeficiente de Atrito aplicado aos pavimentos rodoviários. No entanto, a publicação do IPR-DNER "Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros" de Junho de 1998, indica no Relatório Final, Tomo II, página 245, uma sugestão de avaliação das condições de Resistência à Derrapagem, apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Avaliação das condições de segurança em função do coeficiente de atrito. FONTE: Publicação IPR-DNER (1998)

Avaliação das Condições de Segurança	
Aderência Pneu-Pavimento ou Resistência à Derrapagem (CA - Coeficiente de Atrito)	
Classes de Resistência à Derrapagem	
1. Perigosa	< 0,24
2. Muito lisa	0,24 - 0,30
3. Lisa	0,31 - 0,37
4. Insuficientemente rugosa	0,38 - 0,44
5. Medianamente rugosa	0,45 - 0,51
6. Rugosa	0,52 - 0,72
7. Muito rugosa	> 0,72

Na Rodovia Presidente Dutra foi monitorado o coeficiente de atrito por meio do "*Grip Tester*" em 100 km de segmentos divididos em função de tipo de revestimento existente e em pontos considerados problemáticos pela operação da rodovia, na época em que foi realizada esta pesquisa, isto é, Julho de 2003.

A metodologia utilizada para a análise dos trechos foi separá-la por segmentos que tinham o mesmo tipo de revestimento e fazer uma avaliação individual dos segmentos. Posteriormente os segmentos de mesmo revestimento foram agrupados para termos uma avaliação de resultados de "*Grip Test*" em geral, para uma avaliação de diferenças entre os diversos tipos de revestimento.

Foram calculadas as médias, desvios padrão, valores máximo e mínimo absolutos de cada segmento e avaliados os números de pontos de cada intervalo considerado como significativo de cada grupo de valores. Para evitar distorções que resultados baixos, devido a algum problema localizado que pudesse distorcer significativamente a análise, foi feita também uma avaliação onde, em função da média encontrada e desvio padrão, calculou-se um valor que contivesse 85% dos resultados encontrados. Isto é, estatisticamente, temos, abaixo deste valor, 15% dos resultados.

Este é um bom parâmetro para se definir limites para a área rodoviária, normalmente usados nas especificações. Na Tabela 3.6 são apresentados os valores estatísticos agrupados conforme o tipo de pavimento.

Tabela 3.6. Resultados do "*Grip Test*"

	ESTASTÍSTICA				
TIPO DE REVESTIMENTO	**Média**	**Máximo**	**Minimo**	**>85%**	**Quant.**
CBUQ - REST. 2002 - km 164 Norte SP	**0,26**	0,39	0,14	0,19	16
CBUQ - REST. 2002 - km 191 Sul SP	**0,40**	0,49	0,35	0,36	21
CBUQ - REST. 2002 - Subida da Serra RJ	**0,57**	0,74	0,37	0,48	90
CBUQ - REST. 97 - COM POLÍMERO - km 55 SP	**0,38**	0,51	0,20	0,28	41
CBUQ - REST. 98 - km 214 Norte RJ	**0,49**	0,55	0,38	0,42	14
CBUQ - REST. 98 - km 22 - km 26 Norte SP	**0,44**	0,62	0,32	0,37	41
CBUQ - REST. 99 - km 230 - km 227 Norte - Rec. RJ	**0,56**	0,64	0,46	0,48	32
CBUQ ANTIGO - RJ Norte km 190 - km 189	**0,46**	0,54	0,40	0,42	11
CBUQ ANTIGO - RJ Norte km 330,5 - km 327	**0,50**	0,68	0,38	0,41	35
CBUQ ANTIGO - RJ Sul km 213,5 - 215,5	**0,62**	0,73	0,50	0,56	20
CBUQ ANTIGO - RJ Sul km 227 - km 230	**0,48**	0,58	0,36	0,39	32
CBUQ ANTIGO - RJ Sul km 289	**0,54**	0,59	0,46	0,49	14
CBUQ ANTIGO - RJ Sul km 327,5 - km 331	**0,43**	0,55	0,27	0,34	43
CBUQ ANTIGO - SP Norte km 106 - km 105	**0,43**	0,47	0,39	0,40	11
CBUQ ANTIGO - SP Norte km 177 - km 176	**0,27**	0,30	0,18	0,23	11
CBUQ ANTIGO - SP Norte km 183 - km 181	**0,31**	0,42	0,20	0,23	21
CBUQ ANTIGO - SP Norte km 189 - km 185	**0,29**	0,62	0,2	0,21	41
CBUQ ANTIGO - SP Norte km 192 - km 190	**0,41**	0,69	0,18	0,22	16
CBUQ ANTIGO - SP Norte km 197,5 Fresado	**0,39**	0,65	0,25	0,28	19
CBUQ ANTIGO - SP Sul km 170 - km 171	**0,27**	0,32	0,23	0,24	11
CBUQ ANTIGO - SP Sul km 177 - km 178	**0,38**	0,46	0,31	0,33	11
CBUQ ANTIGO - SP Sul km 186 - km 187	**0,33**	0,48	0,23	0,26	11
CBUQ ANTIGO - SP Sul km 201 - km 202	**0,43**	0,52	0,29	0,35	10
CBUQ ANTIGO - SP Sul km 203 - km 204	**0,44**	0,61	0,30	0,33	13
CPA (CAMADA POROSA DE ATRITO)	**0,46**	0,57	0,35	0,37	11
MICRO A FRIO - BR - 1a. APLICAÇÃO - km 128 Sul	**0,63**	0,71	0,37	0,54	41
MICRO A FRIO - BR - 1a. APLICAÇÃO - km 172 Norte	**0,38**	0,57	0,18	0,29	22
MICRO A FRIO - BR - 1a. APLICAÇÃO - km 190 Norte	**0,52**	0,64	0,21	0,36	14
MICRO A FRIO - CAÇAPAVA	**0,41**	0,52	0,29	0,36	82
MICRO A QUENTE - EXPERIMENTAL RJ Norte km 333	**0,66**	0,70	0,58	0,60	31
MICRO A QUENTE - FX 3 - REST. 02	**0,40**	0,48	0,34	0,35	21
MICRO A QUENTE - FX 3 - REST. 99	**0,44**	0,47	0,40	0,42	11
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - 3 ALÇAS	**0,54**	0,70	0,38	0,47	33
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - ALÇA 1	**0,58**	0,70	0,48	0,49	11
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - ALÇA 2	**0,51**	0,60	0,38	0,43	11
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - ALÇA 3	**0,54**	0,61	0,47	0,49	11
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - CURVA 239	**0,58**	0,65	0,44	0,49	10
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - CURVA 247	**0,42**	0,51	0,35	0,37	12
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - SERRA -Fresado	**0,54**	0,67	0,38	0,45	68
SMA	**0,49**	0,58	0,42	0,43	8
TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO	**0,61**	0,67	0,36	0,55	36

Na Tabela 3.7 apresentam-se os resultados agrupados por segmentos junto às quantidades de valores para cada intervalo avaliado.

Tabela 3.7. Valores obtidos no "*Grip Test*" segmentados de acordo ao tipo de revestimento

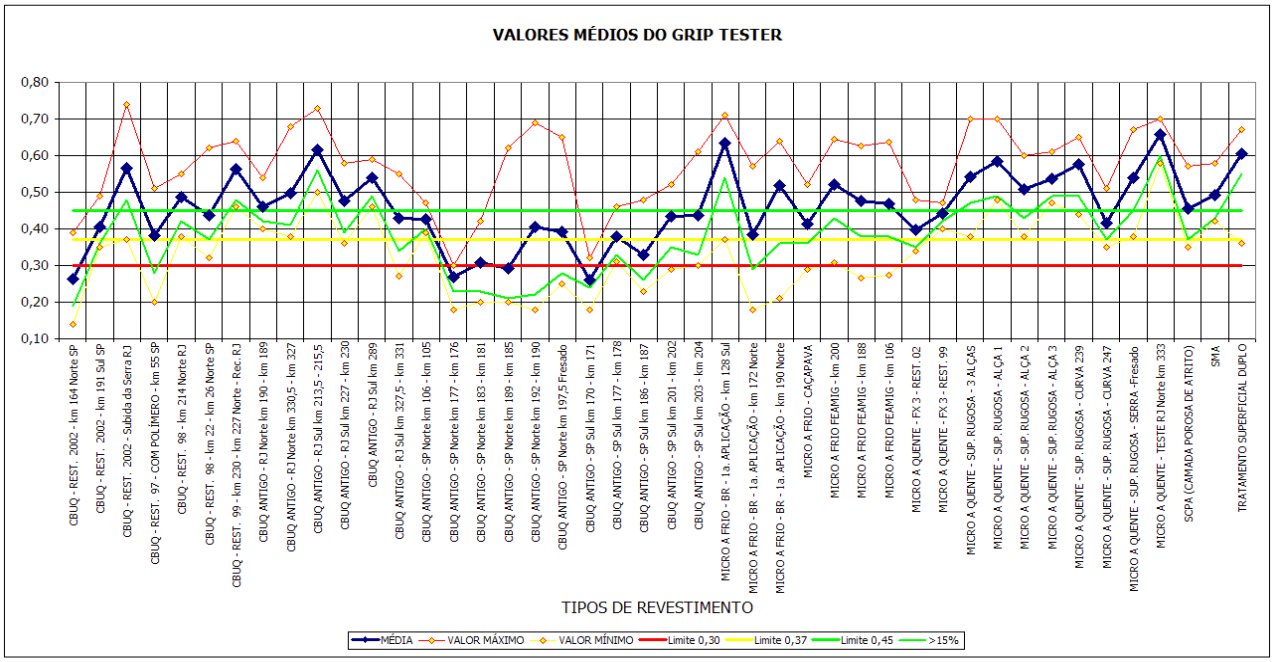
TIPO DE PAVIMENTO	TOTAL DE LEITURAS	MÉDIA	>85%	QUANTIDADE DE PONTOS					
				<0,24	0,24 - 0,30	0,31 - 0,37	0,38 - 0,44	0,45 - 0,51	>0,52
CBUQ RESTAURADO NOS ÚLTIMOS 6 ANOS	255	0,44	0,37	8	15	17	56	58	101
				3%	6%	7%	22%	23%	40%
				3%	9%	16%	38%	60%	100%
CBUQ ANTIGO RJ > 8 ANOS	155	0,50	0,44		6	8	27	59	55
					4%	5%	17%	38%	35%
					4%	9%	26%	65%	100%
CBUQ ANTIGO SP > 8 ANOS	175	0,36	0,28	19	61	34	35	11	15
				11%	35%	19%	20%	6%	9%
				11%	46%	65%	85%	91%	100%
CBUQ ANTIGO > 8 ANOS	330	0,43	0,35	19	67	42	62	70	70
				6%	20%	13%	19%	21%	21%
				6%	26%	39%	58%	79%	100%
CPA (CAMADA POROSA DE ATRITO)	11	0,46	0,37			3	2	3	3
						27%	18%	27%	27%
						27%	45%	73%	100%
MICRO A FRIO - BR - 1a. Aplicação	77	0,54	0,44	4	3	6	11	6	47
				5%	4%	8%	14%	8%	61%
				5%	9%	17%	31%	39%	100%
MICRO A FRIO - FEAMIG	207	0,48	0,39		3	29	41	42	92
					1%	14%	20%	20%	44%
					1%	15%	35%	56%	100%
MICRO A FRIO TOTAL	284	0,50	0,40	4	6	35	52	48	139
				1%	2%	12%	18%	17%	49%
				1%	4%	16%	34%	51%	100%
MICRO A FRIO - CAÇAPAVA	82	0,41	0,36		2	16	44	18	2
					2%	20%	54%	22%	2%
					2%	22%	76%	98%	100%
MICRO A QUENTE - EXPERIMENTAL RJ Norte km 333	31	0,66	0,60						31
									100%
									100%
MICRO A QUENTE FAIXA 3 ISSA	32	0,42	0,39			8	13	11	
						25%	41%	34%	
						25%	66%	100%	100%
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA SP - TREVO FERNÃO DIAS	33	0,54	0,47				3	8	22
							9%	24%	67%
							9%	33%	100%
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA - RJ CORREÇÃO DE CURVAS E SERRA	90	0,51	0,44			2	19	18	51
						2%	21%	20%	57%
						2%	23%	43%	100%
MICRO A QUENTE - SUP. RUGOSA	123	0,52	0,45			2	22	26	73
						2%	18%	21%	59%
						2%	20%	41%	100%
SMA - STONE MATRIX ASPHALT	8	0,49	0,43				3	2	3
							38%	25%	38%
							38%	63%	100%
TRATAMENTO SUPERFICIAL	36	0,61	0,55			1		1	34
						3%		3%	94%
						3%	3%	6%	100%

Os resultados de "*Grip Number*" obtidos na Rodovia Presidente Dutra, para os diferentes tipos de revestimentos, são apresentados na Tabela 3.8, de forma agrupada. Na Figura 3.37 apresentam-se também os valores médios, mínimos e máximos absolutos estatísticos, para 85% do universo de dados obtidos no levantamento.

Tabela 3.8. Resultados de "*Grip Number*" em distintos revestimentos da Rodovia Presidente Dutra

Tipo de Revestimento asfáltico	*GN*
CBUQ com até 4 anos	0,37
CBUQ com até 7 anos	0,35
Camada porosa de atrito (CPA)	0,37
Microrevestimento à frio	0,40
Micro revestimento à quente (Faixa III ISSA)	0,39
Micro revestimento à quente (Rugoso)	0,45
Stone Matrix Asphalt (SMA)	0,43

Figura 3.39. Valores médios do "*Grip Tester*" obtidos em diferentes segmentos da Rodovia Presidente Dutra



A finalidade de se controlar a resistência à derrapagem é a de procurar minimizar a possibilidade de ocorrência de acidentes, tendo em vista que sem uma resistência adequada o motorista pode ter dificuldade em manter controle direcional ou capacidade de frenagem em uma superfície molhada. O controle direcional pode ser perdido quando o pneu e o pavimento são separados por uma lâmina de água (hidroplanagem dinâmica) ou por um filme fino de contaminantes (hidroplanagem viscosa). No primeiro caso tem-se uma lâmina d'água espessa (devido à drenagem superficial insuficientes sob chuva intensa) associada a excesso de velocidade do veículo. No segundo caso, o problema pode ser evitado mantendo-se a superfície limpa de óleo ou de outros materiais derrapantes, como é o caso do próprio asfalto quando se tem exsudação na superfície".

3.1.10. Relação de óxido de cálcio na cal hidratada para efeito de Adesividade

Depois da avaliação do comportamento da cal hidratada como aditivo melhorador de adesividade, constatou-se que algumas davam resultados aquém do esperado. Foi iniciada então uma avaliação

do teor de óxido de cálcio para avaliar a qualidade dos cales. A necessidade de se ter uma avaliação do comportamento das diferentes cales levou ao desenvolvimento desta pesquisa.

Foram utilizados agregados de matrizes diversas para a avaliação do comportamento de uma mistura betuminosa com diferentes teores de Óxido de Cálcio (CaO).

Foram utilizadas diversas faixas granulométricas, mas resultados obtidos em ensaios anteriores mostraram que a adição de cal hidratada a uma mistura betuminosa melhora significativamente a adesividade da mistura independente da matriz da rocha e da curva granulométrica. O teor de cal adotado em todas as misturas foi 1,5%, escolhido por se tratar do teor mínimo para confiabilidade de dosagem na usina.

Como se pode perceber, as porcentagens de Óxido de Cálcio disponíveis ultrapassavam os 40%, o que nos davam valores de danos por umidade induzida – AASHTO T283 acima de 75%. O resultado do Resíduo da Resistência à Tração – RRT - obtido com a mistura sem cal foi 30%. Com isto foi traçado um gráfico mostrando uma relação direta entre a porcentagem de óxido de cálcio e o Resíduo de Resistência a Tração.

3.1.11. Avaliação do teor de asfalto em volume dos projetos de misturas utilizados na Rodovia Presidente Dutra

Normalmente os projetos de dosagem indicam sempre o teor de asfalto em porcentagem sobre o peso da massa. Este tipo de informação pode estar distorcido, visto que, com a variação da densidade do agregado, a quantidade de asfalto em volume é alterada, surgindo discussões e dúvidas em relação à porcentagem de asfalto nas misturas.

Nesta pesquisa foram analisados 66 projetos de misturas betuminosas, com diferentes percentuais de asfalto elaborados no CPR nos últimos anos para avaliar a sua porcentagem em volume, ou seja, a quantidade de asfalto realmente disponível para a mistura. Foram empregados em todos os processos o método de dosagem Marshall como indicado pelo “The Asphalt Institute”, adotando os novos métodos de ensaios da AASHTO e algumas das recomendações para projeto do SUPERPAVE.

Pode-se observar que há uma menor variação nos teores quando avaliados a porcentagem de asfalto em volume, para misturas com granulometrias dentro dos limites da faixa III da DERSA, similar à faixa B’ adotada na Rodovia Presidente Dutra.

Em função dos resultados encontrados foram obtidos os seguintes parâmetros calculados:

Considerando o teor ótimo de asfalto adicionado:

- Para teores de asfalto em peso, o coeficiente de variação absoluto é de 50 % e o estatístico é de 24 %.
- Para teores de asfalto em volume, o coeficiente de variação absoluto é de 33 % e o estatístico é de 20 %.
- Teor médio de asfalto em volume de 12,6 % e 80 % dos valores calculados estão entre 11,5 % e 13,8 %.
- Considerando o teor ótimo de asfalto efetivo, temos:
- Para teor médio de asfalto em volume de 11,6%, 80 % dos valores calculados estão entre 10,7 % e 12,6 %.
- Para teores de asfalto em peso, o coeficiente de variação absoluto é de 41 % e o estatístico é de 21 %.
- Para teores de asfalto em volume, o coeficiente de variação absoluto é de 30 % e o estatístico é de 18%.

Conclusão e Recomendação

Considerando os valores encontrados pode-se verificar que a dosagem de asfalto por volume é mais precisa, porque elimina o efeito da variação da densidade.

Em função disso, recomenda-se que nos projetos de misturas asfálticas e nos controles de rotina das usinas de asfalto, seja considerado na análise crítica, além do teor de asfalto em peso, o teor de asfalto em volume, e suas tolerâncias.

3.1.12. Avaliação da necessidade de aplicação do método Rice para controle do volume de vazios de ar obtido no campo em misturas asfálticas

O controle de obras é um processo que envolve ensaios que, se não aplicados corretamente, podem levar a conclusões distorcidas do estado de uma camada betuminosa na pista.

Pode-se chegar à conclusão de haver porcentagem de vazios baixa (<2%) ou alta (>7%) quando a realidade é que os mesmos estão dentro de limites aceitáveis. A recíproca também é verdadeira, pode se aceitar um segmento com porcentagem de vazios fora da especificação, o que pode levar a uma falência prematura da camada.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar se a Densidade Máxima Efetiva da Mistura Solta (DMT), AASHTO T 209, chamado de método de Rice, é efetivo como controle de obra, em função das variações diárias que ocorrem na usina.

Observou-se que, em pedreiras comerciais, com várias bancadas, há uma variação da densidade da rocha, o que pode gerar teores de asfalto diferentes e também à porcentagem de vazios alteradas.

Para a avaliação da porcentagem de vazios, foram adotados os valores encontrados no controle diário de compactação da Construtora Via-Dragados, tendo sido feito uma Densidade Máxima Efetiva da Mistura Solta (DMT) diariamente, no laboratório do CPR. Dos valores de densidade de pista, foi extraída uma média diária dos resultados e estes valores foram comparados.

Na obra foram usados dois projetos de mistura betuminosa sendo o primeiro do dia 15/03/04 até o dia 30/06/04, quando foi substituído por outro. Os teores de asfalto adicionado permaneceram iguais, 4,7% em peso. A densidade da rocha e a absorção variaram significativamente.

A DMT do projeto variou. No projeto de mistura executado no dia 15/03/04 era 2,555 e no de 02/07/04 a DMT passou para 2,572. É usual no Brasil, controlar a densidade de pista em relação às de projeto, seja por grau de compactação ou por porcentagem de vazios.

Estas variações de densidade da rocha são complicadoras para o controle de qualidade visto que na Usina de asfalto, podem ocorrer alterações significativas na porcentagem de asfalto. Quando a Densidade da Rocha é alterada, o volume do agregado pesado na usina varia e como o asfalto é dosado em peso da mistura total ocorre um aumento ou redução do teor de asfalto na massa.

Esta variação também ocorre em relação à densidade de pista, pois uma rocha mais leve vai levar a uma densidade aparente mais baixa, gerando um grau de compactação aparentemente menor, o que pode levar a uma não conformidade da camada, por não atender aos limites especificados. Da mesma maneira ocorre quando a densidade da rocha aumenta, e muitas vezes se chega à porcentagem de vazios negativos, se não se avalia constantemente o valor encontrado.

Conclusões

Pode-se verificar que o método de Rice para controle de obra é bastante efetivo, principalmente quando a pedreira tem várias bancadas e pontos diferentes de exploração. O controle efetivo de qualidade acontece quando são consideradas todas as variações ocorridas, tanto no agregado como na dosagem da mistura na usina de asfalto, principalmente se levar em conta que as densidades dos agregados graúdos e miúdos são também diferentes. O método RICE mede a densidade da massa solta com todos os seus componentes, tais como, agregados, cal hidratada e Cimento asfaltico.

Recomendação

Recomenda-se que nos controles de rotina das usinas de asfalto, seja considerado para efeito de cálculo da porcentagem de vazios na pista, o método de Densidade Máxima Efetiva da Mistura Solta (DMT), AASHTO T 209, "RICE", medida no dia da aplicação da massa na pista.

3.1.13. Determinação em laboratório da resistência à fadiga de misturas asfálticas

Esta pesquisa foi a primeira desenvolvida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias no âmbito de investigar a resistência à fadiga de misturas asfálticas em laboratório, por meio de ensaios simples, utilizados na época da sua execução.

Objetivo

O objetivo principal deste estudo foi avaliar a resistência à fadiga de misturas asfálticas usualmente utilizadas na Rodovia Presidente Dutra na década do ano 2000, com ligantes asfálticos convencionais e modificados por polímero e por borracha moída de pneus.

Materiais

A Tabela 3.9 mostra quatro misturas asfálticas que foram ensaiadas no CPR da NovaDutra, à temperatura de 250C e utilizando três velocidades de carregamento (0.2, 0.5 e 1.3 mm/min, em termos nominais). A Tabela 3.10 mostra os parâmetros cuja determinação é imediata, de acordo com os procedimentos já descritos.

Tabela 3.9. Misturas asfálticas ensaiadas

Ligante	Penetração a 25°C (0,1 mm)	V_V (%)	p_B (%)	% #200
CAP 20	55	4,1	4,7	6,6
CAP 40	36	4,1	5,0	6,6
CAP com Borracha	52	4,1	5,8	6,6
CAP com SBS	57	4,0	4,7	6,6

Métodos

Toda a caracterização foi efetuada utilizando os corpos-de-prova cilíndricos que são adotados no Método de Dosagem Marshall, através de um procedimento de ensaio que é rápido o bastante para ser incorporado a uma dosagem convencional, de modo a se dispor de uma avaliação quantitativa do potencial que diferentes formulações para a mistura asfáltica têm em termos de resistir à formação de trincas por fadiga.

A ruptura de um sólido se dá pela exaustão da energia de ligação interna do material, decorrente do trabalho efetuado pelas cargas externas. No caso do CBUQ, esta energia de ligação está

associada diretamente à coesão que o asfalto adiciona à matriz de agregados. Uma expressão geral da velocidade de perda de energia de ligação WR do material é dada pela chamada equação cinética:

onde:

W_{R0} = energia de ligação inicial, do material sem fadiga;

t = tempo;

σ = tensão aplicada;

n = expoente da lei de fadiga (função da temperatura);

η = viscosidade dissipativa da mistura (função da temperatura e do tempo de aplicação de carga).

Em um ensaio dinâmico, o parâmetro η é dado por:

$$\eta = \frac{|E^*| sen\phi}{\omega}$$

onde:

$|E^*|$ = módulo dinâmico;

ω = freqüência de aplicação de carga (rad/s);

ϕ = ângulo de fase entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante (rad).

O ângulo de fase pode ser calculado por:

onde:

$b_0 = -20.05586$ $b_1 = 7.007547 \times 10^{-2}$

$b_2 = -2.899322 \times 10^{-2}$ $b_3 = 3.605885$

$b_4 = -1.237843 \times 10^{-3}$ VFA = relação betume-vazios = 100 V_B/VAM

T_{abs} = temperatura absoluta (Kelvin) = T(^{0}C) + 273,15

Em um ensaio de fadiga realizado em cargas repetidas com pulsos de tensão de tração σ de duração Δt_c, haverá uma perda de energia de ligação produzida por um pulso de tensão individual dada por:

$$\delta W_R = \frac{-1}{\eta} \frac{\sigma^n}{W_{R0}^{n-2}} \Delta t_c$$

de modo que, após N_f repetições de carga, a energia de ligação total W_{R0} estará completamente exaurida, levando à formação de uma trinca de fadiga. Dessa forma:

$$N_f = \frac{\eta W_{R0}^{n-1}}{\Delta t_c}\left(\frac{1}{\sigma}\right)^n$$

que é a conhecida lei de fadiga observada em ensaios a tensão controlada.

Na lei de fadiga expressa em termos da deformação específica de tração ε em um ensaio de flexão alternada:

$$N_f = K\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^n$$

tem-se que os parâmetros *K* e *n* não são independentes, mas sim fortemente correlacionados por:

$$n = -0.1093 \log_e K + 1.4749$$

de modo que:

$$N_f = K\left|E^*\right|^n\left(\frac{1}{\sigma}\right)^n = \frac{\eta W_{R0}^{n-1}}{\Delta t_c}\left(\frac{1}{\sigma}\right)^n$$

o que leva a:

$$W_{R0} = \left(\frac{\omega K \Delta t_c}{sen\phi}\right)^{\frac{1}{n-1}}\left|E^*\right|$$

de onde se pode determinar o parâmetro WR0, se o valor de n foi determinado previamente.

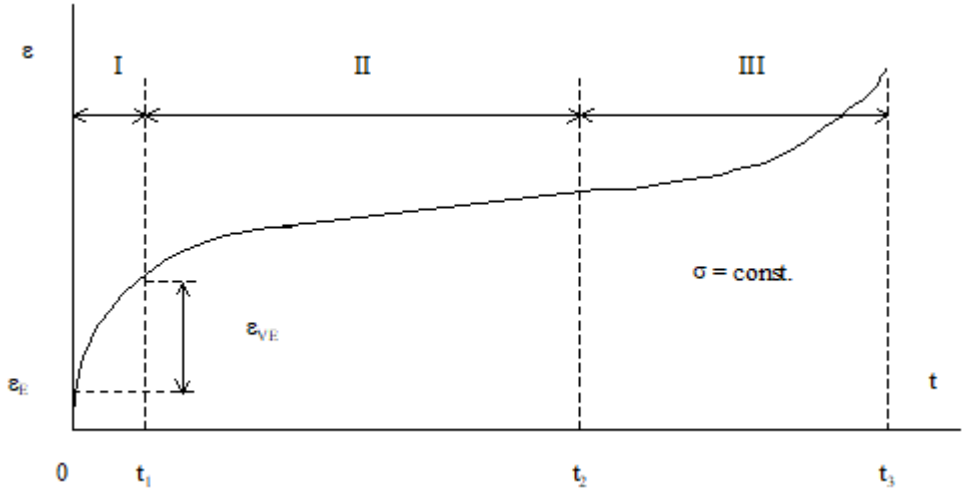
Em um ensaio de *creep* em compressão diametral até a ruptura em concreto asfáltico em termos da evolução do deslocamento vertical ao longo do tempo nota-se a existência de três fases distintas e bem definidas (Figura 3.38) e que podem ser descritas da seguinte forma.

Estágio I: caracterizado pela rápida geração de deslocamentos, a uma velocidade decrescente com o tempo, partindo de uma velocidade inicial infinita (se a carga foi aplicada instantaneamente). Após a deformação puramente elástica, instantânea e simultânea à aplicação da carga, ocorrem as deformações viscoelásticas e as deformações viscoplásticas. A maior parcela das deformações, neste estágio, é das deformações viscoelásticas, que tendem a ocorrer sob uma velocidade decrescente com o tempo, até que se estabilizam, dando início ao:

Estágio II: caracterizado por uma velocidade de deformação aproximadamente constante. A parcela dominante nas deformações é a viscoplástica, cujo acúmulo levará o material à ruptura por cisalhamento ou à abertura de uma trinca, ocasião em que terá início o:

Estágio III: onde a progressão da ruptura implica em redução progressiva da rigidez do corpo de prova. As deflexões são geradas, assim, a uma velocidade crescente com o tempo. É também denominado de *creep* terciário e corresponde ao crescimento da trinca formada no Estágio II em um ensaio em concreto asfáltico, por exemplo, podendo ser descrito pela Lei de Paris. Se se tratar de um ensaio de compressão em um solo, corresponde às deformações de cisalhamento sob tensão constante ao longo dos planos de ruptura formados no Estágio II, relacionando-se com a resistência residual do solo.

Figura 3.40. Ensaio de *creep* até a ruptura em compressão diametral



Qualquer que seja o processo de aplicação de tensões (ensaio dinâmico, cargas repetidas, carga estática ou carga crescente sob velocidade de deformação constante), a equação cinética pode ser integrada para fornecer a expressão da lei de fadiga correspondente. No caso do ensaio estático (*creep*):

$$\int_{W_{R0}}^{0} dW_R = \frac{-\sigma^n}{\eta W_{R0}^{n-2}} t_f = -W_{R0}$$

de modo que o tempo total decorrido até a ruptura é dado por:

$$t_f = \eta W_{R0}^{n-1} \left(\frac{1}{\sigma} \right)^n$$

Basta, portanto, efetuar a ruptura de uma série de corpos-de-prova idênticos, submetendo cada um a uma carga diferente dos demais, medir o tempo total requerido até a ruptura e desenvolver, por regressão linear, o modelo:

$$t_f = a\left(\frac{1}{\sigma}\right)^b$$

de onde se tem:

$$b = n$$

$$a = \eta W_{R0}^{n-1} = \frac{|E^*| sen\phi}{\omega} W_{R0}^{n-1}$$

de modo que se o módulo dinâmico $|E^*|$ a uma certa frequência de carga ω é conhecido, pode-se determinar o parâmetro W_{R0}.

Se o corpo-de-prova for rompido utilizando uma prensa que aplica cargas crescentes sob velocidade de deslocamento constante (caso das prensas de compressão usuais), a equação cinética leva a:

$$\int_{W_{R0}}^{0} dW_R = \frac{-1}{\eta W_{R0}^{n-2}} \int_0^{t_f} \sigma(t)^n dt$$

A variação da tensão aplicada com o tempo (Figura 3.39) pode ser aproximada pela função:

$$\sigma(t) = \sigma_f \left[\alpha \left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha-1} - (\alpha - 1)\left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha} \right]$$

onde σ_f é a resistência à tração e t_f é o tempo total até a ruptura. Esta forma funcional atende a todas as condições de contorno, incluindo as derivadas nulas em t = 0 e em t = t_f, desde que se tenha $\alpha \geq 2$. O parâmetro α deve ser aquele que permita o melhor ajuste entre a função acima e os dados experimentais.

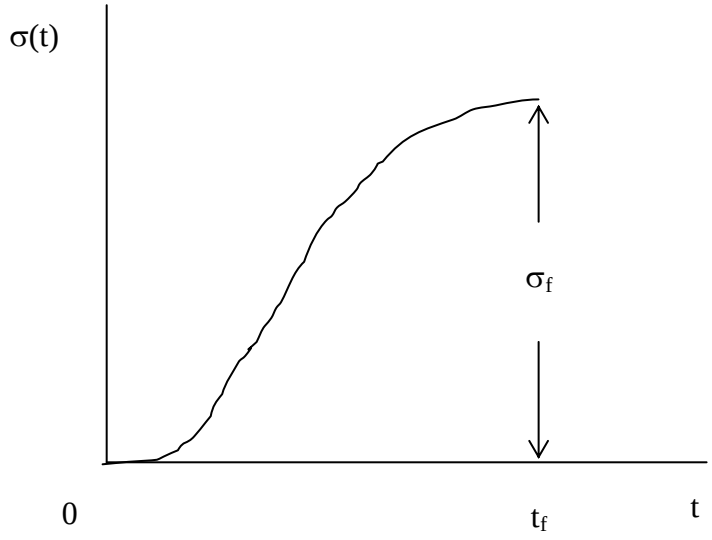
Substituindo esta função na equação anterior:

$$\frac{|E^*| W_{R0}^{n-1} sen\phi}{\omega} \sigma_f^{-n} = \int_0^{t_f} \left[\alpha \left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha-1} - (\alpha - 1)\left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha} \right]^n dt$$

Considerando dois corpos-de-prova idênticos rompidos a velocidades de deslocamento diferentes, pode-se escrever:

$$\left(\frac{\sigma_{f2}}{\sigma_{f1}}\right)^n = \frac{\int_0^{t_{f1}} \left[\alpha\left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha-1} - (\alpha-1)\left(\frac{t}{t_{f1}}\right)^{\alpha}\right]^n dt}{\int_0^{t_{f2}} \left[\alpha\left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha-1} - (\alpha-1)\left(\frac{t}{t_{f2}}\right)^{\alpha}\right]^n dt}$$

Figura 3.41. Ruptura sob velocidade de deslocamento constante



A equação acima pode ser resolvida numericamente de modo a se obter o parâmetro *n* da lei de fadiga. Diferentes velocidades de ruptura levarão a aplicações diversas desta equação, permitindo uma série de determinações de *n*. Embora bastem duas velocidades, é recomendável utilizar ao menos três velocidades distintas, para maior confiabilidade. Além disso, a natureza dessa equação é tal que valores confiáveis para o parâmetro *n* só poderão ser determinados se forem utilizadas duas velocidades significativamente distintas entre si, uma vez que é feita a conta: $(\sigma_{f1} / \sigma_{f2})^n$ = $Integral_1$ / $Integral_2$ e é preciso que a fração $\sigma_{f1} / \sigma_{f2}$ seja bem diferente de 1, na medida em que $1^n = 1$ qualquer que seja o valor de *n*.

Conhecido o valor de *n*, o parâmetro W_{R0} pode ser calculado por:

$$W_{R0}^{n-1} = \frac{\omega \sigma_f^n}{\left|E^*\right| sen\phi} \int_0^{t_f} \left[\alpha\left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha-1} - (\alpha-1)\left(\frac{t}{t_f}\right)^{\alpha}\right]^n dt$$

para qualquer uma das velocidades escolhidas para romper os corpos-de-prova.

Resultados e Conclusões

Na Tabela 3.10 apresentam-se os principais resultados obtidos nas misturas ensaiadas em laboratório. Os resultados obtidos mostraram haver grandes diferenças de resistência à fadiga entre

as misturas analisadas, indicando que mesmo pequenas variações na formulação do material podem ter um impacto significativo em sua durabilidade sob a ação das cargas repetidas do tráfego. Também ficou evidente que não há um tipo específico de ligante betuminoso, modificado ou não, que seja claramente superior aos demais, visto que foi possível a obtenção de elevadas resistências à fadiga com todos os ligantes considerados. Um aspecto que deve ter tido influência neste resultado foi o uso de 1,5% de cal CH-1 em todas as misturas, com seu efeito de melhorar a adesividade asfalto-agregado e a própria resistência do *mastic* betuminoso.

Tabela 3.10. Parâmetros iniciais determinados através dos ensaios

Ligante	n	ε_f (%)	R_T (kgf/cm^2)
CAP 20	3,8364	1,857	13,47
CAP 40	3,3636	2,156	22,46
CAP c/ Borracha	3,1249	1,999	19,76
CAP c/ SBS	2,7849	2,207	17,40

Predominaram misturas com resistências à fadiga moderadas ou baixas sob o uso de CAP 20 ou com asfalto aditivado com SBS, enquanto que o uso de ligantes como CAP modificado por SBS ou CAP 40 levou a misturas de elevada resistência à fadiga, adequadas ao tráfego pesado da Rodovia Presidente Dutra, sob granulometrias bem graduadas na Faixa "C" DNIT, com diâmetro máximo de agregados igual a 12,5 mm e volume de vazios de ar da ordem de 4%.

3.1.14. Avaliação do desempenho de camadas de mistura asfáltica reforçada com geogrelha flexível, com relação à trincamento por fadiga e reflexão de trincas de camadas inferiores do pavimento

A ação combinada do tráfego e do clima leva os revestimentos a trincarem, mais cedo ou mais tarde. Uma vez que uma trinca surja, ela aumenta em extensão, severidade e intensidade, levando, eventualmente, à desagregação do revestimento. Por meio desses efeitos, a velocidade de deterioração do pavimento é usualmente acelerada após o início do trincamento, com efeitos particularmente importantes na progressão dos afundamentos em trilha de roda e da irregularidade.

O problema mais comum quando um recapeamento simples de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) é construído sobre um pavimento asfáltico trincado é a reflexão das trincas ou propagação das trincas das camadas antigas para as novas, que se apresenta após ciclos de carregamento, onde pequenas espessuras de concreto asfáltico não resistem à rápida propagação das trincas. Além disso, o aumento da espessura para atrasar a ascensão da trinca, pode tornar-se economicamente ineficaz, principalmente quando o potencial para ocorrência da reflexão de trincas em camadas asfálticas de recapeamento for elevado.

A reflexão tende a controlar o desempenho do pavimento restaurado, comprometendo a sua vida de serviço e levando a vidas extremamente curtas, no caso de restaurações executadas por meio de recapeamento simples. Um Sistema Anti-Reflexão de Trincas deve ser concebido, definindo-se a natureza dos materiais e as espessuras das camadas constituintes. Estas técnicas costumam envolver o uso de camadas intermediárias especiais, colocadas entre a camada de recapeamento e o pavimento trincado.

Objetivo

Avaliar a aplicação de uma camada de concreto betuminoso usinado à quente reforçada com geogrelha flexível com relação ao trincamento por fadiga e reflexão de trincas, comparando-o com o de camadas do mesmo concreto betuminoso sem reforço, em segmentos com mesmas características estruturais e condições de deflexões.

Metodologia

Execução do trecho teste executado com o concreto reforçado em um segmento de 300m em terceira faixa nas proximidades do km 211 PS – SP, situado em trecho de restauração programado para os anos de 2004 e 2005, entre os km 211 e 217 PS – SP.

Esta situação permite a execução da pista teste em trecho de restauração com concreto betuminoso normal, o que já configurará a outra pista de comparação.

Aplicação

A restauração de um pavimento através do sistema de reforço com Hatelit C 40/17 segue, basicamente, os procedimentos normais de uma restauração convencional. A única atividade adicional com relação ao recapeamento simples é desenrolar a bobina do Hatelit (não requer mão-de-obra especializada). A facilidade de instalação garante a minimização de riscos de mau funcionamento por problemas construtivos. As etapas da aplicação serão descritas a seguir:

- *Primeiro Passo:*

Como primeiro passo, foi realizada uma Fresagem na espessura de corte de 5 cm (Figura 3.42): Esta atividade tem por finalidade reduzir o potencial para a reflexão das trincas na forma de eliminar a erosão dos bordos entre as paredes das trincas e reduzir o comprimento das mesmas. Em alguns segmentos, devido às deformações permanentes excessivas na estrutura de pavimento, a espessura de corte não atingiu os 5,0 cm.

Figura 3.42. Fresagem do revestimento asfáltico existente



- *Segundo Passo:*

Limpeza da pista: Para a retirada de material solto, foram utilizados varreduras mecânicas e ar comprimido para retirada de poeira, com o objetivo de garantir perfeita aderência do Hatelit na superfície, proporcionando uma interface ativa e eficaz.

- *Terceiro Passo:*

É recomendável a utilização de caminhão espargidor, provido de tacômetro e munido de barra distribuidora calibrada e aferida para garantir perfeita taxa da aplicação de emulsão asfáltica catiônica RR-1C. Lamentavelmente este tipo de veículo não foi fornecido pela SERVENG CIVILSAN S/A, construtora executora, por se tratar de um trecho de pequena extensão sendo utilizado por este motivo caneta espargidora. A taxa usual recomendada pelo fabricante da geogrelha é 0,5 l/m2 de resíduo asfáltico após ruptura e cura da emulsão. Esta película de material betuminoso deve ser suficiente para fazer a ligação entre o Hatelit e o pavimento existente.

- *Quarto Passo:*

Colocação do Hatelit, imediatamente após a ruptura e cura da emulsão. Este passo pode ser efetuado manualmente ou com ajuda de uma bobina instalada em uma pá carregadeira com a concha levantada, desenrolando-se a bobina de Hatelit sobre a pista. No caso descrito, foi efetuada a colocação de forma manual por se tratar de um trecho de pequena extensão (Figuras 3.43 a 3.45).

Figura 3.43. Colocação do Hatelit, imediatamente após a ruptura e cura da emulsão



Figura 3.44. Vista parcial da geogrelha Hatelit C 40/17 instalada



Figura 3.45. Vista parcial da geogrelha Hatelit C 40/17 instalada



- *Quinto Passo:*

Aplicação da camada de concreto betuminoso correspondente ao reforço projetado sobre o Hatelit, na espessura de 5 cm. A temperatura da mistura foi de 145oC, Figuras 3.46 e 3.47.

Figura 3.46. Temperatura de lançamento da massa asfáltica



Figura 3.47. Aplicação do concreto asfáltico sobre Hatelit C 40/17



- *Sexto Passo:*

Compactação da camada de concreto betuminoso correspondente ao reforço, segundo procedimento convencional.

3.1.15. Avaliação do comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos, projetados pelos métodos Marshall e Superpave, sob ação de tráfego simulado em modo acelerado por Heavy Vehicle Simulator, em conjunto com os laboratórios da USP e da UFRJ

Entre outubro de 2005 e março de 2006, fez-se um estudo para avaliar o comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos sob a ação de um simulador de tráfego. Este estudo foi realizado pela concessionária CCR NovaDutra, através do seu Centro de Pesquisas Rodoviárias e dentro do plano de pesquisas junto a ANTT. Neste estudo, a pesquisa procurou determinar o comportamento das distintas misturas de CBUQ confeccionadas com base em métodos de dosagem diferenciados e empregando-se quatro tipos de ligantes. Como o que se queria era promover um estudo comparativo entre o comportamento de distintos ligantes asfálticos e métodos de dosagem, optou-se pela utilização de agregados de fonte única e faixa granulométrica idêntica em todas as misturas.

Objetivo

Avaliação do comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos projetados pelos métodos Marshall e Superpave sob ação de Simulador de Tráfego Linear Móvel

Avaliação laboratorial das misturas asfálticas

A primeira fase da pesquisa foi em laboratório, onde foram realizadas as dosagens de misturas com diferentes ligantes (CAP-20, CAP-40, CAP com polímero SBS e CAP com borracha) pelo método Marshall, com diferentes energias de compactação (75 e 90 golpes) e pelo método Superpave.

Na fase seguinte da pesquisa, foram selecionadas cinco misturas cujos comportamentos foram testados em pista com o Simulador de Tráfego Linear Móvel. Estas misturas encontram-se listadas a seguir, onde após a identificação do tipo de ligante empregado tem-se o método de compactação na dosagem e a energia empregada:

- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20 - Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20 - Superpave 125 giros
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-40 - Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT c/ CAP com polímero SBS - Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT c/ CAP com borracha - Marshall 75 golpes

A Tabela 3.11 apresenta as características de viscosidade dos ligantes asfálticos e os resultados da dosagem das misturas asfálticas, com diversos ligantes asfálticos e energias e tipos de compactação são resumidos na Tabela 3.12.

Tabela 3.11. Viscosidade a 177oC dos ligantes empregados na BR-116/SP

Ligante	sSF	cP
CAP-20	29	60
CAP-40	41	80
Asfalto modificado por polímero SBS	96	270
Asfalto borracha	-	1320

Tabela 3.12. Resumo dos resultados no teor ótimo de cada mistura utilizada na pesquisa

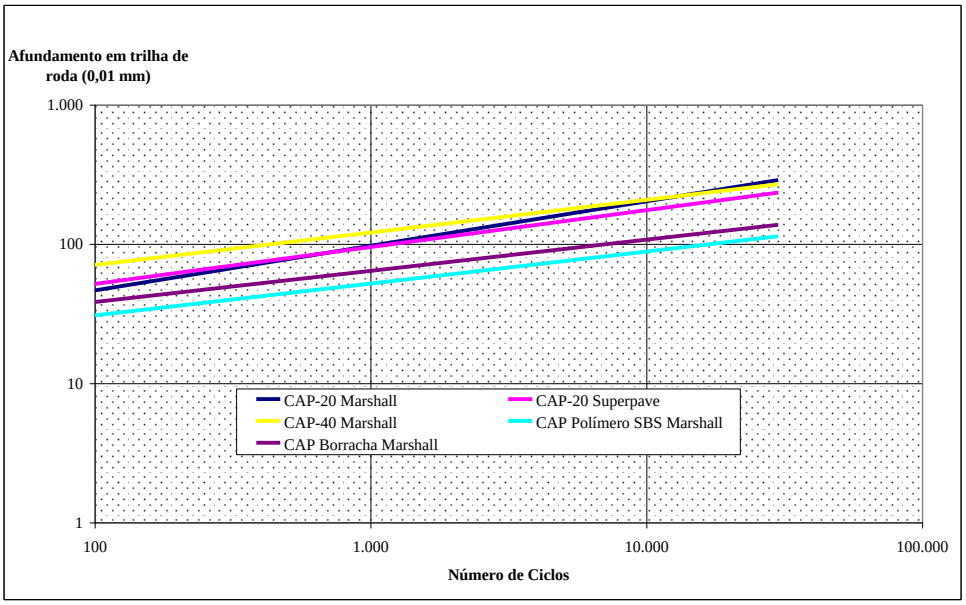
Tipo de Ligante	Método de Dosagem	$D_{máx}$	D	Vv (%)	VAM (%)	CAP (% peso)	Dif CAP-20 (% peso)
CAP-20	Marshall 75 golpes	2.463	2.363	4,1	14,3	4,7	0,0
CAP-20	Marshall 90 golpes	2.468	2.366	4,1	14,0	4,5	0,0
CAP-20	Superpave 125 giros	2.475	2.376	4,0	13,5	4,4	0,0
CAP-40	Marshall 75 golpes	2.459	2.358	4,1	14,7	5,0	+0,3
CAP-40	Marshall 90 golpes	2.470	2.368	4,1	14,1	4,7	+0,2
CAP-40	Superpave 125 giros	2.473	2.376	3,9	13,7	4,6	+0,2
CAP com pol SBS	Marshall 75 golpes	2.462	2.363	4,0	14,3	4,7	0,0
CAP com pol SBS	Marshall 90 golpes	2.468	2.372	3,9	13,5	4,2	-0,3
CAP com pol SBS	Superpave 125 giros	2.483	2.386	3,9	13,0	4,2	-0,2
CAP borracha	Marshall 75 golpes	2.434	2.329	4,3	16,4	5,5	+0,8
CAP borracha	Marshall 90 golpes	2.443	2.344	4,1	15,2	5,0	+0,5
CAP borracha	Superpave 125 giros	2.472	2.370	4,1	13,8	5,5	+1,1

Para a fase seguinte da pesquisa, que consistiu no trecho experimental para avaliação com o HVS (Heavy Vehicle Simulator) foram selecionadas cinco misturas cujos comportamentos foram testados em pista com o Simulador. Estas misturas encontram-se listadas a seguir:

- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20-Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20-Superpave 125 giros
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-40 - Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP com polímero SBS - Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP com borracha - Marshall 75 golpes

Para estas misturas foram realizados os ensaios de Deformação Permanente com simulador de tráfego tipo LCPC francês, com duas placas de cada material coletado da pista, já compactadas e frias, conforme especificação francesa. Estes ensaios de deformação permanente em trilhas de roda foram conduzidos a 60oC até 30.000 ciclos, como especificados nesta norma. As regressões dos resultados de afundamentos em trilha de roda obtidos são apresentadas na Figura 3.48.

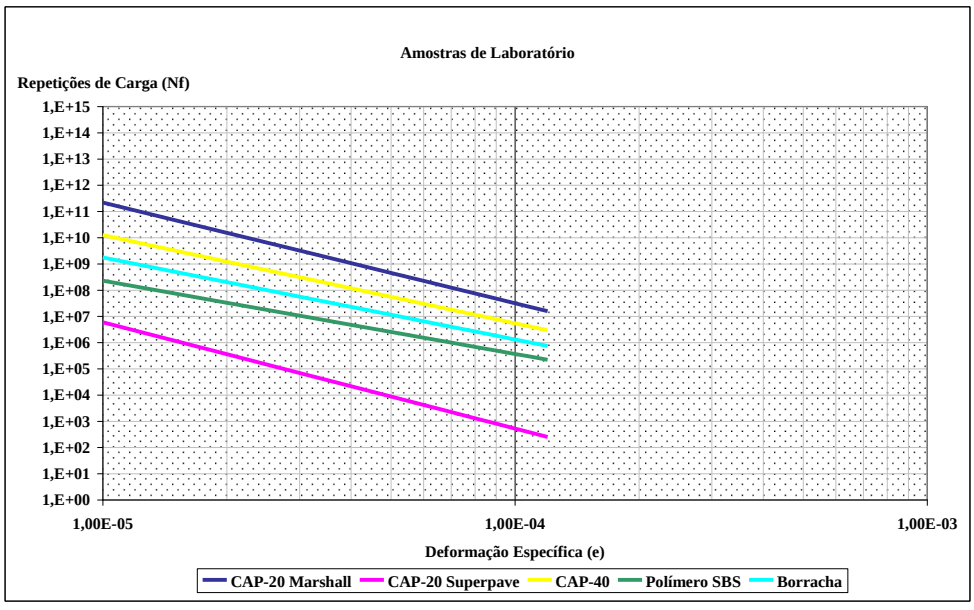
Figura 3.48. Resumo dos ensaios no simulador LCPC para os materiais estudados



Também foi realizada, em laboratório, a determinação da Curva de Fadiga para os cinco tipos de concreto asfáltico em questão, considerando-se as amostras moldadas em laboratório, coletadas na usina e retiradas da pista, totalizando quinze ensaios de cada tipo. Na determinação das curvas de fadiga foram utilizados os procedimentos baseados no uso do ensaio de tração por compressão diametral. Os ensaios foram realizados à temperatura de 25ºC e utilizando três velocidades nominais de carregamento (0,2, 0,5 e 1,3 mm/min). Os resultados gerados são os parâmetros K e n referentes à curva de fadiga, onde ε é a deformação específica de tração na mistura asfáltica. Os resultados são apresentados na Figura 3.49.

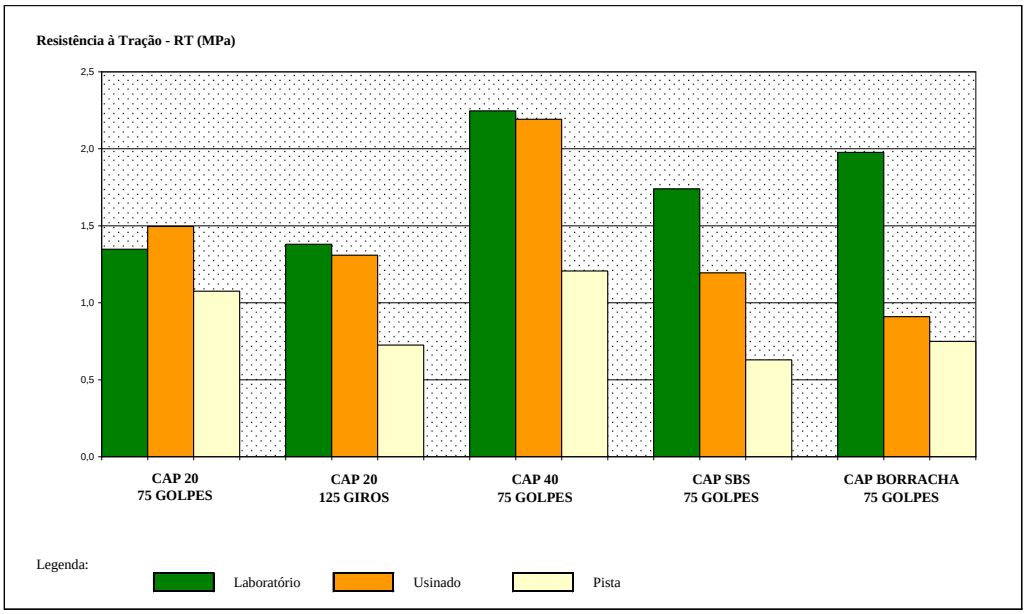
$$N_f = K\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^n$$

Figura 3.49. Curvas de fadiga das misturas asfálticas moldadas em laboratório para a pesquisa



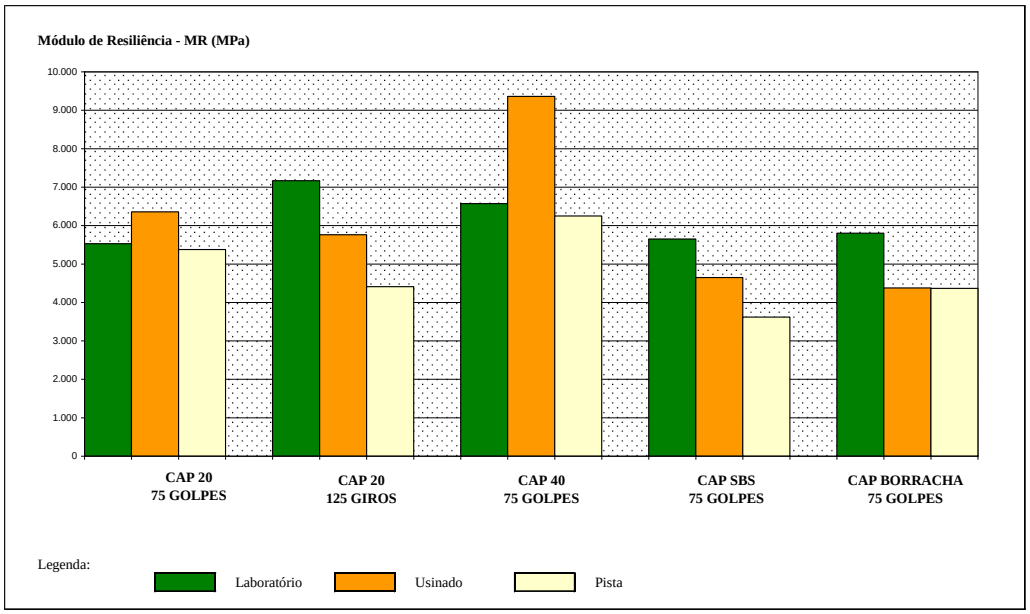
Os resultados dos ensaios de resistência à tração indicam valores maiores para a mistura confeccionada com CAP-40, tanto para as amostras de laboratório quanto para as coletadas na usina e as retiradas da pista, como pode ser observado na Figura 3.50. Para a mistura confeccionada com CAP-20 e dosada pelo método Marshall constatou-se uma menor perda de resistência entre o laboratório e a pista. Já os resultados em laboratório da mistura realizada com este ligante, mas dosada pelo método Superpave, em termos de resistência à tração são semelhantes aos da dosada pelo método Marshall na amostra de laboratório, mas bem inferiores nas amostras de pista. Por fim a maior perda de resistência entre as misturas confeccionadas em laboratório para as coletadas em pista ocorreu com a mistura com CAP polímero SBS, seguida pela mistura com CAP borracha, demonstrando problemas de usinagem e de execução.

Figura 3.50. Gráfico da resistência à tração de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação na BR-116/SP



No que se refere ao módulo de resiliência, observa-se na Figura 3.51, a tendência de redução nos valores obtidos em amostras moldadas em laboratório tanto em relação às coletadas em usina quanto em relação às amostras retiradas da pista, indicando variações entre as distintas etapas do processo, desde o estudo em laboratório (condições controladas) até a aplicação em pista. Os resultados finais indicam valores em pista da ordem de 3.500 a 4.500 MPa para as amostras de CBUQ com CAP borracha, CAP polímero e CAP-20 dosado pelo Superpave; e valores superiores a 4.000 MPa para o CBUQ com CAP-20 e o CBUQ com CAP-40 dosados pelo método Marshall.

Figura 3.51. Gráfico do módulo de resiliência de misturas de laboratório



Construção dos trechos experimentais

A segunda fase da pesquisa refere-se aos estudos do desempenho *in situ* das camadas asfálticas dosadas e estudadas em laboratório, empregando-se o Simulador de Tráfego Linear Móvel ou Heavy Vehicucle Simulator (HVS) e monitorando-se o desempenho da rodovia.

Para a realização dos ensaios acelerados, optou-se pela execução de trechos experimentais consecutivos na alça de acesso da via Dutra (BR-116/SP) com a rodovia D. Pedro (SP-65). O local, nas proximidades do km 169 da BR-116. O local e a posição das seções-teste é ilustrado na Figura 3.52.

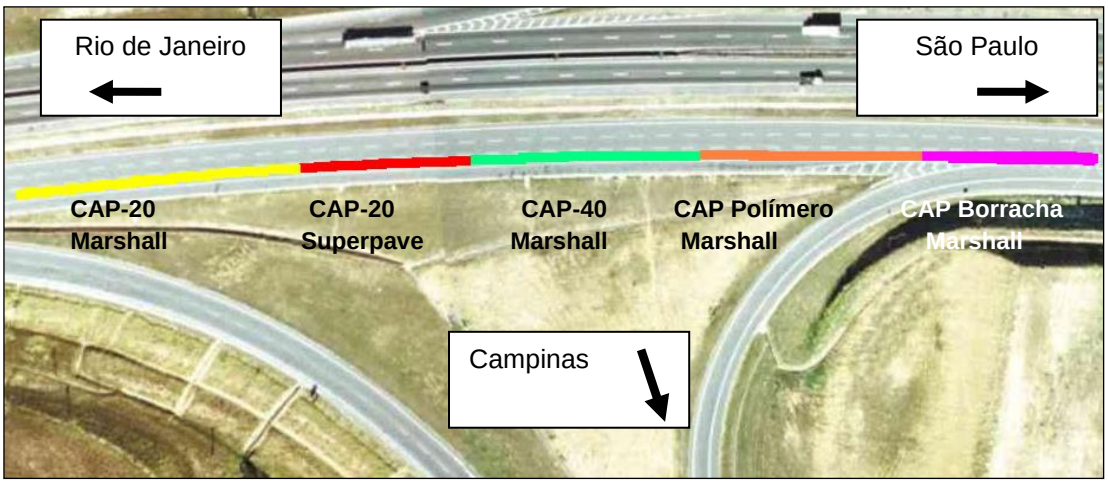
Os dados do projeto de pavimentação da rodovia SP-65 indicaram que o pavimento em questão é do tipo semi-rígido, com revestimento asfáltico sobre base granular. O furo de sondagem aberto no local confirmou esta informação, indicando a seguinte estrutura de revestimento em Concreto Asfáltico (CBUQ) com 120 mm; base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) com 200 mm; sub-base de Brita Graduada Simples (BGS) com 170 mm; reforço do subleito em solo com 210 mm; reforço do subleito com Rachão com 140 mm e subleito.

Durante a execução dos estudos as especificações nacionais para o cimento asfáltico de petróleo foram alteradas, passando a serem classificadas em função dos resultados dos ensaios de penetração, e não mais por sua viscosidade. Assim, de acordo com a resolução número 19 da Agência Nacional do Petróleo, de 11/07/2005, o CAP-20 passou a ser especificado como CAP-50/70 e o CAP-40 como CAP-30-45. Todavia a nomenclatura aqui adotada refere-se à empregada na época do início da pesquisa.

Foram realizados levantamentos deflectométricos empregando-se o FWD no pavimento. Os perfis com os resultados obtidos e a identificação dos locais das seções-teste são apresentados na Figura 3.53, tendo sido realizados ensaios com cargas de 4 e 8 tf no semi-eixo, ao longo de todo o trecho

Figura 3.52. Ilustração do local das seções-teste na BR-116/SP

BR-116/SP - Rodovia Presidente Dutra - km 169



Lengenda:

	Trecho 1	do 87 ao 147	CAP-20 - Marshall
	Trecho 2	do 147 ao 207	CAP-20 - Superpave
	Trecho 3	do 207 ao 267	CAP-40 - Marshall
	Trecho 4	do 267 ao 327	CAP com polímero SBS - Marshall
	Trecho 5	do 327 ao 377	CAP com Borracha - Marshall

Foram retroanalisados os resultados das bacias de deflexão medidas com o FWD, de forma a determinar os módulos de resiliência in situ das camadas do pavimento de cada um dos trechos. Os resultados desta etapa, realizada empregando-se o programa computacional Elmod5, são apresentados na Tabela 3.13.

A execução do trecho consistiu na fresagem de 40 mm do revestimento asfáltico existente na faixa externa de tráfego, seguida da limpeza com jato de ar comprimido, pintura de ligação e recomposição com a mistura asfáltica, atendendo-se à dosagem de cada seção-teste. Os ensaios de controle tecnológico das obras em termos de grau de compactação e espessura são resumidos na Tabela 3.14.

Figura 3.53. Perfil deflectométrico da faixa 1 do dispositivo da BR-116/SP com a SP-65

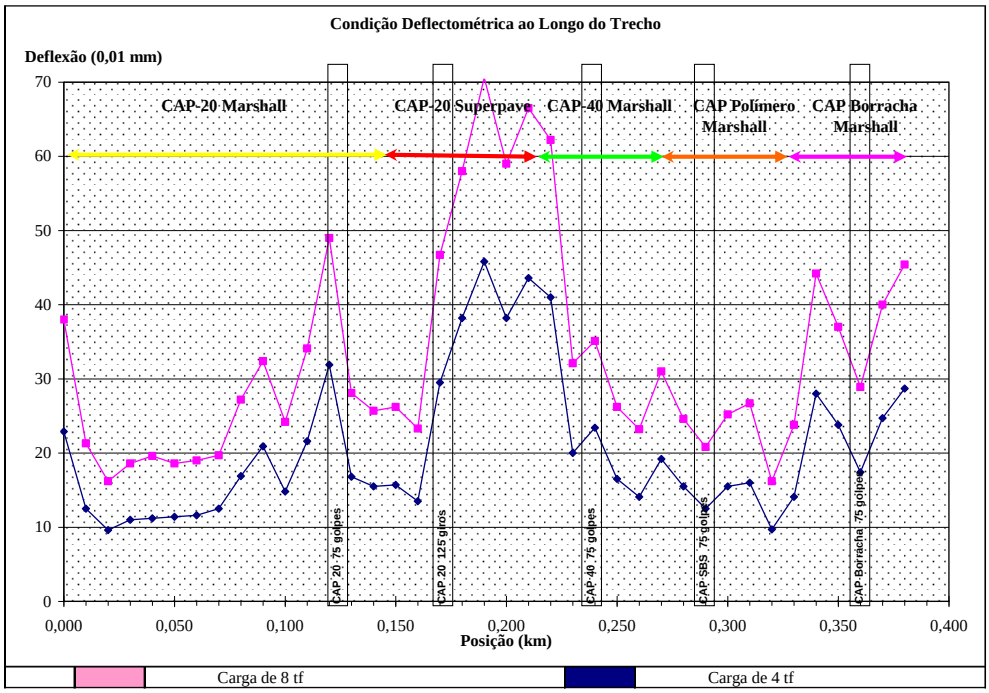


Tabela 3.13. Resultados da retroanálise com dados anteriores à obra de restauração na BR-116/SP

Carga no semi-eixo	Local	Módulos de Resiliência Retroanalisadas (MPa)				
		Revesti-mento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito
4 tf	Trecho 1	1.484	9.439	333	182	212
	Trecho 2	1.107	4.784	204	108	325
	Trecho 3	1.124	7.545	283	158	176
	Trecho 4	4.181	9.489	435	195	190
	Trecho 5	2.091	4.353	188	133	291
8 tf	Trecho 1	1.571	12.455	486	262	199
	Trecho 2	1.645	6.286	257	138	278
	Trecho 3	1.585	9.412	366	207	173
	Trecho 4	4.944	11.179	510	213	167
	Trecho 5	2.095	5.683	227	137	254

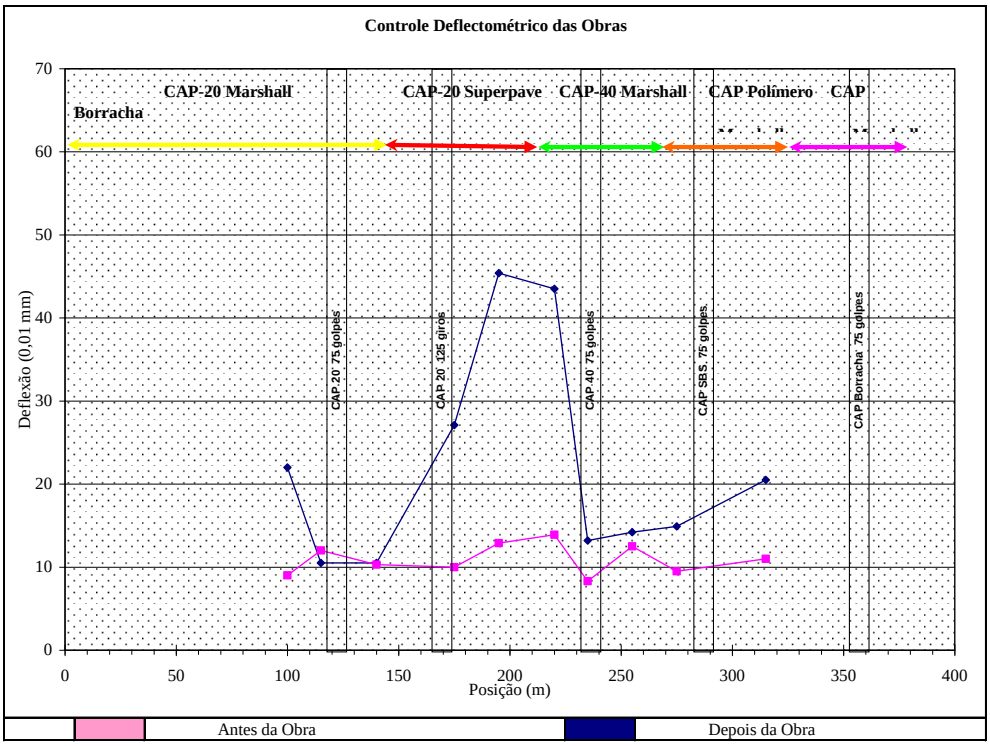
Tabela 3.14. Controle tecnológico das obras na BR-116/SP- Parte 1

Mistura Asfáltica	Volume de Vazios Máximo (%)	Volume de Vazios Mínimo (%)	Espessura Mínima Obtida (cm)
CAP 20 - 75 golpes	7,3%	4,3%	4,4
CAP 20 - 125 giros	8,0%	2,7%	4,1
CAP 40 - 75 golpes	6,3%	3,9%	4,0
CAP SBS - 75 golpes	7,8%	3,3%	3,1
CAP Borracha - 75 golpes	7,9%	3,8%	3,8

Após construção dos trechos experimentais foram realizados os levantamentos deflectométricos com a Viga Benkelman eletrônica, sendo os resultados apresentados na Figura 3.54 de forma comparativa com os valores obtidos com o mesmo equipamento antes das obras de recuperação.

Constata-se o incremento dos níveis deflectométricos praticamente em todo o trecho, havendo maior discrepância entre os valores entre as seções-teste do CAP-20 Superpave e do CAP-40. Todavia os valores encontrados são baixos, especialmente junto às seções-teste.

Figura 3.54. Deflexões medidas com viga Benkelman eletrônica antes e após as obras de fresagens e recomposições na BR-116/SP



Monitoramento dos trechos experimentais

Os testes acelerados foram realizados em conformidade com o método resumido a seguir:

- Movimentos carregados bidirecionais;
- Deslocamento transversal de 150 mm;
- Velocidade do semi-eixo de aproximadamente 10 km/h;
- Carga do semi-eixo de roda dupla de aproximadamente 7,9 toneladas, aferidas com balanças móveis no início dos ciclos em cada seção-teste;
- Simulação de chuvas através do espargimento de 500 litros de água durante uma hora por dia, em períodos descontínuos de 5 a 15 minutos com vazão de 500 litros por hora, em área de 12 m por 2,5 m;
- Medição de temperaturas do pavimento e do ar;
- Monitoramento periódico das condições estruturais e funcionais do pavimento, com medições diárias da deflexão do pavimento, das deformações na trilha de roda, das condições de atrito e textura superficial;
- Registro das demais informações relevantes.

Uma vez que o objetivo da pesquisa era um estudo comparativo de desempenho das distintas misturas asfálticas em pista, os ensaios foram finalizados sempre que se atingiu um total de semiciclos de carga próxima a 250.000 numa seção-teste.

Resultados

A fase de estudos do desempenho das misturas asfálticas em pista é descrita a partir da apresentação de regressões dos dados para a proposição de modelos matemáticos, representativos dos parâmetros de controle, em cada uma das seções-teste. A Tabela 3.15 apresenta a síntese da aplicação de cargas bidirecionais em cada uma das seções-teste.

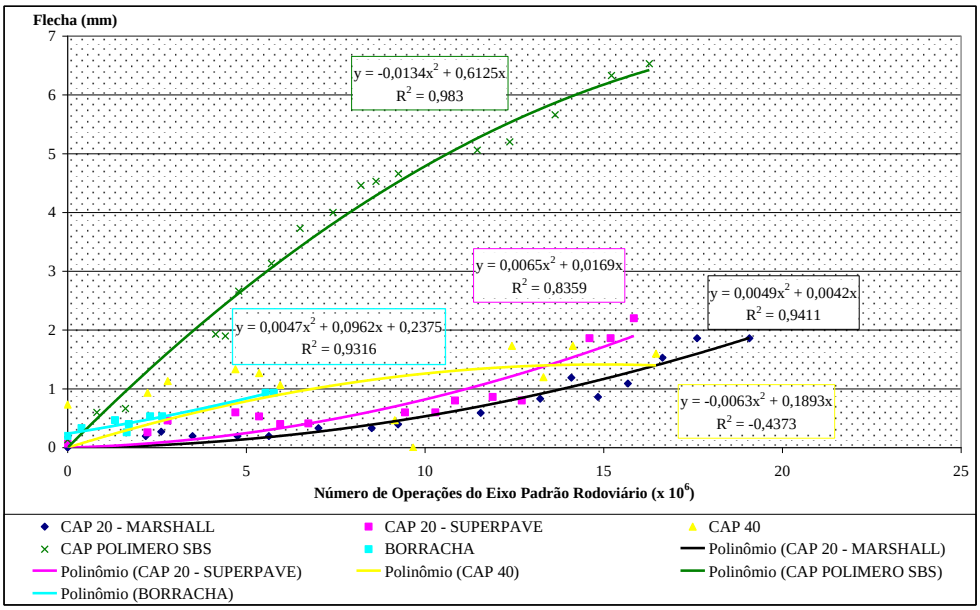
A elaboração dos gráficos com os resultados dos parâmetros técnicos avaliados em cada uma das cinco seções-teste, ao longo do período de simulação em termos de operação equivalente do eixo padrão rodoviário pelo método USACE, permite a concepção de modelos de desempenhos para os distintos tipos de mistura nas condições locais.

Observa-se na Figura 3.55 que somente na seção de CAP com polímero houve evolução significativa no valor de flecha em trilha de roda, sendo constatada flecha superior a 6 mm ao número "NUSACE" de 1,5 x 107, ao passo que nas demais seções os valores finais foram da ordem de 1 a 2 mm, neste nível de solicitação de cargas

Tabela 3.15. Ciclos e operações equivalentes por seção-teste da BR-116/SP

Ligante Asfáltico	Método de Dosagem	Data de Início	Data de Fim	Carga / Ciclos / FC	Número "N"
CAP-20	Marshall	05/10/2005	10/11/2005	7.900 kgf de 0 a 199.838 ciclos (FC=57,49)	$1,90x10^7$
				7.940 kgf de 199.838 a 326.536 ciclos (FC=59,33)	
CAP-20	Superpave 125 Giros	11/11/2005	07/12/2005	7.900 kgf de 0 a 206.900 ciclos (FC=57,49)	$1,60 x10^7$
				7.720 kgf de 206.900 a 286.256 ciclos (FC=49,77)	
CAP-40	Marshall	09/12/2005	02/01/2006	7.900 kgf de 0 a 286.388 ciclos (FC=57,49)	$1,65 x10^7$
CAP c/ polímero SBS	Marshall	04/01/2006	29/01/2006	7.900 kgf de 0 a 283.178 ciclos (FC=57,49)	$1,63 x10^7$
CAP c/ borracha	Marshall	09/02/2006	02/03/2006	6.867 kgf de 0 a 241.300 ciclos (FC=23,93)	$5,77 x10^6$

Figura 3.55. Evolução da Flecha em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”)



Apesar das dispersões e dos baixos valores de R2 todos os valores de macrotextura se mantiveram dentro de parâmetros de excelência exigidos nas rodovias federais concedidas, ou seja, entre 0,6 e 1,2 mm, como pode ser visto na Figura 3.56. Embora haja dispersões e baixos R2 todos os valores de microtextura (expressos em termos de VRD) atenderam o parâmetro usualmente exigido, ou seja, acima de 47. Neste ponto, observam-se na Figura 3.57 valores finais próximos nas cinco pistas, visto que o agregado empregado na camada de rolamento tem a mesma origem em todas as misturas de concreto asfáltico

Figura 3.56. Evolução da macrotextura em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”)

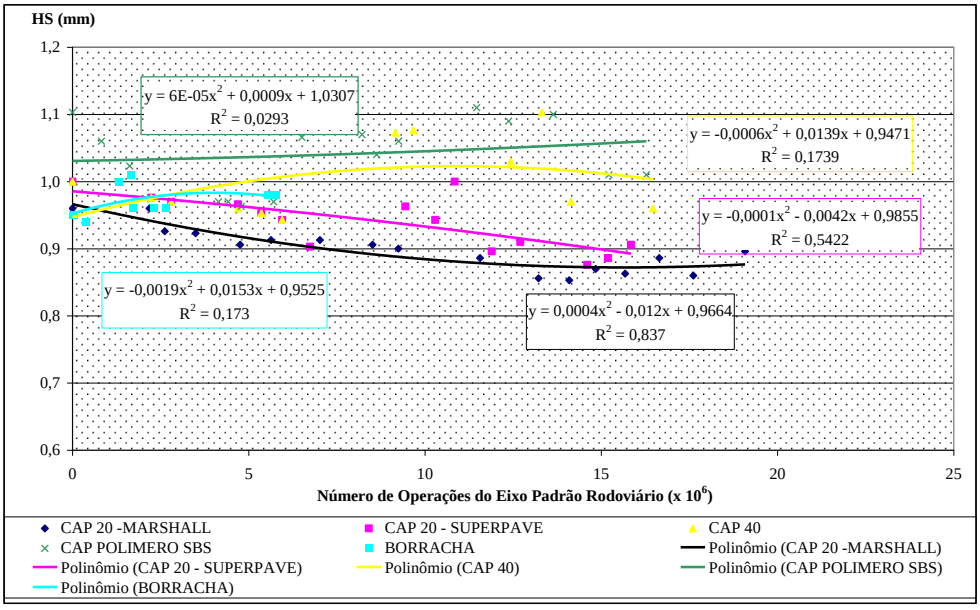
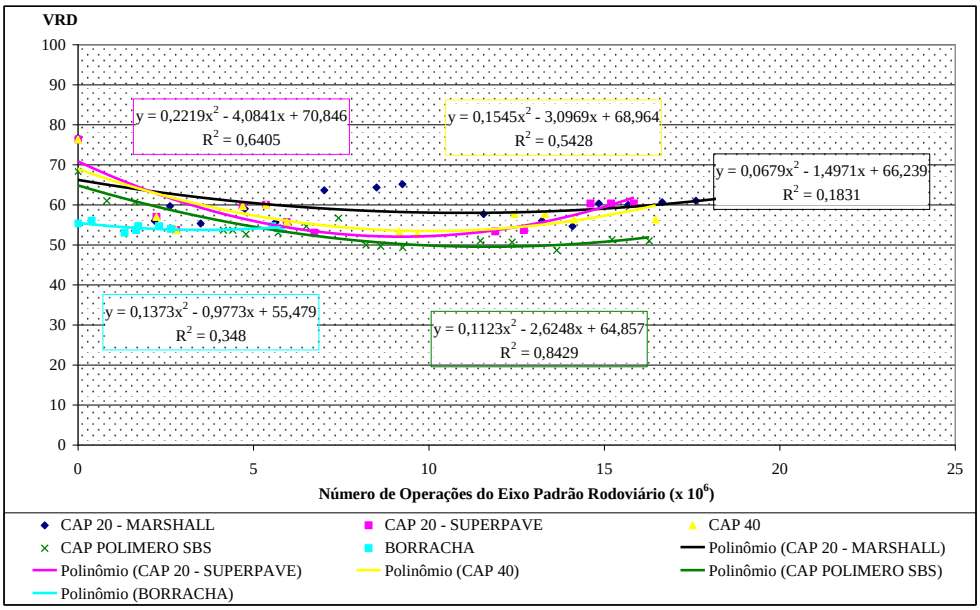


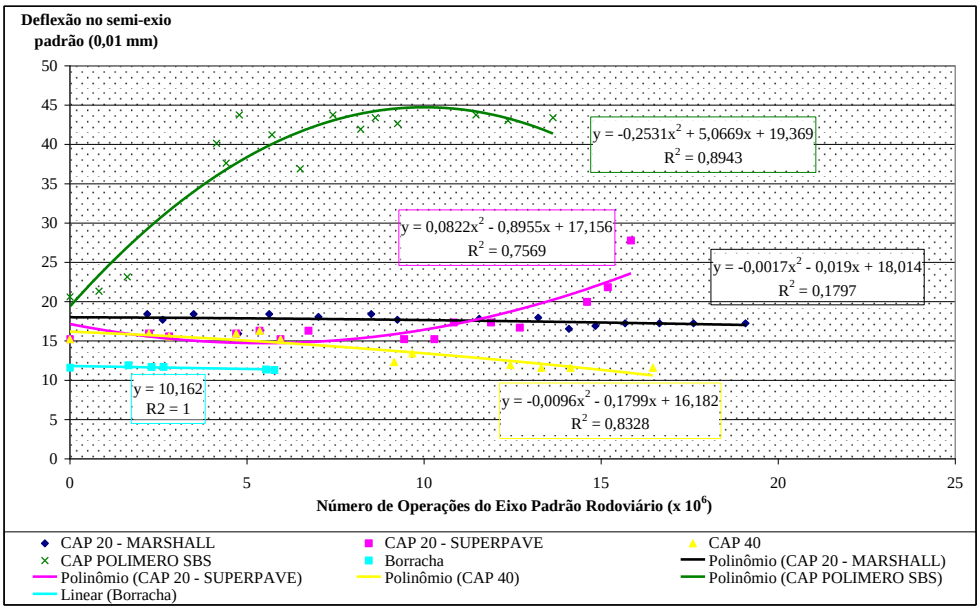
Figura 3.57. Evolução da microtextura em função do número de operações equivalentes do eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”)



Em termos estruturais, constata-se na Figura 3.58 que somente a seção de CAP polímero SBS apresentou uma evolução inicial significativa nos valores de deflexão com posterior estabilização nas leituras. É importante destacar aqui que, embora o modelo tenha indicado uma parábola invertida, na prática, o que se observa no trecho é um rápido crescimento nos valores deflectométricos até 5x106 operação do eixo padrão rodoviário (método USACE), com a estabilização da condição estrutural a partir deste nível de solicitação em valores intermediários, já não compatíveis com o tipo de estrutura em tela. Observou-se também uma tendência de evolução dos valores deflectométricos no trecho do CAP-20 Superpave após 1,5x107 operação do eixo padrão rodoviário (também pelo método USACE).

Constata-se então uma baixa correlação na regressão dos dados do trecho do CAP-20 Marshall sendo, todavia, importante observar que os valores de deflexão se mantiveram praticamente constantes ao longo do período de simulação de tráfego.

Figura 3.58. Evolução da deflexão retificada em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP

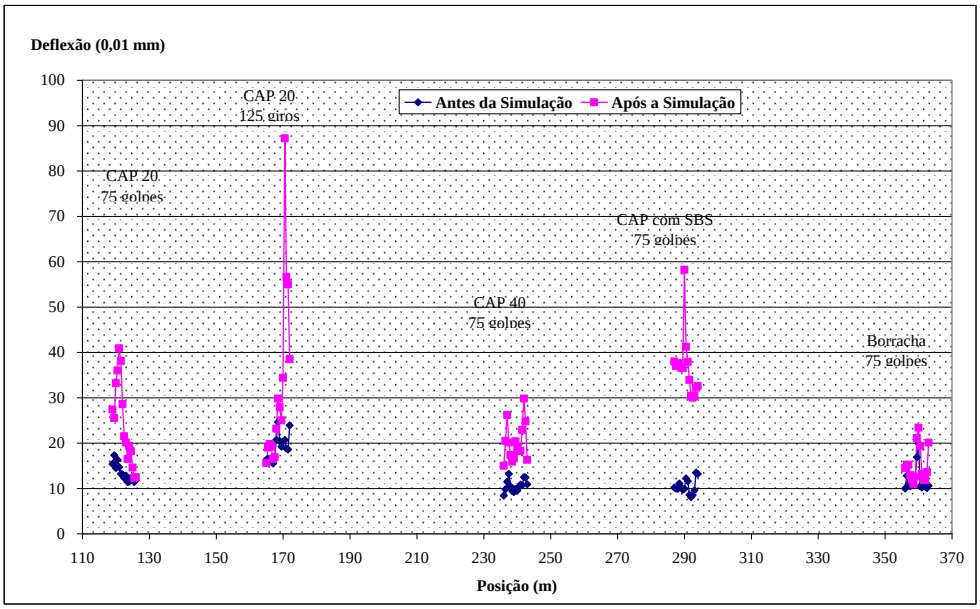


Para que fosse possível fazer comparações, também foram realizados ensaios deflectométricos complementares com o FWD, a cada 0,5m nas seções-teste com os resultados, antes e depois dos ensaios acelerados, apresentados na Figura 3.59.

As variações observadas ponto a ponto se devem ao processo de deterioração do pavimento, que não ocorre de forma constante em toda a seção-teste, inclusive em função das características dos materiais e processos empregados em obras de pavimentação, fato que também é observado em rodovias em operação, onde o processo de deterioração se inicia em alguns pontos para então se manifestar de forma generalizada.

Destaca-se que a seção com CAP polímero SBS foi a que apresentou maior evolução nos níveis deflectométricos como um todo, como constatado no monitoramento ao longo da simulação de tráfego. Todavia, se observa que os pontos finais da seção com CAP-20 Superpave também apresentaram evolução significativa na deflexão ao passo que, no centro desta seção, se manteve estruturalmente estável como observado no monitoramento durante o ensaio acelerado.

Figura 3.59. Evolução das deflexões após a simulação de tráfego na BR-116/SP



Os resultados obtidos na pista executada com emprego de asfalto polímero podem estar associados à ruptura inicial do pavimento, cujas causas remontam a fatores como a pequena espessura executada (aquém do preconizado inicialmente) solicitada por cargas excessivamente elevadas em relação às geralmente praticadas em rodovias brasileiras, o baixo teor de ligante empregado em relação a misturas convencionais, heterogeneidade da mistura propiciando a infiltração prematura da água aspergida na pista etc.

Constata-se na Tabela 3.16 que em todos os casos houve um incremento da deflexão característica após a realização dos testes acelerados, bem como uma maior heterogeneidade de valores (incremento do coeficiente de variação - CV, ou seja, da razão entre o desvio padrão e a média da deflexão).

Tabela 3.16. Evolução dos valores deflectométricos na pesquisa na BR-116/SP

Descrição	Antes da simulação				Depois da simulação				Dc antes/ Dc depois
	D (0,01 mm)	σ (0,01 mm)	Dc (0,01 mm)	C.V.	D (0,01 mm)	σ (0,01 mm)	Dc (0,01 mm)	C.V.	
CAP 20 - 75 golpes	13,3	1,9	15,2	14%	24,3	9,4	33,7	39%	2,22
CAP 20 - 125 giros	19,0	2,8	21,8	15%	32,3	20,0	52,3	62%	2,40
CAP 40 - 75 golpes	10,6	1,3	11,9	13%	20,1	4,2	24,3	21%	2,03
CAP SBS - 75 golpes	10,4	1,6	12,0	16%	36,7	6,8	43,5	19%	3,61
CAP Borracha - 75 golpes	11,9	2,8	14,7	24%	15,2	3,9	19,1	26%	1,30

Conclusões

O estudo de laboratório da fase inicial da pesquisa indicou que teores ótimos de ligantes determinados para o concreto asfáltico faixa C, pelo método Superpave, são praticamente iguais aos obtidos pelo método Marshall com aplicação de 90 golpes. Assim, em ambos os casos, o teor ótimo é da ordem de 0,3% inferior ao teor ótimo obtido pelo método Marshall com 75 golpes num dado ligante. Há que se atentar que esta tendência não foi observada na dosagem do CBUQ com asfalto borracha.

Observa-se também que para o CAP-40 o teor ótimo de ligante foi 0,3% superior ao obtido com o CAP-20. Já o ligante com polímero apresenta esta tendência somente nas dosagens do Superpave e do Marshall 90 golpes, ao passo que no Marshall 75 golpes o teor ótimo foi ligeiramente menor do que o do CAP-20.

Além disto, o CAP borracha exigiu teores adicionais de ligante de 0,8%, 0,5% e 1,1% em relação ao CAP-20 nas dosagens Marshall com 75 e 90 golpes e na dosagem Superpave, respectivamente. Observa-se que o CAP borracha foi o que exigiu maior teor de ligante nos três métodos de dosagem estudados, fato associado a sua maior viscosidade.

Nos ensaios de desempenho em laboratório (em amostras coletadas em pista) para a verificação da deformação permanente da mistura com o simulador LCPC, observou-se que a mistura confeccionada com CAP com polímero foi a que apresentou menores deformações ao final de 30.000 ciclos a 60ºC, sendo um resultado próximo ao obtido com a mistura empregando CAP borracha. Deve-se destacar que não há influência da estrutura do pavimento e das condições de contorno nos resultados, visto que o ensaio é laboratorial num substrato rígido. Neste simulador de laboratório os resultados finais das misturas confeccionadas com CAP-20 e CAP-40 dosados pelo método Marshall com 75 golpes foram muito similares, embora se observe que a tendência das curvas indica que os resultados se devem em grande parte à maior deformação da mistura com CAP-40 logo no início dos ciclos de carga.

Os resultados do simulador LCPC também indicam melhores resultados (menores deformações permanentes ao final de 30.000 ciclos a 60ºC) para a mistura de CBUQ com CAP-20 dosada pelo método Superpave, em relação à mistura dosada pelo método Marshall com 75 golpes, ou seja, menores teores de ligante levam a menor tendência à deformação permanente numa dada mistura.

No que se refere ao módulo de resiliência, observa-se a tendência de redução nos valores obtidos em amostras moldadas em laboratório para as coletadas em usina e outra redução para as amostras retiradas da pista, indicando perdas em todas as etapas do processo, desde o estudo em laboratório (condições controladas) até a aplicação em pista. Os resultados finais indicam valores em pista da

ordem de 3.500 a 4.500 MPa para as amostras de CBUQ com CAP borracha, com CAP polímero e com CAP-20, este último dosado pelo Superpave e valores superiores a 4.000 MPa para misturas com CAP-20 e com CAP-40 dosadas pelo método Marshall.

Com relação à vida de fadiga, constatou-se que para as amostras moldadas em laboratório observam-se melhores resultados permitindo a seguinte hierarquização: (1) CAP-20 Marshall; (2) CAP-40 Marshall; (3) CAP Borracha; (4) CAP polímero SBS e (5) CAP-20 Superpave. Destaca-se a grande diferença entre os resultados das diferentes misturas confeccionadas com CAP-20, indicando a perda de vida de fadiga quando se reduz o teor de ligante da mistura. Já nas amostras retiradas da pista observou-se um ganho em termos de vida de fadiga para o CBUQ com CAP-40 ao passo que os resultados com CAP-20 se mantiveram praticamente constantes. Observou-se também uma melhora menos significativa nos resultados do CAP polímero e do CAP-20 dosado pelo Superpave, bem como uma piora nos resultados para o CAP borracha.

Os ensaios da segunda fase da pesquisa permitem comparar o desempenho das misturas asfálticas na estrutura do pavimento em questão. Todavia, nesta comparação devem ser consideradas as diferenças no total de ciclos e de operações equivalentes de cargas aplicadas nas distintas seções-teste. A Tabela 3.17 resume os resultados obtidos ao término da operação do simulador de tráfego nas cinco seções-teste em tela.

Tabela 3.17. Resumo dos resultados das seções-teste da BR-116/SP

Seção	Tipo de ligante	Método	Número de ciclos	Número de operações Equivalentes	Trincamento (%)	Flecha (mm)	Deflexão (0,01 mm)
1	CAP 20	Marshall	326.536	1,91E+07	8%	1,9	17,2
2	CAP 20	Superpave	286.256	1,58E+07	35%	2,2	27,8
3	CAP 40	Marshall	286.388	1,65E+07	0%	1,6	11,6
4	CAP polímero SBS	Marshall	283.178	1,63E+07	7%	6,5	43,4
5	CAP borracha	Marshall	241.3	5,77E+06	0%	0,9	11,3

Como a variação do número “N” (número de operações equivalentes de carga) entre as quatro primeiras seções-teste e a quita (asfalto borracha) é significativa, a comparação dos resultados deve ser realizada a partir das curvas de desempenho obtidas por tipo de mistura nas seções em questão.

Para efeito comparativo de desempenho das misturas no simulador móvel de tráfego, arbitrou-se no presente estudo a extrapolação dos resultados para 1,5x107 operações do eixo padrão

rodoviário, o que reduz a necessidade de extrapolação de valores. Para tal nível de solicitação, podem-se constatar os valores apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18. Resultados das seções-teste ao final de 1,5 x 107 operações do eixo padrão rodoviário pelo método USACE

Parâmetro	**Tipo de Ligante e Método de Dosagem Empregado**				
	CAP-20 Marshall	**CAP-20 Superpave**	**CAP-40 Marshall**	**CAP polímero SBS**	**CAP borracha Marshall**
Flecha (mm)	1,2	1,7	1,4	6,2	2,7
Mancha de Areia (mm)	1,2	0,9	1,0	1,1	0,8
VRD	59,1	59,5	57,3	50,8	71,7
Deflexão (0,01 mm)	17,3	22,2	11,3	38,4	10,2

Esses resultados são válidos no âmbito do escopo da pesquisa em questão, sendo importante observar que apesar do CAP-40 ter apresentado melhores resultados em parte significativa dos ensaios, devem ser atribuídos pesos para os parâmetros em análise, em função do tipo de emprego que se pretende dar à mistura de concreto asfáltico.

Os ensaios permitiram comparar o desempenho das misturas asfálticas na estrutura de pavimento, devendo ser consideradas as diferenças no total de ciclos e de operações equivalentes de cargas aplicadas nas distintas seções-teste, bem como a restrição de sua aplicabilidade fora do âmbito da pesquisa. Em síntese observou-se que:

- Somente na seção de CAP com polímero houve evolução significativa no valor de flecha em trilha de roda, sendo constatada flecha superior a 6 mm ao número “N” de 1,5 x 107, ao passo que nas demais seções os valores finais foram da ordem de 1 a 2 mm.
- Apesar das dispersões e dos baixos valores de R2 todos os valores de macrotextura e microtextura se mantiveram dentro de parâmetros de excelência exigidos nas rodovias federais concessionadas, ou seja, HS entre 0,6 e 1,2 mm e VRD entre 47 e 75.

Em termos estruturais constata-se que somente a seção de CAP polímero SBS apresentou uma evolução inicial significativa nos valores de deflexão com posterior estabilização nas leituras. Contata-se também uma tendência de evolução dos valores deflectométricos no trecho do CAP-20 Superpave após 1,5x107 operação do eixo padrão rodoviário.

3.1.16. Estudo da sensibilidade do teor e do tipo de ligante em misturas asfálticas no comportamento de fadiga

Pesquisa de fadiga (Parceira com a Universidade Federal de Rio de Janeiro – UFRJ e)

No Brasil, os principais problemas que ocorrem nos pavimentos asfálticos estão relacionados com a resistência à fadiga e ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas das rodas. Algumas rodovias apresentam, precocemente, problemas de afundamento nas trilhas das rodas provenientes exclusivamente do revestimento, mesmo em locais nos quais as misturas asfálticas são usinadas atendendo o intervalo de teor de ligante aceitável pelas especificações vigentes. Outro problema comum está relacionado com a resistência à fadiga, que representa uma das mais importantes características de perda de desempenho das camadas asfálticas nas rodovias brasileiras. Com o objetivo de evitar o surgimento desses defeitos são empregados os resultados da análise em laboratório do ensaio de vida de fadiga, que têm sido usados como critério de dimensionamento de pavimentos (PINTO, 1991). As cargas usadas nesse ensaio, por sua vez, são determinadas em função de outro ensaio limite, o de resistência à tração, comumente obtida de forma indireta devido à maior simplicidade.

Uma das causas desse tipo de problema pode ser o teor inadequado de asfalto, que nem sempre atende ao teor determinado em projeto, podendo ocorrer uma redução ou até um aumento no teor de ligante, em função de alguns problemas ocasionados durante a usinagem da mistura asfáltica. Um aspecto que tem sido objeto de várias análises é a definição do teor de projeto ou "teor ótimo" de ligante obtido na dosagem da mistura asfáltica: varia em função dos critérios adotados na sua seleção e também em função de parâmetros como energia e tipo de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros.

No Brasil, o método de dosagem de misturas asfálticas mais usado é o método Marshall, desenvolvido na década de 1940 e que faz uso da compactação por impacto. Durante décadas esse método foi (e ainda é) muito aplicado. No entanto, na década de 1980, várias rodovias de tráfego pesado nos EUA passaram a apresentar problemas de deformações prematuros, em função do excesso de ligante nas misturas. A causa do problema foi atribuída à compactação por impacto das misturas, que, durante a dosagem, produzia corpos de prova, CPs, com densidades que não condiziam com os valores encontrados no pavimento em campo. Em função dessa incerteza, foi realizada nos EUA uma grande pesquisa, o Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), que acabou resultando em um novo procedimento de dosagem por amassamento, denominado SUPERPAVE (BERNUCCI et al., 2007).

O método Superpave propõe uma forma diferente de preparação do corpo de prova, CP, empregando o compactador giratório (Figura 3.60 e 3.61). Trata-se de um equipamento prático, com boa repetibilidade e reprodutibilidade, que apresenta as seguintes características básicas: ângulo de rotação de 1,25 ± 0,02°; taxa de 30 rpm; tensão de compressão vertical de 600 kPa; capacidade de produzir corpos de prova com diâmetros de 150,0 mm e 100,0 mm.

Figura 3.60. Moldagem de CPs com compactador giratório



Figura 3.61. Moldagem de CPs com compactador giratório



Para a produção de um CP devem ser definidos os esforços que serão utilizados para a determinação do volume de vazios da mistura, ou seja, deve ser definido o número de giros ($N_{projeto}$) que serão aplicados para moldar o CP. Esse número de giros é usado para selecionar o teor de ligante de projeto e varia em função do tráfego (AASTHO, 2001).

Com a finalidade de simular em laboratório o desempenho de misturas asfálticas que serão aplicadas em campo, esta pesquisa teve como objetivo principal verificar a influência da variação dos teores de ligante na resistência à fadiga e na deformação permanente em diferentes tipos de misturas asfálticas. Para isso, esta pesquisa envolve diferentes tipos e granulometrias de agregados e diferentes tipos e teores de ligantes e dois métodos de compactação. Além disso, a pesquisa teve como objetivo realizar uma avaliação complementar, com base, principalmente, em valores de resistência à fadiga para as novas tolerâncias aceitáveis de variação da porcentagem de ligante em relação à ótima, obtida no projeto da mistura.

Este trabalho apresenta um resumo das atividades desenvolvidas no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Foram realizadas dosagens Superpave de 44 misturas asfálticas empregando diferentes tipos e teores de ligantes para determinação do teor de projeto (teor ótimo), sendo que foram moldados 688 corpos de prova, CPs, com compactador giratório

para realizar as dosagens e ensaios mecânicos dinâmicos (fadiga, módulo de resiliência, MR, resistência à tração, RT) e estático (*creep*).

Paralelamente às dosagens Superpave realizadas no Laboratório da COPPE/ UFRJ, foram moldados 2030 CPs no CPR, com compactador Marshall, para dosagem Marshall e ensaios mecânicos, sendo que além dos CPs no teor de projeto, foram moldados CPs ±0,25% e ±0,50%. Como parte da avaliação das misturas asfálticas, CPs no teor de projeto (±0,25% e ±0,50%) moldados no CPR com compactador Marshall foram enviados à COPPE para ser submetidos aos ensaios mecânicos dinâmicos (fadiga, MR e RT) e estático (*creep*).

A pesquisa foi dividida em 2 etapas:

- 1ª etapa: avaliação de misturas densas - CA (concreto asfáltico);
- 2ª etapa: avaliação de misturas especiais - SMA (Stone Matrix Asphalt), GG (*Gap Graded*) e CPA (Camada Porosa de Atrito).

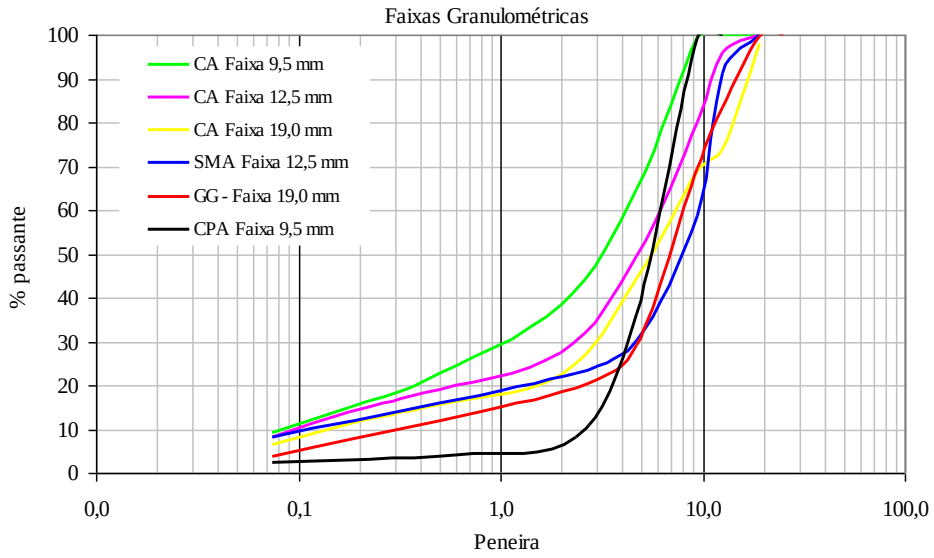
Desenvolvimento da pesquisa

Conforme mencionado, foram analisados quatro tipos de misturas asfálticas (CA, SMA, GG e CPA) de diferentes faixas granulométricas preparadas através de dois métodos de compactação (Marshall e Superpave) e sete ligantes asfálticos (CAP 30-45; CAP 50-70; três asfaltos modificados por polímero e dois asfaltos modificados por borracha). O número de giros para a moldagem dos corpos de prova com o compactador giratório foi determinado para cada tipo de mistura de acordo com a sua respectiva especificação. A seguir são apresentados os parâmetros que foram combinados destas variáveis:

a) Faixas Granulométricas (Figura 3.62):

- CA, Faixa 9,5 mm SUPERPAVE;
- CA, Faixa 12,5 mm DNIT;
- CA, Faixa 19,0 mm SUPERPAVE;
- SMA, Faixa 12,5 mm AASHTO;
- GG, Faixa 19,0 mm CALTRANS;
- CPA, Faixa 9,5 mm ARIZONA

Figura 3.62. Faixas granulométricas avaliadas nesta pesquisa



b) Ligantes Asfálticos:

- CAP 30-45;
- CAP 50-70;
- CAP Modificado por Polímero - SBS;
- CAP Modificado por Borracha - Ecoflex B;
- CAP Modificado por Polímero - Stylink 60/85;
- CAP Modificado por Polímero - FlexPave 65/90;
- CAP Modificado por Borracha - Ecoflex Pave B.

c) Energias de Compactação:

- CA (Figura 3.63):
- Marshall 90 golpes;
- Superpave 125 giros

Figura 3.63. Exemplos de corpos de prova de CA moldados com compactadores Marshall e giratório



SMA:

- Marshall 50 golpes (Figura 3.64).

Figura 3.64. Exemplos de corpos de prova de SMA moldados com compactadores Marshall e giratório



Gap Graded (Figura 3.65):

- Marshall 75 golpes;
- Superpave 100 giros;

Figura 3.65. Exemplos de corpos de prova de GG moldados com compactadores Marshall e giratório



CPA (Figura 3.66):

- Marshall 75 golpes;
- Superpave 100 giros.

Figura 3.66. Exemplos de corpos de prova de CPA moldados com compactadores Marshall e giratório



d) Teores de Ligante:

<u>Compactador Marshall:</u>

- Teor de Projeto;
- Teor de Projeto -0,50% de ligante;
- Teor de Projeto -0,25% de ligante;
- Teor de Projeto +0,25% de ligante;

- Teor de Projeto +0,50% de ligante.

Compactador Giratório:

Teor determinado em Projeto. Paralelamente ao estudo principal foram executadas as seguintes atividades:

No CPR: ensaios de fadiga com ruptura sob velocidade de deformação constante em três velocidades (0,2; 0,5 e 1,3 mm/s) para serem comparados aos ensaios de fadiga realizados na COPPE com cargas repetidas, realizados em quatro níveis de tensão (por exemplo: 10%; 20%; 30% e 40% da resistência à tração estimada).

Misturas asfálticas

O concreto asfáltico, CA, mais conhecido como concreto betuminoso usinado a quente, CBUQ, consiste de um produto resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado mineral bem graduado, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico, espalhado e comprimido a quente, satisfazendo determinadas exigências constantes da especificação. O volume de vazios da mistura varia de 3,0% a 5,0%, no caso de camada de rolamento (camada em contato direto com os pneus dos veículos) e de 4,0% a 6,0% para camadas intermediárias ou de ligação (camada subjacente à de rolamento).

Os agregados empregados no estudo das misturas densas do tipo CA são provenientes da Pedreira Santa Isabel. Para produção de misturas do tipo CA foram selecionados quatro tipos de ligantes, sendo dois ligantes convencionais (CAP 30-45 e CAP 50-70) e dois ligantes modificados (um asfalto borracha, Ecoflex B, e um asfalto polímero, CAP SBS).

Dosagem de Misturas Densas do Tipo CA

A dosagem das misturas asfálticas densas do tipo CA foi realizada empregando os métodos Marshall (CCR Nova Dutra) e Superpave (COPPE/UFRJ), sendo que na COPPE os corpos de prova de CA foram moldados com o compactador giratório a 125 giros para cada teor de ligante determinado na dosagem. Os CPs enviados pela CCR Nova Dutra foram moldados com compactador Marshall a 90 golpes por face. Foram realizadas as seguintes dosagens:

- CA, CAP 30-45 com a faixa 9,5 mm Superpave;
- CA, CAP 30-45 com a faixa 12,5 mm DNIT;
- CA, CAP 30-45 com a faixa 19,0 mm Superpave;
- CA, CAP 50-70 com a faixa 9,5 mm Superpave;
- CA, CAP 50-70 com a faixa 12,5 mm DNIT;

- CA, CAP 50-70 com a faixa 19,0 mm Superpave;
- CA, CAP com SBS Ipiranga com a faixa 9,5 mm Superpave;
- CA, CAP com SBS Ipiranga com a faixa 12,5 mm DNIT;
- CA, CAP com SBS Ipiranga com a faixa 19,0 mm Superpave;
- CA, ECOFLEX B com a faixa 9,5 mm Superpave;
- CA, ECOFLEX B com a faixa 12,5 mm DNIT;
- CA, ECOFLEX B com a faixa 19,0 mm Superpave.

Um resumo dos resultados dos ensaios volumétricos e mecânicos (MR, RT, *creep* e fadiga) é apresentado na Tabela 3.19, divididos em função do tipo de ligante, da granulometria e do tipo da energia de compactação utilizada para a confecção dos corpos de prova.

Tabela 3.19. Resumo dos resultados dos ensaios volumétricos e mecânicos das misturas estudadas

Ligante	Faixa	Teor de ligante	Teor de ligante (%)	Gmm	MEA (g/cm³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	Creep (%)	Fadiga	
												N	N
CAP 30-45	9,5 mm	-0,50%	5,10	2,569	2,465	4,05	16,25	75,09	8.867	1,95	0,17	4.317	2.387
		-0,25%	5,35	2,560	2,456	4,06	16,82	75,85	8.606	1,78	0,22	6.719	3.184
		T.Proj. NDutra	5,60	2,550	2,491	2,31	15,86	85,41	8.239	2,08	0,15	11.437	5.541
		+0,25%	5,85	2,540	2,488	2,05	16,18	87,35	7.244	1,87	0,23	7.324	4.013
		+0,50%	6,10	2,531	2,486	1,78	16,50	89,23	7.085	2,06	0,28	7.538	3.741
		T.Proj. COPPE	5,60	2,559	2,498	2,38	15,97	85,07	7.889	1,92	0,21	9.540	5.052
	12,5 mm	-0,50%	4,40	2,606	2,448	6,06	16,52	63,30	11.306	1,67	0,25	4.768	2.267
		-0,25%	4,65	2,596	2,437	6,12	17,13	64,24	7.481	1,74	0,28	7.624	4.134
		T.Proj. NDutra	4,90	2,586	2,482	4,02	15,83	74,59	8.240	2,10	0,28	25.616	12.159
		+0,25%	5,15	2,576	2,502	2,87	15,38	81,33	8.537	2,01	0,21	12.054	6.005
		+0,50%	5,40	2,566	2,510	2,18	15,34	85,77	8.157	1,84	0,17	21.553	10.698
		T.Proj. COPPE	4,45	2,606	2,475	5,03	15,72	68,02	10.318	1,71	0,18	20.122	12.145
	19,0 mm	-0,50%	4,10	2,617	2,480	5,24	15,11	65,35	9.526	1,81	0,18	3.295	1.678
		-0,25%	4,35	2,607	2,485	4,68	15,17	69,16	9.763	1,69	0,24	7.772	4.154
		T.Proj. NDutra	4,60	2,597	2,499	3,77	14,93	74,73	9.117	1,98	0,23	5.623	2.974
		+0,25%	4,85	2,587	2,514	2,82	14,66	80,75	8.558	1,78	0,28	5.449	2.755
		+0,50%	5,10	2,577	2,514	2,44	14,89	83,58	8.092	1,91	0,27	8.146	3.773
		T.Proj. COPPE	4,60	2,606	2,490	4,45	15,57	71,41	10.084	1,83	0,09	4.815	1.151
CAP 50-70	9,5 mm	-0,50%	4,30	2,591	2,424	6,45	16,56	61,09	6.103	1,46	0,20	5.293	3.118
		-0,25%	4,55	2,580	2,447	5,16	15,96	67,71	7.755	1,63	0,21	5.976	3.126
		T.Proj. NDutra	4,80	2,570	2,475	3,70	15,23	75,73	7.062	1,78	0,21	16.030	7.540
		+0,25%	5,05	2,560	2,471	3,48	15,59	77,70	7.721	1,91	0,31	20.398	9.931
		+0,50%	5,30	2,549	2,465	3,30	15,98	79,38	6.714	1,77	0,19	18.087	9.771
		T.Proj. COPPE	5,10	2,566	2,491	2,92	15,26	80,84	7.062	1,89	0,21	19.642	13.153
	12,5 mm	-0,50%	3,70	2,611	2,443	6,43	15,21	57,70	6.873	1,53	0,19	5.347	2.901
		-0,25%	3,95	2,601	2,468	5,11	14,58	64,92	7.337	1,49	0,23	13.596	5.994
		T.Proj. NDutra	4,20	2,591	2,467	4,79	14,85	67,76	6.945	1,67	0,12	15.198	7.067
		+0,25%	4,45	2,581	2,472	4,22	14,90	71,66	7.354	1,67	0,16	17.723	9.286
		+0,50%	4,70	2,571	2,482	3,46	14,79	76,59	8.038	1,78	0,21	7.957	3.687
		T.Proj. COPPE	4,20	2,604	2,460	5,53	15,56	64,46	7.418	1,64	0,17	8.367	5.681
	19,0 mm	-0,50%	4,00	2,603	2,473	4,99	14,60	65,79	6.924	1,27	0,22	2.096	1.137
		-0,25%	4,25	2,592	2,482	4,24	14,49	70,70	7.925	1,32	0,17	2.755	1.431
		T.Proj. NDutra	4,50	2,582	2,475	4,14	14,96	72,29	7.607	1,30	0,19	3.569	1.820
		+0,25%	4,75	2,571	2,480	3,54	14,98	76,37	6.209	1,22	0,11	4.375	2.392
		+0,50%	5,00	2,561	2,485	2,97	15,03	80,26	7.308	1,24	0,12	3.428	1.665
		T.Proj. COPPE	4,50	2,582	2,509	2,83	13,79	79,50	11.583	1,70	0,00	15.342	6.700
CAP SBS	9,5 mm	-0,50%	4,70	2,597	2,440	6,05	17,18	64,81	4.699	1,57	0,18	17.833	11.704
		-0,25%	4,95	2,587	2,474	4,37	16,26	73,13	5.505	1,79	0,07	22.808	20.980
		T.Proj. NDutra	5,20	2,577	2,467	4,27	16,72	74,48	4.539	1,62	0,20	14.215	9.687
		+0,25%	5,45	2,568	2,475	3,62	16,72	78,34	4.487	1,37	0,17	22.109	14.201
		+0,50%	5,70	2,558	2,478	3,13	16,84	81,43	3.895	1,60	0,15	20.989	18.056
		T.Proj. COPPE	5,20	2,577	2,460	4,54	16,96	73,23	3.897	1,39	0,08	10.717	8.504
	12,5 mm	-0,50%	4,20	2,595	2,461	5,16	15,20	66,03	4.939	1,45	0,18	10.708	7.108
		-0,25%	4,45	2,584	2,472	4,33	15,01	71,13	5.193	1,55	0,12	19.387	10.248
		T.Proj. NDutra	4,70	2,573	2,479	3,65	14,97	75,59	5.213	1,46	0,16	8.107	5.401
		+0,25%	4,95	2,563	2,490	2,85	14,81	80,77	5.428	1,56	0,21	20.463	11.808
		+0,50%	5,20	2,552	2,499	2,08	14,69	85,87	4.764	1,51	0,25	19.198	11.721
		T.Proj. COPPE	4,70	2,590	2,487	3,98	15,33	74,05	3.910	1,36	0,06	11.707	9.114
	19,0 mm	-0,50%	3,60	2,652	2,447	7,73	16,28	52,53	6.015	1,29	0,13	13.192	7.257
		-0,25%	3,85	2,634	2,465	6,42	15,63	58,95	5.063	1,42	0,13	10.445	6.901
		T.Proj. NDutra	4,10	2,617	2,482	5,16	15,04	65,70	5.467	1,58	0,12	14.064	8.395
		+0,25%	4,35	2,600	2,499	3,88	14,44	73,10	5.225	1,60	0,12	18.855	11.502
		+0,50%	4,60	2,583	2,497	3,33	14,48	77,01	4.673	1,56	0,14	19.027	12.643
		T.Proj. COPPE	4,10	2,616	2,487	4,93	14,83	66,75	5.476	1,54	0,07	9.017	5.113
ECOFLEX B	9,5 mm	-0,50%	5,40	2,570	2,399	6,65	19,23	65,40	5.115	1,16	0,23	16.562	8.178
		-0,25%	5,65	2,560	2,418	5,55	18,81	70,51	5.979	1,41	0,13	26.574	13.611
		T.Proj. NDutra	5,90	2,550	2,403	5,76	19,53	70,48	4.934	1,36	0,22	17.362	11.020
		+0,25%	6,15	2,540	2,404	5,35	19,71	72,83	4.798	1,42	0,19	34.408	23.601
		+0,50%	6,40	2,531	2,446	3,36	18,56	81,90	4.937	1,40	0,23	41.708	24.056
		T.Proj. COPPE	5,90	2,550	2,447	4,04	18,06	77,63	4.764	1,47	0,16	37.736	25.592
	12,5 mm	-0,50%	4,80	2,575	2,401	6,76	17,95	62,35	4.095	1,10	0,10	9.409	7.029
		-0,25%	5,05	2,564	2,414	5,85	17,69	66,92	4.937	1,33	0,15	29.012	16.674
		T.Proj. NDutra	5,30	2,554	2,460	3,68	16,34	77,47	4.585	1,44	0,15	31.650	19.822
		+0,25%	5,55	2,543	2,440	4,05	17,20	76,45	4.982	1,50	0,08	23.634	14.534
		+0,50%	5,80	2,533	2,467	2,61	16,50	84,21	4.160	1,48	0,13	26.550	18.964
		T.Proj. COPPE	5,30	2,575	2,473	3,96	16,69	76,26	4.547	1,53	0,09	31.797	28.943
	19,0 mm	-0,50%	4,20	2,606	2,415	7,33	17,18	57,33	6.048	1,36	0,22	6.885	3.599
		-0,25%	4,45	2,595	2,429	6,40	16,89	62,13	5.723	1,33	0,14	18.394	9.271
		T.Proj. NDutra	4,70	2,582	2,439	5,54	16,67	66,77	6.244	1,29	0,11	20.403	10.523
		+0,25%	4,95	2,574	2,420	5,98	17,61	66,03	7.414	1,34	0,16	15.163	6.798
		+0,50%	5,20	2,564	2,434	5,07	17,36	70,79	6.326	1,53	0,32	16.216	7.565
		T.Proj. COPPE	4,70	2,596	2,479	4,51	15,82	71,51	2.978	1,71	0,03	28.914	26.289

O ensaio de MR não tem "valor ideal", nem mínimo ou máximo isoladamente. Somente a partir da análise estrutural do pavimento em questão (conjunto das camadas com seus respectivos MR e espessuras) é possível analisar a adequação deste parâmetro, como será visto mais adiante.

Pode-se verificar pelos resultados apresentados na Tabela 3.19 que todas as misturas atenderam o valor de RT mínimo do DNIT (de 0,65 MPa), sendo que as misturas com CAP 30-45 apresentaram os maiores valores de RT e os menores valores foram apresentados pelas misturas com ligantes modificados.

O ensaio de *creep* estático ainda não dispõe de especificações, o que implica na inexistência de limites ou parâmetros de avaliação. Por esse motivo, foi considerado como parâmetro o ensaio de deformação permanente realizado pelo simulador de tráfego do LCPC, onde o limite máximo especificado para rodovias de tráfego pesado é de 5,0% de deformação. Considerando que esse ensaio é realizado a 60ºC e o ensaio de *creep* é realizado a 40ºC, foi realizada uma "correlação", em que foi adotado o valor de 3,0% como um "possível limite máximo" de deformação para o ensaio de *creep* estático.

De forma geral, pode-se verificar que todas as misturas apresentaram valores de *creep* muito abaixo do "possível limite" de 3,0%. Além disso, pode-se verificar que os valores mais altos foram obtidos pelas misturas moldadas com CAP 30-45 e os mais baixos foram obtidos pelas misturas com asfaltos modificados e que, para um mesmo tipo de ligante, as misturas moldadas com compactador giratório apresentaram os menores valores de *creep*, ou seja, menor deformação e, portanto, maior resistência. Isso pode ter acontecido, em função das diferentes granulometrias (consequentemente do esqueleto mineral) e, principalmente, do tipo de compactação.

Vida de Fadiga - Análise Mecanística

Os modelos de fadiga foram determinados utilizando-se as diferenças de tensões ($\Delta\sigma$, diferença entre tensões de tração e compressão) e as deformações resilientes (ε). As constantes de regressão k1, k2 e k3 são parâmetros de caracterização dos materiais. No ensaio de fadiga, os corpos de prova (CPs) foram submetidos a carregamento diametral, à temperatura de 25ºC. Os CPs foram submetidos a quatro níveis de tensão e, para cada um deles, foi determinado o número de ciclos necessários para a ruptura. Com os resultados obtidos, utilizou-se o programa computacional ELSYM5 e fez-se a comparação das misturas avaliadas (com diferentes ligantes asfálticos) através de uma simulação de duas estruturas de pavimento hipotéticas (1 e 2) e uma estrutura especial (3) empregada na reconstrução de pavimentos pela CCR Nova Dutra (Tabelas 3.20 e 3.21).

Pode-se observar na Tabela 3.20 que a estrutura 3 apresenta características muito diferentes das estruturas hipotéticas, com espessura total de 92,0 cm, composta por um revestimento de 22,0 cm

(12,0 cm de CA + 10,0 cm de binder), uma camada de brita graduada simples, BGS, de 15,0 cm e uma sub-base de rachão de 55,0 cm.

As espessuras e as deflexões máximas após a reconstrução (Tabela 3.21) de cada camada da estrutura 3 foram fornecidas pela Nova Dutra. No caso da estrutura 3, a análise empregando o ELSYM 5 foi feita apenas para a mistura de faixa 12,5 mm DNIT, que é a mistura asfáltica aplicada na camada de revestimento dos pavimentos que são reconstruídos pela Nova Dutra.

Tabela 3.20. Estruturas de pavimentos usadas nas comparações das misturas deste estudo

Estrutura	Camada	Espessura (cm)	Coef. Poisson	MR (MPa)	MR (psi)
1	Capa	10,0	0,30	Variável	MR
	Base	20,0	0,34	340	51.000
	Sub-base	20,0	0,38	210	31.500
	Subleito	Semi-infinito	0,42	85	12.750
2	Capa	7,5	0,30	Variável	MR
	Base	20,0	0,30	450	67.500
	Subleito	Semi-infinito	0,40	60	9.000
3	Capa	12,0 - EGL 12,5 mm	0,30	Variável	MR
	Binder	10,0 - Faixa A DNIT	0,30	3700	555.000
	Base	15,0 - BGS	0,35	250	37.500
	Sub-base	55,0 - Rachão	0,37	100	15.000
	Subleito	Semi-infinito	0,45	52	7.800

Os valores de MR das camadas da estrutura 3, com exceção do MR de CA (que foram extraídos da Tabela 3.19, MR das misturas faixa 12,5 mm), foram adotados e para verificar se esses valores estavam coerentes com a estrutura foi feita a análise usando o programa ELSYM5, onde se pode verificar que todas as camadas atendiam os valores de deflexão após a reconstrução, conforme pode ser observado nas Tabelas 3.21 e 3.22.

Tabela 3.21. Deflexões após reconstrução para Estrutura 3

Camada	Deflexão admissível (10^{-2} mm)	Deflexão calculada com ELSYM5 (10^{-2} mm)
CA	35,0	*
Binder	65,0	61,5
BGS	95,0	87,4
Rachão	120,0	95,3
Sub-Leito	150,0	125,7

* As deflexões obtidas para cada tipo de mistura são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 3.22. Deflexões obtidas usando as misturas de CA Faixa 12,5 mm como capa - Estrutura 3

Teor de ligante	CAP 30-45	CAP 50-70	CAP SBS	ECOFLEX B
-0,50%	31,8	32,8	34,0	34,8
-0,25%	32,5	32,5	33,8	34,0
T. Proj.N.Dutra	32,3	32,8	33,8	34,3
+0,25%	32,0	32,5	33,8	34,0
+0,50%	32,3	32,3	34,3	34,8
T. Proj.COPPE	31,5	32,5	35,1	34,3

Resultados dos Ensaios de Vida de Fadiga

Foram elaborados gráficos do número de ciclos em função da diferença de tensões, em escala logarítmica. Para cada gráfico foi feita a regressão da curva de fadiga, obtendo-se a equação correspondente à curva. Vale ressaltar que para a estrutura 3 foi feita a análise apenas para a mistura de faixa 12,5 mm.

A Tabela 3.23 apresenta a comparação da vida de fadiga das diferentes misturas, em função do teor de ligante de projeto, resumindo o que foi apresentado no item anterior. Nesta tabela, todas as células em amarelo representam a situação na qual o teor de ligante apresentou vida de fadiga menor que a obtida com a mistura moldada no teor de projeto, considerando as duas estruturas testadas. Sabe-se que estes valores são sempre relativos a uma combinação de módulos e espessuras das camadas consideradas, portanto não podem ser generalizados.

Tabela 3.23. Comparação da vida de fadiga das misturas densas

Teor de ligante	CAP 30-45			CAP 50-70			CAP SBS			ECOFLEX B		
	9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm	9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm	9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm	9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm
-0,50%	0,38N a 0,43N	0,19N	0,56N a 0,59N	0,33N a 0,41N	0,35N a 0,41N	0,59N a 0,62N	1,21N a 1,251N	1,32N	0,86N a 0,94N	0,74N a 0,95N	0,30N a 0,35N	0,34N
-0,25%	0,57N a 0,59N	0,30N a 0,34N	1,38N a 1,40N	0,37N a 0,41N	0,85N a 0,89N	0,77N a 0,79N	1,60N a 2,17N	1,56N a 1,80N	0,74N a 0,82N	1,24N a 1,53N	0,84N a 0,92N	0,88N a 0,90N
T. Projeto N. Dutra	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N	1,00N
+0,25%	0,64N a 0,72N	0,47N a 0,49N	0,93N a 0,97N	1,27N a 1,32N	1,17N a 1,31N	1,23N a 1,31N	1,47N a 1,56N	2,19N a 2,52N	1,34N a 1,37N	2,23N a 2,38N	0,73N a 0,75N	0,65N a 0,74N
+0,50%	0,66N a 0,68N	0,84N a 0,88N	1,27N a 1,45N	1,13N a 1,30N	0,52N	0,91N a 0,96N	1,48N a 1,86N	2,17N a 2,37N	1,35N a 1,51N	2,18N a 2,40N	0,84N a 0,96N	0,72N a 0,79N
T. Projeto COPPE	0,83N a 0,91N	0,79N a 1,00N	0,39N a 0,86N	1,23N a 1,74N	0,55N a 0,80N	3,68N a 4,30N	0,75N a 0,88N	1,44N a 1,69N	0,61N a 0,64N	2,17N a 2,32N	1,00N a 1,46N	1,42N a 2,50N

De forma geral, pode-se verificar que o teor de ligante influencia na vida de fadiga das misturas asfálticas, ocorrendo em alguns casos, com pequeno aumento do teor, certo aumento da vida de fadiga. Além disso, pode-se verificar, na maioria dos casos, que um menor teor de ligante é pior do ponto de vista da fadiga. Algumas misturas apresentaram redução de até 70,0% da vida de fadiga quando diminuído o teor em -0,25% e de até 81,0% quando reduzido o teor de ligante em -0,50%.

Pode-se observar que em alguns casos, maior vida de fadiga foi obtida pelas misturas produzidas com compactador giratório, como por exemplo, com o ligante ECOFLEX. Quanto à granulometria dos agregados, pode-se verificar que para faixa granulométrica de 19,0 mm, tanto para CAP 30-45 quanto para CAP 50-70, a vida de fadiga não foi muito elevada, apresentando pequena variação com o teor de ligante quando comparada com as outras misturas de granulometrias diferentes (12,5

mm e 9,5 mm). No caso das misturas com ligante modificado, pode-se verificar que as misturas com SBS faixa 12,5 mm apresentaram maior vida de fadiga quando comparadas com as misturas de outras granulometrias. No caso das misturas com ECOFLEX, as com granulometria 9,5 mm apresentaram a maior vida de fadiga.

Cabe lembrar que, apesar de pequeno aumento do teor de ligante proporcionar, em alguns casos, um aumento de vida de fadiga, é importante analisar também o comportamento de resistência à deformação permanente e exsudação, uma vez que o excesso de ligante pode originar esses tipos de defeitos no pavimento. A partir da análise dos resultados de fadiga foi elaborada a Tabela 3.24 com uma proposta de novos teores de ligante para as misturas marcadas em amarelo.

Tabela 3.24. Proposta de novos teores de ligante para as misturas densas avaliadas.

Tipo de Ligante		**CAP 30-45**			**CAP 50-70**			**CAP SBS**			**ECOFLEX B**		
Faixa Granulométrica		9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm	9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm	9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm	9,5 mm	12,5 mm	19,0 mm
Nova Dutra	T. Projeto	5,60	4,90	4,60	4,80	4,20	4,50	5,20	4,70	4,10	5,90	5,30	4,70
	Novo Teor	5,60	4,90	4,60	5,10	4,80	4,50	5,50	5,00	4,50	6,20	5,30	4,70
COPPE	T. Projeto	5,60	4,45	4,60	5,10	4,20	4,50	5,20	4,70	4,10	5,90	5,30	4,70
	Novo Teor	5,60	4,90	4,60	5,10	4,80	4,50	5,50	5,00	4,50	6,20	5,30	4,70

Stone Matrix Asphalt (SMA)

O SMA apresenta granulometria descontínua, composta por uma maior fração de agregados graúdos britados, uma massa de ligante/fíler (cerca de 10% passando na peneira #200), chamada de mástique, e aproximadamente 4,0% de volume de vazios. Essas misturas formam um esqueleto de alta estabilidade devido ao contato pedra-pedra e necessitam de um teor de ligante superior ao teor de misturas densas (cerca de 1,0 a 1,5%), o que implica na adição de uma fibra para evitar que ocorra o escorrimento de material asfáltico durante o processo de construção (produção e aplicação da mistura) e, particularmente, durante o transporte. A fibra pode ser de celulose, poliéster etc. Os agregados utilizados na mistura de SMA são provenientes da Pedreira Santa Isabel e o calcário é proveniente da Britamax. Foram utilizados na produção de misturas do tipo SMA dois ligantes asfálticos convencionais: CAP 30-45 e CAP 50-70.

A dosagem do SMA (*Stone Matrix Asphalt*) foi realizada de acordo com a norma AASHTO MP 325-08, equivalente a Faixa Alemã 0/11S. Em função da granulometria dos agregados, a faixa granulométrica selecionada foi a 12,5 mm. Para moldagem de corpos de prova no compactador

giratório de misturas do tipo SMA, a especificação AASHTO MP 325-08 recomenda que o número de giros seja igual a 100. No entanto, quando o agregado apresenta desgaste por Abrasão Los Angeles superior a 30,0%, a especificação recomenda que o número de giros seja reduzido para 75 giros. Foi empregada 0,3% de fibra de celulose com asfalto.

A partir dos resultados dos parâmetros volumétricos, não foi possível determinar o teor de projeto da mistura do tipo SMA, considerando o Vv de 4,0%, que atendesse o teor mínimo de ligante asfáltico de 6,00% e o valor mínimo de VAM (de 17,0%), uma vez que o máximo volume de vazios obtido foi de 2,25%, ficando muito abaixo do valor estabelecido pela especificação. Por esse motivo foi feita uma análise para tentar identificar o que poderia estar influenciando nos resultados da dosagem.

Em misturas descontínuas do tipo SMA, o valor baixo de vazios pode ser provocado por uma granulometria inadequada, não proporcionando o intertravamento entre partículas dos agregados ou pela quebra das partículas dos agregados, reduzindo o volume de vazios deixado pelos agregados graúdos.

A verificação do intertravamento das partículas dos agregados foi realizada a partir da análise granulométrica pelo método Bailey, onde se pôde verificar que a granulometria escolhida apresenta bom intertravamento das partículas, não sendo, portanto, a causa do problema.

Para verificar se estava ocorrendo a quebra das partículas foi feita a extração do ligante da mistura que havia sido compactada (CP) empregando um forno que não necessita de solventes e realizada a análise da granulometria dos agregados. O CP é colocado em estufa para que a mistura fique solta antes de ser colocado no forno para realizar a extração do ligante. Pode-se verificar pelos resultados da análise granulométrica pós-compactação que a quantidade de material mais graúdo foi reduzida, indicando que os agregados podem ter se quebrado, uma vez que também a quantidade de materiais finos aumentou, em que a curva fica fora dos limites da especificação. Isso pode ter acontecido devido à baixa resistência ao choque dos agregados, com indicada pelo resultado do desgaste de abrasão Los Angeles.

Como não foi possível atender as especificações com os agregados disponíveis, nem na condição de energia mínima, foi decidido pelos pesquisadores da CCR Nova Dutra e COPPE/UFRJ que não seria realizada a moldagem dos CPs nos teores de projeto (e suas variações) com os compactadores Marshall e giratório.

Gap graded (GG)

O *gap graded* consiste de uma mistura de graduação descontínua, porém densa, que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, atende limite de vazios entre 4,0% a 6,0%, com

características de conforto e segurança adequadas ao tráfego. Sua drenagem se dá pelo escoamento superficial proporcionado pelo nível maior de rugosidade, sem haver percolação pelo interior da camada o que proporciona também maior desempenho às solicitações de cargas. Esse tipo de mistura tem sido empregado como camada de revestimento asfáltico e vem sendo utilizado no país com asfaltos modificados. Neste trabalho foi selecionada a faixa 19,0 mm da CALTRANS (Departamento de Transportes do Estado da Califórnia, EUA).

Os agregados utilizados nesta pesquisa para as misturas GG, provenientes da Pedreira Pombal, foram fornecidos pela Concessionária Nova Dutra. Para a produção das misturas do tipo *gap graded* foram selecionados dois ligantes modificados: CAP Borracha ECOFLEX Pave B e STYLINK Tipo 60/85 PG 76-22.

A dosagem das misturas asfálticas descontínuas no laboratório da COPPE/UFRJ foi realizada empregando o compactador giratório a 100 giros para moldar os corpos de prova nos diferentes teores escolhidos previamente. Foram realizadas as dosagens das seguintes misturas:

Gap Graded, Faixa 19,0 mm CALTRANS, com CAP STYLINK Tipo 60/85;

Gap Graded, Faixa 19,0 mm CALTRANS, com CAP Borracha ECOFLEX Pave B.

Após a moldagem dos CPs foram determinados os parâmetros volumétricos (Vv, VAM, RBV e massa específica aparente) e mecânicos (RT e MR), assim como as densidades máximas das misturas. O teor de ligante de projeto foi estabelecido para um volume de vazios de 5,0%, conforme especificação CALTRANS. Para a mistura com STYLINK Tipo 60/85, o teor de projeto é de 4,90%. Para a mistura com ECOFLEX Pave B, o teor de projeto é de 5,65%.

Resultados dos Ensaios Volumétricos e Mecânicos

Um resumo dos resultados dos ensaios volumétricos e mecânicos das misturas do tipo *gap graded* é apresentado na Tabela 3.25.

Tabela 3.25. Resumo dos parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas *gap-graded* desta pesquisa

Ligante	Teor de ligante	Teor de ligante (%)	Gmm	MEA (g/cm^3)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	*Creep*	Fadiga	
											N	N
Stylink 60/85	-0,50%	4,20	2,643	2,398	9,3	17,0	45,4	4169	1,12	0,159	3432	2542
	-0,25%	4,45	2,623	2,411	8,1	16,7	51,7	3161	1,12	0,158	5969	5328
	T.Proj. NDutra	4,70	2,603	2,424	6,9	16,5	58,4	4503	1,31	0,162	11431	7540
	+0,25%	4,95	2,583	2,430	5,9	16,5	64,2	3529	1,27	0,149	8800	7249
	+0,50%	5,20	2,563	2,439	4,8	16,4	70,6	3778	1,17	0,164	9161	7035
	T.Proj. COPPE	4,90	2,553	2,434	4,7	16,5	71,8	3676	1,07	0,184	16454	12585
Ecoflex Pave B	-0,50%	5,50	2,593	2,430	6,3	17,0	63,0	3518	1,07	0,255	10148	8509
	-0,25%	5,75	2,573	2,426	5,7	17,4	67,1	3252	0,97	0,260	6122	5294
	T.Proj. NDutra	6,00	2,553	2,423	5,1	17,7	71,2	3568	1,18	0,191	12434	10035
	+0,25%	6,25	2,533	2,434	3,9	17,5	77,7	3603	1,06	0,021	4414	3507
	+0,50%	6,50	2,513	2,432	3,2	17,8	81,9	3204	1,19	0,331	5366	4716
	T.Proj. COPPE	5,65	2,510	2,381	5,1	18,8	72,7	4151	0,89	0,372	3682	2393

Pode-se verificar pela Tabela 3.25, que as misturas *gap graded* com CAP STYLINK não atendem ao valor mínimo de VAM (de 17,0%). No entanto, todas as misturas *gap graded* com CAP Borracha ECOFLEX Pave B atenderam ao valor mínimo. Quando analisado a RBV, pode-se observar na Tabela 3.25 que a maioria das misturas com CAP STYLINK não atende aos valores de RBV (de 65,0% a 75,0%), apenas as misturas moldadas com compactador giratório e a mistura com +0,50% moldada com compactador Marshall apresentam valores dentro do intervalo de 65,0% a 75,0%. Quanto às misturas com ECOFLEX Pave B, pode-se verificar que as duas misturas moldadas no teor de projeto atenderam ao valor de RBV.

Em relação ao MR, pode-se verificar pela Tabela 3.25 que o maior valor de MR das misturas com CAP STYLINK Tipo 60/85 foi atingida pela mistura moldada no teor de projeto com compactador Marshall. Para misturas moldadas com o ECOFLEX Pave B com compactador Marshall a variação foi pequena, sendo que o valor mais alto foi obtido pela mistura moldada no teor de projeto com compactador giratório.

Quanto à RT, pode-se observar pela Tabela 3.25 que as misturas com CAP STYLINK apresentaram os valores mais altos quando comparadas com as misturas com ECOFLEX Pave B, sendo que os maiores valores foram obtidos pelas misturas moldadas com compactador Marshall no teor de projeto.

Em relação ao *creep*, pode-se verificar na Tabela 3.25 que todas as misturas apresentaram valores bem abaixo de 3,0% (“limite possível”).

Resultados dos Ensaios de Fadiga - Análise Mecanística para Mistura GG

Foram elaborados gráficos do número de ciclos em função da diferença de tensões, em escala logarítmica para expressar a fadiga das misturas *gap graded* desta pesquisa. Para cada gráfico foi feita regressão obtendo-se a equação da curva de fadiga.

Nas Tabelas 3.26 e 3.27 estão mostrados resumos dos resultados dos ensaios de fadiga das misturas GG, considerando duas estruturas hipotéticas. Com os resultados obtidos, fez-se a comparação das misturas avaliadas com STYLINK e com ECOFLEX Pave B através da simulação de duas estruturas de pavimento hipotéticas. A análise tensional foi feita com o programa ELSYM 5. Na Tabela 3.28 é apresentada a comparação da vida de fadiga das misturas *gap graded* analisadas.

Tabela 3.26. Resumo dos resultados de fadiga das misturas GG desta pesquisa aplicados à Estrutura 1

Teor de ligante	**N**	
	Stylink 65/90	**Ecoflex B**
-0,50%	3432	10148
-0,25%	5969	6122
Teor de Projeto Nova Dutra	11431	12434
+0,25%	8800	4414
+0,50%	9161	5366
Teor de Projeto COPPE	16454	3682

Tabela 3.27. Resumo dos resultados de fadiga das misturas GG desta pesquisa para a Estrutura 2

Teor de ligante	**N**	
	Stylink 65/90	**Ecoflex B**
-0,50%	2542	8509
-0,25%	5328	5294
Teor de Projeto Nova Dutra	7540	10035
+0,25%	7249	3507
+0,50%	7035	4716
Teor de Projeto COPPE	12585	2393

Pode-se observar pela Tabela 3.28, que para as misturas com moldadas com CAP STYLINK Tipo 60/85, a maior vida de fadiga foi obtida pela mistura moldada no teor de projeto com o compactador giratório. No caso das misturas moldadas com o CAP Borracha ECOFLEX Pave B, a maior vida de fadiga foi obtida pela mistura moldada no teor de projeto com o compactador Marshall, apesar de que os CPs com ECOFLEX moldados no Marshall estavam abaixo do teor correto determinado para 5,0% vazios. Comparando os dois tipos de compactadores, pode-se observar que a maior vida de fadiga para as misturas com STYLINK foi obtida com moldagem com compactador giratório (cerca de 44,0% mais alta). No entanto, para as misturas com ECOFLEX a maior vida de fadiga foi obtida com moldagem com compactador Marshall (cerca de 3,4 vezes mais alta).

Tabela 3.28. Comparação da vida de fadiga para as duas misturas GG desta pesquisa

Teor de Ligante	STYLINK 60/85	ECOFLEX Pave B
-0,50%	0,30N a 0,34N	0,82N a 0,85N
-0,25%	0,52N a 0,71N	0,49N a 0,53N
Teor de Projeto Nova Dutra	1,00N	1,00N
+0,25%	0,77N a 0,96N	0,35N a 0,36N
+0,50%	0,80N a 0,93N	0,43N a 0,47N
Teor de Projeto COPPE	1,44N a 1,67N	0,24N a 0,30N

Camada Porosa de Atrito (CPA)

A Camada Porosa de Atrito, CPA, também conhecida como PFC (*Permeable Friction Course*), é composta por uma mistura aberta (OGFC - *Open-Graded Friction Courses*) e tem como objetivo principal proporcionar ao revestimento asfáltico maior atrito entre o pneu e o pavimento. Além de aumentar a rugosidade do revestimento, este tipo de mistura evita a aquaplanagem por possibilitar a passagem da água, uma vez que possui alto teor de vazios com ar (de 18,0% a 25,0%), que auxilia na remoção da água da superfície do pavimento durante o período de chuva. Geralmente, as misturas abertas do tipo CPA, não têm função estrutural, são empregadas em camadas delgadas sobrepostas a uma camada de revestimento densa existente, que tem função estrutural. Em função do seu elevado teor de vazios, a CPA apresenta resistência à tração mais baixa e maior flexibilidade (RT ~0,6 MPa e MR < 2000 MPa) quando comparada com misturas densas.

No Brasil, a dosagem de CPA é realizada empregando o método Marshall, de acordo com a ABNT NBR 12891/2003. No caso da dosagem pelo método Superpave, a moldagem dos corpos de prova deve ser feita com o compactador giratório, atendendo as recomendações do NCHRP 09-33 (2005). Um dos ensaios fundamentais para determinar o teor de projeto das misturas de CPA é o desgaste Cantabro. Segundo a especificação DNER-ES 386/99, a perda máxima admitida neste ensaio é de 25%, para misturas com volume de vazios entre 18,0% e 25,0%. No entanto, a especificação Superpave admite somente até 15,0% de perda e volume de vazios de 18,0% a 22,0%. No caso da resistência à tração, RT, a especificação do DNER determina um valor mínimo de 0,55 MPa, e para o Superpave o valor mínimo aceitável é de 0,70 MPa.

Nesta pesquisa, foram utilizados na dosagem da CPA agregados provenientes da Pedreira Riuma e dois ligantes modificados: um asfalto borracha, o CAP Ecoflex Pave B e um asfalto polímero, o CAP FlexPave 65/90, ambos da Greca Asfaltos. Foi utilizada a fibra de celulose VIATOP 66, composto por 66,6% em peso de fibra e por 33,3% de asfalto.

Inicialmente, a dosagem das misturas da camada porosa de atrito, CPA, foi realizada no laboratório da COPPE/UFRJ empregando o compactador giratório a 50 giros para moldar os corpos de prova nos diferentes teores, conforme recomendação da norma americana. Dessa forma, foram realizadas as dosagens das seguintes misturas:

- CPA, Faixa 9,5 mm ARIZONA, com CAP Ecoflex Pave B;
- CPA, Faixa 9,5 mm ARIZONA, com CAP FlexPave 65/90.

Como complemento foram moldados CPs com o compactador Marshall, empregando 50 golpes por face. Durante a moldagem dos CPs, pode-se verificar que a mistura não apresentava estabilidade mínima, ocorrendo em alguns casos desmoldagem da massa quando o corpo de prova era virado de cabeça pra baixo para realizar a compactação da outra face do CP. Por esse motivo alguns CPs foram descartados.

Após a moldagem foram determinados os parâmetros volumétricos (Vv, VAM, RBV e massa específica aparente) de cada corpo de prova assim como o desgaste Cantabro, a resistência à tração, RT, e módulo de resiliência, MR. Pode-se verificar que não foi possível determinar os teores de projeto das misturas moldadas com compactador giratório para volume de vazios entre 18,0 e 25,0%, uma vez que todos os corpos de prova apresentaram valores superiores a 27,0% de vazios. No caso da mistura moldada com compactador Marshall, o teor de projeto considerando volume de vazios de 22,0% foi de 6,3% para o ligante Flexpave 65/90 e de 6,25% para o ligante Ecoflex Pave B, o que não atende a especificação brasileira, mas atende a especificação americana.

O ensaio de desgaste Cantabro foi realizado na máquina de abrasão Los Angeles, sem as esferas metálicas, segundo a ABNT NBR 15140:2004. As amostras foram submetidas, uma por vez, a 300 revoluções (33 rpm). Todas as misturas atenderam aos valores da especificação brasileira, que determina que o desgaste seja inferior a 25,0%. No entanto, as misturas moldadas com 4,50% de Ecoflex B e 4,00% de FlexPave não atendem a especificação americana, que determina o máximo de 15,0% de desgaste Cantabro.

O ensaio de escorrimento foi realizado segundo a AASHTO T 305-09, com o objetivo de verificar se o teor de fibras adotado (0,4%) era adequado para evitar o escorrimento de material asfáltico. Pode-se verificar que as misturas não necessitariam de fibras, uma vez que todas apresentaram escorrimento menor que 0,3% sem fibra. Vale salientar que, no caso da mistura produzida com 6,0% de ligante, não foi realizado ensaio a uma temperatura de 167ºC, uma vez que os resultados do ensaio a 182ºC já apresentaram valores abaixo do limite exigido pela especificação (máximo de 0,3%).

A partir dos resultados obtidos, pode-se verificar que não foi possível determinar os teores de projeto para um volume de vazios de 22,0%, dentro do limite de 4,00% a 6,00% de ligante, conforme especificação brasileira: todos os corpos de prova moldados apresentaram valores superiores a 27,0% de vazios. Além disso, os resultados do ensaio de resistência à tração mostraram que essas misturas não atingiram o valor mínimo recomendado pelas normas brasileira e americana, ficando abaixo de 0,5 MPa, as moldadas com compactador giratório e com Marshall.

Um resumo dos resultados dos ensaios volumétricos e mecânicos das misturas CPA é apresentado na Tabela 3.29.

Tabela 3.29. Resumo dos parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas de CPA desta pesquisa

Ligante	Teor de ligante	Teor de ligante (%)	Gmm	MEA (g/cm^3)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	*Creep*	Fadiga	
											N	N
FlexPave 65/90	-0,50%	4,20	2,323	1,917	17,5	25,4	31,2	2.360	0,64	0,475	1.468	1.540
	-0,25%	4,45	2,315	1,897	18,1	26,3	31,5	2.679	0,62	0,362	1.201	1.184
	T.Proj. NDutra	4,70	2,307	1,925	16,6	25,4	34,9	2.508	0,73	0,563	3.233	3.277
	+0,25%	4,95	2,300	1,907	17,1	26,4	35,2	2.072	0,57	0,527	2.037	2.279
	+0,50%	5,20	2,292	1,941	15,3	25,2	39,3	2.717	0,67	0,311	1.485	1.443
	T.Proj. COPPE	4,90	2,392	1,841	23,0	31,9	27,8	1.580	0,63	0,753	2.368	2.968
Ecoflex Pave B	-0,50%	4,70	2,483	1,921	22,6	31,4	27,9	2.820	0,56	0,408	1.919	1.817
	-0,25%	4,95	2,473	1,932	21,9	31,2	29,8	2.647	0,55	0,348	1.248	1.234
	T.Proj. NDutra	5,20	2,465	1,922	22,0	31,7	30,6	2.592	0,57	0,887	2.301	2.301
	+0,25%	5,45	2,456	1,939	21,1	31,3	32,8	2.769	0,58	0,572	1.707	1.643
	+0,50%	5,70	2,447	1,932	21,0	31,7	33,7	2.414	0,56	0,405	1.065	1.114
	T.Proj. COPPE	5,10	2,416	1,861	23,0	32,2	28,6	1.645	0,41	0,775	3.171	3.890

Os resultados apresentados na Tabela 3.29 mostram que as misturas de CPA moldadas com o compactador giratório apresentaram maiores valores de *creep*, ou seja, maior deformação, indicando uma menor resistência, que também pode ser verificada pelos resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência.

Resultados dos Ensaios de Fadiga de CPA - Análise Mecanística

Foram elaborados gráficos do número de ciclos em função da diferença de tensões, em escala logarítmica. Para cada gráfico foi feita a regressão da curva de fadiga, obtendo-se a equação correspondente. Com os resultados obtidos, fez-se a comparação das misturas CPA avaliadas (com FlexPave 65/90 e com Ecoflex Pave B) através de simulação de duas estruturas de pavimento hipotéticas. A análise tensional foi feita com o programa ELSYM 5. Na Tabela 3.30 é apresentada comparação da vida de fadiga das misturas para CPA analisadas.

Tabela 3.30. Comparação da vida de fadigadas misturas CPA deste estudo

Teor de Ligante	FlexPave 65/90	Ecoflex Pave B
-0,50%	0,45N a 0,47N	0,79N a 0,83N
-0,25%	0,36N a 0,37N	0,54N
Teor de Projeto Nova Dutra	1,00N	1,00N
+0,25%	0,63N a 0,70N	0,71N a 0,74N
+0,50%	0,44N a 0,46N	0,46N a 0,48N
Teor de Projeto COPPE	0,73N a 0,91N	1,38N a 1,69N

Pode-se observar pela Tabela 3.30 que para as misturas moldadas com FlexPave, a maior vida de fadiga foi obtida pela mistura moldada no teor de projeto com o compactador Marshall. No caso das misturas moldadas com o Ecoflex Pave B, a maior vida de fadiga foi obtida pela mistura moldada no teor de projeto com o compactador giratório.

Pode-se verificar que as misturas abertas, do tipo CPA, sofrem grande influência da forma de compactação empregada na moldagem dos CPs. Além disso, a partir dos teores de projeto obtidos na dosagem Superpave, pode-se verificar que, no caso de misturas abertas, o número de giros não corresponde ao mesmo número de golpes da compactação de misturas densas.

Pode-se verificar que a maioria das misturas com CAP FlexPave 65/90 moldadas nesta pesquisa com compactador Marshall não atende a especificação brasileira quanto ao volume de vazios, de 18,0 a 25,0%.

Os resultados de resistência à tração mostram que todas as misturas com CAP FlexPave 65/90 atendem a especificação brasileira (RT mínimo de 0,55 MPa), mas que apenas a mistura moldada com compactador Marshall no teor de projeto atende a especificação americana (RT mínimo de 0,70 MPa). Quanto às misturas com CAP Ecoflex Pave B moldadas com compactador Marshall pode-se verificar que todas apresentaram valores de RT dentro dos limites da especificação brasileira, mas não atendem a especificação americana. A mistura moldada com compactador giratório não atende aos valores mínimos recomendados pelas especificações: brasileira (0,55 MPa) e americana (RT mínimo de 0,70 MPa).

Quanto ao tipo de compactador, pode-se verificar que todas as misturas CPA com os dois asfaltos modificados, moldadas com compactador Marshall, atenderam a especificação brasileira, mas apenas a mistura com asfalto modificado por polímero moldada no teor de projeto atendeu a especificação americana. No caso das misturas moldadas com compactador giratório, pode-se verificar que a mistura com asfalto modificado por borracha não atende aos valores mínimos recomendados pelas especificações brasileira e americana.

Quanto ao tipo de ligante, pode-se verificar que as misturas moldadas com asfalto modificado por polímero apresentaram melhores resultados quando comparadas com as misturas com asfalto modificado por borracha. Vale ressaltar que foi adotada a CPA como única camada asfáltica na análise das estruturas. No entanto, pode-se verificar pelos resultados de fadiga que a CPA não pode ser empregada como única camada de revestimento, sendo necessário aplicar uma camada mais impermeável antes.

Considerações finais com relação à fadiga das misturas asfálticas

De forma geral, pode-se verificar que todos os tipos de misturas analisadas sofrem influência da variação do teor de ligante na vida de fadiga.

No caso de misturas densas do tipo CA, pode-se verificar que, na maioria dos casos, um menor teor de ligante em relação ao de projeto é pior do ponto de vista da fadiga. No entanto, em alguns casos, um pequeno aumento do teor de ligante proporcionou aumento da vida de fadiga. No caso de misturas densas de granulometria 9,5 mm e 12,5 mm, a influência é maior para misturas com asfaltos modificados, em que um aumento de ligante implica quase sempre em um aumento de vida de fadiga. No caso de misturas de granulometria 19,0 mm ocorreu o inverso, onde a maioria das misturas apresentou uma redução da vida de fadiga com aumento do teor de ligante. Cabe lembrar que, apesar de pequeno aumento do teor de ligante proporcionar, em alguns casos, um aumento de vida de fadiga, é importante analisar também o comportamento de resistência à deformação permanente e exsudação, uma vez que o excesso de ligante pode originar eventualmente esses tipos de defeitos no pavimento.

Misturas descontínuas do tipo SMA dependem muito da qualidade dos agregados, uma vez que a mistura é composta por maior fração de agregados graúdos que deverão estar em contato, interligados através de um mastique, composto de material fino e ligante asfáltico. Esse tipo de mistura deve apresentar granulometria específica, em que o intertravamento das partículas é fundamental, e a resistência dos grãos é um dos principais parâmetros que deve ser considerado, pois pode influenciar na determinação do teor de projeto e na resistência à deformação permanente e vida de fadiga. A resistência à tração da mistura está diretamente relacionada com a permanência do esqueleto mineral formado pelo contato entre as partículas de agregados graúdos. Nesse trabalho pode-se verificar que as misturas SMA testadas não atenderam as especificações, pois o teor de ligante mínimo não foi alcançado e também porque os agregados graúdos apresentaram desgaste elevado, apesar de apresentarem composição granulométrica adequada. Sendo assim, a recomendação é que, caso seja de interesse aplicar uma mistura do tipo SMA, deve ser realizada a troca da origem de agregados e uma nova dosagem. Também podem ser testados ligantes modificados.

Quando analisadas as misturas descontínuas do tipo *gap graded* pode-se verificar que a variação do teor de ligante, para cima ou para baixo, implica na redução da vida de fadiga, independentemente do tipo de ligante, o que implica em dizer que, nesse tipo de mistura, o teor de projeto deve ser sempre atendido. De forma geral, pode-se verificar que as misturas *gap graded* com asfalto modificado por polímero STYLINK apresentaram desempenho inferior quando comparadas com as misturas com asfalto modificado por borracha ECOFLEX Pave B, sendo que as misturas com STYLINK não atenderam ao valor mínimo de VAM (de 17,0%) e que a maioria não atende a RBV (de 65,0% a 75,0%). Quanto à vida de fadiga, pode-se verificar que as misturas com STYLINK moldadas no teor de projeto, tanto com o compactador Marshall, quanto com o giratório, apresentaram as maiores vidas de fadiga. Já as misturas moldadas com o ECOFLEX Pave B, a maior vida de fadiga foi obtida pela mistura moldada no teor de projeto com compactador Marshall, sendo que a menor vida foi obtida pela mistura moldada com o compactador giratório.

Quanto às misturas abertas, do tipo CPA, pode-se verificar que esse tipo de mistura sofre grande influência da forma de compactação empregada na moldagem dos CPs, uma vez que a curva granulométrica é uniforme, formada por agregados quase exclusivamente de mesmo tamanho, com muitos vazios interconectados e quantidade reduzida de material fino. Outro fator importante que foi identificado é que, a partir dos teores de projeto obtidos na dosagem Superpave, pode-se verificar que, no caso de misturas descontínuas e de misturas abertas, o número de giros para moldar os CPs não corresponde ao mesmo número de golpes utilizado na compactação de misturas densas.

Apesar de algumas especificações permitirem a variação do teor de projeto da mistura em usina no intervalo de ±0,3%, deve-se tomar cuidado para evitar que isso não seja refletido no pavimento em forma de defeitos.

De forma geral, alguns resultados mostraram que a variação do teor de ligante influencia o desempenho das misturas asfálticas em laboratório. Além disso, algumas misturas com o mesmo tipo de ligante apresentaram grande variação na vida de fadiga, o que pode ter acontecido em função do tipo e da forma de compactação das misturas. No entanto, esse comportamento não foi uniforme, sendo que para algumas misturas ocorria aumento da vida de fadiga com o aumento de +0,25% do teor de ligante e redução com um aumento de +0,50% do teor de ligante. Outro fator observado é quanto à influência do tipo de compactação, que ainda precisa ser mais explorado, pois o comportamento não é o mesmo para os diferentes tipos de misturas.

Dessa forma, fica evidente a necessidade de continuar estudando a sensibilidade dos ligantes, através da moldagem de novos CPs de algumas misturas e da realização de ensaios complementares.

3.1.17. Estudo da sensibilidade do teor e do tipo de ligante em misturas asfálticas à deformação permanente

Pesquisa de deformação permanente (Parceira com a Universidade de São Paulo – USP)

Este projeto de pesquisa realizado no período 2006-2010, com recursos RDT (Recursos de Desenvolvimento Tecnológico) da ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), previstos em contrato com a Concessionária CCR Nova Dutra, visou analisar o comportamento à deformação permanente de vários tipos de misturas asfálticas e sua variação dependendo do teor e tipo de ligante asfáltico. Foram realizados ensaios de deformação permanente, determinação do volume de vazios antes e após o afundamento em trilha de roda, permeabilidade e abrasão Cantabro de diversas misturas asfálticas preparadas com diferentes ligantes, teores de asfalto, graduações, tamanhos nominais máximos e energias de compactação. Os agregados pétreos e os ligantes asfálticos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa representativos dos materiais empregados nas obras de restauração da Rodovia Presidente Dutra.

A camada de revestimento asfáltico pode contribuir de maneira expressiva para os afundamentos em trilha de roda, seja decorrente de uma densificação complementar ocasionada pelo carregamento repetido ou ainda por cisalhamento, associada à deformação que ocorre por fluência das misturas asfálticas devido à presença do ligante asfáltico. Pode ocorrer deformação permanente excessiva nos revestimentos asfálticos, mesmo se estes forem dosados pelo método Marshall e estiverem no teor "ótimo". Isto decorre de vários fatores concomitantes: as maiores cargas de tráfego e número de repetições, o uso de ligante com consistência inadequada às condições climáticas atuantes na região, problemas de geometria de via como rampas íngremes com veículos comerciais carregados e lentos, tráfego canalizado, entre outras situações. Vários países vêm substituindo a dosagem Marshall por dosagens adaptadas, por dosagem com equipamento giratório, ou outros métodos.

Deve-se ressaltar que não somente o tipo de ligante asfáltico é o responsável pela deformação permanente. Vários fatores concorrem para uma mistura asfáltica ser estável quanto a esta propriedade. A seleção dos materiais empregados, tanto agregados quanto ligante asfáltico, são importantes no comportamento final. É essencial fazer um estudo da composição granulométrica, de modo que a estrutura granular promova um travamento adequado, com elevada resistência ao cisalhamento. Entretanto, deve-se ainda haver espaço (vazios) entre estes agregados para a introdução de ligante, que por sua vez permitirá coesão entre os agregados e os protegerá dos problemas de descolamento de película asfáltica (*stripping*).

Sabe-se que o maior consumo de ligante e maior espessamento de película são bons para a proteção destes agregados e para a resistência à fadiga por repetição de carga. Porém, infelizmente, o maior consumo de ligante asfáltico leva a menor resistência à deformação permanente. Estes comportamentos antagônicos na resposta das misturas asfálticas com a variação do teor de asfalto dificultam a escolha do teor de projeto. Por este motivo, muitas vezes altera-se a graduação para privilegiar algum aspecto técnico, ou mesmo altera-se o tipo de ligante asfáltico para conferir maior resistência ao afundamento.

Metodologia

Esta pesquisa foi realizada conjuntamente pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e pela Concessionária CCR Nova Dutra graças aos Recursos para Desenvolvimento Tecnológicos (RDT) da ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), sendo que outras propriedades como módulo de resiliência, fadiga e resistência à tração foram estudadas conjuntamente pela COPPE/UFRJ e pela Concessionária CCR Nova Dutra completando a avaliação de comportamento mecânico.

Neste estudo foram avaliados diversos tipos de misturas asfálticas, a partir da combinação dos seguintes fatores:

I. Quatro ligantes asfálticos

- CAP 30-45
- CAP 50-70
- Asfalto modificado por polímero (AMP)
- Asfalto modificado por borracha (AMB);

II. Cinco teores de ligante (para verificar se eventuais variações de usina implicariam em potenciais efeitos quanto à deformação permanente)

- Teor de Projeto (TP)
- TP ± 0,5%
- TP± 0,25%;

III. Cinco granulometrias

- 9,5mm (Superpave)
- 12,5mm (Faixa C DNIT)
- 19,0mm (Superpave)
- Gap-graded (Especificação Caltrans)
- CPA (Faixa Arizona).

Foram realizadas as usinagens das misturas asfálticas no LTP seguindo o projeto concebido na NOVA DUTRA - CPR. Após a usinagem das misturas asfálticas, estas foram levadas à mesa compactadora francesa LCP (idealizada no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* da França) para a moldagem das placas (corpos-de-prova utilizados no ensaio de deformação permanente). A mesa compactadora LCPC compacta a mistura asfáltica por rolagem (Figura 3.67), através de uma sequência de passagens de um pneu padronizado, com pressão variando entre 0,3 e 0,6 MPa (3 e 6 bar), segundo especificação europeia EN 12697-33 (2003a).

Para cada tipo de mistura asfáltica estudada foi compactado um par de placas iguais para serem submetidos ao ensaio de deformação permanente. Além disso, também foi moldada uma placa extra de cada concreto asfáltico, para servir de referencial inicial (placa virgem). Os corpos-de-prova para os ensaios de deformação permanente consistiam de placas com 50 mm de espessura por 180 mm de largura e 500 mm de comprimento (Figura 3.68).

Após a moldagem e esfriamento do par de placas iguais, estas eram submetidas ao simulador de tráfego tipo LCPC (também do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) para a determinação do afundamento em trilha de roda, ou deformação permanente (Figura 3.69), segundo a Norma Europeia EN 12697-22 (2003). Este equipamento é composto de um eixo com dois pneus (um para cada placa), com pressão regulável normalizada em 6bar para este ensaio, e carga regulável normalizada em 5.000N. Estes pneus passam em contato direto sobre as placas em ciclos (cada um correspondente a uma ida e uma volta), a uma frequência de 1 Hz, gerando afundamentos progressivos. Este teste é levado até 30.000 ciclos e, a fim de impor a condição mais desfavorável e acelerar a obtenção dos resultados, o mesmo é realizado a 60ºC.

Antes de ser iniciada a simulação de tráfego é lida a condição inicial (ciclo zero) e, posteriormente ao longo do ensaio vão sendo medidos os afundamentos após 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos (Figura 3.70).

Figura 3.67. Mesa Compactadora LCPC



Figura 3.68. Exemplo de Placa moldada



Figura 3.69. Simulador de Tráfego LCPC



Figura 3.70. Medida de Afundamentos



Segundo as recomendações europeias, a porcentagem máxima de afundamento em trilha de roda em revestimentos asfálticos sujeitos a tráfego pesado deve ser de 5% após 30.000 ciclos no simulador de tráfego francês.

No Brasil tem-se procurado estabelecer o limite de 5% aos 30.000 ciclos para concretos asfálticos submetidos a tráfego pesado para as condições prevalecentes no país, devido seu clima ser desfavorável quanto à deformação permanente. Este limite vem sendo utilizado desde 1994 no LTP-EPUSP, desde que os primeiros testes foram feitos com o simulador de maneira pioneira no Brasil.

Na determinação da variação do volume de vazios foram empregados corpos-de-prova extraídos de uma placa virgem (condição inicial de vazios) e de uma placa já submetida aos 30.000 ciclos do simulador de tráfego (condição após deformação permanente). A Figura 3.71 mostra o corte realizado nas placas para a retirada de placa central para a pesagem hidrostática e cálculo de volume de vazios.

Nesta pesquisa, embora não previsto no escopo inicial, foram incluídos ensaios de medida de permeabilidade no CPA, única mistura permeável neste estudo, uma vez que esta mistura tem como uma de suas características mais importantes esta propriedade e não propriamente as deformações permanentes. Os ensaios de permeabilidade das misturas asfálticas tipo CPA foram realizados no LTP-EPUSP, utilizando-se de um permeâmetro concebido e confeccionado especialmente para este fim. Na Figura 3.72 mostra-se o permeâmetro do LTP-EPUSP em funcionamento. A verificação desta propriedade quando no estudo deste tipo de concreto asfáltico é um dos requisitos da norma europeia EN 13108-7 (2006). A especificação europeia EN 12697-19 (2004), que trata de permeabilidade de corpos-de-prova de misturas asfálticas, menciona que a permeabilidade vertical usualmente fica entre 0,5×10-3m/s e 3,5×10-3m/s.

Figura 3.71. Placa cerrada para determinação de volume de vazios

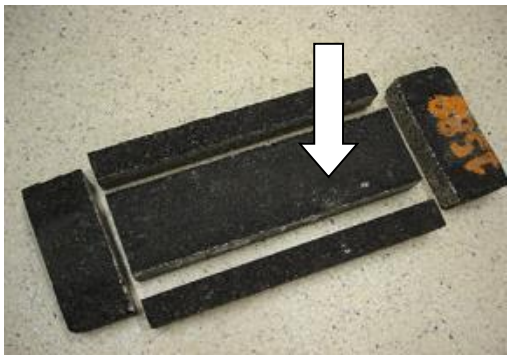


Figura 3.72. Permeâmetro para teste em misturas drenantes tipo CPA



Um ensaio fundamental a ser realizado com misturas CPA é o desgaste por abrasão Cantabro. Este ensaio possui especificação do DNIT sob número ME-383/99. Inicialmente foram realizados ensaios de abrasão Cantabro no CPR da CCR NovaDutra, dentro do programa de dosagem da mistura asfáltica CPA. A especificação europeia EN 13108-7 (2006), que trata de misturas asfálticas drenantes, menciona que a perda de massa máxima na abrasão Cantabro deve ser de 20%.

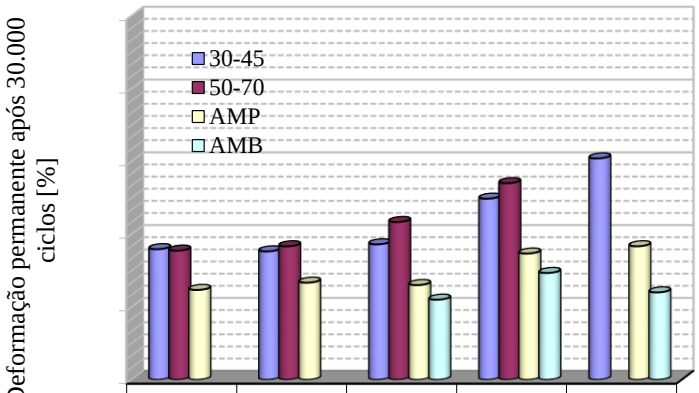
Resultados obtidos – Concreto Asfáltico Denso

Uma vez que a pesquisa forneceu uma série de resultados, foram selecionados dados das misturas com diâmetro máximo nominal de 12,5mm para ilustração, apresentando-se as consequências nos afundamentos devido à variação no teor de asfalto e a importância do tipo de ligante nos resultados de afundamentos em trilha de roda, como pode ser notado na Figura 3.73.

As misturas com ligantes convencionais 30-45 e 50-70 mostraram valores de deformação permanente bastante semelhantes até o teor de projeto e, a partir daí os concretos asfálticos com 30-45 foram mais sensíveis ao afundamento em trilha de roda. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento de 0,3% de teor de ligante para CAP 30-45 em relação ao CAP 50-70 no teor de projeto. Em todos os casos, a deformação permanente ficou acima do limite aceitável de 5%, não sendo aconselhável seu uso na Rodovia Presidente Dutra nestas configurações de mistura. Dependendo da viscosidade do CAP 30-45, estes valores podem se reduzir. Pode-se igualmente corrigir um pouco a graduação de maneira a reduzir a deformação permanente.

Já as misturas com asfalto modificado por polímero SBS e por borracha se mostraram mais resistentes à deformação permanente, apresentando valores de afundamento dentro do limite aceitável em misturas que continham teores de ligante até os de projeto.

Figura 3.73. Deformação permanente das misturas asfálticas densas *Concreto Asfáltico* com diâmetro máximo nominal 12,5 mm Faixa C DNIT



	TP-0,5%	TP-0,25%	TP	TP+0,25%	TP+0,5%
30-45	5,4	5,3	5,6	7,5	9,1
50-70	5,3	5,5	6,5	8,1	
AMP	3,7	4,0	3,9	5,2	5,5
AMB			3,3	4,4	3,6

Resultados obtidos – *Gap-graded*

A Figura 3.74 apresenta as deformações permanentes obtidas em função do tipo e do teor de ligante nas misturas asfálticas de graduação descontínua *gap-graded*. Observa-se que, de maneira geral, as misturas com asfalto modificado por polímero apresentaram melhor comportamento à deformação permanente que aquelas em que foi empregado ligante modificado com borracha, além de mostrarem menor sensibilidade à variação do teor de ligante.

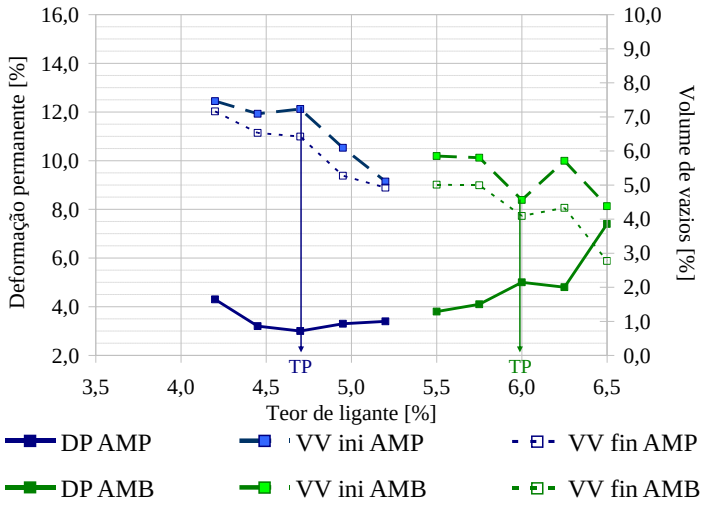
Deve ser ressaltada a diferença muito grande entre os teores de ligante, o que explica parte deste comportamento diferenciado. No que tange ao limite máximo de afundamento em trilha de roda para vias de tráfego pesado (5%), nota-se que todas as misturas asfálticas com AMP apresentaram valores bastante satisfatórios. Os concretos asfálticos com AMB também atenderam a este requisito, exceto na mistura com teor mais elevado de ligante (+0,5%). Sendo assim, o uso das misturas *gap-graded* estudadas nesta pesquisa seria recomendável no caso da Rodovia Presidente Dutra, com exceção daquela em que houve acréscimo de 0,5% de AMB. Por fim, considerando a variação de teor de ligante aceitável em usina (±0,3%), observa-se que isto não comprometeria o comportamento quanto à deformação permanente das misturas asfálticas estudadas, nas configurações de materiais empregadas.

Na Figura 3.74 apresentam-se ainda os resultados de volume de vazios obtidos com os corpos-de-prova extraídos das placas de misturas asfálticas nas condições antes e após a deformação permanente (inicial e final), bem como suas respectivas variações. Pode-se observar que o volume de vazios inicial tende a ser menor quanto maior o teor de ligante, o que era de se esperar. No entanto, comparativamente, as misturas com asfalto-borracha ficaram mais “fechadas”, com

menor volume de vazios, que aquelas usinadas com asfalto-polímero. A análise de resultados mostra que o volume de vazios da mistura com 6,25% de ligante é muito elevado, o que indica erro no teor de ligante real utilizado.

Isto explica a baixa deformação permanente obtida, que deve ser superior na realidade que aquela encontrada.

Figura 3.74. Deformação permanente × Volume de vazios das misturas asfálticas descontínuas *gap-graded* com AMP e AMB



Resultados obtidos – CPA - Camada Porosa de Atrito

A especificação europeia de misturas drenantes (EN 13108-7, 2006) não exige o ensaio de deformação permanente para este tipo de material. Os resultados de volume de vazios encontrados nas placas foram respectivamente: 20,8% de vazios para o AMP e 25,5% para o AMB. No entanto, foi difícil a obtenção destes valores por limitações técnicas.

Os ensaios de permeabilidade apontaram que há uma grande similaridade de permeabilidade de corpos-de-prova extraídos das placas de misturas asfálticas nas condições de placa "virgem". Estes valores ficaram da ordem 1,6 x 10-3 m/s para as misturas de CPA usinadas com AMP e 1,4 x 10-3 m/s para os CPA usinados com AMB. São valores equivalente do ponto de vista prático. Considerando-se que a norma europeia EN 12697-19 (2004) menciona que a permeabilidade vertical de misturas asfálticas em geral deve se situar entre 0,5 × 10-3 a 3,5× 10-3 m/s, nota-se que todos os concretos asfálticos estudados apresentaram resultados satisfatórios quanto a esta propriedade.

Os ensaios de perda de massa pelo desgaste Cantabro foram realizados no CPR da CCR NovaDutra. Os resultados mostram perda decrescente com o aumento de teor de ligante, o que é explicado pela melhor coesão, com valores de 12,2% para CPA no teor de 4,5% de AMP e de 13,9% para CPA com teor de 5,0% de AMB. Ambos valores são similares e equivalentes do ponto

de vista prático. Considerando-se que a norma europeia EN 13108-7 (2006) menciona que a perda de massa máxima de misturas asfálticas drenantes deve ser de no máximo 20%, nota-se que os resultados encontrados se mostraram satisfatórios perante a norma.

Conclusões

Pelos resultados obtidos nesta extensa pesquisa laboratorial, tem-se as seguintes considerações a serem feitas:

I. Caráter Geral: o estudo corrobora a teoria mostrando pelos seus resultados que:

- O aumento de teor de ligante provoca uma redução de volume de vazios;
- O aumento de teor de ligante provoca um aumento da deformação permanente;
- Após ensaio de simulador, o volume de vazios fica reduzido por consolidação da mistura; a deformação consolidação, mas também pela fluência.

II. Concreto Asfáltico: as misturas densas e bem-graduadas do tipo concreto asfáltico apresentam:

- com maior diâmetro nominal máximo, o teor de ligante é menor devido à redução de superfície específica, como era de se esperar;
- não foi observada uma tendência clara de aumento de resistência à deformação permanente pelo aumento do diâmetro nominal máximo pois as curvas granulométricas seguem diferentes padrões de arranjo no esqueleto mineral;
- embora as graduações sigam diferentes padrões de arranjo, todas se apresentem de graduação mais grosseira em relação à linha de densificação máxima, o que é recomendável para não causar problemas de segregação e de superfície com macrotextura muito fechada;
- as misturas com asfalto convencional CAP 50-70 resistiram, em geral, menos que todas as demais misturas asfálticas;
- as misturas com asfalto convencional CAP 30-45 mostram maior resistência, em geral, que aquelas com CAP 50-70, embora as características destes ligantes estivessem lamentavelmente muito próximas. Este aspecto foi observado após a realização de grande parte dos ensaios em concretos asfálticos; os ligantes foram reavaliados pela Dutra, e foram encontrados dados que aproximavam as características de um ao outro;
- Os asfaltos convencionais não deram resultados de deformação permanente inferiores a 5%, limite europeu para tráfego pesado aos 30.000 ciclos de ensaio no simulador de tráfego LCPC em condições padronizadas, tornando-os produtos que podem apresentar problemas de deformação em trilha de roda. O uso de CAP 30-45 mais

consistente que o aqui testado pode auxiliar sobremaneira na redução dos valores encontrados nesta pesquisa;

- Os concretos asfálticos usinados com asfalto convencional são muito sensíveis à variação positiva no teor de ligante (excesso em relação ao de projeto); valores de +0,25% (em excesso) podem ocasionar aumentos expressivos de deformação. O aumento de +0,5% é em geral proibitivo pelas más características de resistência à deformação permanente;
- Os asfaltos modificados oferecem às misturas de concreto asfáltico maior resistência à deformação permanente;
- Os asfaltos modificados, de maneira geral, são menos sensíveis às variações de teores de ligante quanto à deformação permanente, embora a deformação aumente em geral com o aumento do teor;
- A maior parte das misturas asfálticas tipo concreto asfáltico com asfalto modificado (por polímero e por borracha) apresentam deformação inferior ao limite de 5% no simulador de tráfego LCPC.

III. Gap-graded: as misturas do tipo gap-graded apresentam:

- Observa-se, de maneira geral, que as misturas com asfalto modificado por polímero e modificado com borracha mostram-se resistentes à deformação permanente
- No que tange ao limite máximo de afundamento em trilha de roda para vias de tráfego pesado (5%), nota-se que todas as misturas asfálticas com AMP apresentaram valores bastante satisfatórios;
- Considerando a variação de teor de ligante aceitável em usina (±0,3%), observa-se que isto não comprometeria o comportamento quanto à deformação permanente das misturas asfálticas estudadas, nas configurações de materiais empregados, no caso de asfalto polímero;
- Os *gap-graded* com AMB também atenderam a este requisito, exceto na mistura com teores muito elevados;
- O uso das misturas *gap-graded* estudadas nesta pesquisa seria recomendável no caso da Via Dutra;
- Uma vez que as misturas tiveram graduação pré-determinada, o estudo se ateve principalmente voltado às características de ligante.

IV. Camada Porosa de Atrito CPA: as misturas do tipo CPA apresentam:

- A especificação europeia de misturas drenantes (EN 13108-7, 2006) não exija o ensaio de deformação permanente para este tipo de material.
- Considerando-se que a norma europeia EN 12697-19 (2004) menciona que a permeabilidade vertical de misturas asfálticas em geral deve se situar entre 0,5 × 10-3 a 3,5× 10-3 m/s, nota-se que todos os CPAs estudados apresentaram resultados satisfatórios quanto a esta propriedade.
- Os corpos-de-prova extraídos de placas foram mais suscetíveis à perda de massa no Cantabro que aqueles preparados diretamente no molde Marshall, além de apresentarem maior variabilidade de resultados com o acréscimo da quantidade de asfalto na mistura. O sistema de extração de corpos-de-prova das placas altera as ligações entre os agregados, rompendo as conexões entre eles, o que aumenta a perda por abrasão. Estes resultados não devem ser considerados em projeto. Deve-se considerar aqueles obtidos por desgaste Cantabro com corpos-de-prova compactados no Marshall;
- Pode-se observar que o aumento do teor de ligante torna a mistura CPA menos vulnerável à perda de massa por desgaste pois a coesão entre agregados é mais eficiente, porém o volume de vazios pode ficar reduzido e modificar a permeabilidade.

3.1.18. Critério de otimização de projetos de ponte a partir de espectros de acelerações induzidas por veículos nos tabuleiros

Essa pesquisa trata de uma ampla investigação do desempenho estrutural de pontes, considerando os critérios de projeto adotados em normas correntes de estruturas de concreto armado. O objetivo principal foi avaliar o desempenho estrutural de pontes de concreto armado por meio de acelerações induzidas por veículos nos tabuleiros dessas estruturas, para estabelecer critérios de projetos que levem em consideração essas acelerações.

Na primeira fase da pesquisa, foi realizada uma sistematização dos principais resultados medidos em ensaios dinâmicos de estrutura de pontes existentes, relacionando suas frequências naturais a indicativos geométricos, como por exemplo, o vão da ponte. Também foi observada nessa fase a alteração das características de resistência e rigidez dos concretos em pontes de idade elevada, com mais de 40 anos, resultando em funções de distribuição para essas características. Devida a sua importância em projetos estruturais de pontes, ênfase especial foi dada aos coeficientes

dinâmicos mais utilizados. Com o método de identificação adotado, foi possível medir os principais coeficientes dinâmicos durante os ensaios realizados nas pontes monitoradas. Em seguida, comparou-se os valores desses coeficientes e os coeficientes de impacto especificados pela normalização atual.

Na segunda fase da pesquisa foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais fatores que afetam a durabilidade de pontes, reduzindo, portanto, a vida útil das estruturas. Nas pontes investigadas no presente trabalho, a ação externa mais significativa para a fadiga das armaduras é a ação do tráfego de veículos. Dessa forma, investigou-se o tráfego atualmente existente nas rodovias nacionais, utilizando-se dados das monitorações realizadas e dados de tráfego levantados em rodovias brasileiras. Para a análise de fadiga, apresentou-se as curvas SN associadas a hipótese de Palmgren-Miner, que será o método de análise utilizado no presente trabalho.

Considerando-se que tanto as ações do tráfego quanto as curvas de fadiga, respectivamente solicitação e resposta envolvidas na análise estrutural, não podem ser exatamente conhecidas devido a incertezas inerentes a esses fenômenos, o presente estudo apresentou uma abordagem estatística dos mesmos. Para cálculo do índice de confiabilidade à fadiga, foi desenvolvido programa em MATHCAD para simulação do dano acumulado nas armaduras, que considera um tráfego efetivo medido em rodovias nacionais, além de curva SN de Wohler (fadiga) e respectiva aleatoriedade. Esse programa foi utilizado inicialmente para um estudo paramétrico das pontes sobre duas vigas, com geometrias comumente empregadas desde a década de 60, conforme DNIT (2004). Depois foi empregado para análise de fadiga das pontes investigadas no presente trabalho.

Na terceira fase, apresentou-se os trabalhos que visam controlar os danos nas estruturas de concreto em função de suas mobilidades, objeto principal da pesquisa. Esses conceitos foram então aplicados às pontes investigadas e foram obtidas as relações entre acelerações medidas nos tabuleiros das pontes e o dano existente na estrutura. Dessa forma, chegou-se a valores de acelerações que são indicativos da existência do dano na estrutura das pontes.

Além disso, para efeitos de projeto, a confiabilidade à fadiga calculada para as pontes investigadas e relacionada às acelerações induzidas nos tabuleiros, utilizando-se a base de dados levantada nos ensaios dinâmicos. Para isso, foram realizadas simulações numéricas, utilizando-se os valores das pontes investigadas, das quais se dispõe de informações coletadas em ensaios dinâmicos, de suas geometrias e materiais. Nesse caso, os diagramas obtidos permitem controlar a vida útil à fadiga dessas estruturas a partir das acelerações induzidas nos tabuleiros das pontes, atingindo-se, portanto, o objetivo principal dessa pesquisa.

Os resultados da primeira fase da presente investigação realizada foram apresentados por RODRIGUES et al (2010) na Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management do IABMAS – International Association for Bridge Maintenance and Safety. A conferência foi realizada na Filadélfia, Pensilvânia, USA, no período entre 10 e 15 de julho de 2010.

Um resumo dos principais resultados da presente pesquisa está relacionado a seguir:

Verificou-se que as frequências naturais de pontes com idades em torno de 40 anos, determinadas por meio de ensaios dinâmicos de identificação, são próximas às das pontes com mesma idade investigadas em estruturas da Europa, corroborando, portanto, o método de identificação estrutural adotado no presente trabalho;

Os coeficientes de amplificação dinâmica obtidos a partir de dados medidos em pontes de rodovias nacionais foram significativamente superiores aqueles especificados pela NBR-7187 (2003) para projetos;

Os coeficientes de amplificação dinâmicas medidos tiveram melhor correlação com três variáveis, vão da ponte, velocidade de passagem do veículo e freqüência natural, ao invés de somente com o vão da ponte, como sugerido atualmente pela NBR-7187 (2003) para projetos.

As vibrações induzidas nas pontes investigadas foram então correlacionadas, primeiro com o dano estimado nas estruturas existentes, e segundo com o índice de confiabilidade à fadiga calculado para as pontes existentes. Nesse caso as vibrações medidas nas pontes durante os ensaios dinâmicos foram expressas em amplitude máxima pico-a-pico de acelerações e em unidades vibrars, atualmente especificadas pela NBR-15307 (2005). Os resultados indicaram que as amplitudes pico a pico de acelerações apresentam melhor correlação e, portanto, são melhores indicativos tanto do dano existente como do índice de confiabilidade das estruturas existentes. Além disso, a grandeza intensidade de vibração (medida em vibrars) não apresentou correlação satisfatória com os fenômenos estudados e, portanto, não devem ser utilizadas na avaliação desses fenômenos, como atualmente recomenda a NBR-15307 (2005). Dessas correlações, também pode-se sugerir um limite de aceleração pico-a-pico no tabuleiro de pontes de 0,15 g, a ser para avaliar a existência de danos significativos nessas estruturas, e de 0,17 g a ser empregado para verificar a durabilidade em projetos de pontes.

3.1.19. Ensaios para avaliação dos concretos moldados em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfegos de veículos

A durabilidade das construções de concreto está relacionada com as vibrações mecânicas atuantes, principalmente, nas primeiras idades do concreto, quando o concreto está na fase de endurecimento. Nesta fase, as vibrações mecânicas podem introduzir danos permanentes na microestrutura levando a uma redução de propriedades estruturais do concreto tais como a resistência a tração e resistência a ancoragem. Uma das principais consequências desse fenômeno é uma imediata fissuração das peças, seguida pela perda de rigidez global decorrente da microfissuração da peça pelas vibrações mecânicas durante a fase de moldagem.

Quando se trata da ampliação ou reparo de obras de arte do tipo pontes e viadutos que são normalmente submetidas a ações dinâmicas, a moldagem das peças passa ser de importância vital para a durabilidade da estrutura, pois normalmente essas obras são realizadas durante vibrações induzidas por tráfego de veículos das pistas vizinhas, aonde vêm sendo observadas fissurações prematuras das peças.

Portanto, para aumentar o entendimento desse fenômeno e propor um método de moldagem de peças para ambientes com vibrações controladas, foi proposta nesta investigação uma avaliação do desempenho da resistência do concreto sujeito as vibrações ambientes, isto é devido ao tráfego, durante a cura. Para isso, foi realizada uma parceira com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico com o Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) Ltda.

Na primeira etapa foram realizados ensaios em laboratório simulando as vibrações ambientes registradas em campo. Na segunda etapa da pesquisa, as peças foram moldadas em campo onde havia vibrações ambientes inerentes da passagem de veículos. Esses ensaios foram realizados durante a moldagem do pavimento da ponte de Lavrinhas da Rodovia Presidente Dutra, no Estado de São Paulo. Em ambos os experimentos foram empregados diferentes níveis de vibração, com natureza e intensidade distintas visando a identificação da mudança das propriedades estruturais de controle tecnológico do concreto.

Com os resultados desses ensaios foram realizadas comparações da resistência e da rigidez medidas em laboratório com as medidas diretamente em ambiente de campo (ponte de Lavrinhas), nas situações de repouso e de vibração.

Para a execução dos ensaios em laboratório foram moldados corpos de prova com concreto de resistência média de $fck=40\ MPa$, utilizando traços fornecidos pela CCR NovaDutra para cimentos CP-III e CP-V.

Nos ensaios de campo foi utilizado o mesmo concreto utilizado na obra de alargamento de pista da Ponte sobre o Rio Paraíba, km 21,73 da pista São Paulo - Rio de Janeiro, na concretagem do dia 05/10/06 às 7h00.

Os corpos de prova têm formatos cilíndricos e prismáticos. Os cilíndricos foram utilizados para determinação da resistência a compressão e resistência a tração por compressão diametral. Os prismáticos foram utilizados para determinação da resistência à tração por flexão e também para ensaio de arrancamento, para avaliação da aderência da barra de aço no concreto.

Para simular em laboratório as condições de vibração em campo, os concretos foram moldados em plataforma vibratória e em plataforma em repouso. Para os ensaios em plataforma vibratória foram utilizados como referência os registros medidos no Viaduto de acesso à Penedo.

Para esta pesquisa foram moldados 6 lotes de corpos de prova, dois deles utilizaram o traço com o cimento CP III, três utilizaram o traço com cimento CP V e um utilizou o concreto utilizado na obra da ponte sobre o Rio Paraíba em 05/10/06.

Procedimentos de ensaio

Em cada uma das etapas da investigação foram moldados dois lotes de corpos de prova. Um dos lotes foi moldado sobre plataforma vibratória e o outro em plataforma em repouso. A vibração aplicada durante o processo de moldagem e cura foi realizada com um sinal registrado em campo, normalizado, que se repetia a cada intervalo de tempo, tal como ocorre na ponte normalmente. Esse sinal de referência foi registrado no viaduto de Penedo que foi reproduzido com níveis de acelerações cinco vezes maior que o medido no Viaduto originalmente.

As vibrações obtidas na monitoração do tabuleiro do Viaduto de acesso à Penedo, Tabela 3.31, foram reproduzidos na plataforma vibratória durante 4 horas com uma intensidade cinco vezes maior.

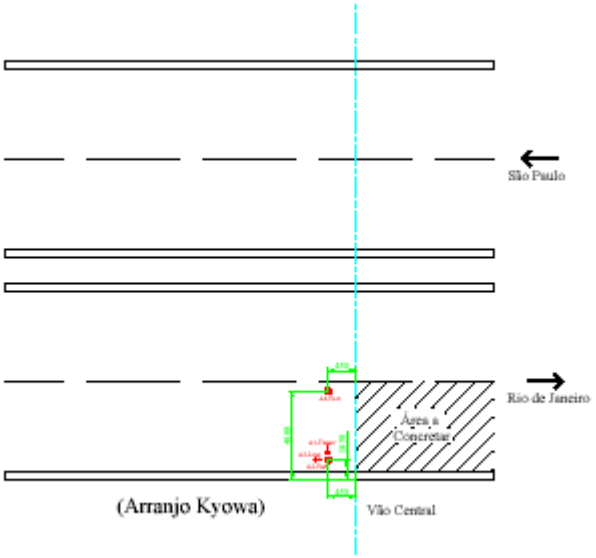
Nos ensaios de campo foram moldados dois lotes de corpo-de-prova. Um deles foi moldado sobre o vão central da Ponte sobre o Rio Paraíba e o outro foi moldado fora da ponte, em uma região em repouso, Figura 3.75.

Tabela 3.31. Estatística das acelerações medidas no Viaduto de acesso à Penedo, Rodovia Presidente Dutra

	A-1	A-2
	(g)	(g)
Amostras	19929	19929
Máximo	0,060059	0,05881
Mínimo	-0,05006	-0,05936
Max – Mín	0,110123	0,11818
Média	-0,00103	-0,00186
Desvio Padrão	0,006989	0,00716
Área	-0,04114	-0,07422

RMS	0,007064	0,0074

Figura 3.75. Arranjo da instrumentação do tabuleiro da ponte sobre o Rio Paraíba



Resultados – Ensaio de compressão axial

Os resultados obtidos no ensaio de compressão axial dos corpos de prova moldados com traço utilizando CP III estão apresentados nas Tabelas 3.32 e 3.33.

Tabela 3.32. Resultados dos Ensaios a compressão axial - Traço CP III, ensaiado na USP

Resistência à Compressão Axial											
7 dias							**28 dias**				
Cura		Compressão Axial (tf)	fci (MPa)	fcm (MPa)	σ	δ	Compressão Axial (tf)	fci (MPa)	fcm (MPa)	σ	δ
cv	1	31,82	39,81	40,53	2,47	6,09	35,20	44,03	44,08	7,14	16,21
cv	2	34,38	43,01				34,70	43,41			
cv	3	31,98	40,01				31,20	39,03			
cv	4	33,68	42,13				40,50	50,66			
cv	5	33,60	42,03				42,60	53,29			
cv	6	28,94	36,20				27,20	34,03			
sv	7	31,94	39,96	39,08	2,53	6,48	42,20	52,79	48,50	2,36	4,87
sv	8	28,16	35,23				38,30	47,91			
sv	9	29,40	36,78				37,40	46,79			
sv	10	33,32	41,68				39,50	49,41			
sv	11	31,82	39,81				37,00	46,29			
sv	12	32,82	41,06				38,20	47,79			

Tabela 3.33. Resultados dos Ensaios a compressão axial - Traço CP III, ensaiado na Falcão Bauer

Resistência à Compressão Axial									
7 dias						28 dias			
Cura		Compressão Axial (tf)	fcm (MPa)	σ	δ	Compressão Axial (tf)	fcm (MPa)	σ	δ
cv	1	39,90	38,75	3,23	8,34	45,70	49,68	3,20	6,44
cv	2	39,60				53,80			
cv	3	39,80				52,00			
cv	4	33,30				46,20			
cv	5	37,50				50,60			
cv	6	43,10				49,80			
sv	7	32,40	31,50	2,83	8,99	42,60	44,67	3,37	7,53
sv	8	28,16				41,80			
sv	9	28,40				45,60			
sv	10	34,00				41,20			
sv	11	34,60				49,70			
sv	12	31,80				47,10			

Os resultados obtidos no ensaio de compressão axial nos corpos de prova moldados com traço utilizando CP V estão apresentados nas Tabelas 3.34 a 3.35.

Tabela 3.34. Resultados dos Ensaios a compressão axial - Traço CP V, ensaiado na USP

Resitência à Compressão Axial											
3 dias							21 dias				
Cura		Compressão Axial (tf)	fci (MPa)	fcm (MPa)	Σ	δ	Compressão Axial (tf)	fci (MPa)	fcm (MPa)	σ	δ
cv	1	26,65	33,34	40,77	6,90	16,94	46,40	58,04	53,69	7,27	13,54
cv	2	27,50	34,40				47,50	59,42			
cv	3	35,40	44,28				45,90	57,42			
cv	4	38,00	47,54				39,60	49,54			
cv	5	29,00	36,28				32,50	40,66			
cv	6	39,00	48,79				45,60	57,04			
SV	7	18,60	23,27	35,22	7,02	19,93	40,00	50,04	52,42	4,24	8,09
SV	8	27,75	34,71				39,90	49,91			
SV	9	25,50	31,90				40,20	50,29			
SV	10	34,00	42,53				48,70	60,92			
SV	11	32,50	40,66				41,40	51,79			
SV	12	30,60	38,28				41,20	51,54			

Tabela 3.35. Resultados dos Ensaios a compressão axial - Traço CP V, ensaiado na Falcão Bauer

Compressão Axial									
		3 dias				21 dias			
Cura		fci (MPa)	fcm (MPa)	σ	Δ	fci (MPa)	fcm (MPa)	σ	δ
cv	1	42,30	41,01	3,25	7,93	53,80	56,06	2,91	5,20
cv	2	37,80				53,60			
cv	3	43,00				56,90			
cv	4	44,30				55,30			
cv	5	36,60				60,70			
cv	6	37,50				***			
SV	10	40,20	40,60	4,76	11,72	54,50	46,65	3,39	7,27
SV	11	35,50				57,60			
SV	12	38,10				50,80			
SV	13	43,30				57,60			
SV	14	48,70				59,40			
SV	15	37,80				***			

Os resultados obtidos no ensaio de compressão axial nos corpos de prova moldados com o concreto utilizado em campo estão apresentados na Tabela 3.36.

Tabela 3.36. Resultados dos Ensaios a compressão axial (Traço de campo, ensaiado no LSE)

Resitência à Compressão Axial											
		7 dias					28 dias				
Cura		Compressão Axial (kN)	f_{ci} (MPa)	fcm (MPa)	Σ	δ	Compressão Axial (kN)	fci (MPa)	fcm (MPa)	σ	δ
cv	1	166,11	21,16	24,54	3,14	12,82	256,57	32,68	29,57	7,28	24,62
cv	2	190,59	24,28				303,01	38,60			
cv	3	239,34	30,49				267,54	34,08			
cv	4	186,82	23,80				228,93	29,16			
cv	5	191,36	24,38				193,66	24,67			
cv	6	181,53	23,12				142,93	18,21			
SV	7	242,69	30,92	27,14	3,55	13,09	202,72	25,82	30,65	5,84	19,05
SV	8	247,54	31,53				202,38	25,78			
SV	9	174,03	22,17				205,09	26,13			
SV	10	207,86	26,48				275,79	35,13			
SV	11	196,95	25,09				245,91	31,33			
SV	12	209,35	26,67				311,89	39,73			

Resultados – Ensaios de compressão diametral

Os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral nos corpos de prova moldados com traço utilizando CP III estão apresentados nas Tabelas 3.37 a 3.38.

Tabela 3.37. Resultados dos Ensaios a compressão diametral (Traço CP III, ensaiado na USP)

Resistência à traçao por compressão diametral											
		7 dias					28 dias				
Cura		Compressão Diametral (tf)	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	Σ	δ	Compressão Axial (tf)	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ
CV	1	23,00	2,40	2,36	0,32	13,54	32,10	3,34	3,10	0,37	12,08
CV	2	25,60	2,67				23,50	2,45			
CV	3	19,46	2,03				31,90	3,32			
CV	4	25,08	2,61				27,40	2,85			
CV	5	18,28	1,90				31,30	3,26			
CV	6	24,36	2,54				32,50	3,38			
SV	7	22,04	2,30	2,15	0,36	16,58	29,50	3,07	3,01	0,10	3,33
SV	8	21,68	2,26				27,80	2,90			
SV	9	21,00	2,19				28,90	3,01			
SV	10	23,02	2,40				30,40	3,17			
SV	11	13,76	1,43				28,90	3,01			
SV	12	22,12	2,30				28,00	2,92			

Tabela 3.38. Resultados dos Ensaios a compressão diametral (Traço CP III, ensaiado na Falcão Bauer)

Resistência à traçao por compressão diametral									
		7 dias				28 dias			
Cura		ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	Δ	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ
CV	1	2,85	3,34	0,35	10,46	3,54	3,60	0,14	3,93
CV	2	3,12				3,60			
CV	3	3,67				3,58			
CV	4	3,29				3,81			
CV	5	3,33				3,66			
CV	6	3,80				3,38			
SV	7	3,04	3,18	0,16	5,16	3,12	3,20	0,19	6,08
SV	8	3,22				3,05			
SV	9	2,95				3,10			
SV	10	3,40				3,05			
SV	11	3,29				3,41			
SV	12	3,17				3,49			

Os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral nos corpos-de-prova moldados com traço utilizando CP V estão apresentados nas Tabelas 3.39 a 3.40.

Tabela 3.39. Resultados dos Ensaios a compressão diametral (Traço CP V, ensaiado na USP)

Resistência à tração por compressão diametral											
		3 dias					21 dias				
Cura		Compressão Diametral (tf)	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ	Compressão Axial (tf)	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ
CV	1	23,5	2,45	2,69	0,37	13,61	26,20	2,73	2,73	0,14	4,96
CV	2	23,4	2,44				25,00	2,60			
CV	3	30,8	3,21				27,60	2,87			
CV	4	28,4	2,96				25,80	2,69			
CV	5	21,7	2,26				24,90	2,59			
CV	6	27,3	2,84				28,00	2,92			
SV	7	25,3	2,63	2,52	0,24	9,52	21,30	2,22	2,58	0,25	9,75
SV	8	24,7	2,57				23,70	2,47			
SV	9	26,3	2,74				23,70	2,47			
SV	10	24,8	2,58				25,70	2,68			
SV	11	19,7	2,05				28,30	2,95			
SV	12	24,4	2,54				26,00	2,71			

Tabela 3.40. Resultados dos Ensaios a compressão diametral (Traço CP V, ensaiado na Falcão Bauer)

Resistência à tração por compressão diametral									
		3 dias				21 dias			
Cura		ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ
CV	1	3,74	3,55	0,29	8,24	4,02	4,04	0,14	3,35
CV	2	3,37				3,95			
CV	3	3,60				3,92			
CV	4	3,33				4,04			
CV	5	4,01				4,30			
CV	6	3,24				4,01			
SV	7	3,62	4,06	0,41	10,16	4,08	4,20	0,32	7,61
SV	8	4,23				3,95			
SV	9	4,76				4,44			
SV	10	3,88				4,42			
SV	11	4,11				3,74			
SV	12	3,74				4,54			

Os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral nos corpos de prova moldados em campo estão apresentados na Tabela 3.41.

Tabela 3.41. Resultados dos Ensaios a compressão diametral (Traço de Campo, ensaio LSE)

Resistência à traçao por compressão diametral											
		7 dias					28 dias				
Vib		Compressão Diametral (tf)	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ	Compressão Axial (tf)	ftci (MPa)	ftcm (MPa)	σ	δ
CV	1	119,94	1,27	1,39	0,18	12,82	193,13	2,05	2,03	0,33	16,21
CV	2	160,73	1,71				220,05	2,34			
CV	3	130,17	1,38				223,43	2,37			
CV	4	129,91	1,38				157,82	1,68			
CV	5	111,39	1,18				150,16	1,59			
CV	6	136,17	1,45				202,72	2,15			
SV	7	165,72	1,76	1,79	0,11	6,29	229,87	2,44	2,33	0,25	10,80
SV	8	170,46	1,81				234,00	2,48			
SV	9	148,63	1,58				183,74	1,95			
SV	10	174,06	1,85				207,37	2,20			
SV	11	178,76	1,90				209,06	2,22			
SV	12	172,87	1,84				250,26	2,66			

Resultados – Ensaios de arrancamento

Os resultados obtidos no ensaio de arrancamento dos corpos de prova moldados com traço utilizando CP III estão apresentados nas Tabelas 3.42 e 3.43.

Tabela 3.42. Resultados dos ensaios de arrancamento (Traço CP III, ensaiado na USP)

Arrancamento											
		7 dias					28 dias				
Cura		Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm(kN)	Σ	δ	Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm(kN)	σ	δ
CV	1	7,65	75,05	63,81	13,15	20,60	8,10	79,46	78,81	10,81	13,72
CV	2	4,08	40,02				8,40	82,40			
CV	3	7,55	74,07				8,10	79,46			
CV	4	7,25	71,12				8,70	85,35			
CV	5	6,18	60,63				9,00	88,29			
CV	6	6,32	62,00				5,90	57,88			
SV	7	6,50	63,77	67,13	8,41	12,53	8,70	85,35	77,66	15,47	19,91
SV	8	5,92	58,08				7,80	76,52			
SV	9	6,89	67,59				4,80	47,09			
SV	10	6,50	63,77				8,80	86,33			
SV	11	8,45	82,89				8,50	83,39			
SV	12	6,80	66,71				8,90	87,31			

Tabela 3.43. Resultados dos ensaios de arrancamento (Traço CP III, ensaiado no Falcão Bauer)

Arrancamento											
		7 dias					28 dias				
Cura		Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm(kN)	σ	δ	Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm(kN)	σ	δ
CV	1	5,78	56,70	54,05	10,60	19,61	8,00	78,48	65,76	7,35	11,18
CV	2	5,20	51,01				6,72	65,92			
CV	3	7,00	68,67				6,70	65,73			
CV	4	3,90	38,26				5,68	55,72			
CV	5	6,24	61,21				6,42	62,98			
CV	6	4,94	48,46				6,70	65,73			
SV	7	5,70	55,92	46,89	8,65	18,45	6,72	65,92	66,25	7,03	10,60
SV	8	3,68	36,10				6,88	67,49			
SV	9	4,70	46,11				7,78	76,32			
SV	10	3,80	37,28				7,02	68,87			
SV	11	5,18	50,82				5,58	54,74			
SV	12	5,62	55,13				6,54	64,16			

Os resultados obtidos no ensaio de arrancamento nos corpos de prova moldados com traço utilizando CP V estão apresentados nas Tabela 3.44 e 3.45.

Tabela 3.44. Resultados dos Ensaios de aderência (Traço CP V, ensaiado na USP)

Arrancamento											
		3 dias					21 dias				
Cura		Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm (kN)	Σ	δ	Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm (kN)	σ	δ
CV	1	4,76	46,70	56,96	7,50	13,17	3,50	34,34	59,68	14,78	24,77
CV	2	6,10	59,84				6,40	62,78			
CV	3	6,00	58,86				7,90	77,50			
CV	4	6,50	63,77				7,10	69,65			
CV	5	4,96	48,66				5,60	54,94			
CV	6	6,52	63,96				6,00	58,86			
SV	7	6,54	64,16	66,02	9,54	14,45	8,10	79,46	74,23	11,38	15,34
SV	8	6,64	65,14				5,60	54,94			
SV	9	6,88	67,49				7,00	68,67			
SV	10	6,30	61,80				7,70	75,54			
SV	11	5,54	54,35				9,00	88,29			
SV	12	8,48	83,19				8,00	78,48			

Tabela 3.45. Resultados dos ensaios de arrancamento(Traço CP V, ensaiado no Falcão Bauer)

Arrancamento											
		3 dias					21 dias				
Cura		Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm (kN)	σ	δ	Força Arrancamento (tf)	F (kN)	Fm (kN)	σ	δ
CV	1	6,20	60,82	47,94	10,93	22,79	6,96	68,28	69,52	7,24	10,41
CV	2	4,90	48,07				8,32	81,62			
CV	3	3,80	37,28				7,24	71,02			
CV	4	6,10	59,84				6,02	59,06			
CV	5	4,78	46,89				6,94	68,08			
CV	6	3,54	34,73				7,04	69,06			
SV	7	6,60	64,75	57,16	9,54	16,70	8,50	83,39	69,26	12,00	17,33
SV	8	6,24	61,21				6,66	65,33			
SV	9	4,68	45,91				7,10	69,65			
SV	10	4,64	45,52				6,30	61,80			
SV	11	6,94	68,08				5,38	52,78			
SV	12	5,86	57,49				8,42	82,60			

Os resultados obtidos no ensaio de arrancamento nos corpos de prova moldados em campo estão apresentados na Tabela 3.46.

Tabela 3.46. Resultados dos ensaios de arrancamento (Concreto de campo, ensaiado no LEM)

Cura

Cura		Força Arrancamento (kgf)	F (kN)	Fm(kN)	Σ	δ	Força Arrancamento (kgf)	F (kN)	Fm(kN)	σ	δ
CV	1	5050	49,54	29,23	17,63	60,31	600	5,89	26,62	11,44	42,98
CV	2	500	4,91				3600	35,32			
CV	3	3150	30,90				3030	29,72			
CV	4	2200	21,58				2560	25,11			
CV	5	1980	19,42				2590	25,41			
CV	6	4999	49,04				3900	38,26			
SV	7	6400	62,78	52,35	11,28	21,54	7500	73,58	53,10	11,83	22,27
SV	8	3800	37,28				5690	55,82			
SV	9	6500	63,77				5000	49,05			
SV	10	4600	45,13				4800	47,09			
SV	11	6140	60,23				3910	38,36			
SV	12	4580	44,93				5580	54,74			

Resultados – Ensaio de resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos no ensaio de flexão simples dos corpos de prova moldados com traço CP III, estão apresentados na Tabela 3.47.

Tabela 3.47. Resultados dos Ensaios de Flexão Simples (Traço CP III, ensaiado na Falcão Bauer)

Resistência à tração por flexão									
		7 dias				28 dias			
Cura		f_{tm} (MPa)	f_{tmm} (MPa)	σ	δ	f_{tm} (MPa)	f_{tmm} (MPa)	σ	δ
CV	1	4,50	5,35	0,79	14,75	5,20	5,70	0,57	10,05
CV	2	6,80				5,80			
CV	3	5,30				5,20			
CV	4	5,10				5,90			
CV	5	5,50				6,70			
CV	6	4,90				5,40			
SV	7	4,80	4,55	0,37	8,19	5,40	6,02	0,75	12,41
SV	8	4,00				6,10			
SV	9	4,50				7,20			
SV	10	5,10				5,70			
SV	11	4,40				5,20			
SV	12	4,50				6,50			

Os resultados obtidos no ensaio de flexão simples nos corpos de prova moldados com traço utilizando CP V estão apresentados nas Tabelas 3.48 a 3.49.

Tabela 3.48. Resultados dos ensaios de flexão simples (Traço CP V, ensaiado na USP)

Resistência à tração por flexão											
		3 dias					21 dias				
Cura		Força (kgf)	f_{tk} (kN)	f_{tkm} (kN)	σ	δ	Força (kgf)	f_{tk} (kN)	f_{tkm} (kN)	σ	δ
CV	1	1690	4,97	4,31	0,44	10,18	2850	8,39	8,59	0,60	7,00
CV	2	1330	3,91				2790	8,21			
CV	3	1390	4,09				2700	7,95			
CV	4	1470	4,33				3280	9,65			
CV	5	1320	3,88				3010	8,86			
CV	6	1590	4,68				2890	8,51			
SV	7	1830	5,39	5,97	0,50	8,45	3250	9,56	7,43	1,38	18,62
SV	8	2330	6,86				1910	5,62			
SV	9	2100	6,18				2390	7,03			
SV	10	1970	5,80				2880	8,48			
SV	11	1950	5,74				2400	7,06			
SV	12	1985	5,84				2320	6,83			

Tabela 3.49. Resultados dos ensaios de flexão simples (Traço CP V, ensaiado na Falcão Bauer)

Resistência à tração por flexão					
3 dias					
Vib		f_{tk} (kN)	f_{tkm} (kN)	σ	δ
CV	1	4,20	4,38	0,21	4,88
CV	2	4,40			
CV	3	4,10			
CV	4	4,50			
CV	5	4,70			
CV	6	4,40			
SV	7	5,10	5,27	0,70	13,35
SV	8	6,60			
SV	9	4,60			
SV	10	5,40			
SV	11	4,90			
SV	12	5,00			

Os resultados obtidos no ensaio de flexão simples dos corpos de prova moldados em campo estão apresentados na Tabela 3.50.

Tabela 3.50. Resultados dos ensaios de flexão simples (Traço de campo, ensaiado no LSE)

Resistência à tração na flexão											
Vib		F (kN)	ftM	ftMm	σ	δ	F (kN)	ftM	ftMm	σ	δ
CV	1	14,19	4,26	4,37	2,29	52,49	11,31	3,39	4,52	2,44	53,95
CV	2	13,18	3,95				14,94	4,48			
CV	3	15,64	4,69				14,06	4,22			
CV	4	12,90	3,87				16,60	4,98			
CV	5	12,73	3,82				14,89	4,47			
CV	6	18,68	5,60				18,55	5,57			
SV	7	14,25	4,27	4,14	1,60	38,64	16,67	5,00	4,68	1,80	38,45
SV	8	15,37	4,61				15,28	4,58			
SV	9	13,62	4,09				13,64	4,09			
SV	10	12,92	3,88				17,91	5,37			
SV	11	15,47	4,64				16,66	5,00			
SV	12	11,24	3,37				13,45	4,03			

Resultados – Módulo de Elasticidade

Os ensaios de compressão para determinação do módulo de elasticidade foram realizados no LEM, Falcão Bauer e LSE.

Para a determinação do módulo de elasticidade nos ensaios de compressão simples os corpos de prova (CP) foram instrumentados com 2 extensômetros, tipo clip-gage, instalados diametralmente opostos no CP, Figura 3.76.

Figura 3.76. Arranjo de ensaio para determinação do módulo de elasticidade, LEM



Os resultados obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade dos corpos de prova com o traço com CP III, estão apresentados nas Tabelas 3.51 a 3.52.

Tabela 3.51. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (Traço CP III, ensaiado na USP)

Módulo de Elasticidade									
7 dias						28 dias			
Cura		Ecsi (GPa)	Ecsm (GPa)	σ	δ	Ecsi (GPa)	Ecsm (GPa)	σ	δ
C/V	1	27,32	21,26	8,57	2,48	15,40	26,95	10,05	2,68
C/V	2	15,20				33,70			
C/V	3	***				31,76			
S/V	4	27,80	29,54	1,58	18,64	33,90	33,69	0,59	56,76
S/V	5	29,92				34,15			
S/V	6	30,90				33,02			

Tabela 3.52. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (Traço CP III, ensaiado na Falcão Bauer)

Módulo de Elasticidade					
7 dias					
Vib		Ecsi (GPa)	Ecsm (GPa)	σ	δ
C/V	1	24,20	24,17	1,64	14,74
C/V	2	25,80			
C/V	3	22,52			
S/V	4	21,11	22,23	1,36	16,29
S/V	5	23,75			
S/V	6	21,83			

Os resultados obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade dos corpos de prova com o traço com CP V, estão apresentados nas Tabelas 3.53 e 3.54.

Tabela 3.53. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (Traço CP V, ensaiado na USP)

Módulo de Elasticidade									
3 dias						21 dias			
Vib		Ecsi (GPa)	Ecsm (GPa)	σ	Δ	Ecsi (GPa)	Ecsm (GPa)	σ	δ
C/V	1	26,40	28,89	3,64	7,94	34,40	32,63	1,54	21,23
C/V	2	27,20				31,60			
C/V	3	33,06				31,90			
S/V	4	24,03	26,89	3,64	7,38	30,67	29,69	0,86	34,60
S/V	5	30,99				29,35			
S/V	6	25,65				29,06			

Tabela 3.54. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (Traço CP V, ensaiado na Falcão Bauer)

Módulo de Elasticidade					
3 dias					
Vib		Ecsi (GPa)	Ecsm (GPa)	σ	δ
C/V	1	***			
C/V	2	***			
C/V	3	***			
S/V	4	26,32	27,29	0,90	30,39
S/V	5	28,09			
S/V	6	27,47			

Os ensaios de compressão simples para determinação do módulo de elasticidade do concreto moldado em campo, ensaiados aos 28 dias, resultaram em valores não estatisticamente consistentes e foram desconsiderados na avaliação final desta da pesquisa. Na Tabela 3.55 estão relacionados os ensaios realizados aos 7 dias.

Tabela 3.55. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (Traço de campo, ensaiado no LSE)

Módulo de Elasticidade					
7 dias					
Vib		Ecsi (GPa)	Ecsm (GPa)	σ	δ
C/V	1	-19,169943	-21,21	2,89	-7,34
C/V	2	-23,255341			
C/V	3	**			
S/V	4	-28,51	-24,00	6,37	-3,77
S/V	5	**			
S/V	6	-19,50			

Conclusões

As conclusões da investigação realizada para avaliar os efeitos da vibração ambiente durante a cura do concreto tanto em laboratório quanto em campo estão apresentadas a seguir:

a) nos resultados das 4 amostras ensaiadas no laboratório com amplitude de acelerações em valor rms de 35 mg (acelerações 5 vezes maior que as medidas originalmente em campo no viaduto de Penedo, valor rms 7 mg), verifica-se que a resistência a compressão dos concretos não é uma boa

propriedade para indicar o efeito deletério da vibração, o mesmo já não acontecendo na resistência ao arrancamento, onde se verificou que 70% dos ensaios foram sensíveis ao efeito deletério da vibração, ou seja, houve uma redução da resistência em decorrência da vibração;

b) o efeito deletério da vibração na resistência e na rigidez do concreto fica mais evidente quando se aumenta a intensidade da vibração, situação que ocorreu nos ensaios de campo, onde se observa que todas as variáveis indicaram uma redução da resistência, onde se praticou vibrações verticais da ordem de 10 mg e na direção transversal ao tabuleiro de 103 mg, com resultante de 110 mg (ambos valores em rms);

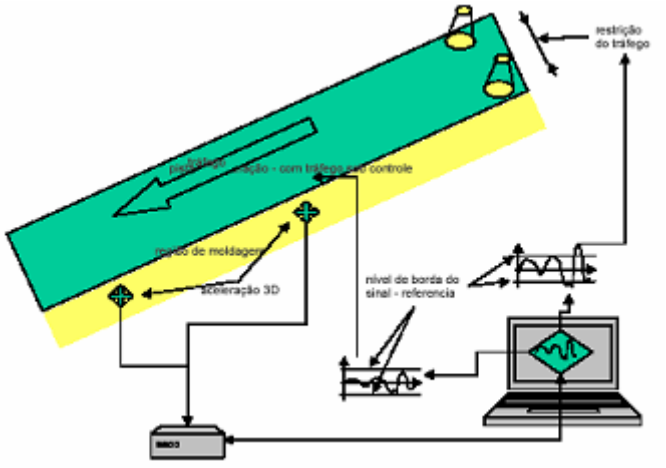
c) o aumento da intensidade das vibrações levou a redução da resistência ao arrancamento da ordem de 50%;

d) da análise das vibrações no tabuleiro da ponte, observa-se também que a direção da vibração não é importante na variação da resistência, pois no caso da ponte de Lavrinhas as vibrações transversais foram da ordem de dez (10) vezes maiores que as vibrações verticais;

Finalmente, conclui-se que a investigação alcançou seus objetivos identificando uma variável que se modifica sensivelmente com a presença da vibração na cura dos concretos.

Ademais a investigação também possibilita a implantação de um procedimento de concretagem para controlar as vibrações deletérias à resistência do concreto, com medidas localizadas de acelerações, fazendo correspondência com as velocidades dos veículos na pista, Figura 3.77.

Figura 3.77. Método de moldagem com vibração controlada, proposto pelo LSE



Para a continuidade da investigação, recomenda-se que o estudo seja ampliado para a avaliação de peças de concreto: viga, lajes e pilares, considerando não somente as propriedades de resistência e rigidez determinadas em ensaios estáticos, mas também aquelas determinadas em ensaios cíclicos que levem em conta a natureza da solicitação como o envelhecimento do concreto. Na

continuidade da investigação, recomenda-se também a realização de moldagem de corpos de prova em diferentes níveis de vibração.

3.1.20. Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes

Este projeto realizado no período 2009-2011, com recursos RDT (Recursos de Desenvolvimento Tecnológico) da ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), previstos em contrato com a Concessionária Nova Dutra, visa introduzir na concessionária NovaDutra do grupo CCR a tecnologia de redução de temperatura na produção e aplicação de misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos, chamada de mistura morna ou de baixa energia, que permite diminuir as temperaturas de mistura e de compactação em cerca de 30ºC, em comparação com misturas asfálticas a quente convencionais. Devido à utilização de temperaturas inferiores àquelas usualmente empregadas em misturas asfálticas a quente convencionais, tem-se uma redução do consumo energético e da emissão de poluentes, o que causa menores impactos ambientais nos serviços de restauração ou de novas obras de pavimentação. Na presente pesquisa foi escolhido um tipo de técnica para produzir misturas asfálticas mornas, que consiste na inserção de um aditivo surfactante no ligante, previamente à usinagem. Este estudo com misturas de baixa energia contempla diferentes ensaios laboratoriais para a caracterização do comportamento mecânico, além da realização e acompanhamento com o tempo de um trecho experimental na Rodovia Presidente Dutra para aplicação prática e análise do comportamento deste material em campo.

Nas últimas décadas tem-se verificado uma crescente preocupação com os impactos causados ao meio ambiente, o que vem estimulando a realização de diversas pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias que os minimizem.

No âmbito rodoviário, a pavimentação também tem buscado constantemente técnicas e materiais ambientalmente sustentáveis. No final da década de 90, quando a União Europeia procurava formas de cumprir as metas do Protocolo de Quioto, surgiram as primeiras pesquisas com misturas asfálticas de baixa energia na Alemanha e, desde então, diversos produtos e processos para a redução da temperatura de misturas a quente vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo.

As misturas mornas são produzidas e aplicadas em temperaturas inferiores às das tradicionais misturas asfálticas a quente em cerca de 30ºC ou mais, reduzindo-se assim a energia utilizada no processo e, consequentemente, diminuindo a emissão de poluentes, tanto em usina quanto em campo. Estas emissões podem ser reduzidas de 30 a 40% em CO2 (relacionado aos GEE) e SO2

(ligado às chuvas ácidas), 50% em compostos orgânicos voláteis (precursores do ozônio e associados aos HPAs), 10 a 30% em CO (indicadores de eficiência de queima), 60 a 70% em NOx (precursor de ozônio) e 20 a 25% em particulados. Dentro deste contexto, é possível que o emprego de misturas de baixa energia possa ser inserido em um projeto para a obtenção de créditos de carbono, sendo este mais um atrativo para as misturas mornas.

Ademais, outra vantagem igualmente importante atribuída ao uso de misturas de baixa energia é a redução dos gastos com combustíveis devido às menores temperaturas, com uma economia que pode variar entre 11% e 35%, dependendo da técnica empregada.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento de um tipo de mistura asfáltica de baixa energia em laboratório, comparando-a com uma mistura a quente produzida com os mesmos materiais, composição e métodos, exceto no que se refere à incorporação de aditivo surfactante e às temperaturas de usinagem e compactação. Cabe mencionar que na tecnologia escolhida, a temperatura dos agregados é reduzida, enquanto que a do ligante asfáltico é mantida a usual do tipo de asfalto utilizado. Além disso, esta pesquisa também objetiva acompanhar a execução de um trecho teste com mistura morna na Rodovia Presidente Dutra, complementando esta etapa com análises periódicas de seu desempenho com o tempo.

Metodologia

Primeiramente tomou-se a dosagem de uma mistura a quente convencional para, a partir daí, executar a mistura morna com a mesma granulometria e teor de ligante. Também foram testadas algumas misturas com teores de asfalto ligeiramente acima daquele de projeto, como forma de verificar o comportamento nesta condição, já que a redução de temperatura nas misturas mornas poderia dificultar a compactação e, deste modo, um pequeno acréscimo de asfalto auxiliaria na lubrificação dos materiais.

O Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra executou as dosagens pelo método Marshall das misturas asfálticas a quente em que o LTP-EPUSP se baseou para estudar as misturas mornas deste estudo.

A fase laboratorial de caracterização mecânica das misturas asfálticas analisadas engloba ensaios para a determinação dos vazios com a compactação, deformação permanente em simulador de tráfego (Figura 3.78), módulo de resiliência (Figura 3.79), resistência à tração por compressão diametral (Figura 3.80) e dano por umidade induzida (Figura 3.81).

Figura 3.78. Deformação permanente

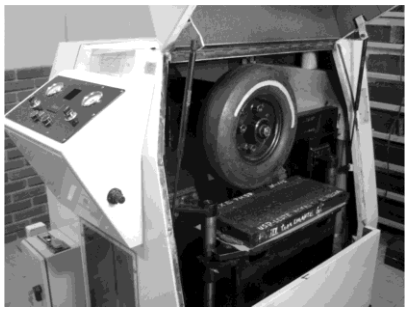


Figura 3.79. Módulo de resiliência

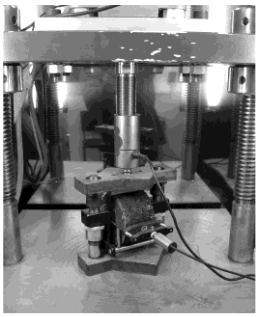


Figura 3.80. Resistência à tração por compressão diametral

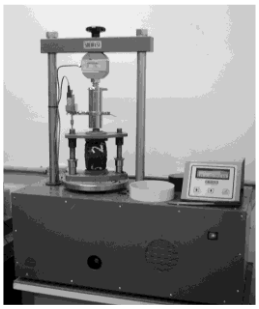


Figura 3.81. Dano por umidade induzida



Já a etapa de campo inclui a execução de um trecho experimental na Rodovia Presidente Dutra e o acompanhamento de seu comportamento com o tempo, a partir da retirada de corpos-de-prova para verificação de espessura e vazios. Além disso, têm-se levantamentos de deflexões antes e após a construção desta pista teste com viga Benkelman (Figura 3.82), de irregularidade com o equipamento Merlin (Figura 3.83) e da condição superficial de textura após três meses da obra com mancha de areia (Figura 3.84) e pêndulo britânico (Figura 3.85). Complementarmente, tem-se ensaios laboratoriais com a mistura morna preparada em usina, a fim de verificar possíveis alterações do teor e da consistência do ligante empregado, granulometria, volume de vazios, deformação permanente e dano por umidade induzida.

Neste estudo foi empregado o CAP 30-45 e agregados provenientes da pedreira Serveng Barueri (localizada na Grande SP), se enquadrando na Faixa C do DNIT e com diâmetro nominal máximo de 12,5mm. A composição granulométrica consistia em 14% de brita 1″, 45% de pedrisco, 39,5% de pó-de-pedra e 1,5% de cal. A dosagem da mistura a quente de referência indicou um teor de ligante de 5,0% para um volume de vazios de 4,2%.

Figura 3.82. Viga Benkelman



Figura 3.83. Irregularidade pelo Merlin



Figura 3.84. Mancha de areia



Figura 3.85. Pêndulo britânico



Resultados obtidos – Pesquisa em Laboratório

O aditivo utilizado para produzir as misturas mornas foi o Gemul XT14 da empresa Quimigel, sendo incorporado ao ligante em laboratório antes da usinagem, em uma taxa de 0,3% em massa de asfalto. Já as temperaturas de usinagem e compactação da mistura morna desta vez ficaram entre 135ºC e 125ºC, já que o ensaio de viscosidade com a mistura de referência indicou 160ºC e 150ºC de temperatura.

A Tabela 3.56 apresenta os resultados gerais obtidos, considerando a mistura a quente de referência e a mistura morna, todas no teor de projeto (5,0%) e com acréscimo de 0,2% e 0,4% de asfalto.

Tabela 3.56. Resultados obtidos em laboratório

Ensaio	A quente teor 5,0% (projeto)	Morna teor 5,0%	A quente teor 5,2%	Morna teor 5,2%	A quente teor 5,4%	Morna teor 5,4%
Volume de vazios, %	5,7	6,2	5,4	5,8	4,7	5,4
Deformação permanente, %	4,6	5,6	4,8	6,1	5,1	6,4
Resistência retida à tração*,%	---	---	---	---	90	87

* após ensaio de dano por umidade induzida

Os resultados mostram que, no geral, a mistura morna teve comportamento um pouco inferior ao da mistura a quente. Ao se observar o volume de vazios, nota-se que o acréscimo de 0,2% e 0,4% de ligante na mistura morna melhorou a compactação, entretanto o potencial para deformação permanente ficou ligeiramente mais elevado. Dentro deste contexto, acreditou-se que esta mistura de baixa energia poderia ser aplicada no trecho experimental, mas de forma cautelosa indicar-se-

ia que fosse preparada com acréscimo de 0,4% de ligante para que a compactação ocorresse de maneira mais eficiente sob menor temperatura em campo.

Deste modo, o ensaio de dano por umidade induzida foi realizado com as misturas com adição de 5,4% de asfalto, onde se observou que o comportamento da mistura morna foi muito semelhante ao da mistura a quente, atingindo valor bastante satisfatório ao se considerar que o mínimo exigido pela especificação do DNIT para misturas a quente é de 70%.

Resultados obtidos – Pesquisa de Campo: Trecho Experimental

O trecho experimental de mistura morna foi programado para ser executado com aproximadamente 600m, na faixa 1 da pista expressa sul do km 225 da Via Dutra, na altura da cidade de Guarulhos (localizada na Grande SP).

Antes da construção, a concessionária CCR NovaDutra fez um levantamento de deflexões e de QI entre os kms 225 e 226. As deflexões se mostraram bastante baixas, com valores oscilando entre pouco menos de 10 a cerca de 35×10-2mm (onde o máximo admissível seria 41,3×10-2mm), e a irregularidade apresentou alguns pontos acima do limite máximo (35 cont/km). Além disso, foi realizado um levantamento de defeitos, que se caracterizaram basicamente em trincas.

Para a construção do trecho experimental foi indicado que a mistura de baixa energia deveria ser usinada com um acréscimo de 0,4% de ligante, em relação ao teor de projeto da mistura a quente, e com os mesmos materiais. As temperaturas apontadas para usinagem e compactação foram as mesmas utilizadas no estudo laboratorial (em média cerca de 135ºC e 125ºC, respectivamente). Recomendou-se ainda para a usina que o aditivo fosse introduzido no tanque de ligante, sendo mantido sob agitação até momento do uso.

A execução do trecho experimental se deu em novembro de 2009, durante a madrugada. O processo de usinagem ocorreu normalmente, com os agregados aparentando estar bem envolvidos pelo ligante, mesmo com a mistura tendo sido preparada em temperatura mais baixa que o usual de misturas a quente.

Em pista, foi realizada uma fresagem prévia do pavimento em 6cm. Em seguida, a mistura morna começou a ser aplicada sem problemas, sendo compactada em temperatura de aproximadamente 120ºC. Entretanto, após a execução de cerca de 70m com sucesso ocorreu um problema na vibroacabadora, interrompendo os trabalhos. O serviço foi retomado alguns minutos depois, mas o problema persistiu de maneira intermitente, levando a alguns pontos de segregação. Com isto, para efeito desta pesquisa considera-se somente o trecho inicial de 70m como trecho experimental, indo do km 225+250 ao 225+320.

Devido ao problema ocorrido, a extensão do trecho experimental ficou curta e a extração de corpos-de-prova para o controle tecnológico levou à retirada de somente um exemplar dentro do segmento de 70m considerado na pesquisa. Os resultados de volume de vazios e de espessura encontrados com este corpo-de-prova foram, respectivamente, 3,0% e 6,9cm (ambos valores dentro dos limites aceitáveis de 2,5% e 7,5% de vazios e acima de 5,7cm de espessura). Deste modo, pode-se dizer que a compactação ocorreu de maneira eficiente, mesmo em temperatura mais baixa que o usual.

Um mês após a execução da obra foram retiradas novas amostras no local para verificação dos vazios, desta vez tendo-se oito corpos-de-prova dentro da extensão de 70m. Além disso, foram extraídos dois corpos-de-prova em pontos anteriores ao trecho experimental (na parte mais antiga), para fins de comparação.

O trecho mais antigo apresentou volume de vazios da ordem de 0,5%, enquanto que o segmento com mistura morna indicou valores entre 3,1% e 5,8%, demonstrando que o segmento anterior já estava bastante consolidado e que o trecho novo apresentava um volume de vazios dentro do esperado.

Após três meses da execução do trecho experimental houve uma nova visita de monitoramento para extrair corpos-de-prova (foram quatro no total) e para fazer um levantamento de deflexões, textura e irregularidade do pavimento. Cabe mencionar que nesta ocasião o trecho não aparentava ter defeitos visíveis e nem problemas de trilha de roda.

No que tange às deflexões, o levantamento ocorreu em seis pontos do trecho de mistura morna. Considerando-se o limite máximo aceitável de 42,3×10-2mm, dois pontos ficaram acima deste, mas isto se deve a um dreno transversal posicionado nesta altura, e as demais deflexões se mostraram aceitáveis, variando entre aproximadamente 25 e 40×10-2mm.

Com relação aos ensaios de mancha de areia (MA) e pêndulo britânico (PB), estes foram executados no segmento de mistura de baixa energia. Os resultados gerais são apresentados na Tabela 3.57.

Tabela 3.57. Resultados de mancha de areia e pêndulo britânico no trecho experimental

	Trecho mistura morna	
	PB	MA
Valor médio	41	0,52
Classificação	insuficientemente rugosa	média

Nota-se que, de maneira geral, os segmentos avaliados apresentaram uma condição relativamente "média" quanto à textura. Os valores encontrados são compatíveis com o tipo de graduação utilizada. É bem provável que o tráfego extremamente elevado da Rodovia Presidente Dutra cause um polimento acelerado dos agregados, tornando a superfície mais fechada.

O levantamento da irregularidade superficial com o Merlin também foi realizado no segmento de mistura de baixa energia. A partir dos registros foi possível calcular o IRI e o QI, cujos valores obtidos são apresentados na Tabela 3.58.

Tabela 3.58. Resultados de Merlin no trecho experimental

	D [mm]	IRI (IRI = 0,593 + 0,0471 * D) [m/km]	QI (QI = 13 * IRI) [cont/km]
Trecho mistura morna	40	2,48	32,2

Considerando-se as especificações do Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos do DNIT, pode-se dizer que ambos os trechos mostraram valores de IRI e QI dentro do aceitável (no caso do IRI o máximo é 2,7m/km).

Os vazios dos corpos-de-prova extraídos foram medidos posteriormente em laboratório e desta vez indicaram valores entre 4,1% e 6,4% (dentro dos limites aceitáveis).

Após coleta de material preparado em usina para o trecho experimental foram realizados inicialmente alguns ensaios laboratoriais após extração pelo método de Abson para determinação de teor e consistência do ligante empregado, bem como da granulometria da mistura. Além disso, foram feitos ensaios para cálculo do volume de vazios, deformação permanente e dano por umidade induzida. Para tanto, o material coletado foi reaquecido a cerca de 120ºC (temperatura de compactação).

Com relação à graduação, o material encontrado se mostrou bastante próximo da faixa granulométrica indicada em projeto. Já no que se refere ao teor de ligante, a quantidade encontrada

na amostra foi de 5,1%, situando-se exatamente no limite inferior usualmente aceitável em usina, já que o projeto determinou um teor de ligante de 5,4%.

Em termos de consistência do asfalto, foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade após a extração e os resultados foram comparados com uma amostra do material que vinha sendo estudado em laboratório.

A penetração passou de 33×0,1mm para 20×0,1mm, o ponto de amolecimento passou de 53,0ºC para 58,3ºC e a viscosidade aumentou em média cerca de 35% nas temperaturas entre 135ºC e 177ºC, indicando que deve ter havido um certo envelhecimento do ligante com a usinagem que o tornou mais rígido. Porém, é provável que o envelhecimento seja menor que aquele normalmente verificado em usinagens a quente.

Por fim, o ensaio de dano por umidade induzida mostrou baixo potencial para problemas de adesividade, já que indicou uma resistência retida à tração de 92%, ou seja, uma perda de resistência com a umidade de cerca de 8%. Este valor aponta o bom comportamento esperado quanto à resistência da mistura à desagregação e descolamento do ligante (*Stripping*), mostrando o bom desempenho do produto corretor de adesividade empregado.

Conclusões

Levando-se em conta os resultados obtidos pode-se concluir dentro da etapa laboratorial que:

- Com um certo incremento do teor de ligante (em relação ao teor de projeto), a mistura de baixa energia pôde ser compactada mais facilmente, mas a mistura ficou mais sensível à formação de trilha de roda (como já era esperado); os valores de afundamento em trilha de roda ainda permanecem muito próximos ao da mistura original de projeto a quente;
- Do mesmo modo, os resultados de dano por umidade se mostraram bastante satisfatórios.

Já dentro da etapa de campo, tem-se como conclusões que:

- A mistura asfáltica morna pôde ser preparada e aplicada em campo com sucesso, segundo métodos usualmente empregados com misturas a quente. Assim, embora tenha ocorrido um problema com o equipamento de obra, o pequeno segmento inicial de 70m foi executado satisfatoriamente e pôde ser considerado para efeito desta pesquisa;
- Após três meses da obra, o levantamento de deflexões apontou valores aceitáveis, exceto em dois pontos (mas isto se deve ao fato de estes estarem posicionados

próximo a um dreno transversal da rodovia), e o levantamento de irregularidade apontou valores aceitáveis de IRI e QI. Além disso, a textura superficial do pavimento com mistura morna se mostrou relativamente "fechada", em termos de macrotextura, mas ainda assim ligeiramente melhor do que no trecho antigo construído com uma mistura asfáltica a quente. Devido ao tráfego extremamente intenso e pesado da Rodovia Dutra, é provável que haja um polimento acelerado dos agregados da superfície da camada, culminando com este "fechamento" da textura.

Com relação aos ensaios realizados com a mistura morna coletada em usina verificou-se que:

- O teor de ligante empregado ficou ligeiramente abaixo do valor indicado pelo projeto, mas dentro do usualmente aceitável como erro de usina (-0,3%);
- Os testes de volume de vazios, deformação permanente e dano por umidade induzida apresentaram valores aceitáveis para o tráfego pesado da Rodovia Presidente Dutra, no trecho considerado.

3.1.21. Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfáltica de elevado módulo

O uso de asfaltos duros em concretos asfálticos é muito difundido na França. Esses concretos asfálticos recebem o nome de misturas asfálticas de módulo elevado (*Enrobé à Module Élevé* - EME) por apresentarem módulo complexo elevado e também elevada resistência à deformação permanente. Possuem curvas granulométricas contínuas próximas à de máxima densidade, maximizando a resistência ao cisalhamento e minimizando os vazios. O baixo volume de vazios e alta dosagem de ligante (em torno de 6%) proporcionam à camada de EME uma superfície muito lisa não sendo apropriada sua utilização como camada de rolamento em decorrência de problemas relativos à baixa aderência pneu-pavimento em dias de chuva. A camada de EME, portanto, é empregada como camada de ligação de pavimentos asfálticos espessos do tipo *deep-strenght*, e sobre ela são empregados em geral revestimentos delgados (por exemplo, *Béton Bitumineux Très Mince* - BBTM) que, além de proporcionar maior segurança ao usuário quanto à aderência em pavimentos molhados (Brosseaud, 2002; Bernucci et al, 2007), também tem o objetivo de reduzir os riscos de deformação permanente na camada asfáltica por ser delgada e suportar esforços desta natureza (Delorme et al, 1996).

Segundo Corté (2001), a França iniciou a adoção de tal técnica em 1980. Com dificuldades em empregar soluções convencionais de manutenção de estruturas em pavimento de rodovias

submetidas a tráfego elevado e intenso e em vias urbanas (com restrições altimétricas, em virtude às interferências de redes de utilidade pública de abastecimento, limitações de calçadas e guias), propôs-se a adoção de EME, empregando camadas mais esbeltas e com vida de fadiga semelhante.

As misturas de asfálticas de módulo elevado foram normalizadas pela AFNOR, em outubro de 1992, revistas posteriormente em 1999 (AFNOR, 1999), com a denominação NF P 98-140 para as misturas do tipo EME. A norma francesa para EME especifica os parâmetros de desempenho de tal mistura de acordo com o diâmetro máximo do agregado, designado por EME 0/Ømax, quais sejam: EME 0/10 (espessura da camada entre 6 e 8), EME 0/14 (espessura da camada entre 7 e 13) e EME 0/20 (espessura da camada entre 9 e 15) e também divide a mistura em classes de desempenho: classe 1 e classe 2.

Experiências descritas por Des Croix e Planque (2004) revelam que uma das principais motivações da utilização da tecnologia de camada de EME foi o atendimento a exigências ambientais quanto à diminuição da exploração de jazidas de materiais pétreos e a redução do custo de misturas asfálticas para utilização em base de pavimentos de rodovias.

Dimensionamento de Estruturas de Restauração de Pavimentos

Os pavimentos flexíveis são estruturas multicamadas com a finalidade de suportar esforços de uma combinação entre a ação das cargas do tráfego e os efeitos do clima com variações de temperatura e umidade ao longo do tempo. (Yoder e Witczac, 1975; Hass e Hudson, 1978; Medina e Motta, 2005). Os principais defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis se refletem no revestimento asfáltico e permitem identificar dois modos distintos de solicitação mecânica nesta camada: [*i*] flexão, proveniente das ações repetidas do carregamento, responsável pela fadiga da camada asfáltica; e [*ii*] compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (formação de trilha de roda).

Para a elaboração do dimensionamento de uma estrutura de pavimento asfáltico, de modo geral, deve-se compreender como ela atinge sua condição de ruína. Tal análise tem como princípio a adoção de cálculos das tensões e deformações, por meio da Teoria da Elasticidade, usando programas computacionais para facilidade e rapidez de cálculos, a partir da representação numérica de um sistema de camadas elásticas com seus respectivos valores de módulo de resiliência (MR) e coeficiente de Poisson (μ).

Quanto às respostas de solicitações mecânicas envolvidas nas estruturas, cada tipo de material se comporta de maneira diferenciada em função de seus materiais constituintes (Huang, 2004):

- Para subleitos ou camadas granulares são calculadas as deformações verticais (εv) no topo da camada;

- Para camadas asfálticas são avaliadas as deformações de tração na sua fibra inferior (εt) e os deslocamentos plásticos que levam a deformações permanentes;
- Para camadas estabilizadas quimicamente com aglomerantes hidráulicos, limitam-se as tensões de tração na sua fibra inferior (σt).

Utilizar um critério de ruína, a partir de modelos preconizados, não significa simplesmente a ação de verificar determinado atendimento a valores admissíveis, mas entender para qual nível de ruína cada modelo foi concebido e estabelecer a partir de que intensidade de defeito a estrutura atingirá seu término de vida de serviço.

Análise estrutural

A análise e verificação dos comportamentos estrutural e deflectométrico do pavimento partiu do estudo paramétrico conjugado de um fatorial envolvendo simulações de estruturas, assentes a um substrato remanescente (que, portanto, sofreu ações do tráfego ao longo de sua vida de serviço), compostas de camada de base em mistura asfáltica de módulo elevado (EME). O revestimento do pavimento é constituído por uma camada de rolamento de mistura asfáltica, geralmente delgada, com atribuição funcional. A Figura 3.86 representa esquematicamente a estrutura tipo proposta.

Para a identificação do comportamento estrutural do pavimento frente às diversas simulações de carregamento foi utilizado o programa computacional de camadas elásticas ELSYM-5, na versão FHWA (Kopperman et al, 1986) que permite determinar as deflexões, tensões e deformações, em qualquer ponto da estrutura, sob ação de várias cargas. Neste estudo, as simulações de carregamento foram baseadas em dois equipamentos utilizados para finalidade de avaliação estrutural: "*Falling Weight Deflectometer*" (FWD) e viga Benkelman (VBK). Para a VBK adotaram-se dois carregamentos distintos no eixo simples de roda dupla (ESRD): 82kN e 130kN. No ESRD simulado, foram utilizadas duas cargas por roda dupla, espaçadas de 340 mm, sendo o número de cargas aplicadas caracterizada por quatro esforços verticais de 20,5kN (ou de 32,5kN, conforme o caso) dispostos geometricamente a partir das coordenadas, em mm: (0; 0), (340; 0), (1810;0) e (2150;0). O plano fatorial deste estudo resultou em 3456 interações das variáveis independentes.

No presente trabalho, procurou-se estabelecer como variáveis, as respostas apenas dos valores máximos dos indicadores estruturais a seguir relacionados, nos respectivos pontos críticos de interesse:

- Deflexão máxima (D0) na superfície do pavimento;
- Deformação específica máxima de tração (εt) na fibra inferior da camada de EME para avaliação da fadiga;

- Tensão específica máxima de tração (σt) na fibra inferior da camada de EME;
- Deformação vertical máxima de compressão (εv) no topo da camada remanescente.

Não estão sendo considerados os afundamentos por deformação permanente nas camadas asfálticas como parâmetro de dano.

Considerando que o valor da deflexão máxima D0, quando analisado isoladamente, pode não ser suficiente para a avaliação estrutural do pavimento, procurou-se também utilizar outros métodos complementares, baseados nas características da linha de deformação elástica da estrutura, quando submetida à ação de um carregamento. Assim sendo, considerou-se além da magnitude das deflexões, os seguintes parâmetros de análise como variáveis dependentes no estudo: Parâmetro Área "S" (AASHTO, 1993); Raio de Curvatura "R" (DNER,1994); produto entre o Raio e a Deflexão Máxima "R x D0" e Índice de Curvatura da Superfície "SCI" (WSDOT, 1995; Kim et al, 2000).

Para o cálculo do Raio de Curvatura "R", no Brasil é adotada a forma parabólica para representar a curvatura da bacia. Tal processo é preconizado pela norma DNER-ME 24/94 (DNER,1994). A expressão matemática para o cálculo de "R" é apresentada a seguir:

$$R = \frac{x^2}{20\left(D_0 - D_x\right)} \qquad (1)$$

Na Equação 1:

R é o Raio de Curvatura, (m);

x é a distância radial do ponto de aplicação da carga, (mm);

D0 é a deflexão no ponto de aplicação da carga, (10-2mm);

Dx é a deflexão à distância radial correspondente a x (mm) do ponto de aplicação da carga. No Brasil, é muito comum a adoção de uma distância radial a 250 mm do ponto de aplicação da carga, (10-2mm).

O Parâmetro Área "S" da bacia de deformação foi calculado a partir da expressão apresentada a seguir, segundo as recomendações do Guia da AASHTO (1993).

$$S = 15\left[1 + 2\left(\frac{D_{300}}{D_0}\right) + 2\left(\frac{D_{600}}{D_0}\right) + \left(\frac{D_{900}}{D_0}\right)\right] \qquad (2)$$

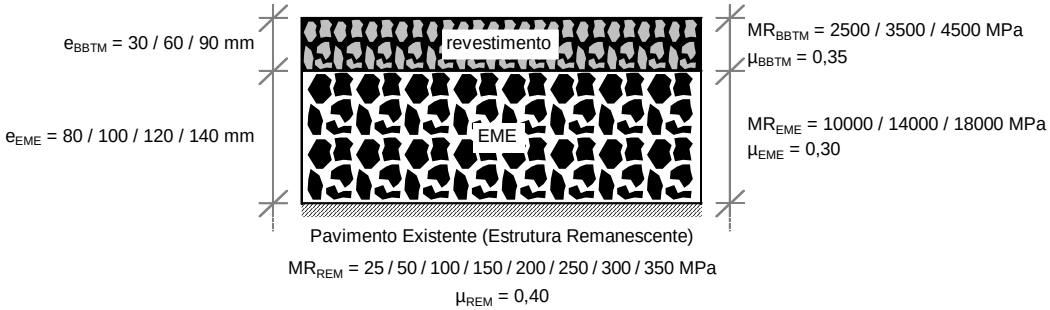
Na Equação 2:

S é o Parâmetro Área, (cm);

x é a distância radial do ponto de aplicação da carga, (mm);

D_0, D_{300}, D_{600} e D_{900} são as deflexões às distâncias radial correspondente a 0, 300, 600 e 900mm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga, (10-2mm).

Figura 3.86. Pavimento tipo com camadas de revestimento e EME como restauração



Legenda:
BBTM = *Béton Bitumineux Très Mince* (Concreto Asfáltico Descontínuo Delgado)
EME = *Enrobé à Module Élevé* (Mistura Asfáltica de Módulo Elevado)
REM = estrutura remanescente

As Figuras 3.87 a 3.89 apresentam algumas imagens da mistura asfáltica do tipo EME executada em caráter experimental na Rodovia Presidente Dutra.

Figura 3.87. Característica da mistura de EME

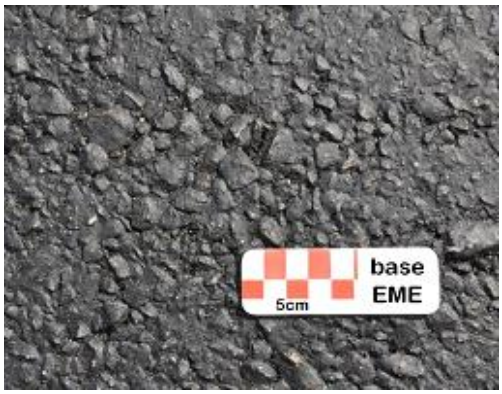


Figura 3.88. Trecho experimental em EME em execução na BR-116 (PN/SP), entre o km 171 e o km 170



Figura 3.89. Trecho experimental em EME executado na BR-116 (PN/SP), entre o km 171 e o km 170



Estudo estatístico

Para obtenção de uma maior confiabilidade nos estudos realizados, os resultados das variáveis em estudo foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA). Seu objetivo é identificar se os valores das variáveis dependentes diferem significativamente do ponto de vista estatístico entre si. A partir disso, foi possível estabelecer a significância das variáveis independentes e das interações sobre a variável dependente, determinada por meio da análise de variância dos termos dos modelos obtidos.

Por meio da análise de variância (ANOVA), utilizada para avaliar quais variáveis independentes influenciam na variável dependente, conclui-se que todos os modelos estudados apresentaram fortes correlações apresentando coeficientes de determinação que se ajustaram 88,8% a 99,9% às variáveis dependentes.

Conclusões

A partir dos modelos apresentados neste trabalho é possível, conhecidas as condições estruturais do pavimento existente e do tráfego futuro, definir rapidamente as características geométricas e mecânicas das misturas asfálticas de módulo elevado (EME) a serem empregadas nas camadas sobrejacentes para restauração.

Cabe salientar que os modelos obtidos da análise dos dados paramétricos são teóricos, ou seja, revelam o comportamento estrutural considerando o procedimento de cálculo adotado pelo programa computacional ELSYM-5 que admite o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas, semi-infinito sendo que seus materiais assumem comportamentos isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico-linear, obedecendo à lei de Hooke generalizada, de acordo com o princípio da Teoria da Elasticidade. Portanto, faz-se necessária a validação destes modelos em campo; ou seja, em trechos, com estrutura constituída

de camada de base com EME estabelecida neste trabalho, submetidos a tráfego real e constantemente monitorados.

3.1.22. Avaliação da pesagem de veículos em movimento com cargas líquidas

O uso do sistema rodoviário no transporte de cargas líquidas é fundamental para a economia nacional, principalmente no transporte de derivados de petróleo e álcool. O controle do peso dos veículos tanque em transporte de cargas líquidas apresenta-se como uma preocupação evidente das concessionárias de rodovias, considerando-se o desgaste prematuro do pavimento e a prevenção de acidentes ocasionados por veículos com excesso de carga. A movimentação da carga dentro dos tanques apresenta-se como o elemento principal no estudo do controle de pesagem na rodovia, com a finalidade de se estabelecer parâmetros de exatidão para a medição do peso do veículo em movimento com cargas líquidas.

Considerando o Código de Trânsito Brasileiro no ART 99, os veículos devem atender aos limites de peso estipulados na legislação, conforme Resolução Contran n.º 258/2007. Atualmente, a forma mais utilizada para fiscalizar o peso dos veículos tem sido as balanças dinâmicas instaladas nas praças de pesagens junta às rodovias. Estas podem ser fixas e portáteis.

Entretanto, a utilização de instrumentos de pesagem de veículos em movimento tem sido vedada para a pesagem de cargas líquidas a granel, considerando o ofício Inmetro/Dimel n.º 018/2008, onde expressa que estes instrumentos não são aprovados para esta finalidade e devem portar a inscrição “Instrumento não apropriado para a pesagem de carga líquida a granel”.

O objetivo deste estudo é a utilização destes instrumentos através de adaptações para esta finalidade a serem ainda desenvolvidas, seja na legislação ou no ajuste de funcionamento, tendo em vista à dificuldade de se verificar o peso dos veículos, por falta de instrumentos de pesagem estática, instalados nas rodovias.

Conforme Faruolo e Brochado (2008), outros estudos devem ser realizados para uma melhor definição da eficiência destes instrumentos para a medição da massa de líquidos em caminhão tanque em movimento, considerando outros fatores atuantes na medição, como o tipo de carregamento de líquido e gases em diferentes diâmetros dos tanques. Considerando naquele estudo os índices de exatidão dentro dos limites de 5% estabelecidos pela legislação de trânsito, os resultados, porém, foram considerados não satisfatórios de acordo com a legislação metrológica, estabelecida pela portaria de aprovação de modelo do instrumento de pesagem, obrigatória para esta finalidade.

Neste sentido, o projeto em questão aprofundou-se na análise realizada no ensaio anterior, e determinar a confiabilidade destes instrumentos para a pesagem de veículos com cargas líquidas. Neste estudo considerando a nova legislação metrológica em desenvolvimento no Inmetro, contribui-se para a regulamentação de instrumentos de pesagem, e na fiscalização de veículos no transporte de líquidos perigosos, produtos líquidos utilizados em processos industriais e combustíveis.

A análise em questão colabora para avanços tecnológicos na utilização de balanças dinâmicas nas rodovias e para o aprimoramento de políticas de controle de excesso peso nas estradas. Desta forma, colabora para a adoção de medidas preventivas para a redução de acidentes de trânsito e desgastes prematuros nas rodovias.

Método

Basicamente, consiste em estudar a pesagem dos veículos, analisando o resultado da medição em diferentes composições de caminhões e tipos de cargas. O processo de análise feito levando–se em consideração o peso de referência de cada veículo, determinado por pesagem estática em uma balança de controle, e o valor medido na balança dinâmica. Para a validação da metodologia foram utilizados em São Paulo, dois diferentes tipos de instrumentos de pesagem dinâmica, um fixo e o outro portátil, e sete tipos de veículos de carga diferentes, contendo condições carga líquida e carga sólida. Foram avaliados os erros da medição, considerando o projeto da nova regulamentação de pesagem de veículos em movimento desenvolvido no Inmetro, os principais fatores de influência na pesagem, Faruolo et al (2006), e o modelo de análise de confiabilidade desenvolvido em Faruolo (2007).

Na regulamentação desenvolvida pelo Inmetro estão divididas as classes de exatidão conforme a Tabela 3.59 para valores de erros máximos admissíveis para a massa total dos veículos e na Tabela 3.60 para valores de erros máximos para a carga por eixo e conjunto de eixos. Estes valores limites foram utilizados para a avaliação dos resultados com foco na eficiência do instrumento de pesagem avaliando-se a exatidão dos instrumentos de pesagem submetidos a este estudo.

Tabela 3.59. Erros máximos admissíveis conforme as classes de exatidão para massa do veículo

Classe de exatidão (Massa do veículo)	Porcentagem do valor convencional da massa de veículo (6.7)	
	Verificação inicial e subsequente (±)	Inspeção em serviço (±)
0,2	0,10%	0,20%
0,5	0,25%	0,50%
1	0,50%	1,00%
2	1,00%	2,00%
5	2,50%	5,00%
10	5,00%	10,00%

Tabela 3.60. Erros máximos admissíveis conforme as classes de exatidão para carga por eixo e conjunto de eixos do veículo

Classe de exatidão da carga por eixo isolado e por conjunto de eixos	Porcentagem de carga média corrigida por eixo isolado e por conjunto de eixos	
	Verificação inicial e subsequente (±)	Inspeção em serviço (±)
A	0,50%	1,00%
B	1,00%	2,00%
C	1,50%	3,00%
D	2,00%	4,00%
E	4,00%	8,00%
F	8,00%	16,00%

Para a análise foi desenvolvida uma estrutura operacional em Queluz, SP, Rodovia Presidente Dutra, para a medição específica dos veículos. Os veículos passaram em uma sequência de pesagem, primeiro por uma balança fixa e em seguida em uma balança móvel, instaladas na mesma trajetória, formando a disposição de duas praças de pesagens. Este artifício propiciou a comparação direta entre os dois instrumentos de pesagens.

Adicionalmente, foi realizada uma inspeção a fim de registrar as condições de segurança dos veículos. A utilização de veículos em condições de conservação conhecidas proporcionou a verificação da sensibilidade dos sistemas de pesagens face às condições dos pneus e estabilidade do chassi.

Resultados

Na análise foram consideradas as classes mais adequadas para a avaliação, correspondendo as Classes 5 para o peso bruto total, denominada massa do veículo, e “E” para conjunto de eixos. Sendo os limites descritos nas respectivas classes.

Uma observação importante foi a identificação de variação dos valores de erro onde são apresentados os valores de erros máximos para cada veículo relacionados aos valores de PBT (peso bruto total) e por eixo ou conjunto de eixos, inferiores ao limite de 5% para o PBT e, na maioria dos casos inferiores ao limite de 7,5% para valores por eixos da legislação de trânsito da época do estudo.

Considerando os dados da primeira balança, utilizando diferentes tipos de veículos rodoviários em movimento, com carregamento de gasolina e químicos, foram obtidos os resultados conforme Tabela 3.61 - balança fixa, onde são apresentados os erros relativos em relação aos valores de referência estabelecidos em pesagem estática, onde apenas a ação da gravidade é atuante para a determinação do valor da massa dos veículos.

Tabela 3.61. Balança fixa

RTM			
Veículos	**carga**	**eixo%**	**PBT%**
3e IPEM	padrão	1,7	1,57
3 eixos	brita	-2,57	-2,06
5 eixos	brita	-1,98	-3,24
6 e 3S3	gasolina	-5,65	-4,21
6 e 3I3	propeno	8,03	1,41
7 eixos	gasolina	-4,52	-2,86
7 eixos	álcool	-4,6	-2,86

Os valores de erros por eixo são maiores, verificando-se a tendência a erros superiores em veículos mais longos. No veículo de 6 eixos com propeno foi identificado que as cargas por eixos isolados não estavam distribuídas de forma uniforme. Os resultados registrados para erros por eixo são superiores aos relacionados ao PBT.

No caso da balança móvel os valores de erros apresentados na Tabela 3.62 são superiores ao da balança fixa. Nesta balança não foram considerados os dois outros veículos com carregamento de brita pelo fato de sido interrompida as medições no momento do ensaio por motivo de chuvas. Os valores dos erros registrados para veículos com carga seca são inferiores aos veículos com carga líquida.

Tabela 3.62. Balança móvel/portátil

RTM			
veículos	**carga**	**eixo%**	**PBT%**
3e IPEM	padrão	2,53	1,57
3 eixos	brita		
5 eixos	brita		
6e 3S3	gasolina	5,32	3,76
6e 3I3	propeno	7,19	3,55
7 eixos	gasolina	6,39	3,61
7 eixos	álcool	4,28	3,46

A apresentação dos dados demonstra a variação em valores positivos e negativos. Os veículos mais longos se apresentam com erros maiores. Neste caso, o tamanho do tanque é uma variável fundamental na possibilidade de deslocamento da carga, como é o caso dos veículos com seis eixos, Figura 3.90, e com tanques de até 30.000 l.

Figura 3.90. Veículos tanque com seis eixos



Estes valores podem ser reduzidos, melhorando a eficiência do sistema de pesagem quando se torna possível identificar a fonte de erro que proporciona esta variação acentuada. A identificação da variação da velocidade e da aceleração durante a pesagem é fundamental para a melhoria na qualidade das medições, reduzindo os valores de pico de erros durante a utilização. A análise em função dos erros médios e a dispersão de cada veículo indicam valores reduzidos, e poucas medições nos valores mais altos indicados.

Discussão

Estudos anteriores Faruolo e Brochado (2008) demonstraram a variação do desempenho da pesagem de veículos com diferentes cargas, onde foram registradas medições com os mesmos veículos com três condições de carregamento, considerando na capacidade máxima, com meia carga e sem carregamento, apresentando para a condição de medição do PBT, valores de erros médios e dispersão inferiores ao estabelecido pela legislação de trânsito, vigente na época de 5%. O estudo desenvolvido pelo LPTC considerou como boa a exatidão de 5% na pesagem de veículos tanque.

Considerando os dados de uma primeira análise do estudo de regulamentação, realizada em São Paulo, na rodovia Imigrantes, em fevereiro de 2010, foram obtidos os valores na Tabela 3.63.

Tabela 3.63. Valores de erros registrados em instrumento em melhor nível de eficiência

Veículo - carga		
3e Ipem - padrão de massa	-1,22	-0,76
3e Glicol	-1,95	-1,60
3e Glicol r	-2,76	-1,15
5e isotanque *	4,64	3,01
5e álcool	-1,72	-0,90
6e 3S3 GLP	2,14	1,78
6e 3S3 Catalisador	-2,24	1,27
6e 3S3 acrilato	2,89	1,90
6e 3S3 gasolina	-2,08	-1,36
6e 3S3 GLP	3,52	1,68
6e 3I3 Hipoclorito	2,85	0,36
6e 3I3 amônia	3,27	0,79
6e 3I3 soda	4,84	-1,46
7e Álcool	-3,23	-1,29

Nesta fase os resultados apresentados estão melhores, máximos de 3,01% para o PBT e de 4,84% para valor por eixo, considerando que foi realizada uma manutenção preventiva e verificação metrológica no dia anterior aos ensaios. O veículo em destaque 5 eixos isotanque apresentou na inspeção prévia problemas estruturais, que comprovaram a influência da má conservação dos veículos na pesagem em movimento.

Na pesquisa diferentes abordagens foram registradas com relação à configuração dos veículos e a forma de distribuição do peso no chassi, condições de pneus, aspectos fundamentais de influência na medição dinâmica do peso dos veículos.

A inspeção de carga perigosa foi um elemento importante para a análise. Sendo verificado que a manutenção dos veículos pelo fato das condições de uso dos veículos influenciarem na vibração do veículo durante a passagem sobre o instrumento de pesagem.

Os erros maiores durante as medições são relacionados basicamente aos efeitos da vibração proporcionada pelos elementos causadores de instabilidade da carga, provenientes da má conservação dos veículos e variação da aceleração dos veículos durante as medições.

Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidos elementos capazes de demonstrar que em condições ideais é possível avaliar o peso dos veículos em movimento com cargas líquidas. O estudo proporcionou um elemento eficiente para o estabelecimento da legislação metrológica adequada para o desenvolvimento desta atividade.

Os aspectos metrológicos utilizados no estudo apresentam uma variável decisiva na fiscalização do peso, pois o controle da aceleração é fundamental para a análise dos resultados. A implementação deste controle mais rígido na legislação metrológica torna evidente a melhora na qualidade da medição e no respectivo controle de peso dos veículos na rodovia. Os resultados parciais apresentados serão complementados com uma nova coleta de dados em campo a fim de consolidar estes resultados.

Os aspectos de metrologia legal, onde a aplicação da legislação e a defesa do cidadão são fundamentais, são determinantes na avaliação da eficiência do instrumento de pesagem. O desenvolvimento da pesquisa relacionada a prática de políticas públicas de regulamentação metrológica representa um avanço imediato da qualidade do tráfego nas rodovias.

3.1.23. Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária NovaDutra

Introdução

As equações empíricas recomendadas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) para o dimensionamento da estrutura de pavimentos (1993 AASHTO) são baseadas nos resultados de rodovias teste originais avaliadas pela AASHTO de 1958 a 1961, em Ottawa, Illinois. O estudo avaliou o desempenho de pavimentos de concreto de

cimento Portland e de pavimentos de concreto asfáltico sob tráfego de particular magnitude e frequência.

De acordo com a *Federal Highway Administration* (1), 80% dos estados americanos usam os guias da AASHTO de 1972, 1986, ou 1993. Muitos países pelo mundo também utilizam este método para seus dimensionamentos de pavimentos. Estes procedimentos empíricos são baseados nas equações de desempenho desenvolvidas através dos dados do pavimento experimental da AASHTO de 1950.

Apesar de estes métodos empíricos estarem sendo usados há muitos anos, eles apresentam um número de limitações que restringem sua eficiência como base para dimensionamento. Algumas dessas limitações incluem:

- Deficiências no carregamento do tráfego: O carregamento de caminhões pesados aumentou de forma considerável desde a década de 1960. Atualmente, pavimentos necessitam der dimensionados para carregamento que possa atingir 200 milhões de passagem de eixo ou mais, porém as equações de dimensionamento básicas foram obtidas para carregamento de tráfego de menos de 2 milhões ESAL's. Isto significa que a aplicação deste método para o tráfego atual necessita de uma extrapolação da metodologia de dimensionamento, distante dos dados utilizados para derivar as equações.
- Deficiências para reabilitação: Procedimentos para reabilitação de pavimentos não foram considerados nos pavimentos testados na AASHTO.

Objetivos

Esse trabalho de pesquisa firmado entre ASU (Arizona State University) e a Concessionária CCR NovaDutra teve como primeiro objetivo o desenvolvimento de um guia para implementação do novo método MEPDG no processo de dimensionamento de pavimentos novos, além da reabilitação, para as condições da Rodovia Presidente Dutra. O objetivo principal foi tem como premissa melhorar e/ou validar dimensionamentos e modelos de previsão previamente existentes.

Definição dos parâmetros de entrada

A completa implementação do MEPDG não consiste apenas no uso direto do software, mas requer uma série de atividades e esforços que incluem, mas não são limitados à caracterização laboratorial dos materiais, seleção e avaliação de seções teste para o processo de calibração, calibração do MEPDG para condições locais que incluem materiais, tráfego e variáveis climáticas e ambientais.

Para este estudo, definiram-se sete seções homogêneas de tráfego para a Rodovia Presidente Dutra, conforme apresentado na Tabela 3.64. Dois tipos diferentes de camadas de mistura asfáltica foram empregadas na análise: a primeira foi referida como "Concreto Asfáltico" (CA) e a segunda como "*Binder*" ou camada de ligação. Nas Figuras 3.91 a 3.97 observa-se que todas as camadas de misturas asfálticas são do tipo CA e nas Tabelas 3.65 e 3.66 apresentam-se as características desses materiais.

Tabela 3.64. Seções da Rodovia Presidente Dutra empregadas para análise preliminar no MEPDG

Seção nº	Identificação da seção	Registros de restauração	Informações de tráfego (AADT)	Tráfego pesado	ESAL (USACE)	ESAL (AASHTO)
1	Pista Norte SP 63-0	1997, 2011	1,55E+04	8,08E+03	2,60E+08	7,81E+07
2	Pista Norte SP 107-106	2003	1,97E+04	7,29E+03	2,35E+08	7,06E+07
3	Pista Norte SP 128-118	2004, 2010	2,16E+04	5,84E+03	1,89E+08	5,66E+07
4	Pista Sul RJ 182-184	2000, 2006, 2010	2,45E+04	6,62E+03	2,13E+08	6,40E+07
5	Pista Sul SP 211-214	2002, 2007	1,10E+04	5,30E+03	1,71E+08	5,12E+07
6	Pista Norte RJ 218-210	1999, 2008	1,07E+04	5,24E+03	1,69E+08	5,08E+07
7	Pista Norte RJ 309-305	2007, 2010	1,33E+04	6,80E+03	2,19E+08	6,57E+07

Figura 3.91. Seção de pavimento 1 – Pista Norte SP 63-0

12,0 cm	Mistura asfáltica
22,0 cm	Mistura asfáltica antiga
15,0 cm	Base granular
20,0 cm	Material natural granular
	Subleito (argila)

Figura 3.92. Seção de pavimento 2 – Pista Norte SP 107-106

4,0 cm	Mistura asfáltica
22,0 cm	Mistura asfáltica antiga
30,0 cm	Base granular
35,0 cm	Material natural granular
	Subleito (argila)

Figura 3.93. Seção de pavimento 3 – Pista Norte SP 128-118

4,0 cm	Mistura asfáltica
11,0 cm	Mistura asfáltica antiga
20,0 cm	Base granular
20,0 cm	Material natural granular
	Subleito (argila siltosa)

Figura 3.94. Seção de pavimento 4 – Pista Norte SP 182-184

5,0 cm	Mistura asfáltica
5,0 cm	Mistura asfáltica antiga
10,0 cm	Mistura asfáltica antiga (*Binder*)
20,0 cm	Brita graduada (macadame hidráulico)
40,0 cm	Sub-base granular_Material granular
	Subleito (silte)

Figura 3.95. Seção de pavimento 5 – Pista Norte SP 211-214

4,0 cm	Mistura asfáltica
16,0 cm	Mistura asfáltica antiga (*Binder*)
15,0 cm	Brita graduada (macadame hidráulico)
15,0 cm	Sub-base granular_Material granular
	Subleito (argila siltosa-arenosa)

Figura 3.96. Seção de pavimento 6 – Pista Norte RJ 218-210

12,0 cm	Mistura asfáltica
4,0 cm	Mistura asfáltica antiga
20,0 cm	Pavimento de concreto existente
35,0 cm	Sub-base_Material arenoso
	Subleito (argila siltosa-arenosa)

Figura 3.97. Seção de pavimento 7 – Pista Norte RJ 309-305

6,0 cm	Mistura asfáltica modificada com polímero
14,0 cm	Mistura asfáltica antiga
20,0 cm	Base granular
20,0 cm	Material granular natural
	Subleito (argila)

Tabela 3.65. Propriedades das misturas asfálticas

Propriedade da mistura	CA	*Binder*
G_{mm}	2,4	2
G_{mb}	2,305	2,368
G_{sb}	2,608	2,61
Teor de asfalto (%)	4,9	3,6
Volume de vazios (%)	3-5 (*as built* = 7)	4-6 (*as built* = 7)
Teor de asfalto efetivo	8,95	5,54
Tipo de ligante	CAP 30-45 – Pen 40-50	CAP 30-45 – Pen 40-50

Tabela 3.66. Graduação das misturas asfálticas de concreto asfáltico (CA) e camada intermediária (*Binder*)

Mistura	ρ_{34} %	ρ_{38} %	ρ_{4} %	ρ_{200} % passante
Mistura CA	2	19	36	8
Mistura *Binder*	26	45	60	6,8

Previsões de defeito no MEPDG

Após serem compiladas todas as informações, foi executado o método de dimensionamento para os sete cenários. Os dados de saída do MEPDG contêm previsões de defeitos individuais mensais para o período de projeto.

Os defeitos abrangidos são: deformação permanente da mistura asfáltica, trincamento por fadiga, trincamento longitudinal, trincamento por reflexão, trincamento térmico. Já que trincamento térmico é causado por mudanças extremas de temperatura negativa, o que não é o caso da Rodovia Presidente Dutra, este defeito não foi previsto. Além disso, não foi previsto trincamento por fadiga (base-topo) para aquelas seções.

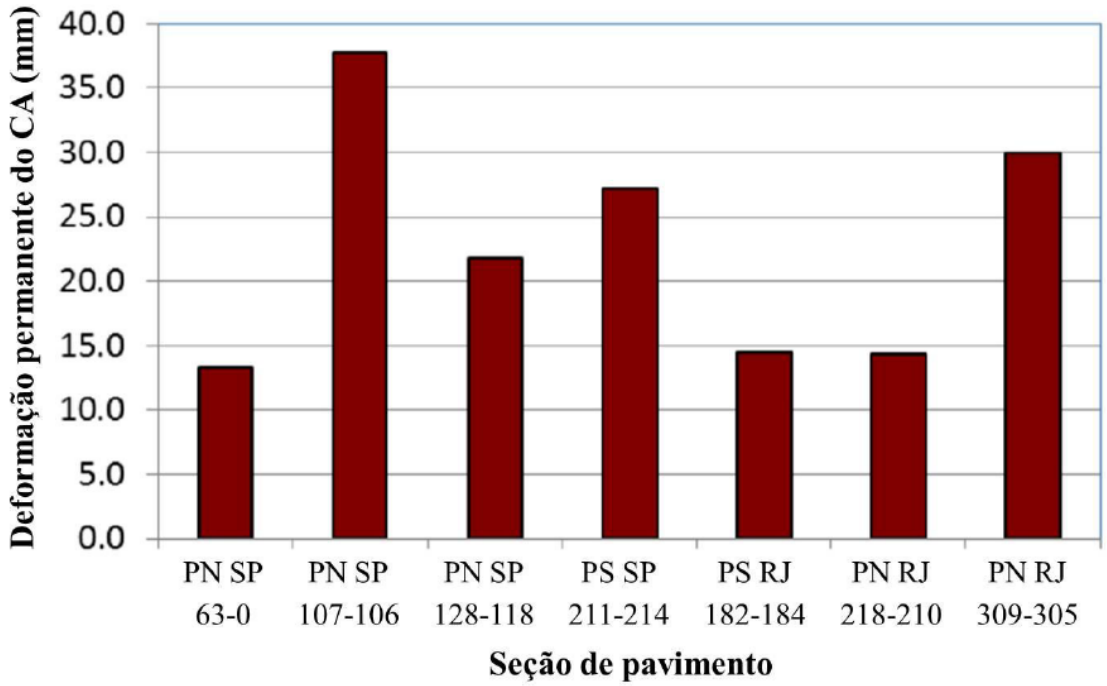
A Tabela 3.67 resume os dados de saída de deformação permanente acumulada na mistura asfáltica em cada seção para cada ano do período de projeto. A Figura 3.98 mostra a deformação permanente total no concreto asfáltico ao final do período de projeto. A partir destas informações pode-se notar que todas as seções apresentaram altos valores de deformação permanente da mistura asfáltica. Existem dois fatores principais que influenciam a previsão destas seções individuais quanto a tráfego e espessuras de camadas. Já que as mesmas misturas foram utilizadas em todos os trechos, os dados da mistura não são considerados como um fator quando há uma

comparação entre as seções. Os trechos com os menores valores de deformação permanente correspondem às seções 1, 5 e 6. Estes trechos correspondem a duas das seções com as espessuras totais mais elevadas de concreto asfáltico e à que contém o pavimento de concreto sob a camada asfáltica. Ainda que não houvesse dados disponíveis de desempenho para comparar a precisão dos valores do MEPDG, todos os dados de saída pareciam ser maiores que o esperado com relação aos valores de deformação permanente do concreto asfáltico (empiricamente, estabeleceu-se que a deformação permanente total não exceda 2,5 cm).

Tabela 3.67. MEPDG – Previsão de deformação permanente acumulada na mistura asfáltica para os cenários dos 7 casos na Rodovia Presidente Dutra

Ano	Deformação permanente do CA (mm)						
	PN SP 63-0	PN SP 107-106	PN SP 128-118	PS SP 211-214	PS RJ 182-184	PN RJ 218-210	PN RJ 309-305
1	5,31	14,12	7,98	10,29	5,41	5,54	10,97
2	7,24	19,74	11,18	14,33	8,00	8,59	16,66
3	8,81	24,33	13,84	17,65	9,37	10,06	20,12
4	9,78	27,20	15,52	19,66	10,69	11,13	22,73
5	10,59	29,54	16,94	21,36	11,81	12,32	25,53
6	11,33	31,75	18,26	22,91	12,75	13,00	27,10
7	12,29	34,80	20,02	25,12	13,59	13,64	28,52
8	13,28	37,69	21,74	27,20	14,45	14,30	29,97

Figura 3.98. Deformação permanente acumulada na mistura asfáltica para os cenários dos sete anos



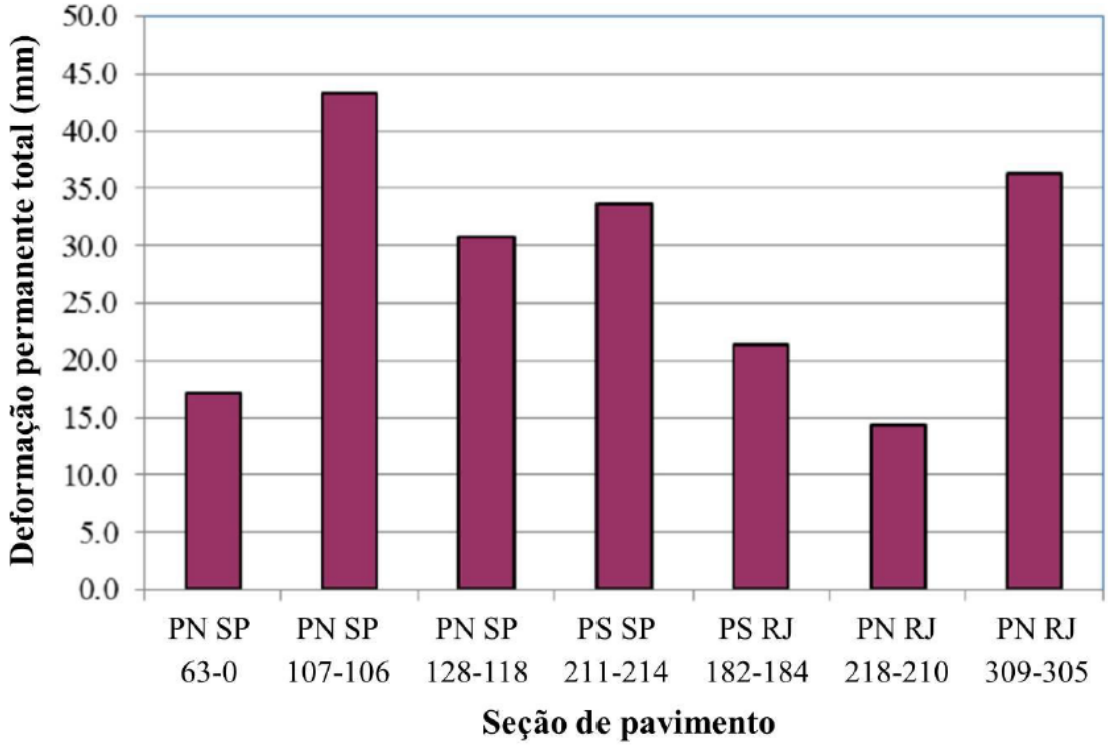
A Tabela 3.68 mostra a previsão de deformação permanente total de cada seção em cada ano de sua vida de projeto. A Figura 3.99 mostra a deformação permanente total para cada trecho ao fim

do período de projeto. Novamente, o MEPDG demonstra maiores níveis de deformação permanente total do que parece ocorrer em campo (análise subjetiva) para estas seções. A partir desta informação também se pode observar que a maior parte da deformação permanente acontece nas camadas asfálticas e uma porcentagem menos significativa deste defeito ocorre na base e no subleito.

Tabela 3.68. MEPDG – Previsão de deformação permanente total para os cenários dos 7 casos na Rodovia Presidente Dutra

Ano	Deformação permanente total (mm)						
	PN SP 63-0	PN SP 107-106	PN SP 128-118	PS SP 211-214	PS RJ 182-184	PN RJ 218-210	PN RJ 309-305
1	8,46	18,90	14,88	15,52	10,74	5,54	16,43
2	10,59	24,79	18,72	19,99	13,92	8,59	22,53
3	12,32	29,54	21,74	23,55	15,54	10,06	26,11
4	13,36	32,51	23,75	25,73	17,09	11,13	28,85
5	14,25	34,95	25,37	27,53	18,34	12,32	31,72
6	15,04	37,24	26,87	29,21	19,41	13,00	33,35
7	16,08	40,36	28,85	31,52	20,37	13,64	34,82
8	17,09	43,36	30,71	33,71	21,36	14,30	36,32

Figura 3.99. Deformação permanente total para os cenários dos sete anos



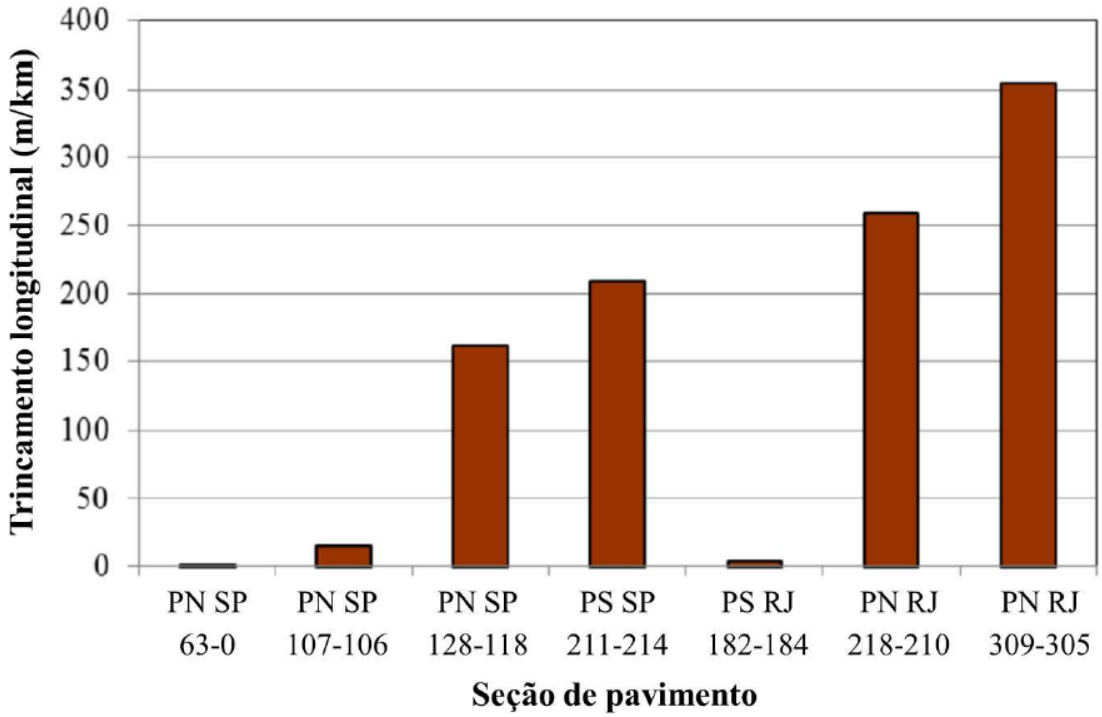
A Tabela 3.69 mostra as previsões do MEPDG para trincamento longitudinal para cada ano do período de projeto. A Figura 3.100 também mostra a previsão de trincamento longitudinal para as seções ao fim do período de projeto. As seções com menor trincamento longitudinal correspondem aos trechos com maiores espessuras totais de CA, 1 e 2, e a seção 5 que tem o trecho com

pavimento de concreto abaixo. O valor usado como limite no MEPDG é 380 m/km, o que é alto para rodovia interestadual. Apesar disso, todas as seções se mostraram abaixo deste limite.

Tabela 3.69. MEPDG – Previsão de trincamento longitudinal para os cenários dos 7 casos na Rodovia Presidente Dutra

Ano	Trincamento longitudinal (m/km)						
	PN SP 63-0	PN SP 107-106	PN SP 128-118	PS SP 211-214	PS RJ 182-184	PN RJ 218-210	PN RJ 309-305
1	0,1	0,8	8,8	10,4	0,2	23,7	18,7
2	0,1	2,1	20,3	26,7	0,6	92,6	54,9
3	0,1	5,0	36,4	48,3	1,0	131,8	96,8
4	0,1	5,9	55,9	72,9	1,5	161,0	145,1
5	0,1	6,5	76,9	99,8	2,0	202,7	198,9
6	0,1	7,2	101,3	130,3	2,6	223,5	250,1
7	0,2	10,9	131,5	167,8	3,3	240,6	299,3
8	0,2	15,2	161,6	208,4	4,2	259,5	354,2

Figura 3.100. Trincamento longitudinal para os cenários dos sete anos

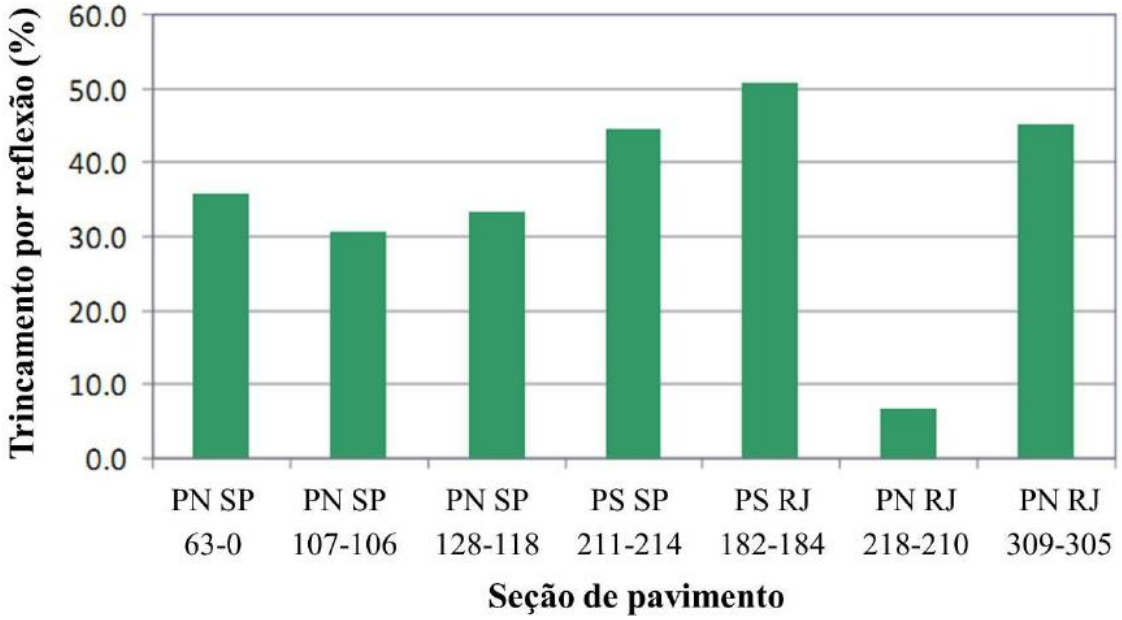


A Tabela 3.70 e a Figura 3.101 mostram as previsões do MEPDG para trincamento por reflexão para as seções. Este defeito é calculado devido ao fato de que todos os trechos são projetos de restauração; isto é, existe uma camada aderida mais antiga sob o recapeamento mais novo. Para todas as seções, exceto a 6 (com pavimento de concreto abaixo), o MEPDG calcula o trincamento elevado por reflexão ao fim dos seus períodos de projeto.

Tabela 3.70. MEPDG – Previsão de trincamento por reflexão para os cenários dos 7 casos na Rodovia Presidente Dutra

Ano	Trincamento por reflexão (%)						
	PN SP 63-0	PN SP 107-106	PN SP 128-118	PS SP 211-214	PS RJ 182-184	PN RJ 218-210	PN RJ 309-305
1	0,0	2,8	2,9	3,3	3,1	0,0	1,0
2	0,4	17,6	17,8	19,5	21,9	0,3	7,2
3	1,7	25,3	26,0	27,8	45,2	1,1	23,7
4	6,4	26,8	27,8	31,3	49,8	3,4	33,7
5	17,4	27,6	29,2	34,6	50,4	5,6	37,7
6	28,8	28,5	30,6	37,9	50,5	6,4	40,2
7	34,0	29,4	32,0	41,2	50,6	6,7	42,6
8	35,6	30,4	33,5	44,5	50,8	6,7	44,9

Figura 3.101. Trincamento longitudinal para os cenários dos sete anos



Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um guia para implementação do novo MEPDG no processo de dimensionamento de pavimentos novos e de restaurações para as condições da CCR NovaDutra; o objetivo final é o de melhorar e/ou validar dimensionamentos e modelos de previsão previamente existentes.

O principal ponto deste guia foi identificar os dados de entrada que a Concessionária Nova Dutra precisa para uma futura implementação do MEPDG. Como mencionado no relatório, a completa implementação do Guia em longo prazo se inicia pela identificação de quais informações serão requeridas para uma transição com sucesso para esta nova ferramenta de análise de projeto e de dimensionamento de estruturas de pavimentos.

As primeiras seções deste relatório fornecem uma experiência sobre o MEPDG que ajuda a identificar as principais diferenças com relação ao método de dimensionamento tradicional. O relatório também inclui uma visão geral do guia para o reconhecimento das etapas no método de dimensionamento, bem como dos dados de entrada que são requeridos em cada campo (tráfego, clima, materiais). Para ter uma avaliação inicial das necessidades de uma calibração do MEPDG para as condições da CCR NovaDutra, diferentes casos foram avaliados. Esta análise representa um ponto inicial para futuras implementações do guia. Não existem previsões de desempenho disponíveis para comparar com os resultados do guia, mas no geral, o MEPDG levou a medidas mais elevadas de defeitos quanto à deformação permanente e trincamento por reflexão. Este estudo preliminar mostra o quão vital é a calibração e a validação do guia para as condições da CCR NovaDutra antes de sua implementação.

O uso efetivo dos procedimentos do novo MEPDG requer bancos de dados de materiais e de tráfego, para se ir além do Nível 3 e das informações *defaults* do MEPDG. Os dados climáticos completos também são necessários para se criar o banco de dados de clima requerido.

Ademais, o MEPDG necessita também de calibração local para a previsão de defeito de cada pavimento. Para novas estruturas de pavimentos flexíveis isto inclui: deformação permanente (camadas de concreto asfáltico, base granular, sub-base, e subleito, e a profundidade total de afundamento), trincamento por fadiga (trincamento longitudinal topo-base e trincamento tipo couro-de-jacaré base-topo), e IRI. O processo de calibração envolve o ajuste das equações de previsão de defeitos de forma a minimizar as diferenças entre o comportamento previsto e o observado. O processo de modelagem de validação envolve a coleta de dados suficientes para confirmar a validade dos modelos de previsão calibrados.

3.1.24. Elaboração do projeto funcional da nova pista de subida da Serra das Araras e adequação do projeto funcional da pista ascendente existente em pista descendente

O trabalho em pauta apresenta o estudo das alternativas de traçado da nova pista ascendente, elaboradas para vencer o desnível de 380m de serra entre as cidades de Piraí e Paracambi no estado do Rio de Janeiro, conhecida como a Serra das Araras, na Rod. Presidente Dutra- BR-116/RJ entre o km 219 e o km 229. Nesses projetos foi considerado que:

- contemple novo projeto com velocidade diretriz de 80km/h e projeções de crescimento de tráfego que considerem os eventos da Copa do Mundo de 2014 e das

Olimpíadas de 2016 no estudo de capacidade viária, de forma a proporcionar um nível de serviço operacional adequado;

- evite a redução de capacidade de tráfego durante a execução da obra, em função da necessidade de: interrupções nas pistas, desvios do eixo, confinamento das pistas, operação de segmentos em mão dupla, redução de velocidade devido a curiosidade dos ususários e que garanta a segurança e a integridade dos usúários e dos trabalhadores;
- utilize a pista atual de subida invertida para descer a serra, com adequações necessárias, para ter ganhos operacionais e de segurança para os usuários.

O documento, subsidiou a Concessionária para discutir e decidir, em conjunto com a ANTT, a solução de traçado que melhor atende às necessidades atuais de demanda de tráfego, com segurança, fluidez e conforto necessários para um atendimento satisfatório aos usuários e um acompanhamento operacional seguro.

Objetivos

O objetivo principal deste estudo foi o desenvolvimento de projetos funcionais para a nova pista de subida da Serra das Araras e adequação da pista ascendente existente em pista descendente.

Para atingir esse objetivo principal foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Análise de diversas variáveis geométricas e geotécnicas possíveis,
- Estudo de cenários económicos;
- Estudos de tráfego;
- Análise dos benefícios esperados;
- Estimativa dos valores dos investimentos e análise econômica pelo método HDM-4.

Traçados preliminares

Inicialmente estudaram-se diversos traçados alternativos para a nova subida da Serra das Araras, conforme ilustra-se na Figura 3.102. Esses traçados iniciais foram estudados considerando a constituição geológica da região, tráfego e sua velocidade, a necessidade e extensão de túneis e viadutos, os benefícios. Assim, conclui-se que os traçados 5B, 5C e 7 foram os que apresentaram inicialmente maior potencial para continuação dos estudos e são apresentados nas Figuras 3.103 a 3.105.

Figura 3.102. Alternativas para a nova subida da Serra das Araras



Figura 3.103. Alternativa 5B em planta

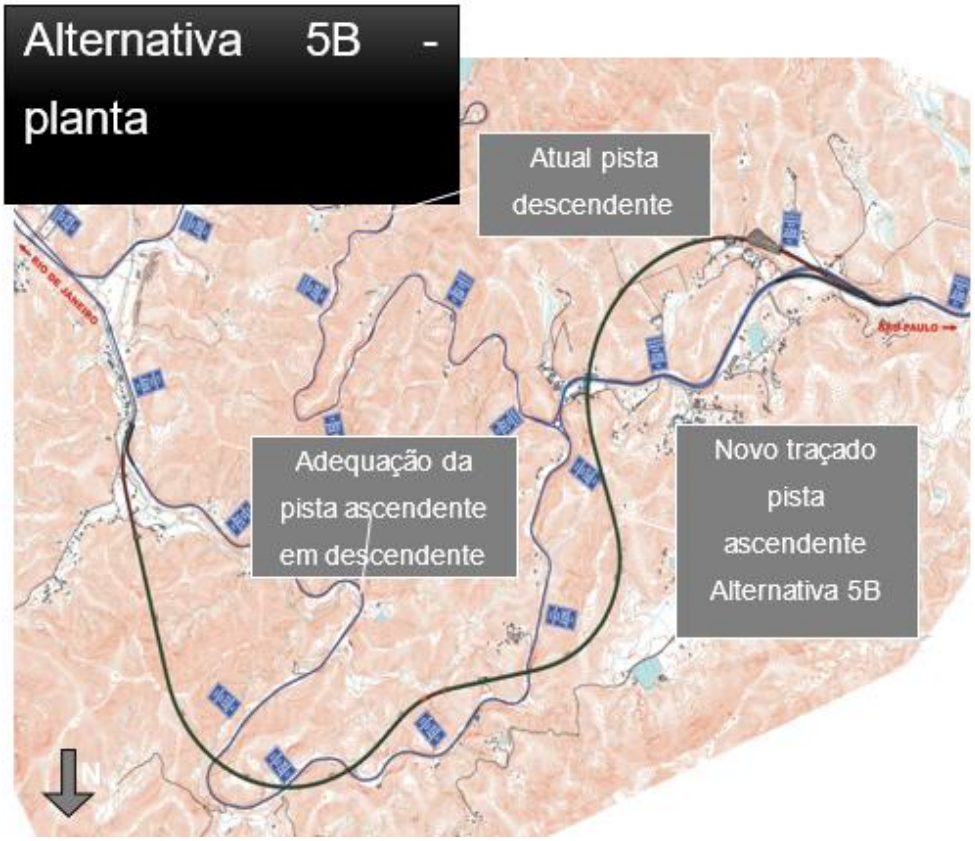


Figura 3.104. Alternativa 5C em planta

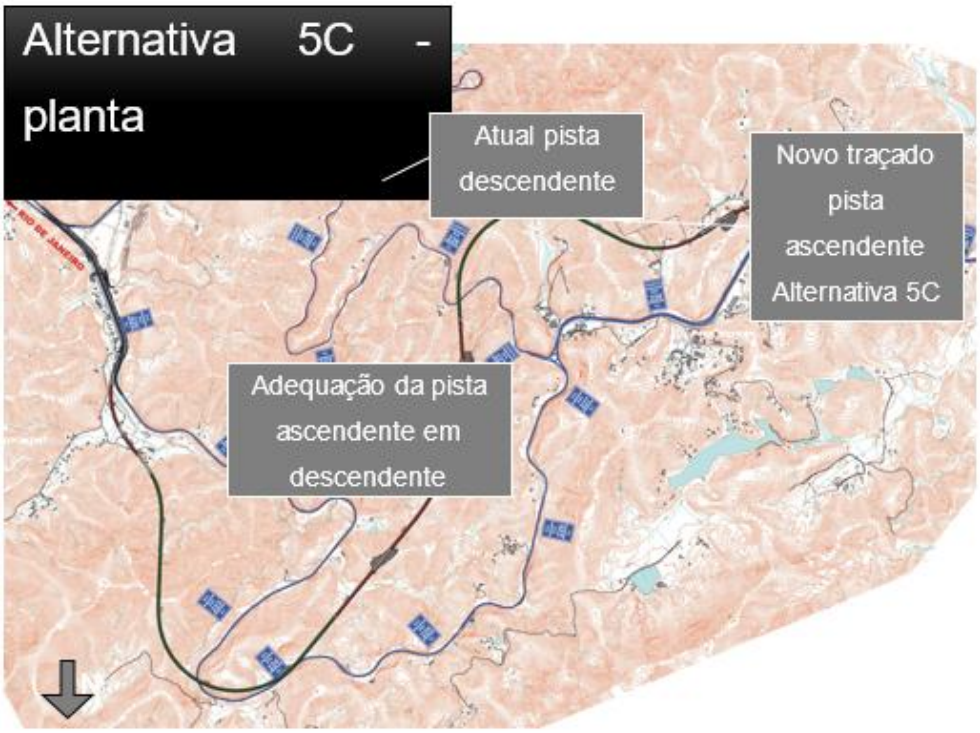
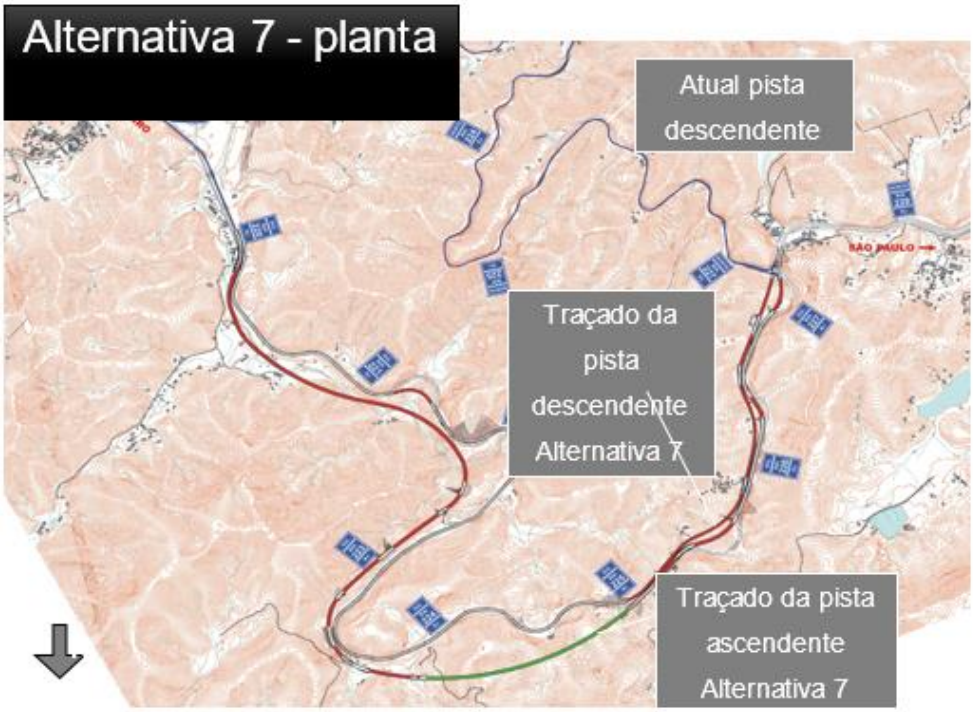


Figura 3.105. Alternativa 7 em planta



Análise pelo Método HDM4

Os estudos coletaram toda a informação necessária para alimentar o HDM-4 e analisar as três alternativas inicialmente selecionadas. Nas Tabelas 3.71 a 3.73 apresentam-se os principais resultados da análise comparativa realizada nesse software.

Tabela 3.71. Vida útil econômica para as alternativas analisadas

Pista	Duplicação		Alternativas 5B e 5C		Alternativa 7	
	velocidade	ano	velocidade	ano	velocidade	ano
Descida	60	2.041	60	2.041	60	2.041
Subida	60	2.029	100	2.041	80	2.039

Tabela 3.72. Valores de investimento para as alternativas analisadas

Ano	Duplicação	Alternativa 5B	Alternativa 5C	Alternativa 7
2.012	20%	10%	10%	10%
2.013	40%	25%	25%	25%
2.014	40%	25%	25%	25%
2.015	-	25%	25%	25%
2.016	-	15%	15%	15%
Investimentos (R$ x 10^6)	**350**	**1.400**	**1.200**	**800**

Tabela 3.73. Custos operacionais dos veículos para as alternativas analisadas

Tipos	Preço Novo	Código FIPE	Consumo (km/l)	Preço Pneu	Vida Pneu (mil km)	Manut. (por hora)	Tripulação por hora (*)
Auto	29.230	005317	13,7	100	60	22,60	7,20
Ônibus	330.000	(**)	5	422	105	25,60	15,1 (7,20)
Médio	136.250	509057	3,1	422	105	25,70	15,1
Pesado	183.450	509084	3,1	803	105	25,70	15,1
Articulado	220.660	509201	2,5	939	130	25,70	15,1

Após análise desses diversos fatores, para os três traçados preliminares, obteve-se a consolidação dos parâmetros econômicos para cada uma das alternativas, com e sem aplicação de fatores de redução Econômico/Financeiro (custo sombra), com mostram as Tabelas 3.74 e 3.75.

Tabela 3.74. Resumo dos resultados econômicos com custo sombra

SOLUÇÕES	INVESTIMENTOS (R$ x 10^6)	TIR (%)	Relação Benefício/ Custo
• PROJETO DE DUPLICAÇÃO	295	5,3	1,0
• ALTERNATIVA 5B	1.178	4,4	0,9
• ALTERNATIVA 5C	1.010	5,3	1,0
• ALTERNATIVA 7	673	8,4	1,5

Tabela 3.75. Resumo dos resultados econômicos sem custo sombra

SOLUÇÕES	INVESTIMENTOS (R$ x 10^6)	TIR (%)	Relação Benefício/ Custo
• PROJETO DE DUPLICAÇÃO	350	3,4	0,9
• ALTERNATIVA 5B	1.400	3,1	0,8
• ALTERNATIVA 5C	1.200	4,0	0,9
• ALTERNATIVA 7	800	6,9	1,3

Principais conclusões

Com base nos dados e análises realizadas neste estudo, obtiveram-se às seguintes conclusões:

Quanto ao nível de serviço das soluções estudadas:

- De acordo com o cenário de tráfego adotado, o projeto de Duplicação é a solução que apresenta a menor vida útil econômica, requerendo investimentos adicionais para adequação do nível de serviço a partir de 2029, ou seja, 10 anos antes do que as demais alternativas. Salienta-se que esses investimentos adicionais foram desconsiderados neste estudo.

Quanto aos benefícios analisados:

- Dos benefícios específicos analisados, a redução dos custos operacionais dos veículos é o mais representativo (72%), seguido pela redução do número de acidentes (20%) e a redução do tempo das viagens (8%).

Quanto aos indicadores econômico-financeiros:

- Apenas o projeto de Duplicação e as alternativas 5C e 7 mostraram-se viáveis quando comparadas à Taxa Mínima de Desconto Econômico (ou Social), admitindo a redução pelo Fator Econômico/Financeiro (custo sombra).
- Em função do elevado valor estimado de investimento, a Alternativa 5B se mostra economicamente inviável em qualquer situação: com ou sem a aplicação do fator de redução econômico/financeira.
- Sem a aplicação do redutor (custo sombra) a relação Benefício/Custo da Alternativa 7 é 45% superior à do projeto de Duplicação e da Alternativa 5C.
- Com a aplicação do redutor (custo sombra) a relação Benefício/Custo da Alternativa 7 é 50% superior à do projeto de Duplicação e da Alternativa 5C.
- Desconsiderando-se o efeito redutor (custo sombra) apenas a Alternativa 7 apresenta viabilidade adequada, ou seja, relação benefício/custo superior a 1 e taxa interna de retorno (TIR) superior (6,9%) à taxa de desconto social (5,1%).

Quanto aos aspectos ambientais:

- Numa avaliação preliminar, a alternativa 7 apresenta volume de escavação inferior às demais alternativas, incluindo o Projeto de Duplicação, demandando menor área para depósito de material excedente e menor necessidade de caminhos de serviço, pois o emboque do túnel proposto está próximo à passagem inferior que será implantada e o

local para depósito de material excedente indicado está na mesma posição do emboque, no outro lado da BR-116.

- A Alternativa 7 e o projeto de Duplicação apresentam emissão de Dióxido de Carbono similares durante o período de vida útil. Considerando-se o modelo de cálculo recomendado pelo GHG Protocol (Green House Gas Protocol), estima-se que mantendo-se a situação atual será lançado cerca de 1.425 TCO2e (toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente), porém com a implantação de um novo traçado (Alternativa 7 ou projeto de Duplicação) ocorrerá uma redução de 4% de emissão deste poluente.

Diante do acima exposto, entendeu-se que a "Alternativa 7" é a que apresentou os melhores benefícios sociais, econômicos e ambientais.

3.1.25. Capacitação da Equipe Técnica do CPR com uso dos novos equipamentos adquiridos

O Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra em 2010 iniciou a aquisição de equipamentos sofisticados para avaliação de diversos materiais empregados na construção e restauração de pavimentos rodoviários. Assim, para capacitar a equipe técnica foi realizada a contratação de uma empresa parceira para o desenvolvimento e realização de aulas aplicadas aos conceitos básicos de pavimentação.

O Conteúdo dessas aulas tem como base os materiais empregados na constituição de misturas asfálticas e foram agrupados da seguinte maneira:

Materiais:

- Tipos: ligantes asfálticos, agregados, solos e aditivos;
- Classificação: tradicional e Superpave;
- Caracterização: granulometria, densidades, Bailey, abrasão Los Angeles etc.

Misturas asfálticas:

- Tipos de misturas asfálticas: concreto asfáltico (CA), *stone matrix asphalt* (SMA), camada porosa de atrito (CPA), *gap-graded* (GG);
- Métodos de dosagem convencional e Superpave.
- Avaliação das misturas asfálticas: ensaios volumétricos (massa específica máxima, massa específica aparente, volume de vazios, vazios do agregado mineral) e mecânicos (módulo de resiliência, módulo dinâmico, *flow number* e fadiga).

Programa de Treinamento

O programa de treinamento foi organizado em aulas presenciais baseadas no Livro de Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros (Bernucci et al. 2008). A organização dessas aulas é apresentada a seguir:

- Aula 1: Introdução e Breve Histórico da Pavimentação no Brasil;
- Aula 2: Terminologia e Noções Gerais sobre pavimentação;
- Aulas 3 e 4: Agregados – tipos e ensaios;
- Aula 5: Agregados – Superpave;
- Aulas 6, 7, 8 e 9: Método Bailey - teoria e prática;
- Aula 10: Ligantes asfálticos convencionais - tipos e ensaios;
- Aula 11: Ligantes modificados - tipos e ensaios;
- Aula 12: Ligantes asfálticos - Superpave – ok!
- Aulas 13 e 14: Misturas Asfálticas – tipos: concreto asfáltico; stone matrix asphalt; gap graded; camada porosa de atrito;
- Aulas 15 e 16: Dosagem de Misturas Asfálticas - Método Marshall;
- Aula 17, 18, 19 e 20: Dosagem de Misturas Asfálticas - Método Superpave - teoria e prática;
- Aulas 21, 22, 23 e 24: Ensaios - teoria e prática.

Considerações Finais

Durante o período de treinamento foi feito o acompanhamento das atividades realizadas no laboratório, onde os técnicos aplicavam os conhecimentos adquiridos nas aulas teóricas e práticas. Dessa forma, foi possível observar a realização dos procedimentos de ensaios, assim como dos métodos de dosagens de misturas asfálticas.

Outro aspecto importante abordado foi a dosagem empregando o método Superpave e a moldagem dos corpos de prova com o compactador giratório, que representa um grande avanço, uma vez que a moldagem por amassamento empregando o compactador giratório simula mais a passagem do rolo compactador no campo.

3.1.26. Capacitação da equipe técnica – Método Superpave

Com a construção do novo centro de pesquisa, a CCR NovaDutra passou a desenvolver diversas pesquisas e aplicar novas tecnologias nos pavimentos sob sua responsabilidade, empregando equipamentos importados da mais alta tecnologia, para atender as especificações Superpave e,

dessa forma, poder simular o comportamento de materiais e misturas asfálticas em laboratório antes de aplicá-los em campo.

Um dos maiores problemas encontrados entre profissionais que atuam na área de pavimentação asfáltica é o desconhecimento e emprego errado de termos técnicos. Por exemplo, um equívoco é "traduzir" os termos técnicos aproveitando as siglas internacionais sem considerar a sua definição, por exemplo, Gsa = *Apparent Specific Gravity* = densidade real do agregado e não densidade aparente do agregado, que é Gsb = *Bulk Specific Gravity*.

Portanto, o objetivo desse projeto foi realizar a capacitação técnica da equipe do CPR, principalmente em relação a metodologia SUPERPAVE.

As aulas teóricas da capacitação da equipe técnica foram ministradas na sala de reuniões e as aulas práticas foram realizadas no laboratório do novo centro de pesquisas da CCR, localizado na sede da Nova Dutra - Rodovia Presidente Dutra BR-116, em Santa Isabel, SP. O objetivo desse trabalho era treinar e capacitar a equipe técnica para realizar avaliação e caracterização dos diversos materiais e misturas asfálticas, empregando os ensaios convencionais e Superpave. Para isso foi feito o acompanhamento das atividades realizadas pela equipe técnica, assim como dos procedimentos atualmente adotados na avaliação, caracterização e dosagem dos materiais empregados na pavimentação asfáltica.

Após essa etapa de acompanhamento foi feita uma análise das técnicas empregadas, onde foi verificada a necessidade de alterações, atualizações e desenvolvimento de novos procedimentos. O treinamento foi composto por aulas teóricas e práticas.

O conteúdo das aulas tem como base os conceitos básicos sobre pavimentação asfáltica, incluindo materiais e misturas asfálticas, aplicando a metodologia Superpave.

Materiais:

- Tipos: ligantes asfálticos, agregados, solos e aditivos;
- Classificação: tradicional e Superpave;
- Caracterização: granulometria, densidades, Bailey, abrasão Los Angeles etc.

Misturas asfálticas:

- Tipos de misturas asfálticas: concreto asfáltico (CA), *stone matrix asphalt* (SMA), camada porosa de atrito (CPA), *gap-graded* (GG);
- Métodos de dosagem convencional e Superpave.

- Avaliação das misturas asfálticas: ensaios volumétricos (massa específica máxima, massa específica aparente, volume de vazios, vazios do agregado mineral) e mecânicos (módulo de resiliência, módulo dinâmico, *flow number* e fadiga).

3.1.27. Free Flow - Implantação De Pontos Com Novo Sistema Automático De Arrecadação Para Testes (1ª Etapa)

Um sistema de teste de arrecadação foi instalado numa sequência de sítios ao longo da rodovia Presidente Dutra para a determinação do nível de acerto de inspeção automática via OCR para todos os períodos ao longo de um conjunto de dias de operação. A taxa efetiva de acerto (considerada correção de perda de tráfego e apoio de BackOffice, ou seja, é a soma %fCE+%fCH) para os melhores pontos flutua dentro do intervalo de 70% a 80%. Esse índice de validação de leituras foi obtido em apenas dois sítios, o de Guarulhos (GRU) (km 227) e o de São José dos Campos (SJC) 'sul' (km 140). O primeiro sítio adquiriu imagens da fronteira de veículos, enquanto que o segundo capturou imagens traseiras. Vale ressaltar que o ponto GRU é responsável por 44% do fluxo de veículos no trecho de rodovia estudado pelo projeto, enquanto que o ponto SJS é responsável apenas por 12% do fluxo total. Para atingir o nível de certeza nos resultados, o projeto desenvolveu um processo de auditoria interna que levou em consideração a contagem de tráfego por meio de sistema independente (conhecidos como ATs). Considerando os dias 'oficiais' de aquisição, as taxas máximas de acerto corrigido para cada sítio se distribuem conforme segue:

- GRU: 71,5% (17/9/2012) e 72,7% (18/9/2012);
- SJS: 69,4% (17/9/2012) e 77,4% (18/9/2012);
- BMA: 22,0% (17/9/2012) e 23,0% (18/9/2012);
- SJM: 42,5% (17/9/2012) e 42,7% (18/9/2012);
- SJC: 26,4% (17/9/2012) e 24,7% (18/9/2012);

O projeto envolveu a integração de dados em diversos segmentos ou estratos tais como: sítio de aquisição, período do dia, tipo de dados, dentre outros. Um processo especial de inspeção precedido por auditoria na estrutura de dados foi estabelecido. Notas preliminares (sem envolver estatística de tráfego) são descritas no relatório para conjunto de dias restritos (antes de 5/9 e conjunto 6/9, 7/9 e 8/9). Durante o conjunto de dados considerados 'oficiais', todos os fornecedores conseguiram operar seus sistemas de forma simultânea para possibilitar integralização de dados. O processo de inspeção final envolveu a utilização de 10 a 20 pessoas formando um comitê de inspetores (BackOffice) para agrupamento dos dados da leitura e detecção em várias classes: grupo de acerto do sistema automático, grupo de acerto exclusivo dos humanos,

grupo de dados contendo placas ilegíveis, grupo de dados com placas inválidas e grupo de motocicletas. Cada um desses grupos foi usado para compilar índices ou frações de acerto específicas para cada estrato junto com seus desvios-padrão. O projeto demonstrou que existem variações no tempo de inspeção médio entre inspetores e que os pontos que apresentam melhor desempenho (essencialmente medido pela fração de imagens validadas do total de registros) também coincidem com os pontos de maior velocidade de análise em BackOffice. Assim, quanto melhor for o desempenho do ponto de aquisição tanto menor é o esforço humano dispendido na análise das imagens. Isso acontece porque sistemas com índices de acerto automático piores requerem mais tempo de digitação de código correto e não apenas a mera checagem visual de imagens. Tempos típicos de análise em regime de alta eficiência estão no intervalo 2-4 segundos enquanto pontos que exigem digitação das placas fazem 8-12 segundos. O tempo médio de inspeção inferido a partir do 'estado da arte' instalado durante o projeto é da ordem de 4 segundos.

No que tange apenas às taxas de acerto automático, sem considerar as perdas envolvidas, para os melhores níveis alcançados (melhores sítios) não se observam variações grandes entre dia e noite, nem aparentemente com o tipo de placa (cor, reflexividade). Em relação a análise de tráfego, foram observadas perdas consideráveis de registro nos dias 17/9 e 18/9 para os sítios BMA e SJC (índices de relação registro-tráfego superiores a 60%). Para esses pontos, as notas de inspeção automática foram corrigidas para o fluxo registrado e resultaram em valores típicos entre 20% e 30%, bem inferiores aos registros de GRU e SJS. O sítio de SJM, embora tenha apresentado o menor índice de perda de veículos, apresentou o menor nível de acerto de todos os sítios. De forma geral, as perdas por ilegibilidade de placa ou imagens não conforme somam aproximadamente entre 10% e 20% do fluxo efetivamente registrado para os sítios com as melhores notas de inspeção, enquanto que o resíduo das diferenças para o total deve necessariamente ser inspecionado por operadores humanos. O esforço de BackOffice (percentagem de imagens do total que deve necessariamente ser inspecionado por humanos) envolve considerações financeiras e pode ser estimado parcialmente pela análise dos índices. Porém, com base nos tempo médio determinado para inspeção de um registro pelo BackOffice usado no projeto, foi estimado o número de pessoas necessárias para inspecionar todos os registros gerados por todos os pontos, assumindo que não há perdas de tráfego (registro). Para o tempo médio de inspeção (4s), 48 pessoas são necessárias trabalhando em um turno de 8h, enquanto que se o tempo de 10s de digitação média for usado (o operador não faz a checagem do código gerado, mas digita diretamente a placa) esse mesmo número é da ordem de 120 pessoas. Variações de duração de turno podem ser importantes para garantir boa eficiência de inspeção pelos os humanos. Os erros de leitura automática observados (ou, equivalentemente, frações de imagens exclusivamente lidas por humanos) estão muito

relacionados à presença de caracteres específicos que causam maior erro. Tais caracteres podem ser usados para segregar placas em BackOffice, aumentando a eficiência final de inspeção. Ainda na questão ‘detecção de veículos’, ficou claro que o uso de laços virtuais – em que pese a vantagem expressiva de não se ter que instalar nenhum dispositivo na pista – sofre de algumas desvantagens, como a necessidade de regime de iluminação constante.

Com relação à incidência de chuvas, boa parte do projeto transcorreu durante o período de estiagem. Por causa disso, uma análise sistemática da influência de chuvas não foi realizada, o que exigiria, rigorosamente, o uso de ferramentas de medição pluviométricas em cada sítio. Entretanto, no dia 21/9/2012 foi possível extrair as frações de desempenho para um período de chuva relativamente moderada para GRU, o que foi observado por meio da impressão da imagem (perda de contraste). Os resultados não permitem inferir que houve perda de qualidade no processo de inspeção, utilizando dados de um dos melhores pontos de aquisição, embora tenha ocorrido um aumento pequeno da taxa de imagens ilegíveis. Com relação à eficiência de inspeção de motocicletas, um dos sítios (SJS) capturou imagens traseiras, e valores típicos da ordem de 25% foram encontrados. A maior parte dos registros de motos (aproximadamente 50%) somente pode ser inspecionada por operadores humanos.

No que se refere à possibilidade de se usar o sistema para rastreamento sucessivo de veículos, ou, de forma equivalente, as taxas de leitura automática sucessivas, a utilização das melhores frações de validação de código e sob a assunção de perda nula de tráfego levam a valores teóricos da ordem de 81,9%±9,0% para 2 pórticos, 72,9%±12,1% para 3 pórticos e 65,6%±14,5% para uma sequência de 4 pórticos. Durante o projeto não foi possível executar um teste de rastreabilidade, o que não impediu a determinação dos coeficientes de rastreamento, que podem ser facilmente obtidos a partir dessas taxas de leitura individuais.

3.1.28. Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados com cal hidratada

Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo laboratorial da estabilização de solos de granulometria fina com cal hidratada, para avaliar o efeito da incorporação deste aditivo nos parâmetros mecânicos usualmente empregados em projetos de dimensionamento empírico de pavimentos.

Metodologia

Para alcançar o objetivo traçado nesta pesquisa foram estudados dois solos argilosos de granulometria fina estabilizados com diversos teores de cal hidratada. Foi empregada a cal hidratada do tipo CH-1 e as misturas resultantes foram avaliadas por meio de ensaios tradicionalmente empregados no setor de construção de pavimentos e à luz dos resultados obtidos em ensaios mecânicos, como compressão simples estática, compressão diametral estática e compressão triaxial cíclica.

Resultados

Inicialmente foram realizados os ensaios de compactação Proctor na energia intermediária nos solos sem cal e com adição de 3%, 5% e 7%. Os resultados desses ensaios são apresentados na Figura 3.106. Em seguida, na umidade ótima e massa específica seca máxima determinadas nesse ensaio, foi realizado o ensaio de CBR e expansão, e os resultados são apresentados na Figura 3.107 onde observa-se o incremento da capacidade de suporte e a redução da expansão conforme se adiciona cal aos solos avaliados.

Figura 3.106. Resultados da compactação realizada no solo cal

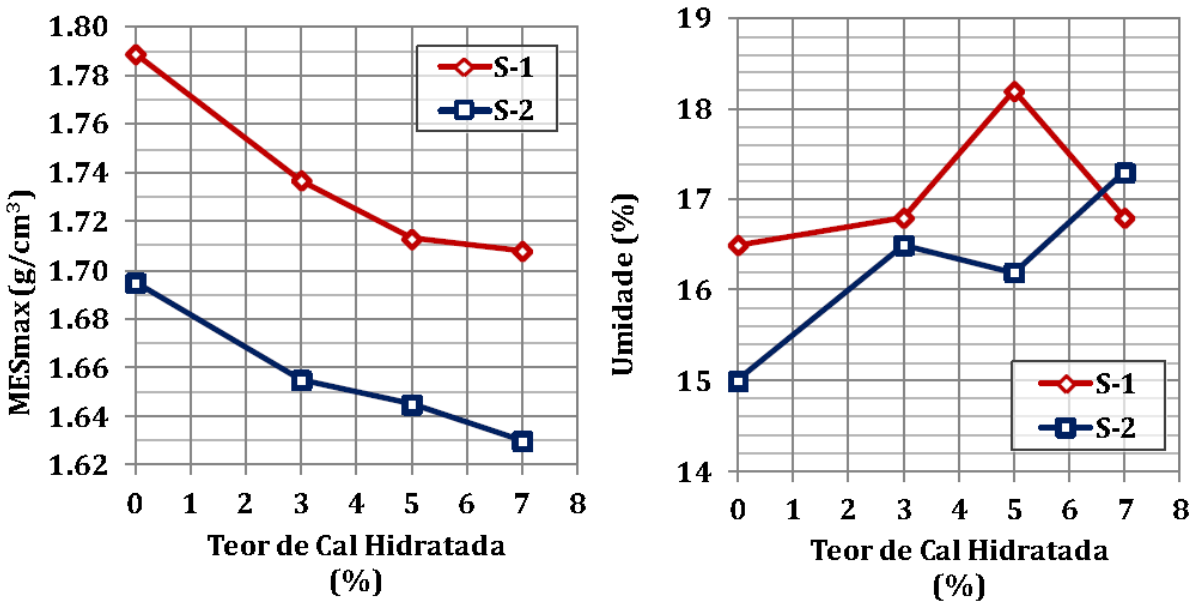
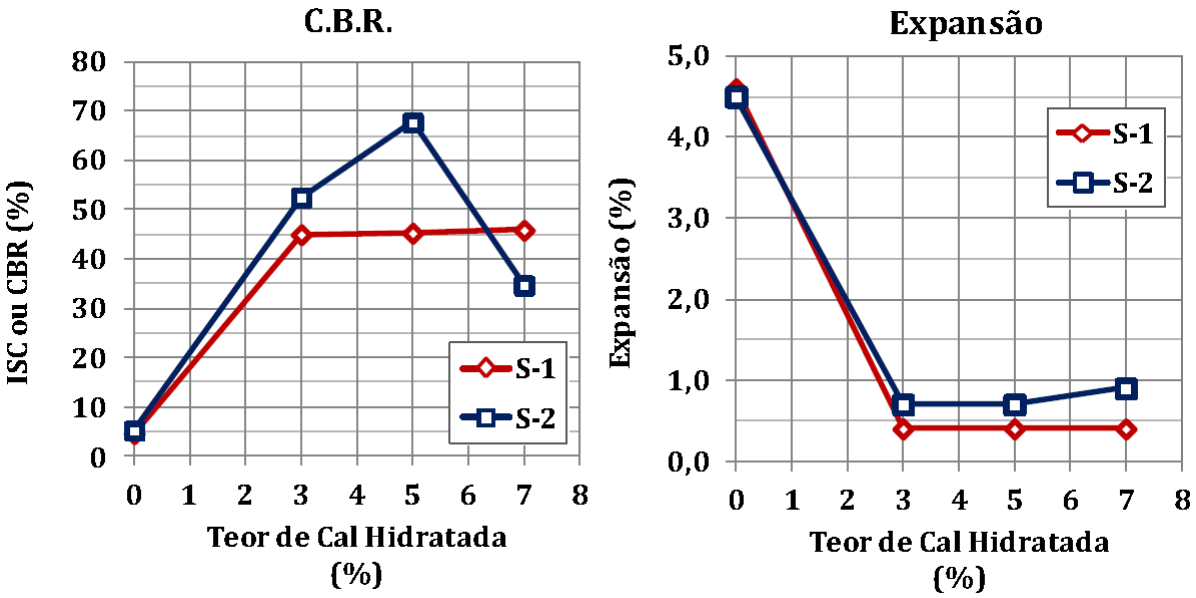


Figura 3.107. Resultados obtidos no ensaio de CBR nas misturas de solos



Nesta pesquisa também foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RT), usualmente empregados como parâmetros de avaliação na estabilização de solos. Estes ensaios foram realizados em corpos de provas curados durante 3, 7 e 28 dias. Os resultados desses ensaios são apresentados nas Figuras 3.108 e 3.109 e observa-se que houve um ganho significativo de resistência conforme se incrementa o tempo de cura e o teor de cal nas misturas.

Figura 3.108. Resultados obtidos no ensaio de compressão simples nas misturas de solos

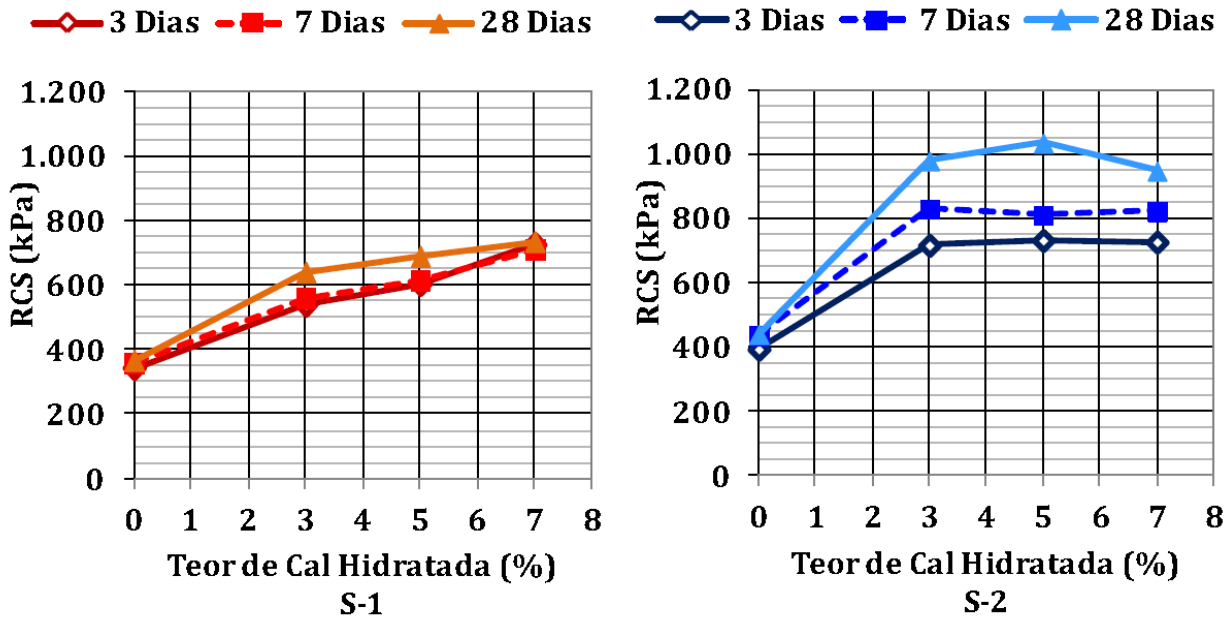
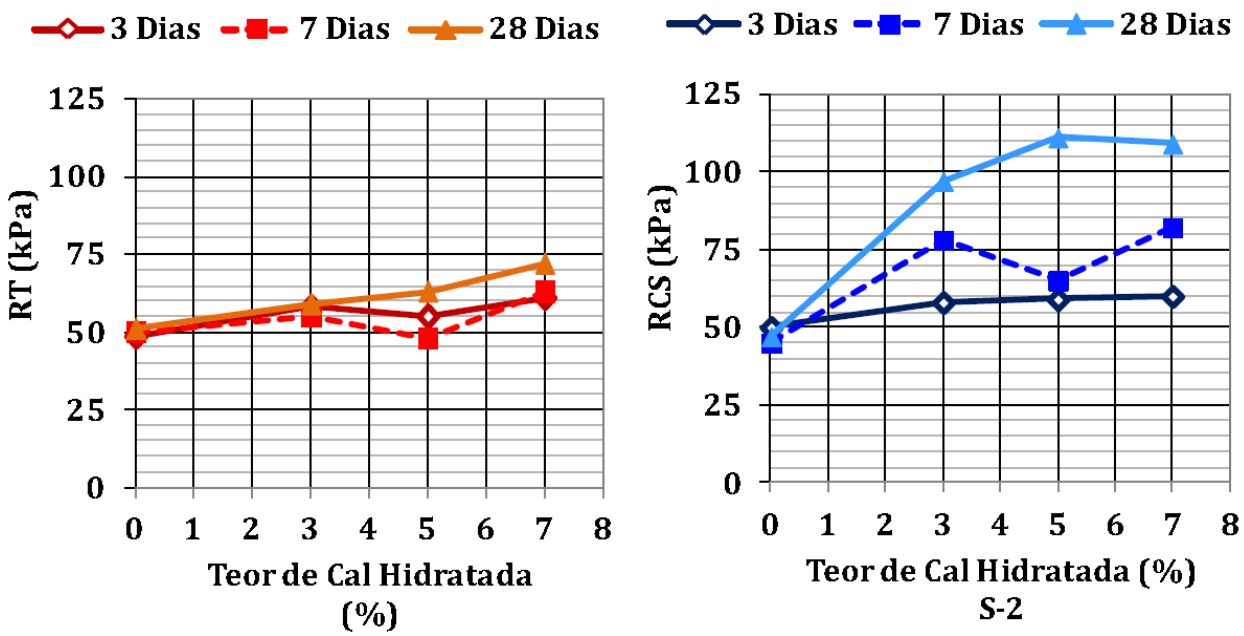


Figura 3.109. Resultados obtidos no ensaio de compressão diametral nas misturas de solos



O módulo de resiliência também foi determinado nas misturas de solo cal por meio do ensaio de compressão triaxial cíclica em corpos de prova curados durante 3, 7 e 28 dias. Os resultados mínimos e máximos obtidos em cada idade são apresentados nas Figuras 3.110 e 3.111 para os solos S-1 e S-2 respectivamente. Observa-se novamente que há uma tendência de incremento de rigidez conforme se aumenta o tempo de cura, mas parece que a adição de 3% de cal é suficiente para estabilizar os solos estudados.

Figura 3.110. Resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica nas misturas de solo cal com o solo S-1

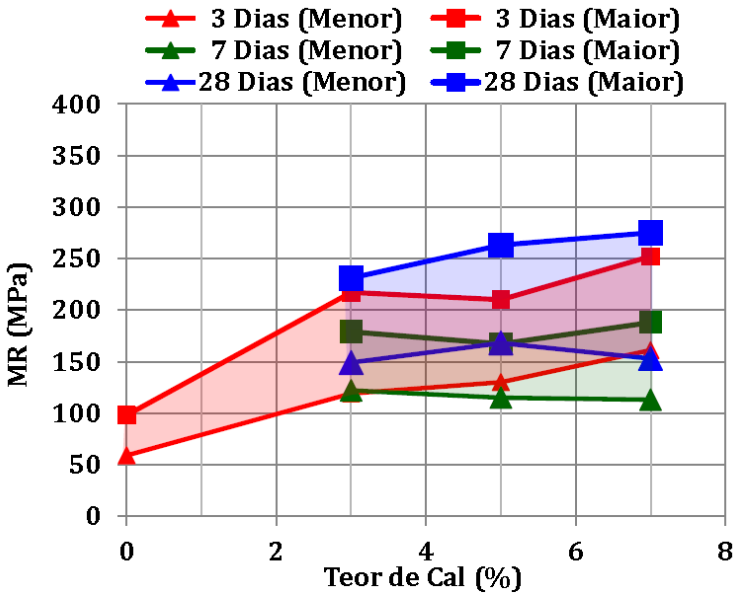
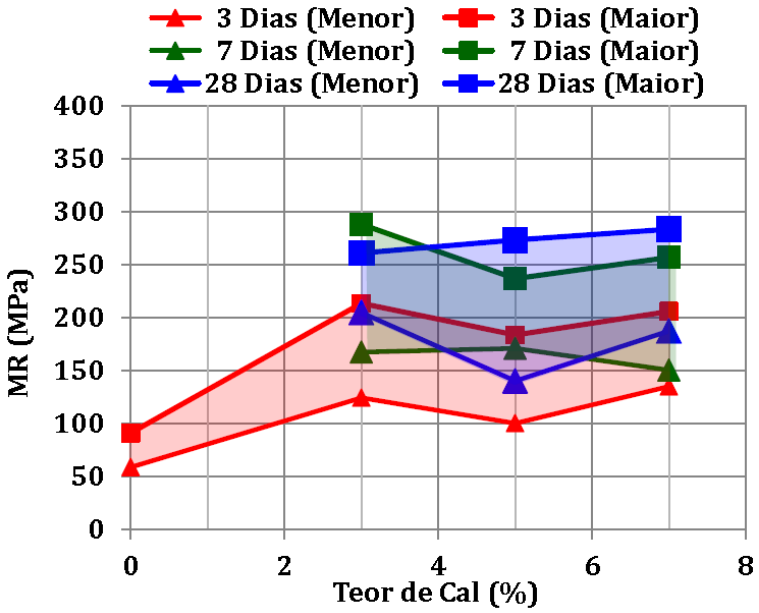


Figura 3.111. Resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica nas misturas de solo cal com o solo S-2

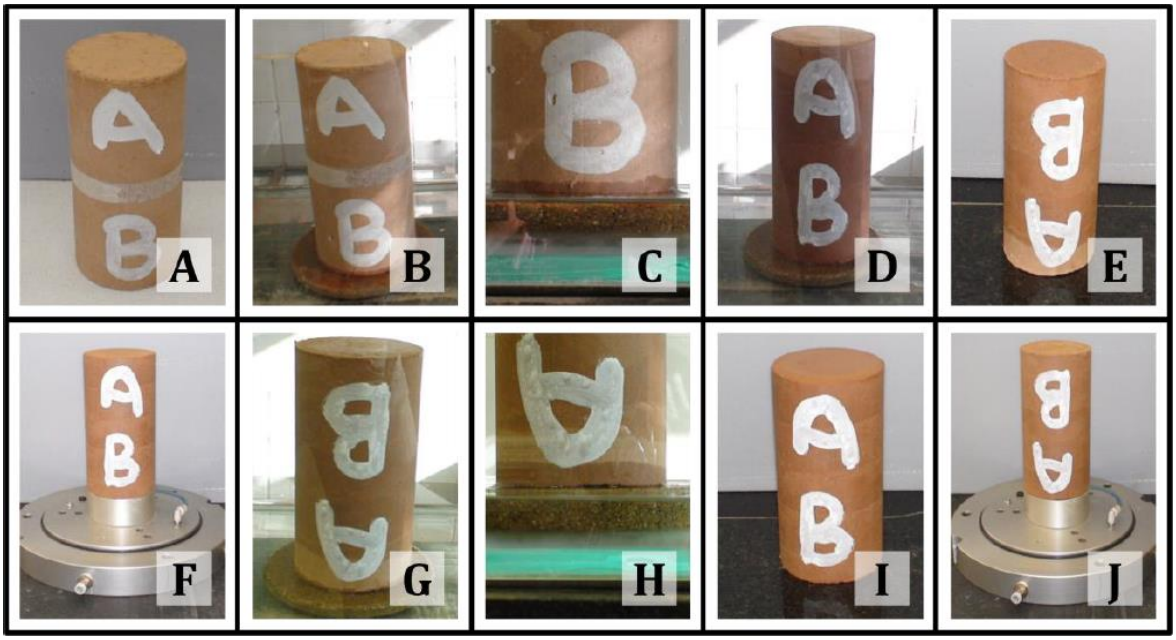


Usualmente os solos estabilizados com cal podem estar sujeitos à oscilação de umidade na estrutura do pavimento. Assim, é importante avaliar em laboratório os efeitos deletérios da água nos corpos de prova de solo cal. Neste estudo empregou-se um método recomendado pela *National Lime Association* (NLA) dos Estados Unidos. Esse procedimento está esquematizado na Figura 5.22 e é detalhado na continuação:

- Após o tempo de cura especificado, o corpo de prova foi ensaiado normalmente no ensaio de compressão triaxial cíclica. O módulo de resiliência assim obtido foi denominado de MR-seco.
- Concluído o ensaio, a face plana "B" do corpo de prova foi colocado na pedra porosa, embebida em água, para saturar por 24 horas por capilaridade (ver Figuras 3.112A, 3.112B, 3.112C, 3.112D;
- Após as 24 horas de capilaridade, o corpo de prova foi virado e apoiado em uma bancada na sua face plana "A" durante 30 minutos (ver Figura 3.112E). Logo após esse período, o ensaio de compressão triaxial cíclica foi executado; vale notar que o CP foi disposto no equipamento de modo que a face que foi saturada "B" fique na parte inferior (ver Figura 3.112F). O módulo de resiliência assim obtido foi chamado de MR-24h.
- Depois de realizado o ensaio, o corpo de prova foi submetido novamente à saturação por capilaridade durante 24 horas, apoiando a face "A" na pedra porosa (ver Figuras 3.112G e 3.112H). Após esse tempo o corpo de prova foi apoiado em uma bancada na sua face "B" durante 30 minutos (ver Figura 3.112I). Após esse período foi

executado novamente o ensaio de compressão triaxial cíclica; vale notar que o CP foi disposto no equipamento de modo que a face que foi saturada por último “A” fique na parte inferior (ver Figura 3.112J). O módulo de resiliência assim obtido foi chamado de MR-48h.

Figura 3.112. Sequência de execução do ensaio de compressão triaxial cíclica no corpo de prova seco e após 24 e 48 de saturação por capilaridade



Nas Figuras 3.113 e 3.114 apresentam-se os resultados de MR após saturação por capilaridade dos corpos de prova dos solos S-1 e S-2 respectivamente. Observa-se que a adição de cal nos solos incrementa consideravelmente a resistência à ação deletéria da água, e esse efeito é mais benéfico conforme é maior o tempo de cura dos corpos de prova submetidos ao processo de saturação por capilaridade.

Figura 3.113. Resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica nas misturas de solo cal com o solo S-1 após submetidas à saturação por capilaridade

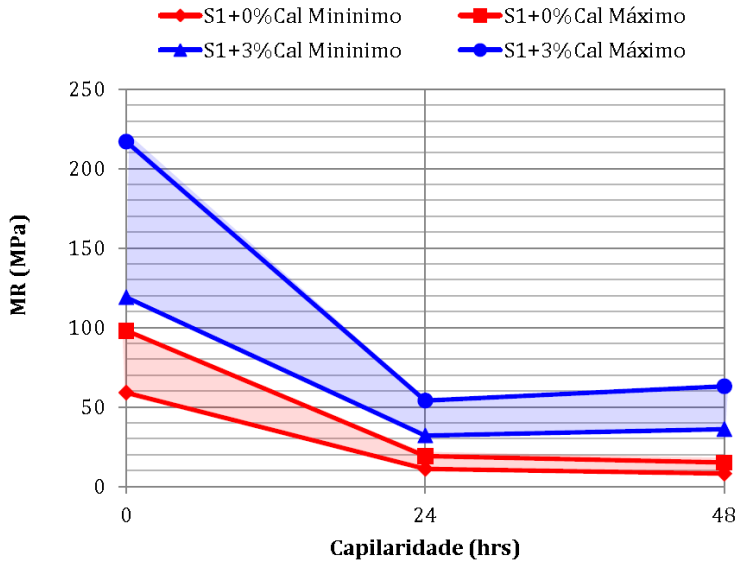
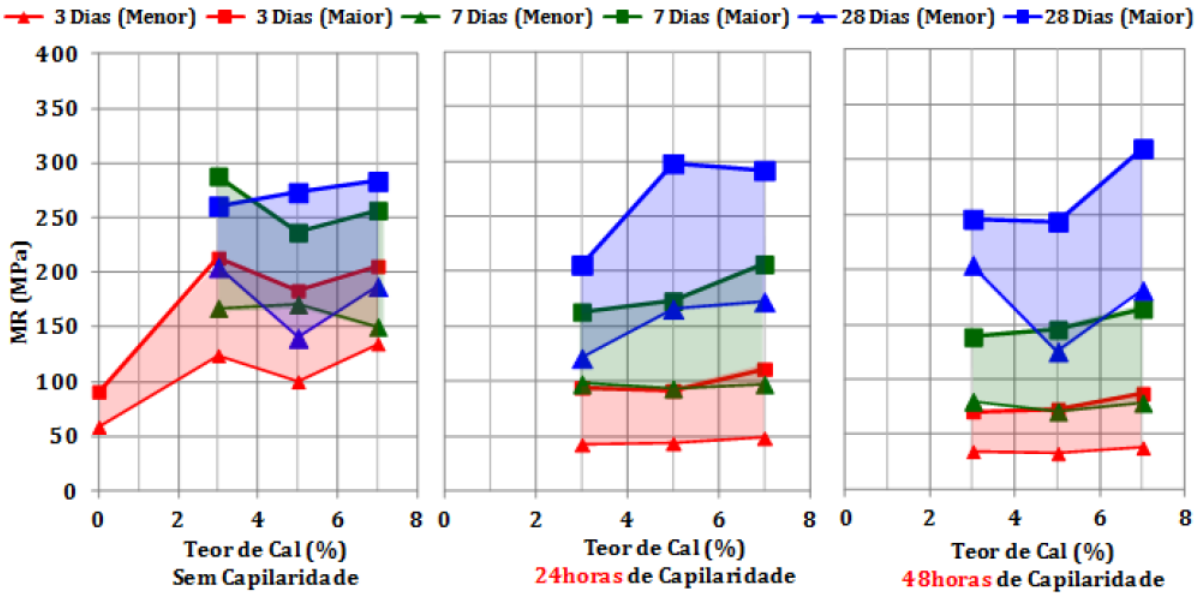


Figura 3.114. Resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica nas misturas de solo cal com o solo S-2 após submetidas à saturação por capilaridade



Conclusões

Nesta pesquisa estudou-se a estabilização de solos problemáticos (expansivos e com baixa capacidade de suporte) com a incorporação de cal hidratada do tipo CH-1. Os solos estudados foram dois solos argilosos (A-6 e A-7-5) característicos na faixa de domínio da Rodovia Presidente Dutra, identificados como S-1 e S-2, respectivamente. Fixaram-se os teores de cal hidratada CH-1 de 3%, 5% e 7%, em peso, para serem adicionados aos solos selecionados.

No ensaio de compactação Proctor na energia intermediária indiciou verificou-se que o incremento de cal hidratada aumenta o teor ótimo de umidade e reduz a massa específica seca máxima dos solos.

Se bem o ensaio de CBR não é o mais apropriado para avaliar os benefícios da estabilização de solos com cal hidratada, foi executado nas misturas de solo cal para obter uma ideia da capacidade de suporte dos solos estabilizados. Notou-se que a adição de apenas 3% de cal hidratada incrementou consideravelmente esse índice e reduziu expressivamente a expansão dos solos estudados. Contudo, vale salientar que, nas camadas de solo cal componentes de estruturas de pavimentos não devem ser considerados valores de CBR superiores a 15% no dimensionamento.

O ensaio de compressão simples foi executado apenas na condição seca, já que os corpos de prova imersos durante 24horas, conforme indicação da DNER ME 180/94, não resistiram à imersão. Considera-se que esse tipo de condicionamento é excessivo e não representa adequadamente às condições de campo. Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) obtidos na condição seca mostraram que os maiores ganhos de resistência foram obtidos nas misturas com 7% de cal hidratada. Contudo, a incorporação de 3% parece ser suficiente para obter resistência adequada para o emprego do solo cal como reforço de subleito, principalmente no solo A-7-5.

No ensaio de resistência à tração foi observado um comportamento similar ao notado no ensaio de compressão simples. A adição de 3% de cal hidratada nos solos produziu os maiores ganhos proporcionais de resistência à tração (RT) com relação à resistência do solo natural.

Os ensaios de compressão triaxial cíclica mostraram que o modelo composto se ajustou melhor aos dados experimentais obtidos. De modo geral, a adição de 3% de cal hidratada nos solos incrementou aproximadamente em 100% o módulo de resiliência (MR), alcançando valores próximos a 150MPa.

A saturação dos corpos de prova por capilaridade previamente à execução do ensaio de compressão triaxial cíclico, executado de forma complementar neste estudo, mostrou que os solos estabilizados com cal hidratada do tipo CH-1 apresentam boa resistência à ação deletéria da água, quando comparados com os resultados obtidos no solo puro.

Com relação ao tempo de cura, notou-se nos três parâmetros estudados, (RCS, RT, MR) que conforme se incrementa a cura do solo cal a resistência e a rigidez tendem a aumentar. Vale salientar que neste estudo se estudou até o tempo de cura de 28 dias, mas outros estudos mostram que o ganho de resistência do solo cal pode continuar por anos.

O solo cal curado durante 28 dias e saturado por capilaridade foi o que apresentou menores perdas de rigidez, quando comparado com os outros tempos de cura. Esse comportamento indica a importância de conservar o solo cal bem drenado na sua cura inicial.

Finalmente, conclui-se que a estabilização de solos problemáticos com cal é uma técnica que incrementou a rigidez e a resistência dos solos estudados e, ao mesmo tempo, melhorou a suscetibilidade à ação deletéria da água.

3.1.29. Revestimentos asfálticos sustentáveis: estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas

Na última década um novo desafio tem sido colocado para os órgãos gestores rodoviários e para os responsáveis por obras, questão complexa e imperativa nos dias atuais, a sustentabilidade no setor rodoviário. Neste sentido, houve um crescente interesse por novas tecnologias direcionadas a este tema em pavimentação, tendo sido introduzido várias inovações em materiais e produtos.

As misturas asfálticas mornas se referem a uma tecnologia relativamente recente, em que as temperaturas de usinagem e compactação são reduzidas em cerca de 30^{o}C ou mais, em relação as misturas asfálticas quentes convencionais, para reduzir as emissões asfálticas e de consumo energético. Dessa forma, são consideradas na Europa e nos Estados Unidos misturas mais sustentáveis que poderiam reduzir os problemas ambientais e melhorar as condições de trabalho dos operadores envolvidos na cadeia produtiva de misturas asfálticas.

Para possibilitar a redução nas temperaturas de produção, são utilizados aditivos mornos que possibilitem obter misturas asfálticas com características similares às misturas asfálticas quentes convencionais. Nos dias de hoje existem diversas tecnologias que garantem a redução das temperaturas de usinagem e compactação, tais como: as ceras orgânicas, os químicos surfactantes, o espumejamento do ligante asfáltico, entre outros.

Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um estudo laboratorial com diferentes tipos de técnicas de misturas mornas, em comparação com uma mistura a quente convencional, para avaliação do comportamento mecânico e do potencial de emissões. A pesquisa foi desenvolvida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária NovaDutra do Grupo CCR em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP.

A pesquisa compreendeu a realização de ensaios laboratoriais de comportamento mecânico em misturas asfálticas produzidas em laboratório e em usina asfáltica. Também foi realizada a medida

de emissões poluentes, principalmente no que diz respeito aos Hidrocarbonetos Cíclicos Aromáticos (HPAs). Essa medida e coleta de emissões foi realizada em laboratório e, complementarmente, em usina de asfalto e em pista.

Resultados da avaliação mecânica

Inicialmente as misturas asfálticas mornas foram dosadas empregando o compactador tradicional Marshall e sem a incorporação de aditivos mornos, com o objetivo de obter os teores de ligante asfáltico convencional de referência. Em seguida, verificou-se essa dosagem com a incorporação desses aditivos e os resultados são apresentados nas Figuras 3.115 a 3.117.

Figura 3.115. Teor de ligante asfáltico versus o volume de vazios da mistura quente Q-1 e das misturas com aditivo morno Evotherm 3G

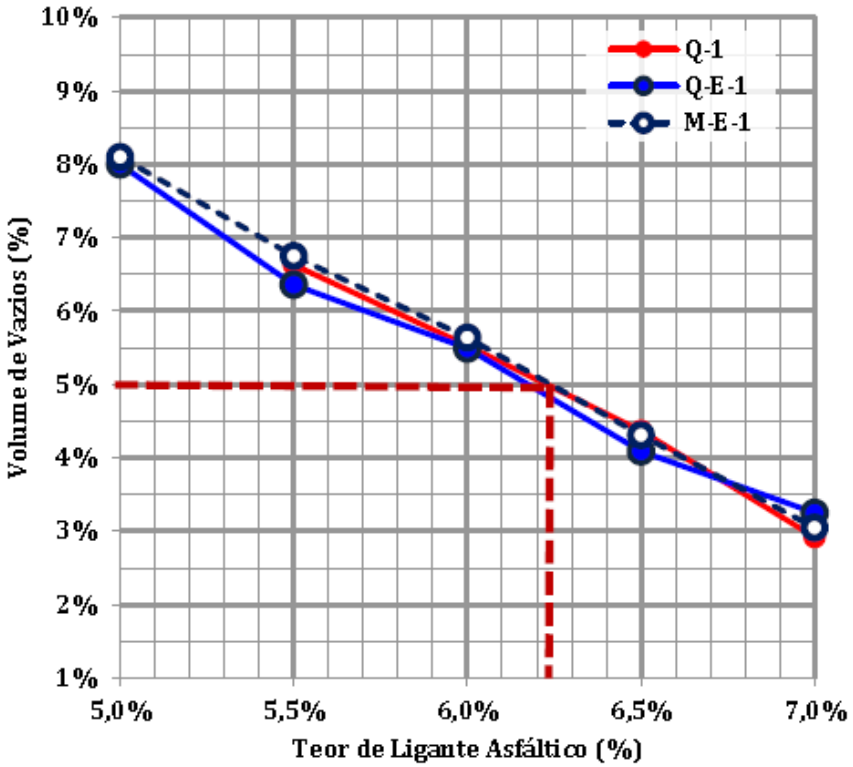


Figura 3.116. Teor de ligante asfáltico versus o volume de vazios da mistura quente Q-1 e das misturas com aditivo morno Gemul XT-15

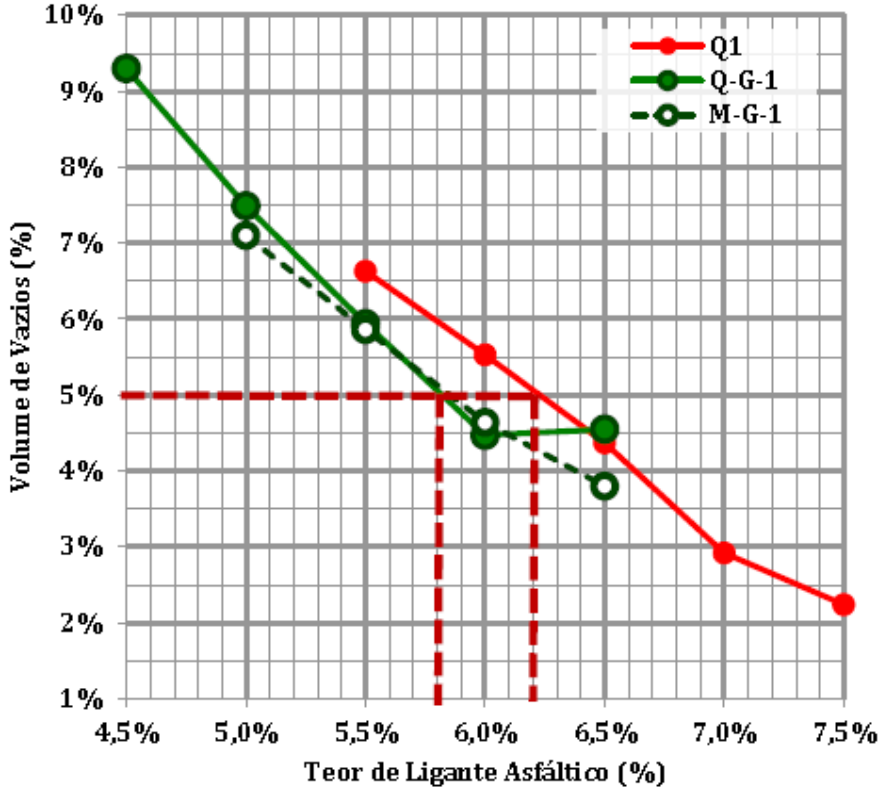
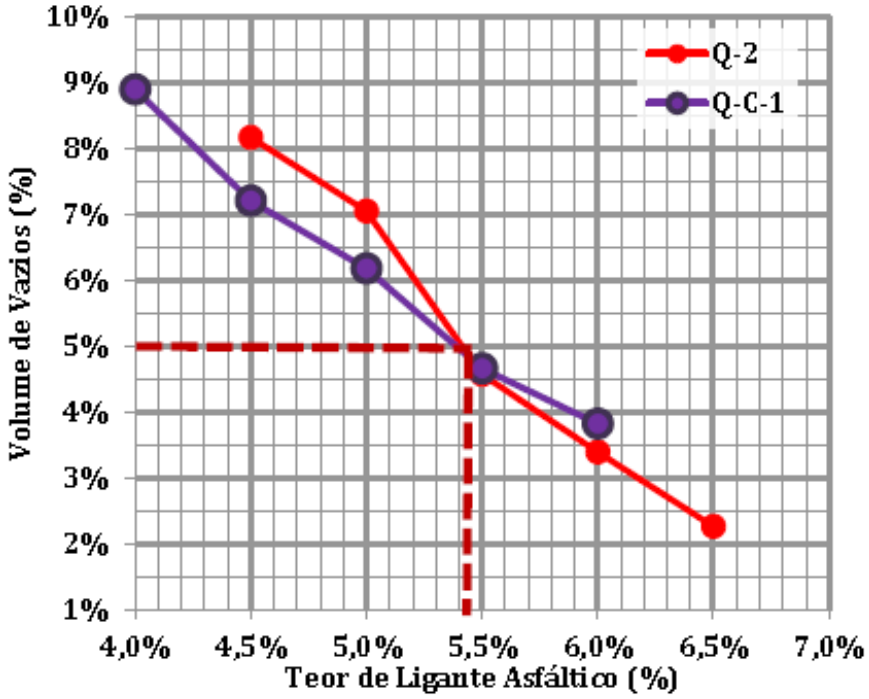


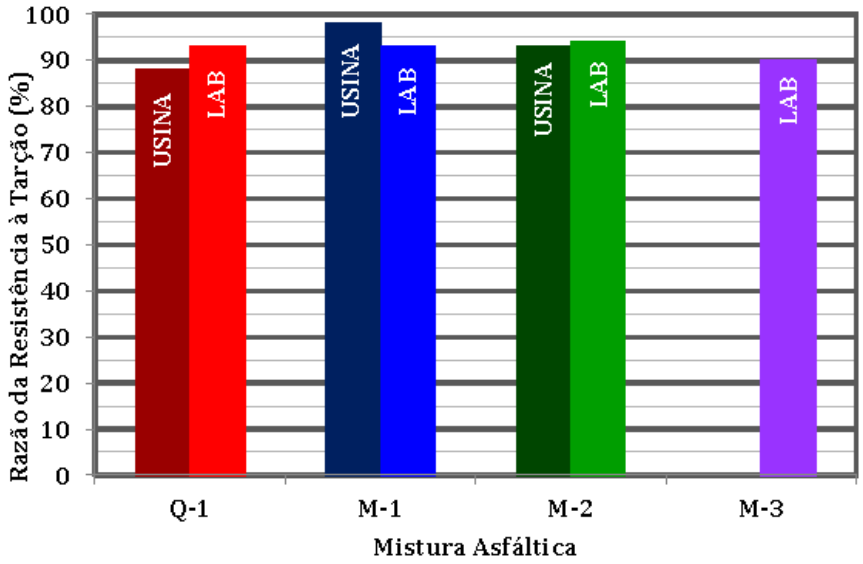
Figura 3.117. Teor de ligante asfáltico versus o volume de vazios da mistura quente Q-1 e das misturas com aditivo morno CCBit



O ensaio de dano por umidade induzida (DUI) foi realizado após definição da dosagem das misturas asfálticas mornas e de referência. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas

mornas apresentam boa resistência à ação deletéria da água, similar e até superior à mistura asfáltica quente de referência (Figura 3.118). Salienta-se que todas as misturas asfálticas foram compostas com 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1.

Figura 3.118. Resultados de dano por umidade induzida na mistura asfáltica de referência e nas misturas asfálticas mornas



Os resultados dos ensaios mecânicos são apresentados nas Figuras 3.119 a 3.123. Observa-se nessas figuras que os valores nos parâmetros mecânicos foram muito parecidos entre a mistura asfáltica morna e a mistura asfáltica quente de referência, quando foram avaliados os materiais coletados de usina.

Figura 3.119. Resistência à tração das misturas asfálticas estudadas

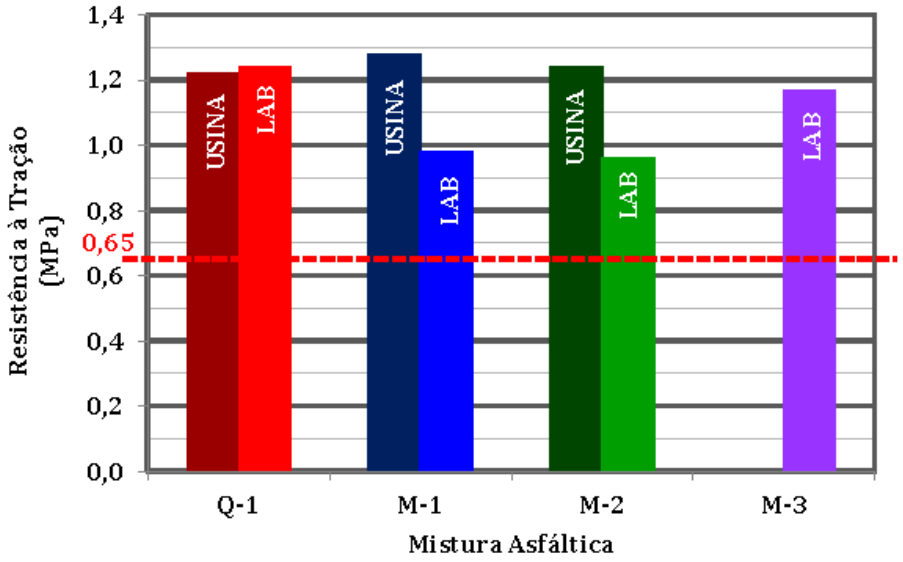


Figura 3.120. Módulo de resiliência das misturas asfálticas estudadas

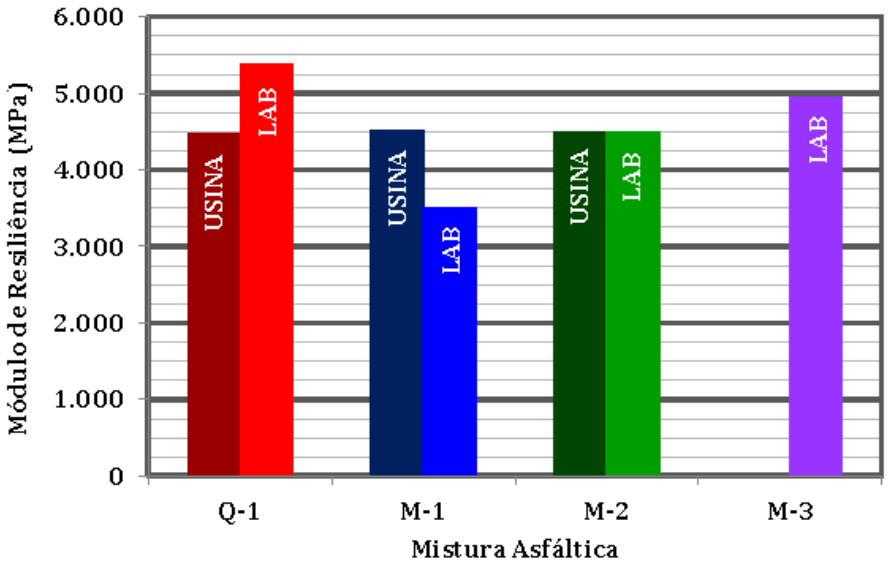


Figura 3.121. Curvas mestres obtidas no ensaio de módulo dinâmico realizado nas misturas asfálticas estudadas

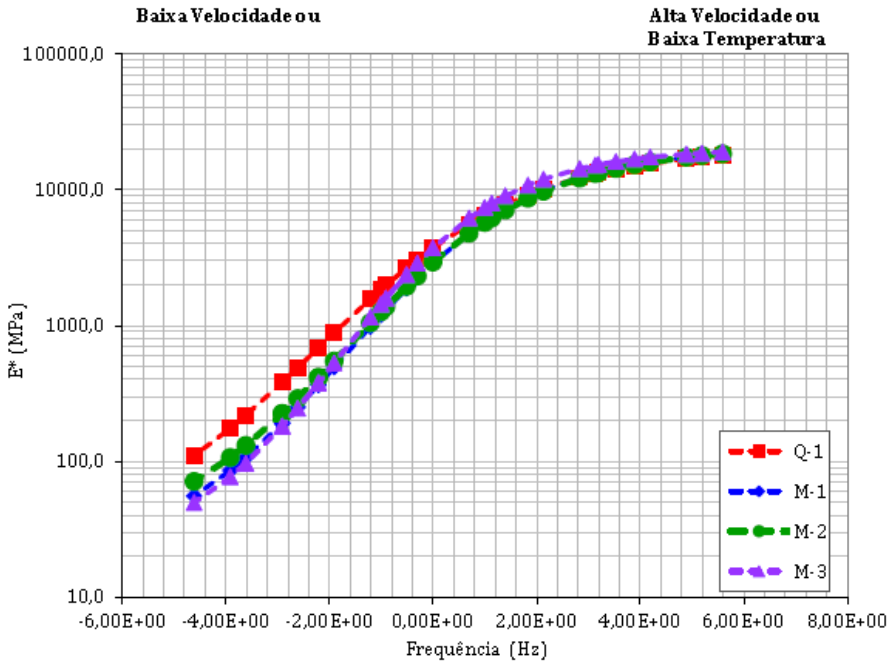


Figura 3.122. Resultados dos ensaios de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos

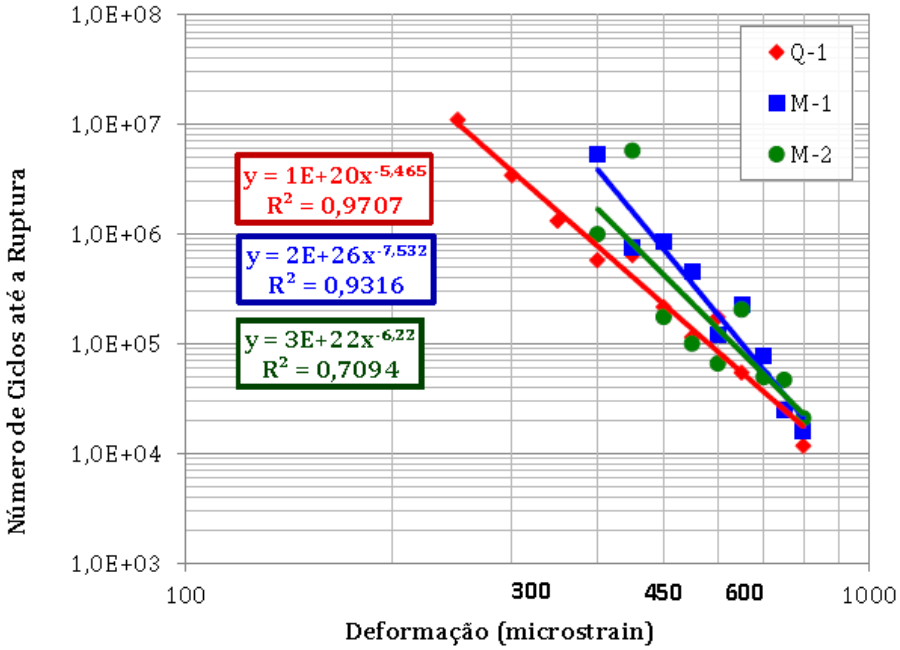
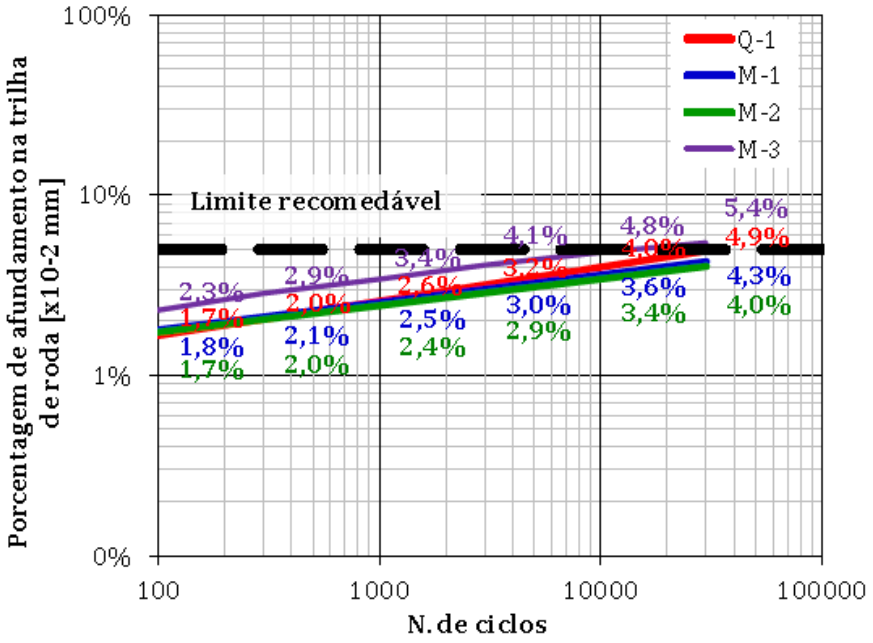


Figura 3.123. Afundamento de trilha de roda observado nos ensaios laboratoriais do simulador francês (LCPC)



Resultados da avaliação de emissões

A avaliação das emissões asfálticas nesta pesquisa foi focada na análise dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e foi realizada em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação LTP-EPUSP. Neste caso, foram analisados os HPAs prioritários, tanto na fase particulada quanto gasosa. Os resultados dessas análises são apresentados nas Figuras 3.124 e

3.125 para o monitoramento realizado em laboratório na produção dessas misturas asfálticas mornas e de referência.

Figura 3.124. HPAs prioritários na fase particulada coletados durante preparação de massa asfáltica em laboratório para a mistura de controle e as misturas com aditivos surfactantes

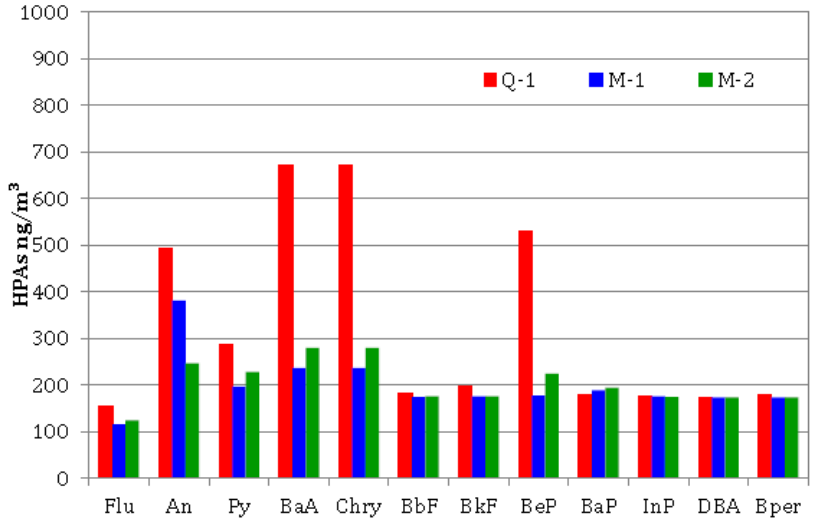
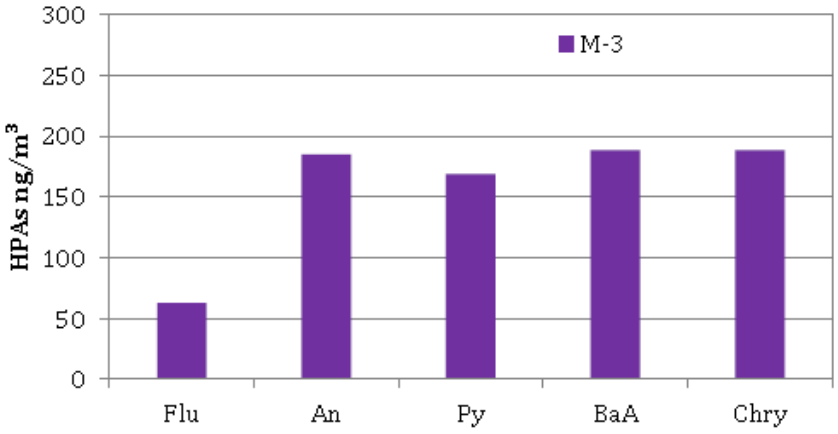


Figura 3.125. HPAs prioritários na fase particulada coletados durante preparação de massa asfáltica em laboratório para a mistura com aditivo morno tipo cera orgânica



Considerações Finais

Nesta pesquisa foram estudadas três tecnologias de aditivos mornos disponíveis no mercado nacional para produção de misturas asfálticas mornas, duas do tipo químico surfactantes (Evotherm 3G e Gemul XT-15) e uma do tipo cera orgânica (CCBit 113AD).

Esses aditivos foram usados para compor três misturas asfálticas mornas, sendo que para as misturas asfálticas mornas com Evotherm3G e Gemul XT-15, foi utilizado um ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moído. Já na mistura asfáltica morna com CCBit 113AD foi utilizado um ligante asfáltico do tipo CAP 30/45. Para efeitos comparativos foi executada uma

mistura asfáltica quente de referência com ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moído.

Os ensaios mecânicos de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos e deformação permanente por trilha de roda foram executados nas misturas asfálticas. Os corpos de prova utilizados para execução desses ensaios foram produzidos com massa asfáltica produzida em laboratório e também com massa asfáltica coletada em usina.

Os resultados desses ensaios mecânicos permitem realizar as seguintes conclusões com relação às misturas asfálticas mornas:

- Com relação ao ensaio de resistência à tração, notou-se que as misturas asfálticas mornas coletadas em usina apresentaram resistência similar à mistura asfáltica quente de referência. As misturas mornas com Evotherm 3G e Gemul XT-15 produzidas em laboratório apresentaram RT inferior á mistura de referência, contudo todos os valores de resistência foram superiores a 0,65MPa, que é o valor mínimo usualmente recomendado para misturas asfálticas. Vale salientar que a mistura morna com CCBit 113AD preparada com CAP 30/45 apresentou valores de RT similares à mistura asfáltica quente com ligante asfáltico modificado por borracha.
- No ensaio de módulo de resiliência verificou-se que, para o caso das massas coletadas em usina, as misturas asfálticas mornas apresentaram comportamento similar ao observado na mistura asfáltica quente. No caso dos corpos de prova produzidos com massa asfáltica de laboratório, as misturas asfálticas mornas apresentaram rigidez levemente inferior à mistura asfáltica quente.
- As curvas mestres das misturas asfálticas mornas mostraram também uma tendência de redução de rigidez das misturas asfálticas mornas, de forma mais notória no caso em que os corpos de prova foram produzidos em laboratório. De modo geral, as misturas produzidas em laboratório apresentaram valores de módulo dinâmico inferiores aos obtidos nas misturas coletadas em usina. A maior rigidez das misturas asfálticas coletadas em usina pode ser atribuída ao reaquecimento que essas misturas sofreram em laboratório para possibilitar a moldagem dos corpos de prova do ensaio de módulo dinâmico. Sabe-se que o reaquecimento do ligante asfáltico representa o enrijecimento do mesmo, impactando também na rigidez da mistura asfáltica e que é refletida no valor do módulo dinâmico.
- Embora as misturas asfálticas mornas tenham apresentado rigidez levemente inferior à mistura asfáltica quente de referência, constatou-se no ensaio de deformação

permanente por trilha de roda que, as misturas asfálticas mornas não possuem potencial para apresentar esse tipo de defeito. Os ensaios realizados no simulador de tráfego francês tipo LCPC mostraram que as misturas asfálticas mornas com Evotherm 3G, Gemul XT-15 e CCBit 113AD apresentam valores de afundamento de trilha de roda muito similares à mistura asfáltica quente de referência, em todos os casos inferior a limite máximo aceitável.

- Com relação à vida de fadiga obtido no ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos, notou-se que as misturas asfálticas mornas coletadas em usina tenderiam a apresentar uma menor vida de fadiga, quando comparadas com a mistura asfáltica quente de referência. Contudo, os ensaios realizados em corpos de prova produzidos com massa asfáltica preparada em laboratório mostraram que as misturas asfálticas mornas com Gemul XT-14 e Evotherm 3G têm expectativa de vida de fadiga muito superior à mistura asfáltica quente.

No que se refere às emissões asfálticas, verificou-se que:

- A redução de temperatura de usinagem nas misturas mornas levou a diminuições bastante expressivas das emissões de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) prioritários, tanto na fase particulada quanto na fase gasosa, em comparação com a mistura asfáltica quente de referência, em todos os ambientes observados (laboratório, usina de asfalto e aplicação em pista).
- Os HPAs estão presentes não só na fase particulada, mas também na gasosa, sendo neste caso parte dos compostos orgânicos voláteis (COVs). Especificamente, se constatou que a fase particulada foi mais preponderante em todos os casos analisados.
- As emissões produzidas pelas misturas asfálticas em pista são reduzidas em relação às emissões asfálticas de usina, de forma mais pronunciada na mistura asfáltica quente de referência por esta perder mais energia térmica durante o transporte do que a mistura asfáltica morna. As emissões de HPAs nas misturas asfálticas mornas em pista e em usina são mais próximas entre si, mostrando que as misturas mornas tendem a perder menos temperatura durante o transporte, o que é um benefício. Comparativamente, as misturas asfálticas mornas sempre apresentam redução de HPAs em relação às quentes, seja em usina, como na pista, em torno de 20%.
- De maneira geral, as misturas asfálticas mornas não apresentaram dificuldades para atender os critérios volumétricos de dosagem, já que o volume de vazios na compactação das misturas foi atingido mesmo reduzindo as temperaturas de usinagem e compactação.

Conclui-se que as misturas asfálticas mornas estudadas, com Evotherm 3G, Gemul XT-15 e CCBit 113AD, apresentam um comportamento mecânico bastante similar à mistura asfáltica quente de referência. As misturas apresentam boa resistência à ação deletéria da água e, apesar de exibirem rigidez levemente inferior do que a mistura asfáltica quente, não apresentam riscos de desenvolver deformação permanente, à luz dos resultados obtidos no ensaio de trilha de roda executado em laboratório.

Os resultados da coleta de emissões asfálticas em laboratório, usina e pista demonstraram que as misturas asfálticas mornas apresentam menor potencial de poluição do meio ambiente e representam a criação de um melhor ambiente de trabalho para os trabalhadores relacionados à pavimentação asfáltica, tanto na etapa produtiva na usina de asfalto como na etapa construtiva em pista.

3.1.30. Estudos para incorporação de conceitos de sustentabilidade em passarelas ao longo da rodovia Presidente Dutra

A necessidade atual de economia de recursos naturais, visando melhorar as condições ambientais, demonstra ser uma necessidade eminente, em especial em temas relacionados à construção de habitações, residências, edifícios e até mesmo obras de arte, como passarelas, pontes e viadutos.

Estudos que busquem, além de reduzir uso de recursos monetários, também economia de recursos naturais e incorporem conceitos de sustentabilidade, visando reduzir o impacto ambiental das obras e intervenções, são demandas atuais.

A presente proposta de desenvolvimento visa apresentar alternativas mais sustentáveis para as passarelas para pedestres, com alternativas que possam ser incorporadas nas passarelas existentes e nas novas a serem construídas, economizando assim recursos (financeiros e naturais), através de um projeto, processo de construção e manutenção adequados.

Dentro do Grupo de Estudo sobre Infraestrutura Verde, no Programa/Projeto Estrada Sustentável, foram levantadas e ranqueadas diversas necessidades. A demanda mais citada e esperada pelo grupo diz respeito à incorporação de conceitos de sustentabilidade na infraestrutura das rodovias participantes do programa. A questão de infraestrutura verde se faz premente, uma vez que a própria rodovia impacta o meio ambiente de muitas formas, desde a construção até seu uso.

Outro aspecto levantado, e que pretende ser abordado, é a questão da Segurança Viária, especialmente na questão relativa ao uso das passarelas pelos pedestres; conferindo características que permitam ao usuário sentirem-se seguros e, consequentemente, passem a utilizar as passarelas.

Esse aspecto foi levantado por outro grupo de estudo do programa, que trata das questões de Segurança Viária. Os atropelamentos, decorrentes do cruzamento das rodovias, é a principal causa de morte decorrente de acidentes rodoviários.

A Rodovia Presidente Dutra, alvo do estudo em questão, apresenta, hoje, um número bastante significativo de passarelas para pedestres – as mais de cem passarelas já construídas apresentam tipologias bastante diferenciadas. Intervenções buscando economia de recursos devem ser incorporadas a cada uma delas, visando assim que tenhamos, por exemplo, economia de energia elétrica e menor número de manutenções com o uso de materiais adequados a cada microambiente onde estão inseridas. Nos próximos anos, um número alto de passarelas serão construídas, as quais deverão atender a requisitos de projeto, como incorporar sustentabilidade, através de questões de durabilidade, aumentando assim sua vida útil e reduzindo manutenções periódicas e preventivas, e também incorporar conceitos de industrialização com uso de materiais alternativos, como, por exemplo, o uso de materiais reciclados de outras indústrias e da própria indústria da construção civil em processos industrializados devido a repetitividade das tipologias a serem propostas.

Objetivo geral

A presente pesquisa teve como principal objetivo desenvolver/apresentar alternativas de construção, estudo de materiais e alternativas tecnológicas para projeto, construção e adaptação de passarelas incorporando conceitos de sustentabilidade, economia de recursos naturais e vida útil/ciclo de vida ao longo da Rodovia Presidente Dutra.

Descrição sucinta do projeto e apresentação da metodologia de trabalho

Este projeto foi desenvolvido através de uma estrutura matricial, com 2 eixos centrais sendo desenvolvidos através de outros 5 eixos (A a E), que buscaram desenvolver os temas que foram incorporados aos Eixos centrais (1 e 2), dentro do que cabe à cada um deles.

Eixo 1: passarelas existentes, ou seja, foram realizados estudos visando desenvolver opções para incorporação de conceitos de sustentabilidade, economia de energia e economia de recursos naturais nas passarelas já existentes ao longo da rodovia; também foram contemplados estudos para alternativas adequadas, incorporando os conceitos citados, para monitoração, manutenção e recuperação das passarelas existentes.

Eixo 2: passarelas a serem construídas, ou seja, estudo de alternativas de processos construtivos, materiais alternativos e/ou recicláveis, adequados ao meio onde as passarelas estarão inseridas, além de alternativas de projeto e desenho mais adequados às condições de exposição e de inserção no ambiente onde será construída; os conceitos de sustentabilidade, economia de energia e economia de recursos naturais deverão ser contemplados prioritariamente. O estudo foi conduzido

tendo como premissa que o custo de construção da passarela deveria ser semelhante ou menor do que o atual, para construção das atuais passarelas implantadas.

Esses dois Eixos se desenvolveram frente a outros 5 eixos:

Eixo A – Arquitetura – Desenho para sustentabilidade: nesse eixo, foram estudadas as alternativas de projeto, visando um levantamento de estado da arte no tema, levando em consideração alternativas nacionais e internacionais atuais para o tema, questões como segurança viária e estrutural, opções em uso hoje para desenho e projeto de passarelas.

Eixo B – Materiais – Durabilidade para sustentabilidade: nesse eixo foram levantadas as condições de exposição e agressividade do ambiente aos materiais e processos de construção, permitindo a incorporação ao estudo de conceitos como vida útil, vida de serviço, ciclo de vida e outros. Visa a realização de um levantamento das condições de exposição das distintas regiões da rodovia. O produto deste eixo permitiu a geração de parâmetros diretos de escolha de materiais e processos adequados às condições de exposição, visando maximizar a vida útil e reduzir manutenções e reparos.

Eixo C – Materiais – Alternativas para sustentabilidade: nesse eixo, foram estudadas as alternativas de materiais, processos construtivos e de construção adequados às premissas da proposta. Foi incorporado o conceito de regionalização. Inicialmente, foram listadas as alternativas de materiais convencionais, materiais alternativos, reciclados, materiais de alta tecnologia, processos construtivos com valor agregado de sustentabilidade, tendo em vistas sempre as questões relativas à regionalização, maximização dos conceitos de vida útil e minimização de manutenções.

Eixo D – Tecnologias – Soluções para a sustentabilidade: nesse eixo, foram estudadas as alternativas de soluções existentes para melhor adequação às premissas da presente proposta. Entre elas se destacam alternativas para autonomia de energia elétrica para iluminação, por exemplo.

Eixo E – Economia ambiental – Ganhos ambientais com uso de alternativas de sustentabilidade: com ferramentas adequadas, pode-se quantificar, em recursos financeiros, os ganhos com o uso de alternativas que incorporem conceitos de sustentabilidade. Tais ferramentas permitem que as escolhas tenham parâmetros quantitativos para escolha. Assim, pode-se, além de entender a importância de uma determinada escolha, quantificar o ganho com a economia de recursos naturais por meio da economia no uso deste tipo de recurso.

3.1.31. Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados

As bases ou sub-bases cimentadas têm sido frequentemente utilizadas na construção de pavimentos para atender ao crescimento do tráfego, das cargas por eixo e da pressão de enchimento de pneus. A adição de cimento em base granular induz a um ganho estrutural, já que o pavimento é alterado de flexível para semi-rígido (YODER E WITCZAK, 1975). A experiência tem mostrado que a resistência maior dos materiais cimentados propicia espessuras de bases mais delgadas ao pavimento semi-rígido e uma melhor distribuição de tensões ao subleito (BALBO, 2007).

Além disso, a presença da camada cimentada reduz as tensões de tração da camada asfáltica, permitindo a redução da espessura de material asfáltico, em comparação à espessura requerida para um pavimento flexível convencional equivalente (SUZUKI, 1992).

Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência do teor de cimento Portland, teor de umidade, tempo de cura, energia de compactação e a fonte do agregado mineral nos parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento.

Foi desenvolvido um programa laboratorial para avaliar a influência desses fatores nos parâmetros mecânicos de:

- Resistência à compressão simples (RCS);
- Resistência à tração (RT);
- Módulo de Resiliência (MR);
- Módulo Dinâmico (MD).

Planejamento

Foi elaborado um programa laboratorial utilizando-se a técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais. Dessa forma foi possível realizar variações nos fatores de entrada e avaliar os efeitos dessas variações por meio dos ensaios laboratoriais em corpos de prova de BGTC. Na Tabela 3.126 é apresentado um resumo dos fatores avaliados e nota-se que a combinação de seus níveis originou um total de 72 experimentos.

Figura 3.126. Fatores considerados no planejamento fatorial

Fator	Níveis
Fonte de Agregados	2
Energia de Compactação	2
Teor de Cimento Portland	3
Umidade de compactação	3
Tempo de Cura	2
Total de Experimentos	**72**

Resultados

Após a realização dos ensaios laboratoriais, os resultados foram avaliados estatisticamente para verificar o comportamento e a tendência dos parâmetros mecânicos em função dos diversos fatores definidos para esta pesquisa. Nas Figuras 3.127 e 3.128, por exemplo, apresentam-se os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, respectivamente, em função da variação dos fatores estudados. De maneira geral observam-se as seguintes tendências:

- A BGTC produzida com agregados basálticos apresentou maiores resistências;
- Conforme era esperado, o maior tempo de cura e o emprego de maiores teores de cimento Portland incrementa a resistência da BGTC;
- Com relação ao teor de umidade, o emprego de teores, um pouco acima da ótima, tendem a decrescer a resistência da BGTC;
- O emprego de energia de compactação maior conduz a maiores resistências, tanto à compressão simples como à tração por compressão diametral.

Figura 3.127. Efeitos principais dos fatores estudados na RCS

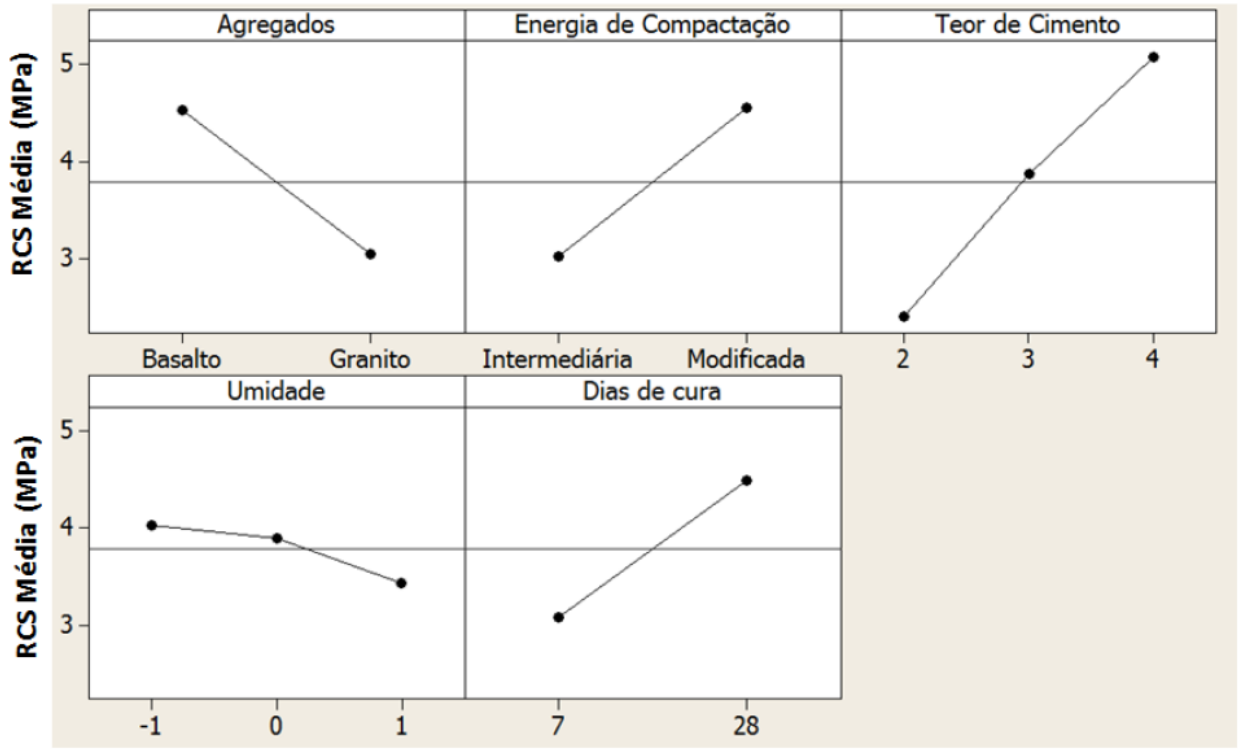
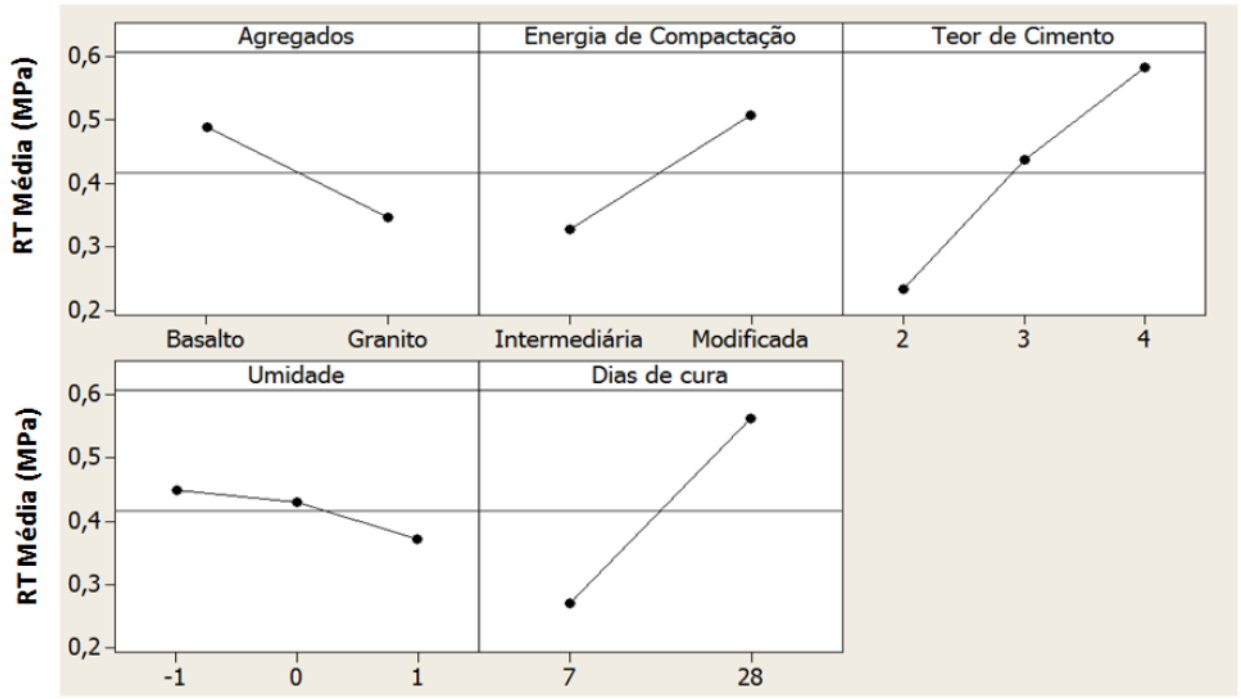


Figura 3.128. Efeitos principais dos fatores estudados na RT



Com relação aos resultados de rigidez da BGTC, os resultados médios obtidos por compressão diametral e compressão axial cíclica de corpos de prova cilíndricos são apresentados nas Figuras 3.129 e 3.130, respectivamente. As tendências de rigidez, em função dos fatores analisados são basicamente os mesmos que os observados anteriormente para a RCS e RT.

Figura 3.129.Efeitos principais dos fatores estudados no MR obtido por compressão diametral cíclica

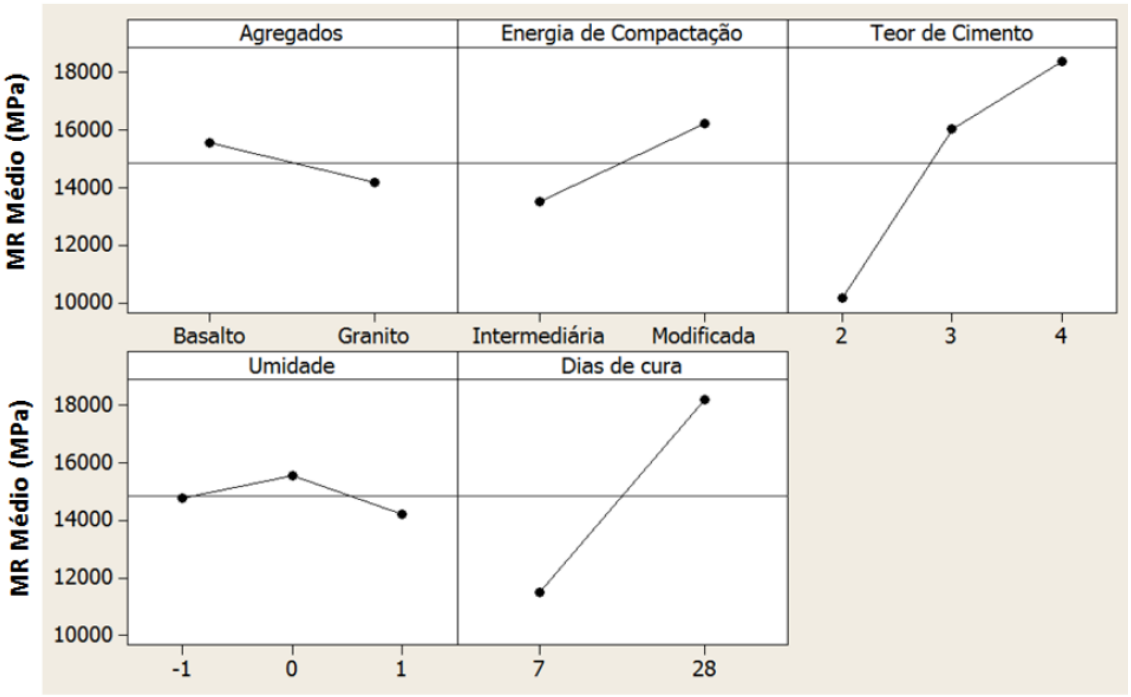
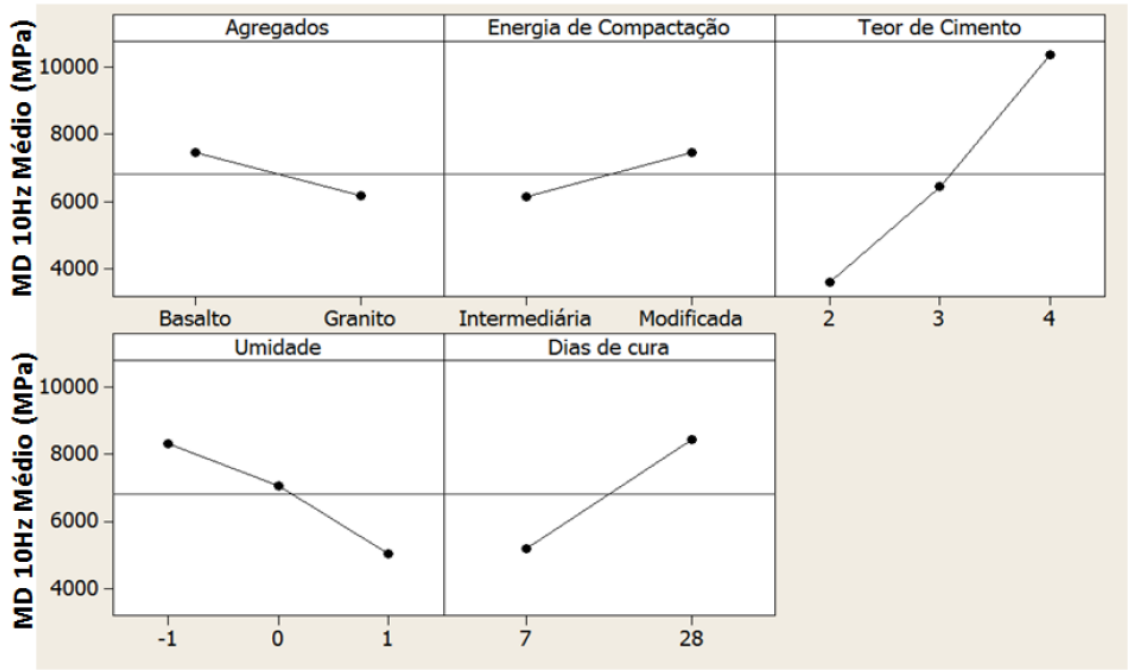
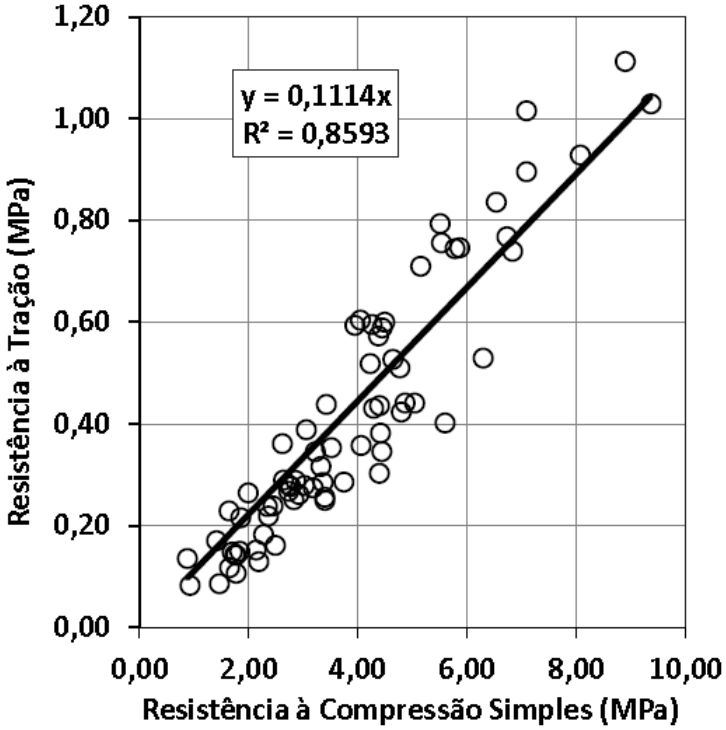


Figura 3.130.Efeitos principais dos fatores estudados no módulo dinâmico por compressão axial cíclica



A partir dos resultados obtidos no programa laboratorial de BGTC, foram modeladas algumas equações para poder estimar certos parâmetros em função dos fatores delineados no experimento. Na Equação da Figura 3.131, por exemplo, é apresentado um modelo para estimar a resistência à tração em função da resistência à compressão simples, que é um ensaio usualmente utilizado na dosagem da BGTC. Nesse modelo nota-se que a RT é aproximadamente 11% da RCS, valor muito próximo ao sugerido usualmente nas referências bibliográficas que indicam a relação de 10%.

Figura 3.131. Efeitos principais dos fatores estudados na RCS



O módulo dinâmico da BGTC também foi modelado em função das propriedades dos materiais e das características da mistura, como mostra o modelo apresentado na Equação 5.1. Esse modelo apresenta um excelente ajuste com elevado coeficiente de determinação e, como mostra a Figura 5.25, com os pontos muito próximos à linha de igualdade.

$$MD = 67{,}4E - 2.267\gamma + 3.506C + 169T - 1.522W \qquad (R^2=0{,}96) \qquad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

MD = Módulo Dinâmico com 1Hz em MPa;

E = energia de compactação em kgf□cm/cm3, (Energia Intermediária = 12,9 kgfxcm/cm^3; Energia Modificada 27,2 kgfxcm/cm^3);

γ = massa específica real dos agregados em kgf/cm^3;

T = tempo de cura em dias;

C = teor de cimento (%).

Considerações finais

A ferramenta estatística análise de variância (ANOVA) foi utilizada para auxiliar na análise da influência dos fatores e suas interações na avaliação dos parâmetros mecânicos. Dessa análise, foram realizadas as seguintes conclusões.

Teor de cimento Portland

De modo geral, verificou-se que o incremento do teor de cimento promoveu o aumento da resistência à compressão simples, da resistência à tração, do módulo de resiliência e do módulo dinâmico. Assim, este fator foi estatisticamente significativo para todos os parâmetros avaliados.

As normativas nacionais especificam o emprego da BGTC com teores de cimento de 3% a 5% de cimento Portland, contudo, neste estudo optou-se por avaliar os teores de 2% a 4%. O intuito foi verificar se, com 2% de cimento Portland seria possível atender os valores mínimos de resistência à compressão simples (>3,50MPa) na energia modificada de compactação. Essa hipótese foi constatada na BGTC com agregados basálticos, mas não para a BGTC com agregados graníticos. Já no parâmetro resistência à tração, as combinações de BGTC com 2% apresentaram valores médios que oscilaram de 0,20 a 0,30MPa e nas combinações de BGTC com 4% de cimento a RT média oscilou de 0,60 a 0,70MPa.

Com relação aos parâmetros de rigidez determinados por esforços de tração diametral e de compressão axial, observaram-se valores elevados de módulo de resiliência e módulo dinâmico, até alcançar valores superiores a 18.000MPa e 12.000MPa, respectivamente, nas combinações com 4% de cimento Portland.

Teor de umidade

As misturas de BGTC foram compactadas na umidade ótima e também 1% abaixo e acima desse valor determinado no ensaio de compactação Proctor. Observou-se que essa variação no fator é significativamente influente para todos os parâmetros mecânicos estudados.

De modo geral, o emprego de até 1% abaixo da umidade ótima promoveu o incremento dos parâmetros mecânicos, quando comparados com os resultados obtidos na BGTC compactada na umidade ótima e 1% acima da umidade ótima.

Tempo de cura

Os ensaios realizados neste estudo foram executados após 7 dias e 28 dias de cura da BGTC em câmara úmida. Verificou-se que, conforme o tempo de cura aumenta, a resistência e a rigidez da BGTC tende a se incrementar, para todas as condições e combinações testadas.

Energia de compactação

As normas nacionais indicam a compactação da brita graduada tratada com cimento na energia intermediária, equivalente a 12,9kgfxcm/cm3. Neste estudo avaliou-se o ganho que poderia ser obtido pelo incremento da energia de compactação para a modificada, equivalente a 27,2kgfxcm/cm3.

De modo geral, os resultados do programa laboratorial comprovaram que o incremento da energia de compactação aumenta as características de resistência e rigidez da BGTC, de forma mais notória nos casos em que é utilizado o agregado basáltico.

Fonte de agregados

Os agregados estudados nesta pesquisa para compor a BGTC foram o granito e o basalto. Este fator também foi significativamente influente no comportamento mecânico da BGTC. A BGTC com agregados basálticos apresentou valores de resistência e rigidez superiores aos observados na BGTC com agregados graníticos.

Neste estudo comprovou-se que o comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento é influenciado pelas variáveis analisadas e suas interações. O teor de cimento, como era de se esperar, é o fator mais influente quando comparado com os outros fatores estudados. Verificou-se também que, conforme o tempo de cura aumenta a resistência e rigidez da BGTC também se incrementam.

A fonte de agregados também influencia significativamente no comportamento mecânico, sendo que os resultados de resistência e rigidez são mais elevados nas misturas de BGTC com agregados basálticos.

A redução do teor de umidade, em torno de 1% abaixo da ótima, tende a incrementar a resistência e rigidez da BGTC, enquanto que o incremento da umidade reduz esses parâmetros mecânicos. Esse comportamento aponta a influência desse fator na dosagem da BGTC.

As misturas de BGTC compactadas na energia modificada apresentaram valores de resistência e rigidez superiores àquelas moldadas na energia intermediária. Assim, conclui-se que empregar energia de compactação mais elevada pode-se traduzir em ganhos no comportamento mecânico da BGTC.

Finalmente, conclui-se que o comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento é uma mistura muito sensível aos materiais utilizados e ao processo de sua produção, na usinagem e na sua compactação. Essa sensibilidade evidencia a importância do controle de qualidade na execução das obras que empregam a BGTC para, assim, atender satisfatoriamente aos critérios especificados em projetos estruturais de pavimentos.

3.1.32. Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas a partir de dois métodos de ensaio com diferentes tipos de asfalto

O surgimento de novos materiais no mercado da pavimentação exige, na atualidade, o desenvolvimento e a execução de ensaios racionais no laboratório que possibilitem avaliar e selecionar a melhor solução para cada caso particular. No caso dos revestimentos asfálticos de pavimentos flexíveis, a seleção adequada do tipo de ligante asfáltico e dos agregados pode garantir pavimentos mais duráveis e resistentes ao trincamento por fadiga.

O trincamento por fadiga, também conhecido como couro de jacaré, é considerado como um dos principais mecanismos de deterioração dos revestimentos flexíveis. Basicamente, são trincas longitudinais que podem ser interconectadas causando a degradação da mistura asfáltica, sob a ação de carregamentos do tráfego.

Sabe-se que a vida de fadiga das misturas asfálticas é influenciada por diversas variáveis, tais como as propriedades dos materiais, os parâmetros volumétricos da mistura, as técnicas construtivas, a solicitação e composição do tráfego, as condições climatológicas, entre outras.

O estudo do mecanismo do dano por fadiga nos revestimentos asfálticos pode ajudar no desenvolvimento de modelos de previsão de vida de fadiga para diversas misturas asfálticas.

O comportamento de fadiga das misturas asfálticas tem sido estudado por muitas décadas por diversos pesquisadores. O trincamento por fadiga, na perspectiva de pavimentos asfálticos, é definida como o dano acumulado devido à ação de carregamentos repetidos com níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura. A aplicação sucessiva de tensões gera um processo de microfissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, consequentemente, na ruptura do material.

No laboratório, usualmente, a vida de fadiga das misturas asfálticas é avaliada à luz dos resultados de ensaios em condições de carregamento e temperatura bem controlados. Na atualidade existem diversos métodos utilizados para estudar em laboratório o mecanismo de fadiga de misturas asfálticas, por exemplo ensaios de tensão controlada, de deformação controlada, ensaios de compressão diametral indireta, com corpos de prova no formato trapezóide em balanço, ensaio por flexão de viga apoiada em quatro pontos. Neste estudo, foi selecionada a última configuração e um ensaio de ruptura diametral de corpos de prova cilíndricos com velocidade controlada, para avaliar diferentes materiais ao longo da Rodovia Presidente Dutra.

Objetivos

Neste estudo foi desenvolvido um programa laboratorial com o objetivo de avaliar a influência do tipo de ligante asfáltico, a faixa granulométrica e da fonte de agregados minerais na vida de fadiga de misturas asfálticas, utilizando dois métodos de ensaio:

- Ensaio de fadiga por ruptura diametral com velocidade controlada em corpos de prova cilíndricos obtidos no compactador Marshall;
- Ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos.

A combinação dos fatores analisados deu origem a quarenta misturas asfálticas, nas quais, foram determinados os parâmetros das leis fadiga para os dois ensaios avaliados. Além disso, no ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos foi possível analisar a rigidez na flexão das misturas asfálticas.

Planejamento

Além de avaliar o tipo de ligante asfáltico, também se investigaram quatro faixas granulométricas e duas fontes de agregados graníticos, disponíveis no Estado de São Paulo e no Estado do Rio de Janeiro, e próximas à Rodovia Presidente Dutra. Essa combinação de fatores e níveis resultou em um planejamento fatorial com 40 experimentos para realizar nos dois tipos de ensaios de fadiga, como mostra a Tabela 3.76.

Tabela 3.76. Planejamento fatorial da pesquisa

	1	2	3
FATOR	FONTE DE AGREGADOS	LIGANTE ASFÁLTICO	FAIXAS GRANULOMÉTRICAS
NÍVEIS	1. Jambeiro 2. Pombal	1. CAP 30/45 2. CAP Borracha 3. CAP Polímero 4. CAP HiMA 5. CAP Alto Módulo	1. Faixa III-DERSA 2. EGL 12,5mm 3. EGL 9,5mm 4. *Gap Graded*
	2	5	4
TOTAL	**40**		

Resultados

Após conclusão do programa laboratorial, os resultados dos ensaios foram processados para poder modelar as leis de fadiga, nas duas configurações de ensaios avaliadas. Os resultados dessas análises são apresentados nos itens seguintes.

Fadiga por velocidade controlada

Estes ensaios foi realizado em corpos de prova cilíndricos moldados no compactador Marshall, nos quais foi aplicado um carregamento diametral com diversas velocidades. Esse tipo de ensaio é compatível com a caracterização de materiais de revestimentos asfálticos mais espessos em decorrência da predominância de absorção das tensões pelo revestimento com relação às camadas subjacentes (PINTO, 1991; HUANG, 1993). A Figura 3.132 apresenta um exemplo da execução desse ensaio em laboratório.

Figura 3.132. Execução do ensaio de fadiga por velocidade controlada (Bernucci et al, 2008)



Os resultados de fadiga por velocidade controlada são apresentados nas Figuras 5.42 a 5.45, para as diversas faixas granulométricas avaliadas neste estudo, com agregados Jambeiro (Estado de São Paulo) e Pombal (Estado de Rio de Janeiro).

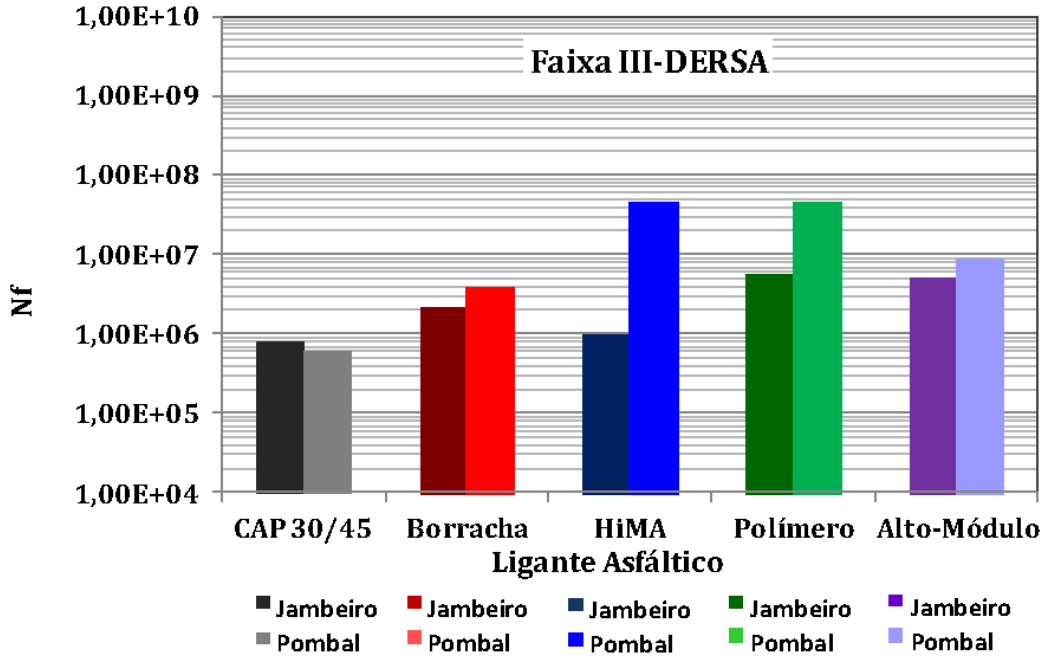


Figura 5.42: Previsão de vida de fadiga previsto para as misturas asfálticas com granulometria Faixa III-DERSA

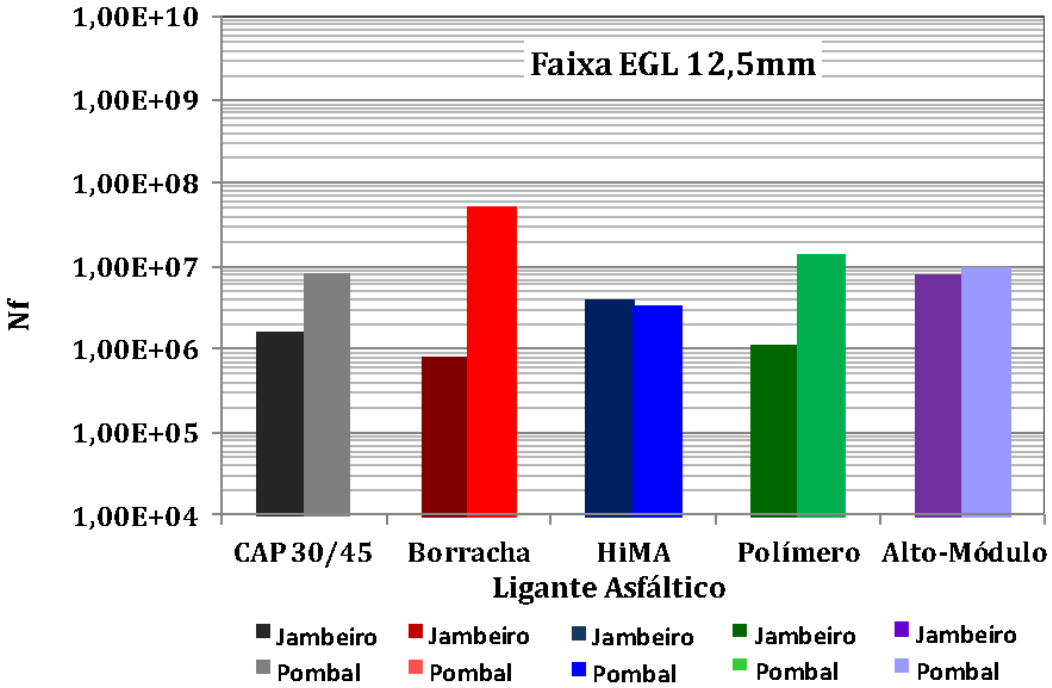


Figura 5.43: Previsão de vida de fadiga previsto para as misturas asfálticas com granulometria Faixa EGL 12,5mm

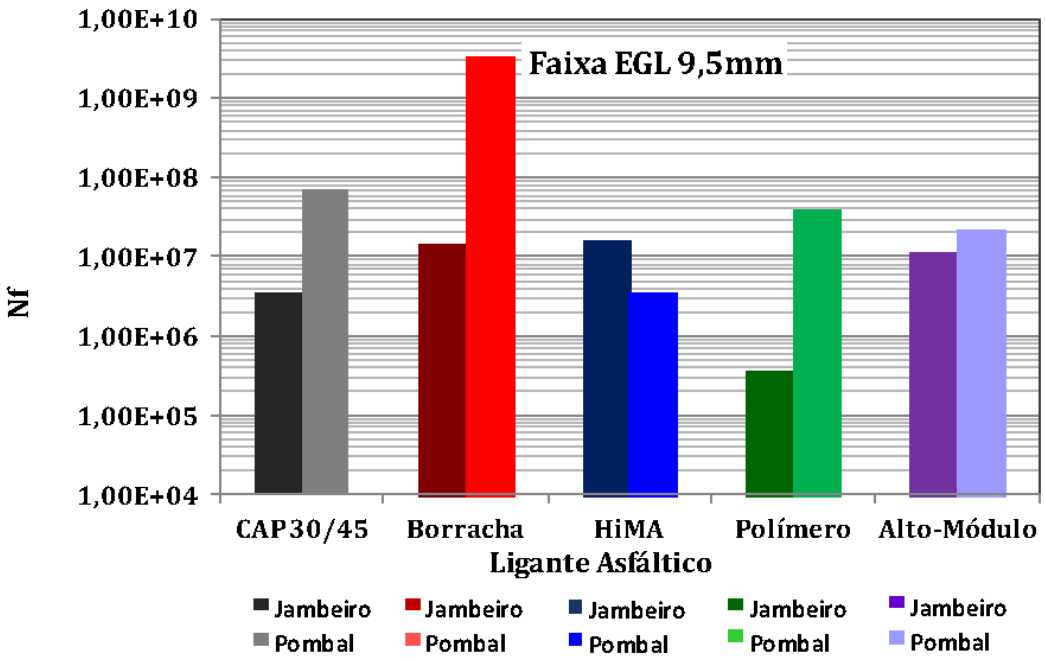


Figura 5.44: Previsão de vida de fadiga previsto para as misturas asfálticas com granulometria Faixa EGL 9,5mm

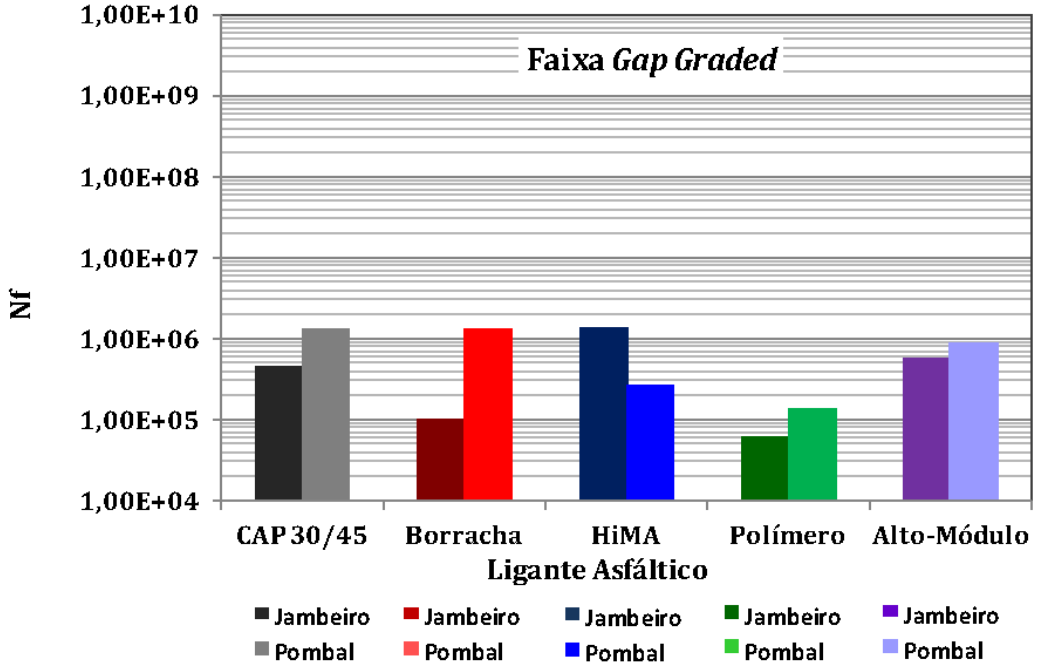


Figura 5.45: Previsão de vida de fadiga previsto para as misturas asfálticas com granulometria Faixa III-DERSA

Ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos

No ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos, são necessários equipamentos especiais para a moldagem dos corpos de prova e para melhor entendimento, realiza-se uma breve descrição na continuação.

O PReSBOX – IPC (Figura 5.46) é o compactador utilizado para a moldagem dos corpos de prova para este ensaio, o qual utiliza o princípio do amassamento e produz prismas de 45 cm de comprimento, 15 cm de largura e altura entre 14,5 cm e 18,5 cm. Estes prismas permitem a extração de 4 vigotas que são obtidas por serragem utilizando o equipamento Autosaw – IPC (Figura 5.47), que possui gabaritos para otimizar o corte, garantindo precisão das dimensões das vigotas e rapidez de execução. Com esses equipamentos é possível obter os corpos de prova prismáticos necessários para o ensaio, conforme mostram as Figuras 5.48 e 5.49.



Figura 5.46: Compactador PReSBOX (IPC) empregado para moldagem de prismas de misturas asfálticas



Figura 5.47: Autosaw (IPC) empregada para serragem dos prismas e obtenção das vigotas

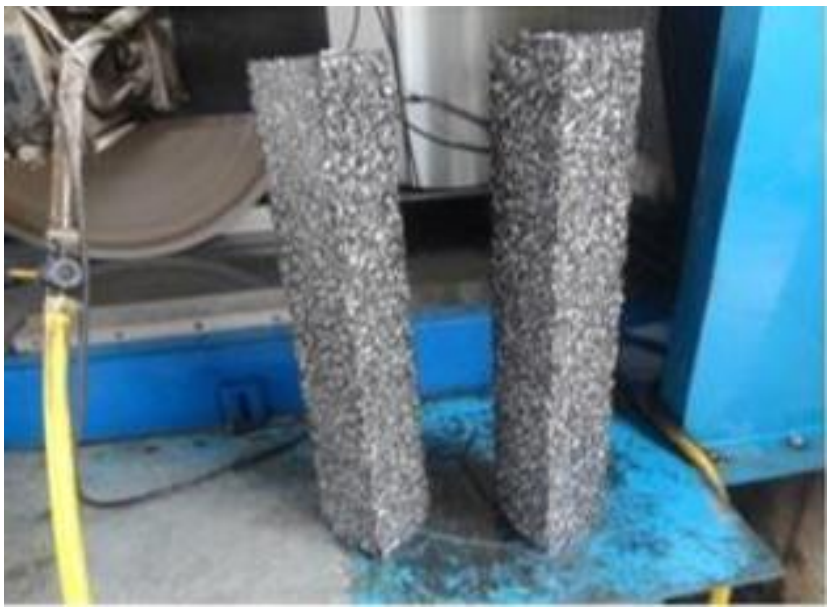


Figura 5.48: Corpos de prova prismáticos para o ensaio de fadiga por flexão de viga



Figura 5.49: Execução do ensaio de fadiga por flexão cíclica de corpos de prova prismáticos

Os ensaios de fadiga nessa configuração foram realizados na temperatura de 20°C na frequência de 10Hz. Os resultados de Nf (ciclos até a fadiga) em função da deformação aplicada durante o ensaio são apresentados da Figura 5.50 até a Figura 5.53, para as diferentes granulometrias, ligantes asfálticos e fontes de agregados.

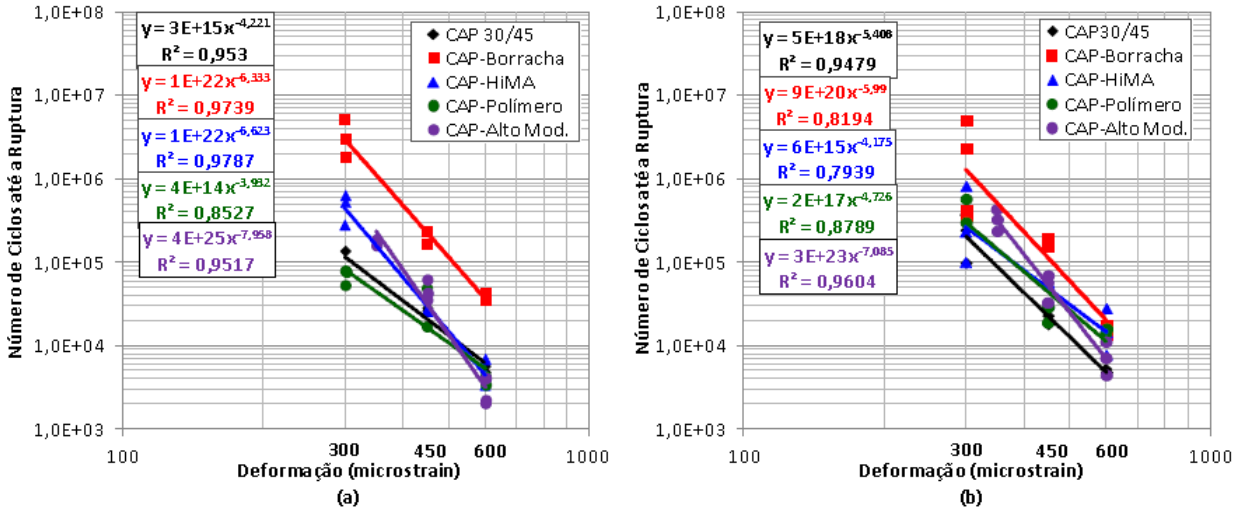


Figura 5.50: Nf nas misturas asfálticas com granulometria Faixa III-DERSA, para: (a) agregados de Jambeiro-São Paulo; (b) Pombal-Rio de Janeiro

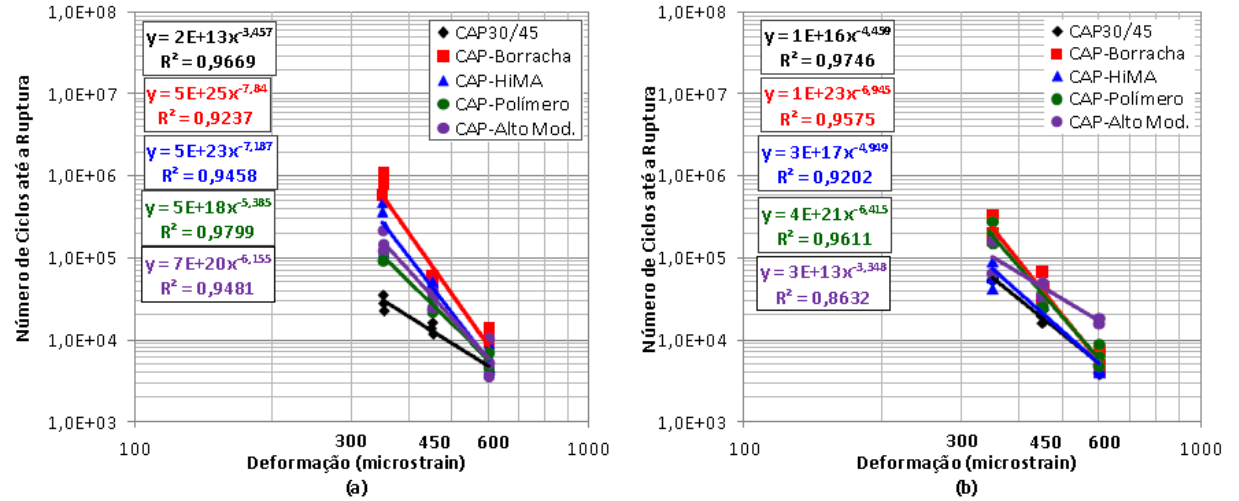


Figura 5.51: Nf nas misturas asfálticas com granulometria Faixa EGL 12,5mm, para: (a) agregados de Jambeiro-São Paulo; (b) Pombal-Rio de Janeiro

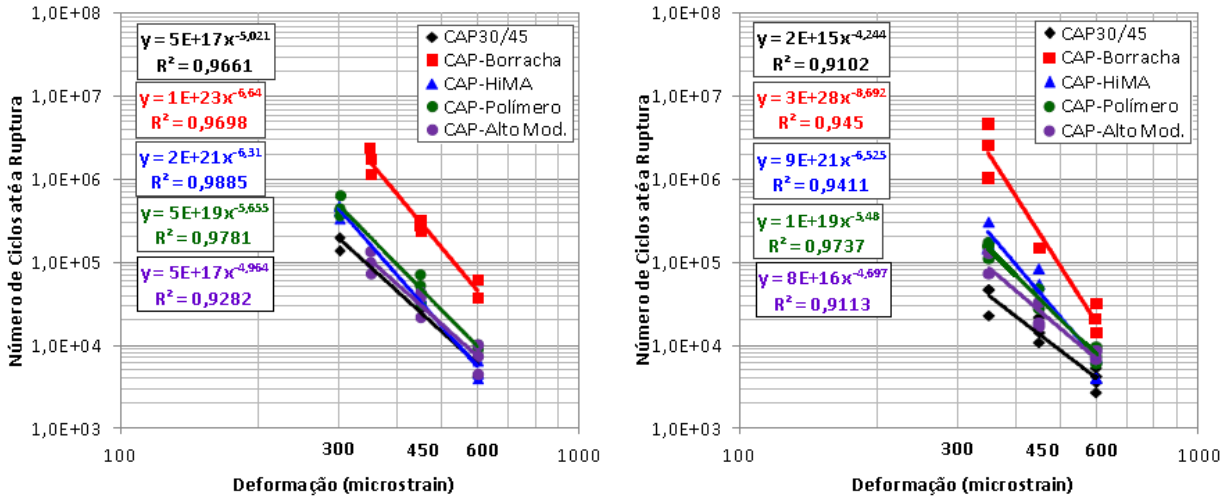


Figura 5.52: Nf nas misturas asfálticas com granulometria EGL 9,5mm, para: (a) agregados de Jambeiro-São Paulo; (b) Pombal-Rio de Janeiro

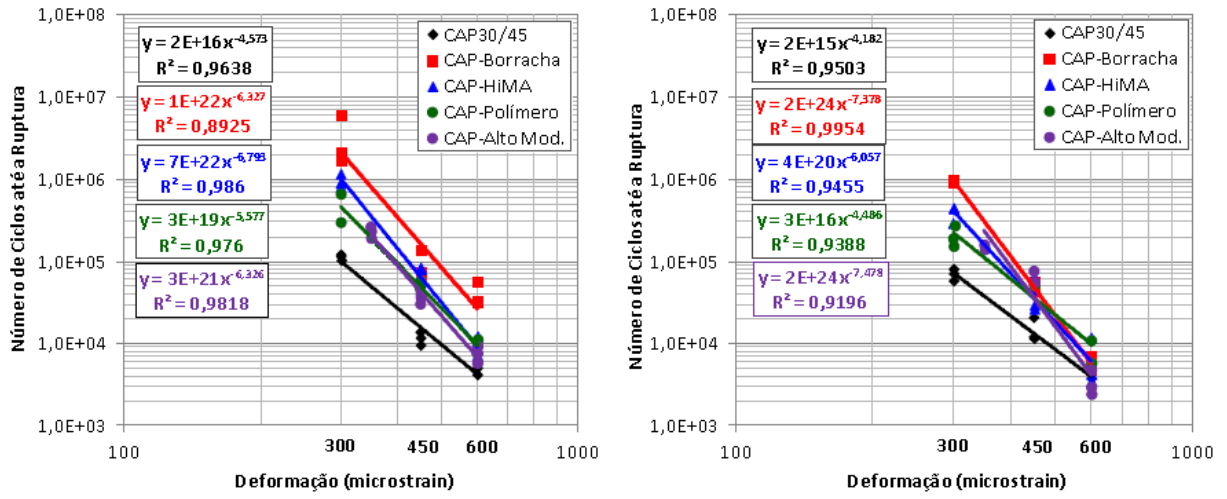


Figura 5.53: Nf nas misturas asfálticas com granulometria Faixa *Gap Graded*, para: (a) agregados de Jambeiro-São Paulo; (b) Pombal-Rio de Janeiro

Na Tabela 5.14 apresenta-se um ranqueamento do ligante asfáltico em função da maior vida de fadiga prevista para deformações de 100 microstrain (εμ), em função da faixa granulométrica e fonte de agregados. Observa-se que não somente o tipo de ligante asfáltico influencio na vida de fadiga das misturas asfálticas, mas também os demais fatores avaliados. Já na Tabela 5.15, apresenta-se também um ranqueamento, fixando o tipo de ligante asfáltico estudado nas faixas granulométricas e observa-se o mesmo comportamento.

Tabela 5.14: Ranqueamento do ligante asfáltico em função da maior vida de fadiga prevista para deformações de 100microstrain, para cada faixa granulométrica e fonte de agregados estudada

Fonte de Agregados	Pedreira Jambeiro (São Paulo)				Pedreira Pombal (Rio de Janeiro)			
Posição	**Faixa III-DERSA**	**EGL 12,5mm**	**EGL 9,5mm**	***Gap Graded***	**Faixa III-DERSA**	**EGL 12,5mm**	**EGL 9,5mm**	***Gap Graded***
1	CAP-Alto Módulo	CAP-Borracha	CAP-Borracha	CAP-Borracha	CAP-Alto Módulo	CAP-Borracha	CAP-Borracha	CAP-Borracha
2	CAP-Borracha	CAP-HiMA	CAP-HiMA	CAP-HiMA	CAP-Borracha	CAP-Polímero	CAP-HiMA	CAP-Alto Módulo
3	CAP-HiMA	CAP-Alto Módulo	CAP-Polímero	CAP-Alto Módulo	CAP-30/45	CAP-HiMA	CAP-Polímero	CAP-HiMA
4	CAP-30/45	CAP-Polímero	CAP-Alto Módulo	CAP-Polímero	CAP-Polímero	CAP-30/45	CAP-Alto Módulo	CAP-Polímero
5	CAP-Polímero	CAP-30/45	CAP-30/45	CAP-30/45	CAP-HiMA	CAP-Alto Módulo	CAP-30/45	CAP-30/45

Tabela 5.15: Ranqueamento das granulometrias e fontes de agregados de maior e menor vida de fadiga prevista para deformação de 100με, em função do tipo de ligante asfáltico utilizado

LIGANTE ASFÁLTICO		**CAP 30/45**	**CAP-Borracha**	**CAP-HiMA**	**CAP-Polímero**	**CAP-Alto Módulo**
Maior Vida de Fadiga (100με)	Faixa Granulométrica	Faixa III-DERSA	EGL 9,5mm	EGL 12,5mm	EGL 12,5mm	Faixa III-DERSA
	Fonte de Agregados	Pombal	Pombal	Jambeiro	Pombal	Jambeiro
Menor Vida de Fadiga (100με)	Faixa Granulométrica	EGL 12,5mm	Faixa III-DERSA	Faixa III-DERSA	Faixa III-DERSA	EGL 12,5mm
	Fonte de Agregados	Jambeiro	Pombal	Pombal	Jambeiro	Pombal

No ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos, obtêm-se a cada ciclo a rigidez na flexão das misturas asfálticas, e esse é o critério monitorado no decorrer do ensaio para determinar o início de fadiga. Dependendo da norma seguida, emprega-se entre 40 e 50% da rigidez inicial da mistura asfáltica. Nas Figuras 5.54 a 5.57, apresentam-se os resultados de fadiga após 50 ciclos, que é considerada pelas normas como a rigidez inicial no ensaio.

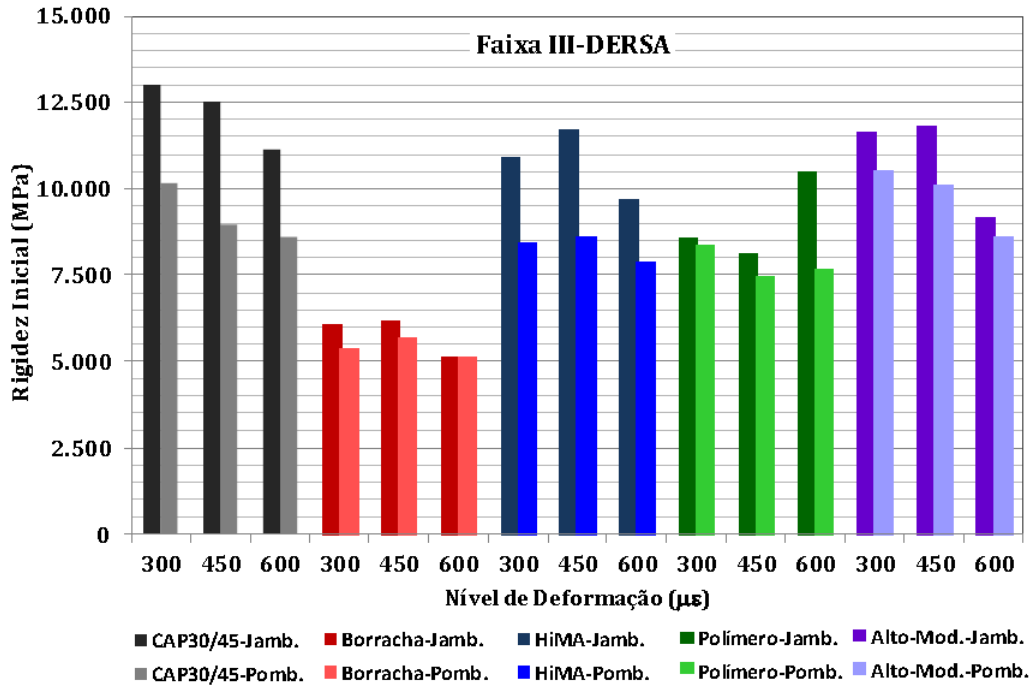


Figura 5.54: Rigidez inicial na flexão das misturas asfálticas com granulometria da Faixa III-DERSA, em função do nível de deformação aplicado e do tipo de ligante asfáltico

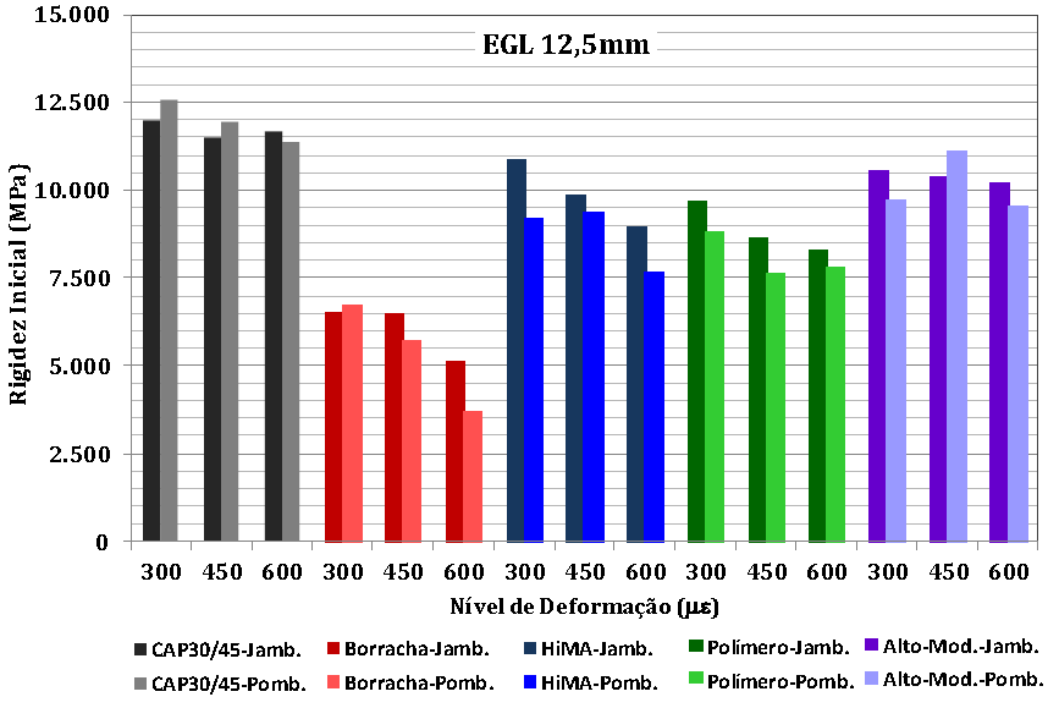


Figura 5.55: Rigidez inicial na flexão das misturas asfálticas com granulometria da EGL 12,5mm, em função do nível de deformação aplicado e do tipo de ligante asfáltico

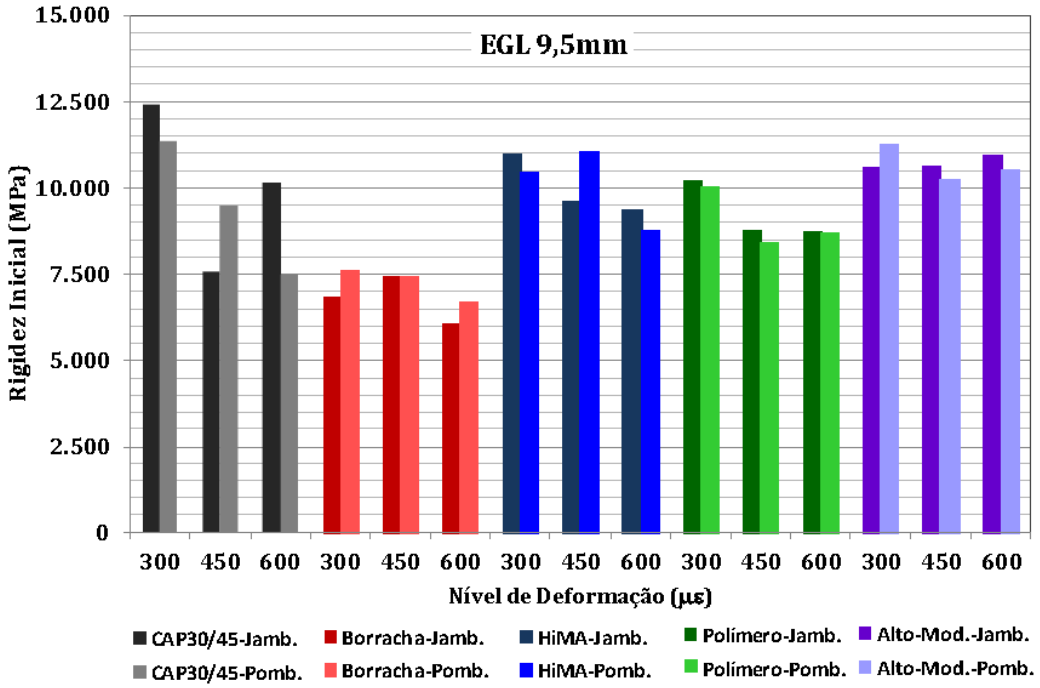


Figura 5.56: Rigidez inicial na flexão das misturas asfálticas com granulometria da EGL 9,5mm, em função do nível de deformação aplicado e do tipo de ligante asfáltico

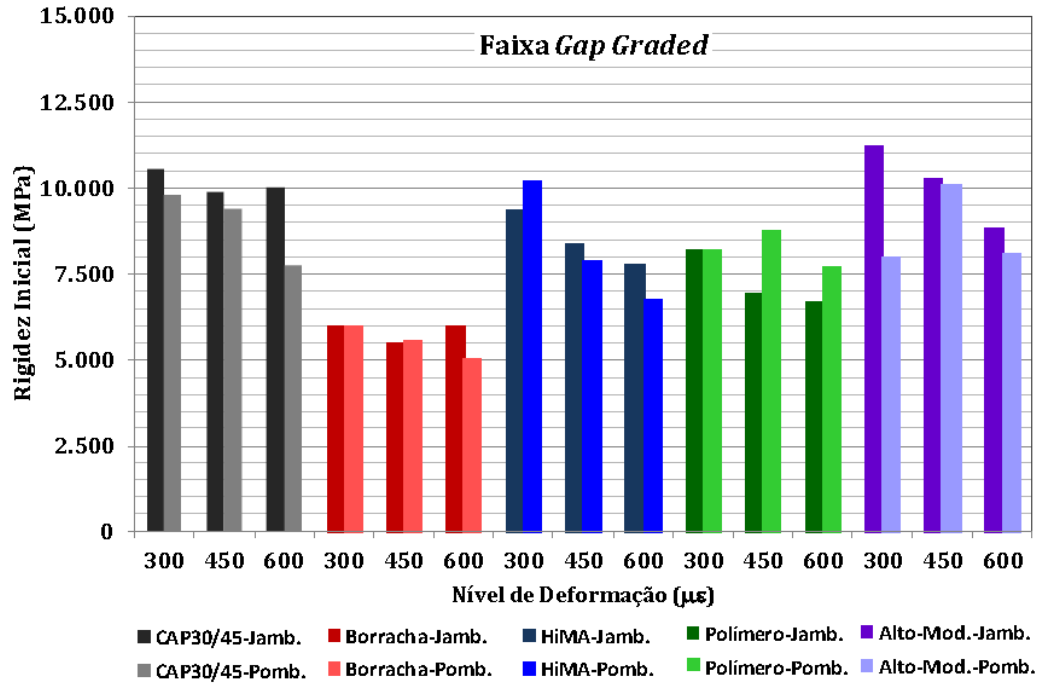


Figura 5.57: Rigidez inicial na flexão das misturas asfálticas com granulometria da Faixa *Gap Graded*, em função do nível de deformação aplicado e do tipo de ligante asfáltico

Conclusões

O ensaio de fadiga por compressão diametral com velocidade controlada de corpos de prova cilíndricos é um ensaio prático e muito simples de ser executado em laboratórios com equipamentos básicos, como o compactador Marshall e uma prensa com controle de aplicação de carga e leitura de deslocamento.

Vale notar que o ensaio de fadiga por compressão diametral com velocidade controlada apresenta algumas limitações já que, utiliza equações preditivas determinadas pelo Instituto de Asfalto no ano 1982, determinadas para materiais diferentes aos testados neste estudo. Notou-se neste estudo que o ensaio não identificou claramente misturas com ligantes asfálticos modificados. Vale ainda notar que, neste ensaio é utilizada a teoria da elasticidade para formular o modelo de fadiga, mas é bem sabido que os materiais asfálticos apresentam um comportamento viscoelástico dependente da temperatura e frequência de aplicação de carregamentos.

O ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos é um ensaio bastante sofisticado, já que permite obter vários parâmetros da mistura asfáltica além das leis de fadiga, como por exemplo, a rigidez na flexão, o ângulo de fase e a energia de trabalho durante o ensaio.

Contudo, vale notar que o ensaio por flexão cíclica de viga demanda bastante tempo, tanto na preparação dos corpos de prova (vigotas) como na própria execução do ensaio. Para poder avaliar uma única mistura asfáltica pode se demorar de duas semanas até seis semanas, já que são necessários vários corpos de prova testados em diversos níveis de deformação. Nas misturas asfálticas com baixa rigidez na flexão, como as produzidas com CAP-Borracha, por exemplo, demandaram até dez dias para testar uma única vigota no nível de deformação de 300microstrain.

Ressalta-se ainda que, os ensaios executados neste estudo atenderam as normativas americanas AASHTO T 321 e ASTM D 7460-10, que recomendam realizar o ensaio na temperatura de 20ºC, com frequência de carregamento de 10Hz. Contudo, essas condições do ensaio deveriam ser revistas para a realidade brasileira e, inclusive, adotar períodos de descanso durante o ensaio para considerar o resselagem (*healing*) da mistura asfáltica.

A previsão de vida de fadiga das misturas asfálticas no ensaio de fadiga por ruptura diametral com velocidade controlada é levemente superior, quando comparados com os resultados de previsão de vida de fadiga obtidos no ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos. Contudo, vale notar que nesses ensaios os corpos de prova de geometria distinta são submetidos a carregamentos e estados de tensão diferentes. Além disso, o primeiro ensaio utiliza a temperatura de 25ºC enquanto que no segundo a temperatura recomendada é de 20ºC.

Assim, é difícil poder realizar comparações entre os dois ensaios utilizados nesta pesquisa, dadas essas diferenças. Mas vale notar que, no ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos, as condições de campo são simuladas de melhor maneira do que no ensaio de ruptura diametral por velocidade controlada.

Finalmente, conclui-se que o tipo de ligante asfáltico é influente na vida de fadiga das misturas asfálticas, para as faixas granulométricas testadas neste estudo. Destacam-se as misturas asfálticas com CAP-Borracha para a Faixa EGL 9,5mm, o CAP-HiMA para a Faixa EGL 12,5mm e o CAP-Alto-Módulo para a Faixa III-DERSA.

Salienta-se que outros ensaios devem ser também executados em conjunto com o ensaio de fadiga, como por exemplo, ensaios em múltiplas frequências e temperaturas, ensaios de deformação permanente, com o objetivo de entender melhor o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica e poder realizar sua aplicação racional.

Dessa forma, a seleção de uma mistura asfáltica para sua aplicação em atividades de manutenção e construção de pavimentos pode ser otimizada para atender as especificações de projeto, as condições climatológicas e as solicitações do tráfego.

3.1.33. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland – Desenvolvimento de método de dimensionamento e avaliação de processos construtivos

A técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland é uma alternativa para a restauração dos pavimentos asfálticos. Assim, nesta pesquisa objetivou-se estudar a técnica, tanto pela execução de um trecho experimental, como pela aplicação de um possível método de dimensionamento de pavimentos que incluem a reciclagem com cimento Portland.

Execução do trecho experimental

A execução do trecho experimental deste estudo foi realizado entre os km 53+000 e 53+900 da Rodovia SC 303, no lado direito da pista original da via. Os serviços foram iniciados a partir do km 53+900 (Segmento 5) e todos os procedimentos foram acompanhados pela equipe de pesquisadores do LAPAV/UFRGS e são descritos nesta seção.

Coleta de materiais para realização de ensaios em laboratório

Foram realizadas sondagens com auxílio de retroescavadeira para possibilitar a coleta de materiais da sub-base e subleito (Figura 5.58), bem como verificar o estado dos materiais e a espessura das camadas da estrutura do pavimento, que se mostraram muito próximas às verificadas nas sondagens anteriores e apresentadas na Tabela 5.16.



Figura 5.58: Coleta dos materiais de suleito e sub-base

Tabela 5.16: Dados das sondagens imediatamente anteriores à execução do trecho

Segmento	km	Espessura CA (cm)	Espessura Base (cm)	Espessura Sub-base (cm)	Subleito
2	53+100	7,5	18	45*	Solo argiloso
1b	53+300	8	25	45*	Solo argiloso
3	53+500	9	29	45*	Rocha + solo argiloso
4	53+600	9,2	21	27*	Rocha
5	53+900	8	27	27*	Solo argiloso

Também foram coletados os materiais de revestimento asfáltico (coletado do km 53+900) e base (coletado do km 53+040). Esta etapa foi realizada com auxílio da recicladora empregada nos serviços da SC-453 e foram coletados mais de 500 kg, conforme é ilustrado na Figura 5.59.

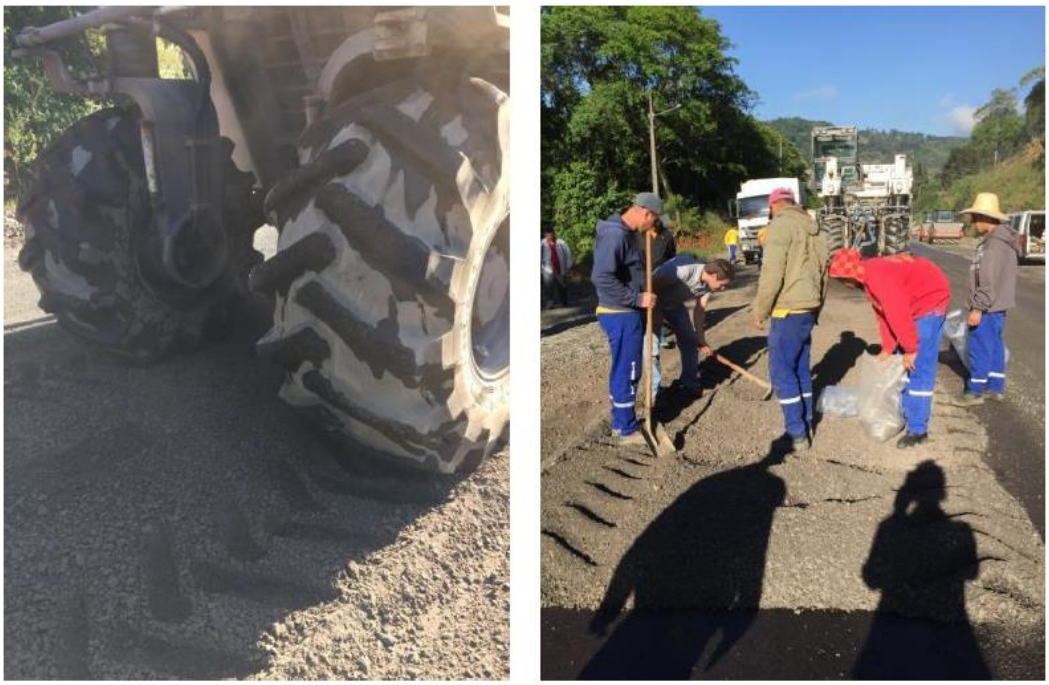


Figura 5.59: Coleta dos materiais de revestimento e base

Iniciou-se o processo de execução do trecho com a distribuição de agregados adicionais (somente no Segmento 4) por meio de caminhão basculante equipado com distribuidor de agregados, conforme a Figura 5.60 A taxa de distribuição foi verificada para tal segmento com emprego de bandeja com dimensões de 50 cm x 50 cm.



Figura 5.60: Distribuição de agregados adicionais e verificação da taxa

Em seguida, procedeu-se com a distribuição do cimento Portland. Esta etapa foi realizada utilizando-se um distribuidor automatizado Streumaster SW16MC (Figura 61), que efetua controle

da taxa distribuída através do peso do caminhão e da velocidade de avanço, contando com controle computadorizado. A taxa distribuída foi controlada a cada 100 metros com emprego de bandeja com dimensões de 50 cm x 50 cm.



Figura 5.61: Distribuição de cimento e verificação da taxa

Logo em seguida, a recicladora modelo Wirtgen WR2500S passou a operar com velocidade igual a 6 m/min e com velocidade de rotação do cilindro de corte igual a 2150 RPM (Figura 5.62). A água era fornecida para a recicladora por meio de um caminhão cisterna com capacidade de 10 mil litros.



Figura 5.62: Operação da recicladora no local do trecho experimental

Após a passagem da recicladora era coletada quantidade de amostra da mistura reciclada de cada um dos segmentos para moldagem de 3 corpos de prova (CP) com dimensões iguais a 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, visando a realização de ensaios de resistência à compressão simples (2 CPs) e resistência à tração por compressão diametral (1 CP) aos 7 dias de cura (Figura 5.63).

No primeiro segmento realizado (Segmento 5) também coletou-se material para execução de um ensaio de compactação, utilizando-se a umidade do projeto de dosagem da mistura da SC-453, visando a determinação do peso específico aparente seco utilizado no controle de compactação da camada reciclada do trecho experimental (já que não houve adição de agregados virgens em grande parte dos segmentos).



Figura 5.63: Moldagem de CPs para controle de resistência da camada reciclada

A compactação da camada reciclada era iniciada logo após a passagem da recicladora. Esta compactação era realizada inicialmente com emprego de quatro rolos pé-de-carneiro vibratórios, modelo Dynapac CA-250 PD de 12,4 toneladas (Figura 5.64), e visava o confinamento e compactação dos 2/3 inferiores da camada. O primeiro rolo operava logo após a recicladora, portanto, sem um número pré-definido de fechas (idas e voltas), já os outros três rolos operavam em conjunto, realizando entre 8 e 10 fechas.




Figura 5.64: Compactação da camada reciclada por meio de rolos pé-de-carneiro

Posteriormente, a conformação geométrica da via era realizada com uso de marcos topográficos e de uma motoniveladora Caterpilar 140H operando apenas em corte, visando não comprometer o grau de compactação da camada reciclada (Figura 31). Então, era realizada a compactação final da camada reciclada empregando-se um rolo Dynapac CA250 vibratório e um rolo pneumático CAT PS360C (Figura 5.65), de forma a efetuar a compactação do terço superior da camada e seu acabamento superficial.




Figura 5.65: Conformação geométrica e compactação final da camada reciclada

Após estas etapas, realizavam-se diversos ensaios para controle tecnológico da camada reciclada com cimento. Verificava-se o peso específico aparente seco in situ para cada um dos segmentos do trecho experimental através do método do frasco de areia (Figura 5.66). O furo realizado para execução de tal ensaio era aproveitado para verificação da espessura da camada reciclada e através do material retirado do mesmo verificava-se o teor de umidade por meio do método da frigideira (Figura 5.66). Estes dados foram utilizados para calcular o grau de compactação de cada segmento.



Figura 5.66: Métodos do frasco de areia e da frigideira empregados na camada reciclada

Também foram realizados levantamentos deflectométricos utilizando-se Viga Benkelman e um caminhão com eixo traseiro simples de rodas duplas e carga de 8,2 toneladas (Figura 5.67). Foram verificadas as deflexões D0 e D25 a cada 10 metros, no bordo interno e externo da faixa.



Figura 5.67: Levantamento deflectométrico da camada reciclada após compactação

Para posterior liberação ao tráfego, executava-se tratamento superficial simples (TSS) sobre a camada reciclada empregando-se emulsão RR2C polimérica a uma taxa de 0,8 kg/m² a 1,2 kg/m² e agregados (pó de pedra + pedrisco) a uma taxa de 5 kg/m² a 9 kg/m² (Figura 5.68). O controle da taxa de ambos era realizado utilizando-se bandeja com dimensões de 50 cm x 50 cm.

Após sete dias da reciclagem, foram realizadas novas leituras deflectométricas a cada 20 metros, no bordo externo da faixa direita.



Figura 5.68: Execução do TSS sobre a camada reciclada

A Tabela 5.17: apresenta os horários aproximados de início e fim de cada serviço. Destaca-se que para os primeiros três segmentos executados (5, 4 e 3) os serviços foram realizados individualmente, pois a necessidade de se modificar algumas características inerentes dos mesmos não possibilitava que os serviços fossem realizados de forma contínua. A partir do Segmento 1b e até o Segmento 1a, os serviços passaram a ser realizados de forma contínua, já que a única modificação entre estes segmentos era o aumento da espessura reciclada no Segmento 2.

Tabela 5.17: Horários de início e fim de cada etapa da execução do trecho experimental

	5		4		3		1b, 2 e 1a	
Etapas	**Início**	**Fim**	**Início**	**Fim**	**Início**	**Fim**	**Início**	**Fim**
Distribuição de agregados	-	-	9:00		-	-	-	-
Distribuição de cimento	9:05	9:10	10:13	10:15	12:54	13:45	15:13	16:25
Reciclagem	9:26	10:30	10:33	11:09	13:07	14:39	15:23	17:07
Compactação inicial	9:32	10:45	10:35	11:18	13:10	14:50	15:25	17:10
Conformação geométrica	10:45	11:19	11:17	11:46	14:52	15:18	16:30	17:30
Compactação final	11:19	11:37	11:45	12:05	15:17	15:50	17:00	18:00
Pintura de cura	14:40	14:48	14:40	14:48	16:40	17:23	18:20	19:00
Salgamento	14:48	14:58	14:48	14:58	16:40	17:23	18:20	19:00
Liberação ao tráfego	19:00		19:00		19:00		19:00	

Por fim, realizou-se a execução do revestimento em concreto asfáltico contendo asfalto modificado por borracha de pneus no dia 19 de novembro. O atraso em demasia aconteceu devido a problemas com a vibroacabadora da empresa contratada e tal indefinição também impossibilitou que a equipe de pesquisadores do LAPAV/UFRGS pudesse acompanhar esta etapa da restauração.

Foi aplicada emulsão RR2C polimérica para realização da pintura de ligação a uma taxa de 0,5 litros/m². A mistura asfáltica foi distribuída com uso de vibroacabadora e compactada por um rolo liso vibratório (Dynapac CC 424HF de 10,5 toneladas) e outro pneumático (Dynapac CP224 com carga máxima de 21 toneladas) realizando entre 8 e 10 fechas (Figura 5.69).

Durante a execução do revestimento, foram coletadas amostras da mistura asfáltica visando à determinação do teor de ligante e da granulometria da mesma em laboratório. No dia 30 de novembro foram realizadas novas leituras deflectométricas a cada 20 metros, no bordo externo da faixa direita. Também foram extraídos 3 testemunhos por segmento do trecho experimental para determinação da resistência à tração e do módulo de resiliência da camada asfáltica, ambos ensaios realizados por compressão diametral.



Figura 5.69: Conformação e compactação da camada asfáltica

Proposta de método de dimensionamento

A sequência do método proposto aqui segue os procedimentos normalmente empregados em métodos mecanístico-empíricos para dimensionamento de pavimentos, conforme apresentado na Figura 5.70. O detalhamento de cada etapa é apresentado nas seções subsequentes.

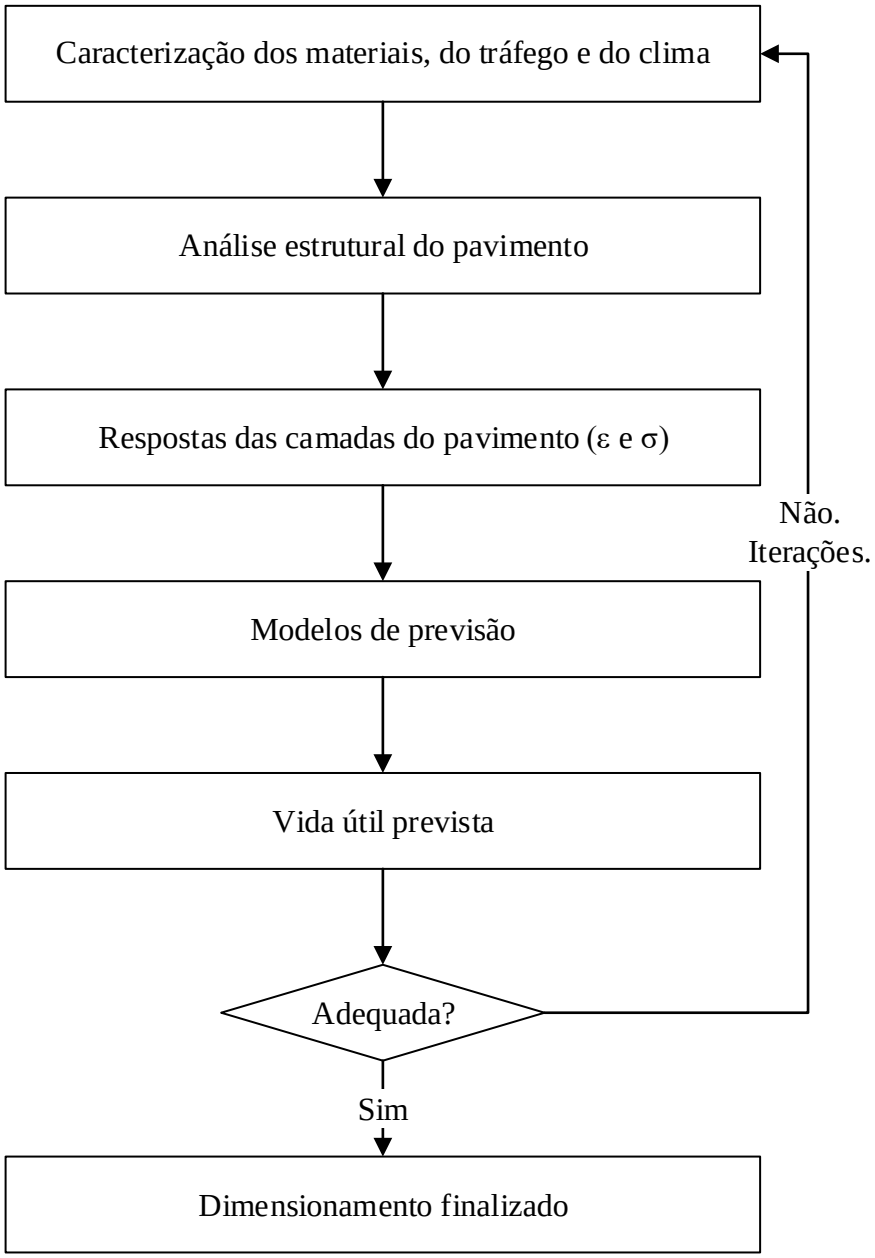


Figura 5.70: Procedimento empregado no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos

O processo de caracterização dos materiais inclui a determinação de suas propriedades elásticas e da espessura da camada. Os parâmetros mínimos necessários geralmente são a rigidez, o coeficiente de Poisson e o peso específico de cada material.

Para solos e materiais granulares, deve-se determinar o módulo de resiliência por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Misturas asfálticas também devem ser caracterizadas através da determinação de seu módulo de resiliência, o que geralmente acontece através do ensaio de compressão diametral. Contudo, sempre que possível, sugere-se identificar o efeito da temperatura e da frequência na rigidez dos materiais asfálticos, através da determinação do módulo dinâmico.

No que diz respeito à camada reciclada com cimento, sugere-se que a sua caracterização seja realizada através de ensaios de resistência à tração na flexão (RTF) aos 28 dias de cura, já que as condições impostas neste ensaio se assemelham às observadas em campo para materiais cimentados. Neste ensaio, devem ser registrados os deslocamentos causados pelo carregamento aplicado, de modo que seja possível determinar a deformação de tração na ruptura (ε_b) e o módulo de elasticidade flexural (MEF) da mistura, parâmetros essenciais para um adequado dimensionamento.

Para casos em que não seja possível determinar tais parâmetros experimentalmente, a Tabela 5.18 apresenta valores de referência obtidos por meio de ensaios flexurais aos 28 dias de cura para diferentes composições de misturas recicladas com cimento (D'AVILA, 2015; CASTAÑEDA LÓPEZ, 2016; GRASSIOLI, 2017; FEDRIGO, tese de doutorado com previsão de defesa para 2019).

Na Tabela 5.19, apresentam-se valores de referência (média e variação) de outros parâmetros mecânicos (resistência à compressão simples, RCS; resistência à tração por compressão diametral, RCD; e módulo de resiliência na compressão diametral, MRD) aos 7 dias de cura obtidos para as mesmas misturas (FEDRIGO, 2015; KLEINERT, 2016; GRASSIOLI, 2017).

Quanto ao coeficiente de Poisson, sugere-se que sejam utilizados os valores obtidos por Kleinert (2016) para misturas recicladas com solo-cimento e brita graduada tratada com cimento (BGTC) como materiais de base, iguais a 0,17 e 0,26, respectivamente.

Embora se saiba que não sejam procedimentos triviais, sempre que possível, aconselha-se também a execução de ensaios flexurais com carregamento cíclico, aos 28 dias de cura, para determinação do módulo de resiliência flexural (MRF) e da vida de fadiga das misturas recicladas com cimento.

Tabela 5.18: Parâmetros flexurais aos 28 dias de cura de misturas recicladas com cimento

Material de base	Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	RTF (MPa)	εb (με)	MEF (MPa)	MRF (MPa)	Peso específico (kN/m³)
Brita graduada simples	2	20	0,26	117	4103	2955	20,80
		50	0,32	262	2957	2986	20,60
		70	0,21	371	1422	2913	20,60
	4	20	0,87	194	9246	7725	21,10
		50	0,77	288	5110	4772	20,70
		70	0,80	566	3183	4871	20,90
	6	20	1,53	193	13255	-	22,50
		50	1,21	286	9095	-	21,60
		70	1,11	409	5301	-	21,20
Solo laterítico	2	20	0,28	508	983	1226	17,10
		50	0,49	467	1459	1524	19,30
		70	0,75	1059	1401	2404	20,73
	4	20	0,65	273	2908	2041	17,41
		50	0,96	519	2454	3505	19,59
		70	0,93	596	2366	4163	20,10
	6	20	0,61	463	2553	-	18,11
		50	0,90	328	4701	-	19,43
		70	1,43	557	3808	-	21,03
Brita graduada tratada com cimento	2	20	0,44	223	3685	-	20,97
		50	0,47	369	3421	-	21,38
		70	0,44	1089	1309	-	20,88
	4	20	0,96	225	7500	-	20,50
		50	0,90	549	3831	-	21,32
		70	1,01	794	2871	-	21,34
	6	20	1,23	257	7038	-	21,36
		50	1,27	409	5774	-	21,19
		70	1,34	1200	3601	-	21,35

Tabela 19: Parâmetros mecânicos aos 7 dias de cura de misturas recicladas com cimento (são apresentados os valores médios e, entre parênteses, a variação)

Material de base	Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	RCS (MPa)	RCD (MPa)	MRD (MPa)	Peso específico (kN/m³)
Brita graduada simples	2 a 6	20 a 70	3,50 (1,9 a 5,6)	0,60 (0,25 a 1,00)	15500 (6300 a 23200)	20,6 (20,0 a 21,1)
Solo laterítico	1 a 7	10 a 90	2,60 (1,0 a 4,0)	0,50 (0,15 a 0,80)	6300 (2700 a 10900)	19,4 (17,1 a 21,6)
Brita graduada tratada com cimento	1 a 7	10 a 90	3,40 (1,7 a 5,3)	0,55 (0,25 a 0,85)	9600 (3100 a 16800)	21,1 (20,5 a 21,4)
Solo-cimento	1 a 7	10 a 90	4,00 (2,0 a 6,5)	0,6 (0,20 a 0,60)	8100 (2200 a 13900)	21,8 (21,3 a 22,2)

A espessura inicial a ser utilizada para cada camada do pavimento poderá ser a determinada através de um método empírico de dimensionamento, como, por exemplo, o atual método empregado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). A espessura da camada reciclada

com cimento será influenciada por características do pavimento original, da dosagem da mistura reciclada com cimento e dos procedimentos construtivos a serem empregados. Destaca-se que a espessura final será função do processo iterativo do método mecanístico-empírico.

Tráfego

O tráfego deverá ser caracterizado através da determinação do número de repetições admissíveis do eixo padrão considerado no país para o período de projeto (N). Assim, deve-se considerar o eixo simples de rodas duplas que transmite uma carga total de 8,2 toneladas ao pavimento, calculado com base nos fatores de equivalência de carga desenvolvidos pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*).

Clima

Os efeitos climáticos também devem ser levados em consideração quando do dimensionamento do pavimento. Por exemplo, sabe-se que a temperatura tem influência no comportamento das misturas asfálticas. Deste modo, as temperaturas previstas para determinada região podem ajudar na escolha de materiais utilizados na mistura (como o ligante asfáltico) e na previsão de seu comportamento em serviço. Assim, novamente destaca-se a importância de se determinar o módulo dinâmico das misturas asfálticas para diferentes frequências de carregamento e temperaturas.

Outro fator a ser considerado é a umidade das camadas granulares e de solos, incluindo-se o subleito. O comportamento de tais materiais é bastante influenciado pelo seu teor de umidade e o ingresso da água nessas camadas pode comprometer o desempenho do pavimento. Assim, características de precipitações atmosféricas de determinada região podem se tornar bastante importantes, bem como a determinação do módulo de resiliência na compressão triaxial para diferentes condições de umidade.

Análise estrutural do pavimento e respostas das camadas

A partir das características dos materiais empregados, da definição das espessuras iniciais para cada camada, bem como da caracterização do tráfego e do clima, realiza-se a análise estrutural do pavimento. Para tal, deve-se empregar um *software* específico para análise de pavimentos, geralmente fundamentado na teoria de multicamadas elásticas.

A análise da estrutura resultará nas respostas do pavimento frente às condições de carregamento, expressas em termos de tensões e deformações em posições críticas que dependem das características de cada camada e material.

Sabe-se que o mecanismo que comanda a degradação de camadas cimentadas em geral, incluindo as recicladas, é o trincamento por fadiga. Também é de conhecimento que tal mecanismo é governado pela deformação de tração (ε_t) que se desenvolve na fibra inferior da camada cimentada, ocasionada pela tensão de tração que se concentra na mesma área. Portanto, a reposta crítica da camada reciclada com cimento, que será utilizada na previsão da vida útil da mesma, é a ε_t.

Modelos de previsão

Através das respostas do pavimento, e utilizando-se modelos de previsão específicos para cada material, será possível determinar a vida útil de cada camada do pavimento. Para a camada reciclada com cimento, aconselha-se que sua vida de fadiga seja determinada através do modelo laboratorial apresentado na Equação 5.2.

$$N_f = a\left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_b}\right)^{-SDE} \qquad \text{Equação 5.2}$$

Onde:

- N_f é a vida de fadiga laboratorial da camada reciclada com cimento;
- ε_t é a deformação de tração na fibra inferior da camada reciclada, em με;
- ε_b é a deformação de tração na ruptura da mistura reciclada com cimento, em με;
- a é um parâmetro de regressão determinado experimentalmente através de ensaios de fadiga;
- SDE (*Strain Damage Exponent*) é um parâmetro de regressão determinado experimentalmente através de ensaios de fadiga. Tal parâmetro representa o dano causado à mistura reciclada pela deformação.

Parâmetros de regressão

Os parâmetros de regressão devem, preferencialmente, ser determinados de forma experimental. Deste modo, ensaios de fadiga, aos 28 dias de cura, devem ser realizados para a mistura reciclada com cimento a ser empregada. Entretanto, como a realização de tais ensaios requer equipamentos específicos e, portanto, é pouco trivial, apresentam-se valores de referência para estes parâmetros de regressão (Tabela 5.20).

Tabela 20: Parâmetros de regressão de fadiga para misturas recicladas com cimento

Material de base	Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	a	SDE	R^2
Brita graduada simples	2	20	2,6E+00	7,3	0,57
		50	4,1E-05	9,2	0,86
		70	1,9E-06	9,9	0,78
	4	20	3,8E-05	9,0	0,81
		50	9,9E-07	11,1	0,85
		70	8,4E-16	15,4	0,56
Solo laterítico	2	20	2,0E-08	11,1	0,88
		50	1,3E-03	6,7	0,89
		70	6,0E-08	7,9	0,57
	4	20	1,0E-04	9,4	0,68
		50	6,0E-09	10,7	0,71
		70	1,0E-22	21,2	0,66

Fator laboratório-campo

Destaca-se que o modelo para previsão da vida de fadiga de camadas recicladas com cimento apresentado neste método é estritamente laboratorial. Na continuidade da pesquisa, nos próximos anos, atenção será dada à calibração de campo deste modelo. Salienta-se que tal calibração é de extrema importância, devido ao fator de escala observado entre os comportamentos de laboratório e de campo.

Para que seja possível definir um fator laboratório-campo que reduza os efeitos de escala, deve-se realizar uma análise conjunta de uma quantidade representativa de dados de ensaios laboratoriais e de monitoramento de pavimentos com camadas recicladas com cimento em serviço, visando identificar adequadamente seus mecanismos de degradação. Contudo, tal processo demanda tempo e mesmo países com elevada tecnologia em pavimentação, como os Estados Unidos, ainda não apresentam uma versão definitiva de modelos de previsão para materiais cimentados.

Vida útil prevista

Conforme apresentado na Figura 1, o processo de dimensionamento mecanístico-empírico é iterativo. Ao final de cada iteração, a vida útil prevista para cada camada do pavimento deve ser comparada com o número de repetições admissíveis do eixo padrão para o período de projeto definido para o pavimento (N).

Caso a vida útil prevista para determinada camada não seja adequada (inferior a N), deve-se reiniciar o processo apresentado na Figura 1, modificando-se parâmetros de entrada, como, por exemplo, a espessura desta camada. Deste modo, para que o processo iterativo de dimensionamento seja encerrado, a vida útil de todas as camadas deve ser superior a N.

No caso da camada reciclada com adição de cimento, deve-se comparar a vida de fadiga (N_f), determinada através do modelo apresentado na Equação 1, com o número de repetições admissíveis do eixo padrão (N).

Considerações finais

O método apresentado foi baseado em um número limitado de dados laboratoriais, sendo necessária sua calibração através de novos estudos laboratoriais e de campo. Destaca-se que, mesmo com o fim deste projeto de pesquisa, se dará continuidade ao estudo, visando buscar o aperfeiçoamento do método proposto.

3.1.34. Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade

Introdução

O pavimento asfáltico é uma das soluções de engenharia mais difundida pelo mundo, tendo em vista suas características técnicas e a facilidade de construção e de manutenção. A principal peculiaridade é que o pavimento é uma estrutura dimensionada para "ruir" dentro de um determinado período de uso, chamado de vida útil ou período de projeto, se distinguindo de qualquer outra estrutura civil. Tal degeneração se dá, basicamente, pela ação conjunta das cargas do tráfego e do intemperismo, na forma de umidade, radiação solar e, em determinados países, pelos ciclos de gelo-degelo. Por esta razão, projeto adequado e manutenção preventiva e corretiva representam dois elementos de fundamental importância no gerenciamento de uma rede rodoviária.

Dentre os fatores que contribuem para o projeto adequado de um pavimento asfáltico e sua manutenção eficiente está a seleção dos materiais de construção. No caso dos pavimentos asfálticos, o ligante asfáltico, que atua como agente cimentante, aglutinando as partículas de agregado mineral, tem grande relevância sobre o comportamento estrutural do pavimento. A mistura de componentes, se adequadamente compactada e construída em espessura compatível com a estrutura em questão, tem como propósito combater os esforços de tração, compressão e cisalhamento que solicitam o pavimento. Tais esforços repetitivos culminam na formação dos três principais mecanismos que levam o pavimento asfáltico à falência estrutural: deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento de origem térmica. Por isso, a seleção racional do tipo de ligante asfáltico mais adequado para uma obra é um fator muito importante.

Objetivos

O objetivo geral deste projeto de pesquisa é a incorporação da tecnologia Superpave para ligantes asfálticos nas atividades regulares da CCR Nova Dutra, como ferramenta de caracterização reológica de materiais asfálticos a ser empregada tanto na seleção de ligantes asfálticos quanto no controle de qualidade destes materiais.

Os objetivos específicos são:

1. Determinar os graus de desempenho para a Rodovia Presidente Dutra, tendo por base dados de temperaturas máximas e mínimas obtidas de estações meteorológicas instaladas nas proximidades da rodovia;
2. Realizar ensaios reológicos para a classificação de ligantes asfálticos puros e modificados comerciais, visando a definição de um panorama nacional do mercado de ligantes asfálticos;
3. Conceber uma especificação interna de materiais asfálticos, que sistematize e oriente a seleção de ligantes asfálticos, sejam puros ou modificados, destinados às obras da CCR Nova Dutra.

Materiais e Métodos

Esta pesquisa teve por objetivo caracterizar, do ponto de vista das diferentes propriedades reológicas, ligantes asfálticos comerciais disponíveis no mercado brasileiro. Neste sentido, foram selecionados dois CAPs convencionais e oito ligantes asfálticos modificados, que foram designados com os seguintes códigos:

- A: CAP 30/45;
- B: CAP 50/70;
- C: asfalto borracha fornecido pela empresa 1;
- D: asfalto modificado com polímero elastomérico fornecido pela empresa 2;
- E: asfalto modificado com polímero elastomérico fornecido pela empresa 2;
- F: asfalto borracha fornecido pela empresa 2;
- G: asfalto de alto módulo fornecido pela empresa 3;
- H: asfalto de alto módulo fornecido pela empresa 4;
- I: asfalto modificado com polímero elastomérico fornecido pela empresa 4; e
- J: asfalto modificado com asfalto natural e polímero elastomérico fornecido pela empresa 4.

Todas as amostras de ligantes asfálticos puros e modificados foram avaliadas através de ensaios de laboratório realizados nas três condições de envelhecimento praticadas: (1) condição virgem, (2) condição envelhecida a curto prazo na estufa de filme fino rotativo (RTFO) e (3) condição envelhecida a longo prazo (resíduo do RTFO envelhecido no vaso pressurizado – PAV).

Os ligantes asfálticos foram avaliados em dois laboratórios (Laboratório do CPR da CCR Nova Dutra e Laboratório de Estradas da EESC/USP), que realizaram os ensaios para medidas de propriedades reológicas, que incluem: (1) os ensaios em regime oscilatório de cisalhamento no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), para a construção de curvas-mestre, para a determinação do grau de desempenho (PG) sob temperaturas altas, para a determinação da temperaturas críticas de fadiga e para a avaliação da estabilidade à estocagem, (2) o ensaio de varredura linear de amplitude (LAS), para obtenção das características de fadiga dos materiais, (3) o ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR), para obtenção das características relacionadas à resistência à deformação permanente dos materiais, (4) o ensaio de fluência na flexão no reômetro de flexão em viga (BBR), para obtenção das propriedades a baixas temperaturas, também utilizadas para determinar o PG a baixas temperaturas, (5) viscosidade rotacional, (6) penetração, (7) ponto de amolecimento, (8) ductilidade, (9) recuperação elástica no ductilômetro; (10) retorno elástico e (11) densidade.

Os graus de desempenho (PG) da rodovia Presidente Dutra foram determinados a partir da análise das séries históricas de temperaturas do ar obtidas de quatro estações meteorológicas nas cercanias da rodovia. Além disso, foi apresentada uma proposta de especificação interna para seleção e controle de qualidade de ligantes asfálticos no âmbito da Concessionária CCR Nova Dutra.

Resultados e Análise dos Resultados

As principais conclusões sobre os resultados dos ensaios são apresentados em seguida.

Ensaios de ponto de amolecimento: os resultados obtidos para as amostras de A a J mostra uma diferença de até 8,3ºC entre pontos de amolecimento para uma mesma amostra virgem – neste caso para o asfalto H – e de até 4,9ºC entre pontos de amolecimento para uma mesma amostra envelhecida a curto prazo – neste caso para a amostra F. Em relação ao incremento do ponto de amolecimento, a máxima diferença foi de 5,7ºC, obtida para a amostra E.

Ensaios de penetração: os resultados obtidos para as amostras de A a J mostra uma diferença de até 17 décimos de mm entre valores de penetração para uma mesma amostra virgem – neste caso para o asfalto F – e de até 12 décimos de entre valores de penetração para uma mesma amostra envelhecida a curto prazo – neste caso para a amostra G.

Ensaios de ductilidade: apenas os materiais de A a J, analisados no Laboratório de Estradas da EESC-USP, foram submetidas a ensaios. Os asfaltos convencionais (A e B) atenderam a ductilidade mínima exigida pela especificação para asfaltos convencionais de no mínimo 60 cm e também aos valores para materiais envelhecidos a curto prazo, de 10 e 20 cm, para CAP 30/45 e CAP 50/70, respectivamente. Não há valores ductilidade de referência para asfaltos modificados, tendo sido observados valores expressivamente baixos, inferiores a 30 cm (amostras F e H). Para o caso dos asfaltos modificados envelhecidos a curto prazo, foram observadas ductilidades baixas pra vários materiais (asfaltos C, D, F, H e J), na faixa de 36 a 10 cm.

Ensaio de recuperação elástica no ductilômetro, apenas os materiais de A a J, analisados no Laboratório de Estradas da EESC-USP, foram submetidas a ensaios. Para os asfaltos borracha, a especificação exige valores de no mínimo de 50 ou 55%, para material virgem, a depender da classe do asfalto borracha. As amostras C, F e S foram classificadas como AB tipo 8, para o qual a recuperação elástica mínima é de 50%. Tanto a amostra C quanto a amostra F atendem tal requisito. Já a norma para asfaltos modificados por polímeros especifica, para materiais virgens, valores de recuperação elástica de 75, 85 e 90% para as três classes de material previstas naquela especificação. As amostras D, E e I apresentaram valores de recuperação elástica respectivamente de 75, 92 e 89%, respectivamente. Já as amostras G e J apresentaram recuperações elásticas de 73 e 74%, respectivamente. O asfalto H não permitiu a determinação da recuperação elástica, dado que as amostras romperam antes de atingir o estiramento de 20 cm. A mesma norma DNIT especifica que os materiais retenham 80% da recuperação elástica após o envelhecimento a curto prazo, o que foi atendido por todas as amostras.

Ensaios de viscosidade: tomando por base os limites de viscosidade rotacional recomendados pela ANP para asfaltos convencionais, observa-se que os asfaltos convencionais (A e B) apresentam viscosidades ligeiramente superiores a tais limites, em particular nas temperaturas de 135 e 150ºC, sendo que a 177ºC ambos os materiais atendem tais limites. No caso dos asfaltos borracha, pode-se afirmar que os três asfaltos borracha apresentam viscosidades inferiores a 2 Pa.s, que é o limite superior de viscosidade para o AB tipo 8 na temperatura de 175ºC. Em relação aos asfaltos modificados com polímero, todos atendem a especificação.

Graus de desempenho: os graus de desempenho a altas e a baixas temperaturas das amostras de A a J analisadas no Laboratório de Estradas da USP-São Carlos e de A a T analisadas no laboratório do CPR da CCR Nova Dutra são mostradas na Tabela 1. Pode-se verificar que os **graus de desempenho a altas temperaturas** para os asfaltos convencionais foram **PG 70** (CAP 30-45) e **PG 64** (CAP 50/70). No caso dos asfaltos modificados foi possível observar PGs entre 70 e 82, sendo que a amostra G alcançou PG 88 pela avaliação do Laboratório da EESC-USP, e a amostra

R alcançou PG 94, na avaliação do laboratório da CCR Nova Dutra. Em relação aos **graus de desempenho a baixas temperaturas** foram observados os asfaltos B, F e H apresentaram PGs distintos nas análises realizadas nos dois laboratórios. Os PGs determinados no laboratório do CPR da CCR Nova Dutra resultaram um grau acima dos determinados no Laboratório de Estradas da USP-São Carlos. Tal fato pode ter ocorrido em função da diferença nos procedimentos para na estufa PAV. Dentre os asfaltos analisados, observaram-se PGs entre -10 e -28, os quais são todos compatíveis com o PG a baixas temperaturas recomendado para os trechos da rodovia.

Tabela 1: Graus de desempenho das amostras analisadas nessa pesquisa.

Amostra	Alta temperatura		Baixa temperatura	
	USP–São Carlos	CPR Nova Dutra	USP–São Carlos	CPR Nova Dutra
A	70	70	-16	-16
B	64	64	-22	-16
C	76	76	-28	-28
D	70	70	-22	-22
E	76	76	-16	-16
F	76	76	-28	-22
G	88 (82)	82	-16	-16
H	82	70	-16	-10
I	76	70	-22	-22
J	82	82	-16	-16
K		70		-16
L		82		-16
M		76		-16
N		76		-22
O		70		-22
P		70		-16
Q		82		-10
R		94 (82)		-22
S		76		-16
T		70		-22

Com base nos resultados dos ensaios **MSCR**, foram determinados os **níveis de tráfego** (obtidos com base nos resultados de Jnr). Os resultados mostraram classes de tráfego mais altas para os asfaltos modificados, em relação aos asfaltos convencionais, demonstrando a capacidade destes materiais em proporcionar maior resistência à deformação permanente às misturas asfálticas.

Índices de envelhecimento foram obtidos das relações entre os valores de recuperação elástica (quanto menor o índice, maior o aumento da recuperação elástica), compliância não-recuperável (quanto maior o índice, maior a queda da compliância não-recuperável com o envelhecimento) e Jnr,diff (quanto maior o índice maior a redução do Jnr,diff com o envelhecimento), os quais foram usados no ordenamento dos asfaltos em relação à sensibilidade ao envelhecimento a curto prazo. O asfalto H resultou o menos sensível ao envelhecimento a curto prazo, seguido pelo G e depois pelo A. O asfalto E resultou o mais sensível ao envelhecimento, seguido pelo J e depois pelo F.

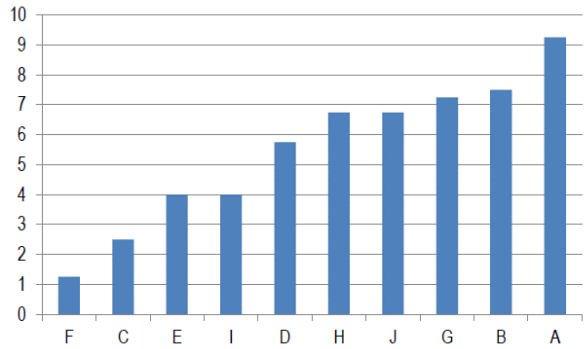
As **temperaturas críticas de fadiga** das amostras apresentaram variação entre 16 e 34ºC, sendo que parte expressiva dos asfaltos modificados apresenta temperaturas críticas de fadiga inferiores às obtidas para os asfaltos convencionais. Os resultados do **ensaio LAS** foram empregados na avaliação da **vida de fadiga dos ligantes asfálticos** envelhecidos a curto e a longo prazos. Com base nos modelos de fadiga ajustados foi feita uma estimativa do número de solicitações do eixo padrão de 80 kN (Nf) que levaria os materiais à fadiga, considerando dois níveis de deformação, 2 e 20%. A Tabela 2 mostra os valores de Nf dos materiais avaliados nos dois níveis de deformação considerados e nos dois níveis de envelhecimento praticados.

A Figura 1 mostra o ordenamento final das amostras ensaiadas nos dois laboratórios. No ordenamento realizado com resultados da USP – São Carlos pode-se observar que os materiais A e B, por se tratarem de asfaltos puros, apresentam os piores desempenhos à fadiga, ao passo que o material F é o que apresenta o melhor desempenho à fadiga, seguido pelo material C e depois o material E. No ordenamento realizado no CPR Nova Dutra pode-se observar que a amostra H é a que apresenta o pior desempenho à fadiga, seguida pelos asfaltos puros A e B. O material R é o que apresenta o melhor desempenho à fadiga, seguido pelo material C e pelo material F. Interessante observar que o material F ocupou a primeira posição no ordenamento dos materiais analisados na USP – São Carlos e ocupou a terceira posição neste ordenamento. Também chama a atenção o fato de o material C ocupar a segunda melhor posição em ambos os ordenamentos.

Tabela 2: Valores de Nf para os materiais analisados nessa pesquisa.

Material	USP – São Carlos				CPR Nova Dutra			
	Envelhecido a curto prazo		Envelhecido a longo prazo		Envelhecido a curto prazo		Envelhecido a longo prazo	
	2	20	2	20	2	20	2	20
A	21.322	32	13.676	6	30.547	36	52.522	32
B	26.414	55	54.615	45	9.037	24	90.341	48
C	237.700	199	382.382	163	332.986	261	192.912	165
D	37.860	102	90.867	69	27.664	115	167.815	92
E	372.912	205	66.654	50	184.435	125	248.853	40
F	246.656	247	429.321	212	268.444	223	486.632	246
G	112.481	18	136.388	2	535.051	118	391.690	7
H	144.736	35	92.941	4	13.430	15	77.221	6
I	76.343	162	158.407	92	35.601	61	202.474	71
J	29.376	46	105.847	24	61.111	59	612.657	37
K					10.028	22	433.986	87
L					42.706	18	858.498	51
M					35.439	52	330.843	66
N					54.704	97	186.506	76
O					74.163	176	218.793	102
P					30.729	47	103.223	42
Q					105.689	37	878.108	30
R					518.531	426	1.372.458	343
S					162.438	143	247.053	85
T					55.587	117	210.254	128

USP – São Carlos



CPR Nova Dutra

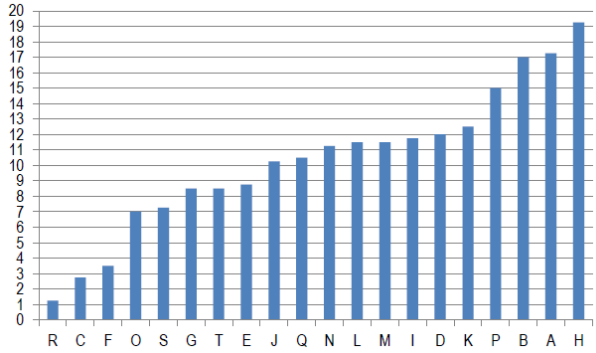


Figura 1: Ordenamento final dos materiais em função do número de solicitações do eixo padrão (Nf) necessário para provocar fadiga no material.

As medidas de G* e delta feitas para construção das curvas-mestre foram empregadas na avalição da sensibilidade ao envelhecimento a curto e a longo prazos dos asfaltos. Os materiais foram ordenados em relação à **sensibilidade aos envelhecimentos a curto e a longo prazos**, tomando por base os índices de envelhecimento baseados nas relações apenas entre os valores de G*. O ordenamento final mostrou que a amostra G é a mais sensível ao envelhecimento (curto e longo prazos juntos), seguida pelo asfalto H e pelo asfalto I. O ordenamento global mostrou que o asfalto F é o menos sensível ao envelhecimento, seguido pelos asfaltos J e D.

Em relação à **estabilidade à estocagem** dos ligantes asfálticos modificados, as especificações admitem uma diferença entre pontos de amolecimento entre amostras de topo e fundo máxima de 9ºC para os asfaltos borracha (amostras C, F e S), e máxima de 5ºC para asfaltos modificados com polímeros. Dos dezoito asfaltos modificados avaliados, cinco se mostraram instáveis ao armazenamento. Os asfaltos E e G não atenderam o limite de 5ºC e entre os asfaltos borracha, os materiais C e F não se mostraram estáveis ao armazenamento. Em relação à análise dos índices de estabilidade baseados nos valores de G*, as amostras D, H, I e J apresentaram índices de estabilidade próximos de 1 (entre 1,0 e 1,2), com baixos valores das diferenças entre pontos de amolecimento. As amostras C e F (asfaltos-borracha) apresentaram índices de estabilidade baixos, porém a diferença entre pontos de amolecimento é razoavelmente alta. As amostras E e G apresentaram índice de estabilidade e diferença entre pontos de amolecimento altos.

Determinação do PG do Pavimento da Rodovia Presidente Dutra

A determinação do grau de desempenho, PG, do pavimento se baseia nas medidas das temperaturas extremas (máxima e mínima) do ar, que são convertidas em temperaturas do pavimento por meio de funções de transferência. A temperatura máxima do pavimento é obtida com base na temperatura média do ar dos 7 dias consecutivos mais quentes de cada ano. Por sua vez, a temperatura mínima do pavimento é obtida com base na temperatura mínima do ar para cada ano.

A temperatura máxima do ar ($T_{máx_ar}$) é dada pela Equação 1 e a temperatura mínima do ar ($T_{mín_ar}$) é dada pela Equação 2, em graus Celsius:

$$T_{máx_ar} = T_{média_ar(alta)} + z.\sigma_a \qquad \text{Equação 1}$$

$$T_{mín_ar} = T_{média_ar(baixa)} - z.\sigma_b \qquad \text{Equação 2}$$

sendo z igual a 2,055, para um nível de confiabilidade de 98%, e σa e σb os desvios padrões das medidas de temperaturas altas e baixas, respectivamente, no período considerado.

As medidas de temperatura do ar foram obtidas de quatro estações meteorológicas localizadas nas cercanias da Rodovia Presidente Dutra: Guarulhos, Taubaté, Resende e Seropédica. Para estimar as temperaturas do pavimento ($T_{pavimento,\ máx}$ e $T_{pavimento,\ mín}$), em graus Celsius, considerando as temperaturas máximas e mínimas do ar foram empregadas as funções de transferência dos programas SHRP (McGENNIS et al., 1994 e do Long-Term Pavement Performance (MOHSENI e CARPENTER, 2004; LTPP, 1998; BOSSCHER, 2000). A Equação 3 está escrita para a profundidade de 20 mm e as Equações 4 e 6 em função da profundidade H, em mm:

$$T_{pavimento\ máx} = 0{,}9545 \times (T_{máx_ar} - 0{,}00618 \times LAT^2 + 0{,}2289 \times LAT + 42{,}2) - 17{,}78 \quad \text{Equação 3}$$

$$T_{pavimento\ máx} = 54{,}32 + 0{,}78 T_{máx_ar} - 0{,}0025 \times LAT^2 - 15{,}14 \log_{10}(H + 25) + z \times (9 + 0{,}61\sigma^2)^{0{,}5} \quad \text{Equação 4}$$

$$T_{pavimento\ mín} = T_{mín_ar} \quad \text{Equação 5}$$

$$T_{pavimento\ mín} = -1{,}56 + 0{,}72 T_{mín_ar} - 0{,}004 \times LAT^2 + 6{,}26 \log_{10}(H + 25) - z \times (4{,}4 + 0{,}52\sigma^2)^{0{,}5} \quad \text{Equação 6}$$

sendo LAT a latitude da estação meteorológica (em graus), H a profundidade em mm, z=2,055, para um nível de confiabilidade de 98%, e σ o desvio padrão das medidas de temperaturas.

A partir das médias de temperaturas do ar dos sete dias consecutivos mais quentes de cada ano, para as quatro estações meteorológicas em questão, foram determinadas as médias das temperaturas máximas do ar por estação meteorológica, ao longo do período considerado (20 anos), assim como os respectivos desvios padrões e as temperaturas máximas do ar calculadas com base na Equação 1. As Tabelas 3 e 4 apresentam os PGs recomendados em função das temperaturas máximas e mínimas, respectivamente, determinadas usando os modelos do SHRP e do LTPP.

Tabela 3: PGs recomendados a partir das temperaturas máximas e críticas.

Estação	Guarulhos	Taubaté	Resende	Seropédica
Tmédia (7 dias consecutivos)	33,6	35,0	34,5	37,6
σ	0,98	1,33	1,29	1,17
Tmáx_ar	35,6	37,8	37,1	40,0
Tcrítica LTPP (20 mm)	62,0	63,9	63,5	65,6
Tcrítica SHRP (20 mm)	58,3	60,4	59,9	62,6
PGs recomendados	64	64	64	70

Tabela 4: PG recomendados a partir das temperaturas mínimas e críticas.

Estação	Guarulhos	Taubaté	Resende	Seropédica
Tmédia	5,7	4,0	7,1	14,5
σ	2,39	1,58	1,67	1,11
Tmín_ar	0,8	0,7	3,6	12,2
Tcrítica LTPP (superfície)	0,0	0,7	2,8	9,3
Tcrítica SHRP (superfície)	0,8	0,7	3,6	12,2
Tcrítica LTPP (20 mm)	1,6	2,3	4,4	10,9
PGs recomendados	-10	-10	-10	-10

Pode-se observar que, em relação às temperaturas máximas, nas três estações meteorológicas mais próximas à cidade de São Paulo, o PG recomendado para a rodovia é 64, e na estação meteorológica próxima à cidade do Rio de Janeiro, o PG recomendado é 70. Considerando que as temperaturas críticas, obtidas em função das temperaturas mínimas, são todas superiores a zero e que a primeira classe de ligantes asfálticos na especificação Superpave é -10, o PG a baixas temperaturas a ser adotado para toda a Rodovia Presidente Dutra será -10.

Como conclusão deste estudo, tem-se que o PG do pavimento, na região das estações meteorológicas de Guarulhos, Taubaté e Resende, é o PG 64-10 e, na região próxima à estação meteorológica de Seropédica, o PG é 70-10. No entanto, considerando os níveis de tráfego da rodovia (VDM altíssimo), a classe final do pavimento da Rodovia Presidente Dutra será PG64E-10 para o trecho coberto pelas estações meteorológicas de Guarulhos, Taubaté e Resende, e PG70E-10, para o trecho na proximidade da estação meteorológica de Seropédica.

Proposta de Especificação Interna para Ligantes Asfálticos

O nível de complexidade de uma especificação para materiais asfálticos depende de diversos fatores, dentre os quais podem ser destacados: o nível de severidade do clima (o efeito das variações de temperatura e do nível de envelhecimento sofrido pelo ligante asfáltico) e do tráfego (efeito dos níveis de carga e dos tempos de aplicação de carga) e o número de ligantes asfálticos comerciais disponíveis.

Atualmente, a especificação Superpave é a única em nível global que comporta as variáveis mais complexas e corriqueiramente encontradas na pavimentação asfáltica. Dada a severidade climática das áreas cortadas pela Rodovia Presidente Dutra e o alto volume de tráfego pesado que utiliza a rodovia e também considerando a diversidade de asfaltos não-modificados e modificados disponíveis no mercado brasileiro, é razoável crer que uma especificação para materiais asfálticos pautada nos princípios e parâmetros da especificação Superpave seja a solução mais adequada. Em uma primeira fase, a especificação interna da CCR Nova Dutra comportaria apenas propriedades relacionadas às temperaturas de usinagem e compactação e às temperaturas altas e intermediárias do pavimento, de modo a englobar as etapas de construção e de serviço do pavimento.

A especificação interna proposta é composta dos seguintes itens:

- **viscosidade rotacional**, medida no viscosímetro Brookfield, segundo os procedimentos indicados na norma ASTM D4402, em temperaturas na faixa de 135 a 177ºC, utilizando ligantes asfálticos virgens;
- **grau de desempenho em temperaturas altas**, determinado com base nos parâmetros G* e δ, obtidos com o DSR segundo a norma ASTM D7175, em temperaturas na faixa de 46 a 88ºC, utilizando ligantes asfálticos virgens e envelhecidos a curto prazo na estufa de filme fino rotativo (RTFO); adotar os graus de desempenho 46, 52, 58, 64, 70,76 e 82, adicionando o grau 88, de modo a caracterizar adequadamente os ligantes asfálticos modificados existentes no mercado brasileiro;
- **temperatura crítica de fadiga**, determinada com base nas medidas de G* e δ obtidas no DSR segundo a norma ASTM D7175, em temperaturas na faixa de 40 a 4ºC, utilizando ligantes asfálticos envelhecidos apenas a longo prazo no PAV e preservando os limites de G*.senδ em função da classe de tráfego para a determinação das temperaturas críticas de fadiga;
- **classes de tráfego,** segundo a AASHTO M320 (S- padrão, H-pesado; V-muito pesado e E-extremamente pesado) determinadas com base nos valores de compliância não-recuperável dos asfaltos envelhecidos a curto prazo obtidos na temperatura representativa das temperaturas máximas às quais o pavimento pode estar sujeito (64, 70 e 76ºC);
- **simulação do envelhecimento a curto prazo** na estufa de filme fino rotativo (RTFO), segundo a norma ASTM D2872, com determinação do balanço de massa; e
- **simulação do envelhecimento a longo prazo** na estufa de vaso pressurizado (PAV), segundo a norma ASTM D6521.

A partir dos PGs determinados para diferentes trechos da Rodovia Presidente Dutra é possível refinar a classificação do ligante asfáltico em função do nível de tráfego de trechos específicos da rodovia. Os dados de tráfego da concessionária CCR Nova Dutra indicam a existência de diferentes trechos homogêneos ao longo da rodovia. Foi escolhido o km 270, na cidade de Barra Mansa, aproximadamente no ponto médio entre Rezende e Seropédica (sedes de duas estações metereológicas) como ponto de mudança do PG do pavimento de 64 para 70, já que as medidas obtidas na estação de Rezende indicaram PG 64 e as medidas obtidas na estação de Seropédica indicou PG 70. É importante destacar que os tráfegos em todos os trechos homogêneos é superior a $3x10^7$ repetições do eixo padrão, o que levaria à atribuição de classes de tráfego V ($N>3x10^7$

"ou" tráfego lento) ou E ($N>3x10^7$ "e" tráfego lento). Como o tráfego da Rodovia Presidente Dutra é reconhecidamente pesado e volumoso, seria mais prudente, do ponto de vista de projeto, considerar que a classe E seja atribuída a todos os trechos.

De posse de tais classes exigidas para o ligante asfáltico, é possível especificar materiais de forma mais racional e consistente, além de realizar o devido controle de qualidade no recebimento dos materiais. Os fornecedores de asfalto, tanto não-modificados quanto modificados, deverão informar as condições de produção e armazenamento dos materiais, de modo a orientar a coleta de amostras para controle de qualidade por parte do CPR da CCR Nova Dutra, além de fornecer laudo constando a classe do material conforme os critérios aqui especificados.

3.1.35. Materiais de Sinalização Horizontal: Avaliação do desempenho para elevados volumes de tráfego

Introdução

A pesquisa envolveu experimento de sinalização viária na pista da rodovia, em local situado no trecho no estado de São Paulo.

Objetivos

O objetivo geral da pesquisa foi estudar diferentes tipos de materiais para sinalização horizontal, a fim de verificar o desempenho para as mesmas condições de implantação e solicitação, na Rodovia Presidente Dutra.

Para alcançar o objetivo proposto, as seguintes atividades foram realizadas:

- Elaboração de revisão da literatura para aferição do atual Estado da Arte sobre o tema objeto da pesquisa.
- Execução do experimento com a seleção de três produtos disponíveis no mercado nacional para aplicação em segmento teste da Rodovia Presidente Dutra.
- Realização de monitorações para medição da retrorrefletividade (a cada quinze dias, durante o período da pesquisa) dos materiais adotados para a sinalização horizontal, de acordo com o experimento executado.
- Verificação visual das condições dos materiais testados durante o experimento.
- Identificação de possíveis associações entre as diferentes medidas de monitoração.

Execução do Experimento

1.1.1.1.Seleção dos materiais

Os três materiais empregados na pesquisa estão disponíveis no mercado nacional, dentro das especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, e foram selecionados pela CCR NovaDutra com base em sua utilização mais comum na rodovia:

- Termoplástica spray (“A”), aplicado com espessura de 1,5 mm;
- Metilmetacrilato bi-componente (PMMA – plástico a frio) (“B”), aplicado com espessura de 0,5 mm;
- Acrílica à base de água (“C”), aplicado com espessura de 0,5 mm.
- As microesferas de vidro utilizadas foram:
- Pré-misturadas à tinta: Microesferas Tipo IB - 200 a 250 g/l;
- Aspergidas na superfície da tinta: Microesferas Tipo IIC 300 a 400 g/m² – por simples aspersão.

1.1.1.2.Seleção do local do segmento teste

O local selecionado para o experimento foi uma faixa de tráfego, especificamente a de cobrança automática da praça de pedágio Arujá da Rodovia Presidente Dutra (Figura 2), devido a características que facilitam o controle do experimento e a coleta de dados, como a disponibilidade de registros da quantidade de veículos e sua classificação por tipo ou por eixos e uma menor interferência no fluxo local no momento das medidas. O experimento foi realizado na cabine 12, na faixa mais à direita, com velocidade máxima de passagem de veículos prevista de 40 km/h.



Figura 2: Local selecionado: praça de pedágio Arujá, situado na rodovia Presidente Dutra - km 204, SP.

1.1.1.3.Definição da configuração do experimento

Com intuito de acelerar os efeitos do tráfego na sinalização, os elementos escolhidos para o experimento foram linhas transversais à faixa de rolamento, que, nessa direção, acabam sendo mais solicitadas pela passagem de pneus dos veículos do que se fossem longitudinais. Em virtude do sentido único do tráfego, presumiu-se que a solicitação dos pneus sobre cada linha seria diferente, conforme a posição da linha, sendo que a primeira receberia constantemente o maior impacto do tráfego. Para tanto, foram aplicadas várias linhas transversais com cada material, em sequências variadas dentro do mesmo conjunto de materiais A, B, C, de modo a evitar a repetição da mesma sequência. Os arranjos dos materiais foram de três em três, resultando em seis conjuntos. Dessa forma, a configuração de implantação ficou como apresentada na Figura 3.

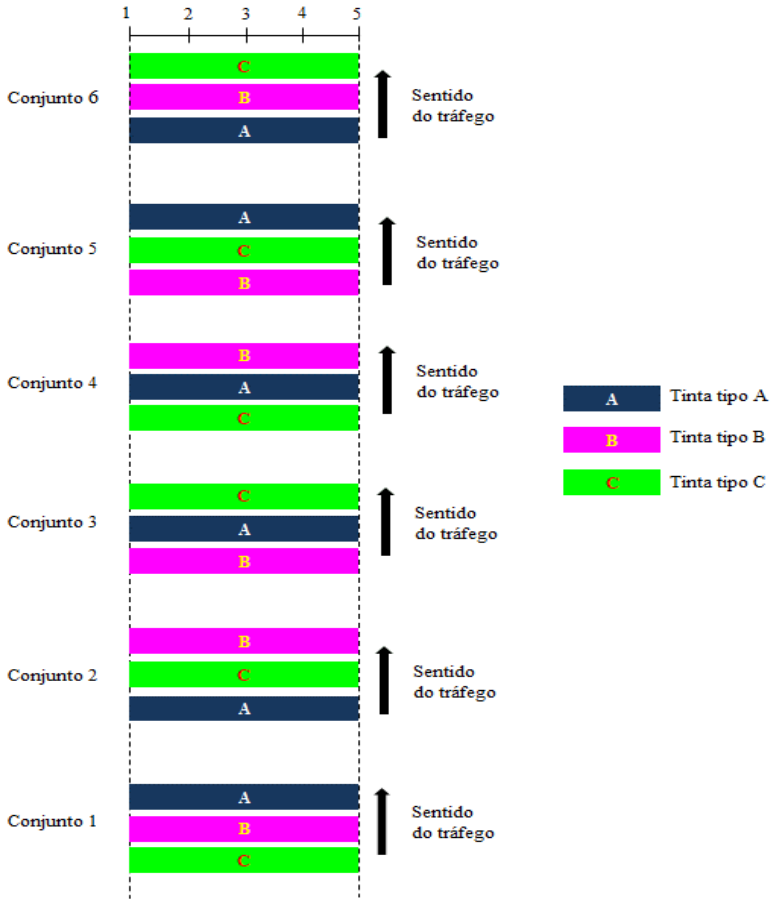


Figura 3: Configuração física da sinalização horizontal do experimento.

Cada um dos seis conjuntos é composto por um trio de linhas, sendo que cada linha foi demarcada com um tipo de material “A”, “B” ou “C”. No total, foram 18 linhas transversais. Em cada linha transversal foram definidas 5 posições de leitura da retrorrefletividade, considerando a heterogeneidade dos esforços solicitantes (pneus) ao longo da mesma linha. As posições 2 (dois) e 4 (quatro) são intermediárias e aproximadamente coincidentes com as trilhas de roda dos veículos. A configuração com os seis conjuntos dispostos sequencialmente, cada um com um trio de linhas aplicadas com os materiais A, B e C, também permitiu representar, numa pequena área,

todos os arranjos possíveis entre três materiais diferentes: ABC, BCA, CAB, BAC, ACB e CBA. Desse modo, não foi necessário utilizar longos trechos da rodovia para a realização do experimento, possibilitando a concentração em trecho de pequena área, o que facilitou sua monitoração.

1.1.1.4.Aplicação da sinalização na pista

Após definição da configuração geométrica, a aplicação da sinalização foi realizada entre as 22h00 do dia 13 e as 03h15 do dia 14 de julho de 2016, em função de ser o horário de menor movimento naquele trecho da rodovia, uma vez que foi necessária realizar a interdição de algumas faixas de tráfego durante os trabalhos e também durante o período requerido para a secagem do material aplicado.

Inicialmente foram feitas as pré-demarcações no pavimento, manualmente, e em seguida, as tintas foram aplicadas pelos equipamentos e veículos adequados. Para evitar heterogeneidades na aplicação dos materiais decidiu-se aplicar a sinalização a partir da faixa de tráfego contígua (cabine nº 11), de modo que quando o equipamento chegasse à faixa da cabine nº 12 (do experimento), já estivesse em condições estabilizadas de aplicação. Desse modo, cada linha foi demarcada sobre duas faixas de tráfego contíguas, facilitando ao operador do equipamento manter velocidade constante de aplicação do material (tinta+microesferas) sobre a faixa nº 12, sendo que a passagem pela faixa nº 11 serviu como uma "calibração".

Após a conclusão das aplicações, a equipe de campo realizou o primeiro levantamento da retrorrefletividade, utilizando equipamento retrorrefletômetro horizontal Easylux (nacional), seguindo a norma ABNT correspondente. Estas primeiras leituras foram realizadas apenas para controle da execução, e os valores lidos não foram utilizados na análise estatística. As Figuras de 5 e 6 mostram alguns registros fotográficos da aplicação dos materiais.



Figura 5: Pré-demarcação dos materiais: A = HOT; B = PF; C = AQ.



Figura 6: Materiais A, B e C aplicados nas faixas de tráfego nº 11 e nº 12.

Monitoração da Retrorrefletividade da Sinalização

Inicialmente, planejava-se que a monitoração da retrorrefletividade da sinalização seria feita com frequência quinzenal. Considerando o desgaste acelerado da sinalização horizontal devido ao intenso tráfego de veículos no trecho do experimento, houve um rápido declínio da retrorrefletividade inicial, levando à necessidade de monitoração mais frequente (semanal) enquanto as leituras estivessem sofrendo alterações tão céleres. Foram realizadas 32 avaliações, entre os dias 13/07/2016 e 03/05/2017. O levantamento da retrorrefletividade foi realizado por meio de retrorrefletômetro portátil.

Ao redor de cada posição de 1 a 5 de cada linha transversal pintada, foram feitas 5 leituras, movimentando-se o equipamento ao redor de cada posição, sempre nos mesmos pontos e na mesma sequência. A Figura 7 mostra a realização das medidas de retrorrefletividade com o uso de retrorrefletômetro horizontal.



Figura 7: Medição da retrorrefletividade com o uso de retrorrefletômetro horizontal.

Os dados foram então anotados em planilhas de campo. A Figura 8 apresenta um exemplo da planilhas utilizada na monitoração da retrorrefletividade com o uso de retrorrefletômetro horizontal.

Os dados de pluviometria foram obtidos por meio da estação pluviométrica do CEMADEM – estação pluviométrica da cidade de Arujá devido à proximidade da estação à praça de pedágio.

Monitoração do Tráfego

O efeito do tráfego foi considerado de 3 formas diferentes:

- Volumes de veículos: quantidade de veículos que passam pela faixa sinalizada entre uma monitoração e outra, sem considerações quanto à sua classificação.
- Número N: número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 t (18.000 lb ou 80 kN) durante o período de vida útil do projeto, que teria o mesmo efeito que o tráfego previsto sobre a estrutura do pavimento" (DNIT, 2006). Os fatores considerados no seu cálculo englobam a composição do tráfego (classificação das categorias de veículos), pesos das cargas

transportadas e sua distribuição nos diversos tipos de eixos dos veículos, e são conhecidos por meio das pesagens realizadas em postos de pesagem veicular (balanças de veículos).

- Número de eixos de veículos: quantidade de eixos que passam pela faixa sinalizada entre uma monitoração e outra, sem considerações quanto à sua carga.

Os dados volumétricos de tráfego foram obtidos pelos equipamentos instalados na praça de pedágio, na faixa da cabine nº 12. Os dados de carga foram obtidos na balança situada próximo à praça de pedágio (Guararema).

Concessionária: Nova Dutra
Rodovia: Presidente Dutra BR 116
Local/Sentido: Cabine 12 - Pedágio de Arujá Norte
Data: 20/07/2016

MEDIDAS EM: mcd/lux.m²

Conjunto 1

"C" Base d'água							"B" PMMA							"A" Termo Plástico						
Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1	217	220	219	217	212	217	1	209	214	218	214	208	213	1	238	236	238	250	240	240
2	105	105	104	104	104	104	2	159	156	156	151	150	154	2	155	135	137	136	137	140
3	221	218	222	225	227	223	3	232	229	232	232	229	231	3	240	214	210	208	208	216
4	114	115	113	112	116	114	4	140	140	142	141	139	140	4	142	146	147	139	138	142
5	296	289	291	304	304	297	5	136	134	136	137	133	135	5	300	304	299	301	304	302

Conjunto 2

"A" Termo Plástico							"C" Base d'água							"B" PMMA						
Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1	156	155	160	157	154	156	1	208	208	210	208	210	209	1	198	187	192	196	194	193
2	105	136	126	106	123	119	2	89	90	90	95	90	91	2	135	134	137	138	139	137
3	196	147	150	151	142	157	3	211	206	203	212	197	206	3	156	151	156	152	155	154
4	97	106	108	108	103	104	4	96	92	94	90	93	93	4	125	128	129	130	133	129
5	252	280	272	273	251	266	5	261	272	290	309	278	282	5	128	123	142	149	149	138

Conjunto 3

"B" PMMA							"A" Termo Plástico							"C" Base d'água						
Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1	209	212	208	210	204	209	1	196	2189	189	207	204	597	1	244	235	227	213	223	228
2	160	155	161	162	159	159	2	119	149	132	118	107	125	2	130	120	115	115	119	120
3	158	157	152	159	165	158	3	147	155	145	147	165	152	3	215	199	243	250	256	233
4	139	141	133	142	137	138	4	107	143	159	113	112	127	4	124	111	122	116	119	118
5	144	131	129	142	150	139	5	362	323	326	304	315	326	5	253	247	272	249	240	252

Conjunto 4

"C" Base d'água							"A" Termo Plástico							"B" PMMA						
Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1	203	206	203	196	194	200	1	172	171	173	170	176	172	1	231	232	232	230	231	231
2	125	123	120	121	122	122	2	116	110	104	106	108	109	2	142	142	142	141	140	141
3	235	235	233	239	246	238	3	171	172	157	160	170	166	3	176	172	172	170	169	172
4	101	101	100	100	100	100	4	131	133	137	139	132	134	4	170	167	168	167	167	168
5	247	245	244	243	248	245	5	244	253	245	246	245	247	5	130	128	128	130	130	129

Conjunto 5

"B" PMMA							"C" Base d'água							"A" Termo Plástico						
Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1	184	186	183	186	192	186	1	200	202	204	202	204	202	1	138	138	141	143	149	142
2	174	173	170	173	172	172	2	103	107	108	107	102	105	2	108	108	111	102	104	107
3	337	337	340	352	348	343	3	191	190	177	194	197	190	3	176	161	165	169	160	166
4	181	152	181	149	149	162	4	90	91	92	93	91	91	4	106	105	107	105	108	106
5	147	149	148	146	146	147	5	291	302	304	300	302	300	5	235	209	205	186	201	207

Conjunto 6

"A" Termo Plástico							"B" PMMA							"C" Base d'água						
Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média	Posição de leitura	Leituras					Média
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1	147	144	144	145	143	145	1	226	220	221	219	222	222	1	188	179	180	185	182	183
2	105	102	96	98	96	99	2	169	167	166	166	167	167	2	125	124	120	120	123	122
3	122	113	117	122	120	119	3	171	169	165	164	162	166	3	182	181	177	171	179	178
4	97	103	100	100	108	102	4	160	159	162	158	157	159	4	102	105	101	106	103	103
5	196	215	215	196	205	205	5	157	157	151	154	152	154	5	267	260	255	248	252	256

Figura 8: Exemplo de planilha utilizada na medição da retrorrefletividade com o uso de retrorrefletômetro horizontal.

Verificação Visual das Condições dos Materiais Testados Durante o Experimento

A análise visual mostrou um desgaste muito maior do material nas posições 2 (dois) e 4 (quatro), por conta da passagem dos eixos dos veículos (trilha de roda). A posição 5 (extrema direita) apresentou o menor desgaste, porque os condutores dos veículos evitam essa posição (paralaxe).

Análise do Comportamento da Sinalização

Os resultados demonstraram que a retrorrefletividade diminuiu com o tempo para todos os materiais testados, observando seu desgaste físico (não houve reaplicação da sinalização ao longo do experimento). A retrorrefletividade parece ter-se estabilizado ao longo do tempo, porém, próximo ao fim do experimento houve dificuldade nas leituras devido à cada vez menor quantidade de material de sinalização no pavimento.

Salles et al. (2015) desenvolveram um estudo similar sob as condições e as normas nacionais. O estudo partiu de uma avaliação, ao longo de dois anos, de três segmentos viários experimentais: um rodoviário e dois urbanos, com diferentes tipos de demarcações e materiais. No experimento, observaram que o tráfego de veículos pesados foi responsável pelo maior desgaste da demarcação nas faixas mais solicitadas. Constataram, também, que a chuva, combinada com a passagem dos pneus dos veículos, provocou aumento da retrorrefletividade, devido ao efeito de limpeza dos elementos retrorrefletivos (microesferas de vidro) da sinalização. Outra observação registrada foi que a retrorrefletividade depende, também, da sua posição (longitudinal e transversal), e no trecho rodoviário a linha de eixo acabou apresentando maiores níveis de retrorrefletividade do que a linha de bordo, pois mais veículos trafegaram sobre a primeira, somado ao efeito de limpeza da chuva. Este efeito combinado do tráfego e a chuva foi observado no experimento na rodovia Presidente Dutra, onde se observou que os valores médios de retrorrefletividade com registro positivo de ocorrência chuva no dia anterior à monitoração foram inferiores àqueles quando a chuva ocorreu quatro dias antes. Aparentemente houve tempo suficiente para que o tráfego limpasse a sinalização, com a ajuda da chuva.

Conforme visto na análise estatística, para representação do efeito do tempo cronológico, a chuva foi uma das melhores formas encontradas como variável indicadora, assim como o número equivalente de eixos acumulado.

Na análise estatística, não ficou evidente que haja diferenças na perda da retrorrefletividade quanto ao posicionamento longitudinal. Isto significa que o efeito observado nos conjuntos 1(um) a 6 (seis) é o mesmo. Para o posicionamento transversal, contudo, observou-se que há diferenças

significativas, já que os valores de retorrefletividade nas posições 2 (dois) e 4 (quatro) correspondentes à trilha de roda dos veículos apresentaram maiores reduções do que as posições extremas, 1 (um) e 5 (cinco) e central, 3 (três).

Sob as mesmas condições de operação, conclui-se que, em termos de valores médios do material, sem considerações quanto ao posicionamento transversal, o material B apresentou o melhor desempenho do que A e C, do ponto de vista da manutenção da retrorrefletividade. Por outro lado, não há como desconsiderar o efeito do posicionamento transversal na análise, sendo que, assim, os materiais B e C apresentam desempenhos semelhantes e superiores ao material A.

É importante destacar que este experimento foi realizado de modo a obter resultados de uso e desgaste da estrutura acelerados e, portanto, as condições de sua execução foram bastante específicas. A disposição transversal das faixas demarcadas no pavimento maximizou a interação entre o tráfego e a estrutura da sinalização. Em condições normais de operação da rodovia, contudo, a intensidade dos movimentos de veículos sobre a sinalização horizontal é menos expressiva, já que ocorre apenas quando os veículos mudam de faixa, transpondo as linhas longitudinais que dividem as faixas de tráfego. Além disso, o experimento foi aplicado em área totalmente inserida em uma praça de pedágio, que possui características físico-operacionais distintas de outras seções da rodovia.

Conclusões

O experimento realizado permitiu avaliar o desempenho de três materiais de sinalização horizontal rodoviária quanto ao comportamento de sua retrorrefletividade ao longo do período de 11 (onze) meses contínuos, sob o efeito do tráfego de veículos, em condições reais de operação da rodovia.

Os valores de retorrrefletividade foram medidos com aparelho retrorrefletômetro calibrado, em pontos distribuídos sobre a área de demarcação da sinalização. A análise dos valores de retrorrefletividade consideraram, portanto, a localização física relativa dos pontos observados, tendo constatado que houve interação entre a posição e o tempo, sendo mais notável a diferença observada na retrorrefletividade das posições da seção transversal da faixa de rolamento ao longo do tempo: as posições “2” e “4”, que correspondem aos locais de passagem das rodas dos veículos, apresentaram valores expressivamente menores de retrorrefletividade do que as posições “1” (extremidade esquerda), “2” (central) e “5” (extremidade direita) da sinalização.

Outra observação que o experimento permitiu registrar foi o efeito da chuva sobre a retrorrefletividade, onde pode-se verificar que cada precipitação, independentemente de sua intensidade ou duração, foi seguida de aumento da retrorrefletividade. Este efeito positivo, entretanto, não poderia ser atribuído somente à chuva, lembrando que outros fatores poderiam

colaborar para o efeito de “limpeza” da superfície da sinalização horizontal, como por exemplo, o tráfego de veículos.

O comportamento dos três materiais experimentados foi diferente, e houve interação com o tempo. O material “B” apresentou maior estabilidade, ou menores variações, da retrorrefletividade durante o tempo deste experimento. Embora sua retrorrefletividade inicial fosse menor do que a dos materiais “A” e “C”, conservou-se melhor ao longo do tempo, em uso, do que aquelas.

Cabe observar, também, que valores maiores de retrorrefletividade não significam, necessariamente, melhor desempenho do material de sinalização, pois outros fatores devem ser computados em sua avaliação, como durabilidade, forma de utilização, custos de implantação e de manutenção, desgaste observado além de fatores psicológicos que dizem respeito à percepção do motorista, para o qual a visibilidade e compreensão são requisitos fundamentais. A retrorrefletividade pode contribuir para a visibilidade, porém a compreensão depende da conspicuidade da sinalização, ou seja, da capacidade do elemento viário ser identificado e compreendido corretamente (FUJII, 2017).

3.1.36. Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e flow number de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas.

Introdução

O incremento do volume de tráfego, das cargas por eixo e da pressão de enchimento dos pneus dos veículos comerciais nas rodovias no Brasil exige cada vez mais o emprego de materiais com maior resistência e durabilidade na construção dos revestimentos de pavimentos rodoviários. O incremento do tráfego também representa uma menor disponibilidade de interromper o tráfego para as atividades de conservação. Nesse sentido, a CCR NovaDutra constantemente está à procura de materiais que possam atender a essa problemática, para garantir a segurança e o conforto dos usuários.

Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades fundamentais e de principal interesse para o dimensionamento mecanicista de estruturas de pavimentos, de diversas misturas asfálticas e a influência da fonte dos agregados, da faixa granulométrica e do tipo de ligante asfáltico.

Os parâmetros mecânicos foram avaliados por meio de um programa laboratorial que incluiu os seguintes ensaios:

- Caracterização dos materiais e dosagem de misturas asfálticas;

- Módulo de resiliência (MR) por compressão diametral em três temperaturas;
- Resistência à tração (RT);
- Módulo dinâmico (E*);
- Compressão uniaxial de carga repetida (*Flow Number*, *FN*).

Seleção e Caracterização dos Materiais

1.1.1.5.Agregados Pétreos

Para composição das diversas misturas asfálticas deste estudo foram coletados três tipos de agregados minerais (brita 1", pedrisco e pó de pedra) de diferentes pedreiras, de acordo com a DNER PRO 120-97:

- Agregados graníticos do Estado de São Paulo - Pedreira Jambeiro do Grupo Serveng
- Agregados basálticos do Estado de São Paulo - Pedreira Sanson
- Agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro - Pedreira Pombal e Enfol

Os agregados foram submetidos aos ensaios de caracterização:

- Granulometria (AASHTO T-27 e AASHTO T-11)
- Desgaste por abrasão "Los Angeles" (ABNT NBR-6465)
- Durabilidade (AASHTO T-104-9)
- Densidade real, densidade aparente e a absorção (AASHTO T-85).
- Equivalente areia (DNER 054/97)

1.1.1.6.Ligantes Asfálticos

Para elaboração deste estudo foram selecionados 12 ligantes asfálticos disponíveis no mercado nacional, identificados conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Ligantes asfálticos programados para serem estudados nesta pesquisa.

Número	Ligante Asfáltico	Nomenclatura utilizada
1	CAP 50/70	CAP 50/70
2	CAP 30/45	CAP 30/45
3	Asfalto Modificado por Polímero 60/85	AMP1
4	Asfalto Modificado por Polímero 60/85	AMP2
5	Asfalto Modificado por Polímero 60/85	AMP3
6	Asfalto Modificado por Polímero 60/85	AMP4
7	Asfalto Modificado por Borracha moída de pneus tipo AB8	AB1
8	Asfalto Modificado por Borracha moída de pneus tipo AB8	AB2
9	Asfalto Modificado por Borracha moída de pneus tipo AB8	AB3
10	Ligante Asfáltico de Alto Módulo	AM1
11	Ligante Asfáltico de Alto Módulo	AM2
12	Ligante Asfáltico de Alto Módulo	AM3

Todos os ligantes asfálticos foram caracterizados através do conjunto de ensaios exigidos nas suas respectivas especificações técnicas.

Dosagem das Misturas Asfálticas

Foram elaborados os projetos de dosagem das misturas asfálticas, para os três tipos de agregados, as quatro granulometrias (Faixa III DERSA, EGL 19,0 mm, EGL 9,5 mm e GAP) e os doze ligantes asfálticos selecionados, totalizando 144 dosagens. A Tabela 6 apresenta, como exemplo, as principais propriedades volumétricas e características de dosagem das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo.

Tabela 6: Propriedades das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo.

ID MISTURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ligante Asfáltico	30/45	50/70	AMP1	AMP2	AMP3	AMP4	AB1	AB2	AB3	AM1	AM2	AM3
Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)	4.6	4.6	4.6	4.7	4.8	4.7	5.5	5.3	5.1	4.7	4.7	4.5
Absorção de asfalto pelo agregado (%)	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.4
Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm^3)	2.613	2.620	2.620	2.620	2.619	2.620	2.620	2.619	2.620	2.620	2.620	2.620
Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm^3)	2.643	2.644	2.644	2.643	2.639	2.642	2.647	2.640	2.643	2.646	2.635	2.644
Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm^3)	2.371	2.366	2.365	2.360	2.352	2.362	2.340	2.339	2.352	2.363	2.358	2.375
Massa específica máxima da mistura (g/cm^3)	2.460	2.462	2.461	2.455	2.450	2.457	2.436	2.437	2.446	2.459	2.452	2.466
Volume de vazios de projeto (%)	3.6	3.9	3.9	3.9	4.0	3.9	3.9	4.0	3.9	3.9	3.9	3.7
Vazios de agregado mineral (%)	13.4	13.8	13.9	14.1	14.5	14.1	15.6	15.4	14.8	14.0	14.2	13.4
Vazios cheios de asfalto (%)	72.9	71.9	71.7	72.7	72.5	72.3	74.8	74.0	73.8	72.2	72.9	72.4
Resistência à tração (MPa)	2.5	2.0	2.4	2.6	1.9	2.5	1.6	1.8	1.8	2.9	2.8	3.0
Relação Fíler/Asfalto	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.5	1.5	1.6	1.8	1.7	1.8
Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)	11.2	11.2	11.2	11.5	11.6	11.4	13.1	12.6	12.1	11.5	11.3	10.9

Na Figura 9 são apresentados, como exemplo, os valores de teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas Faixa III-DERSA, selecionados para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência, módulo dinâmico e flow number. Salienta-se que para as misturas asfálticas com granulometria Faixa III-DERSA, EGL19mm e EGL 9,5mm foi utilizado o volume de vazios de 4,0% para selecionar o teor de ligante de projeto, enquanto que para a mistura asfáltica Gap Graded foi selecionado o volume de vazios de 5,0%.

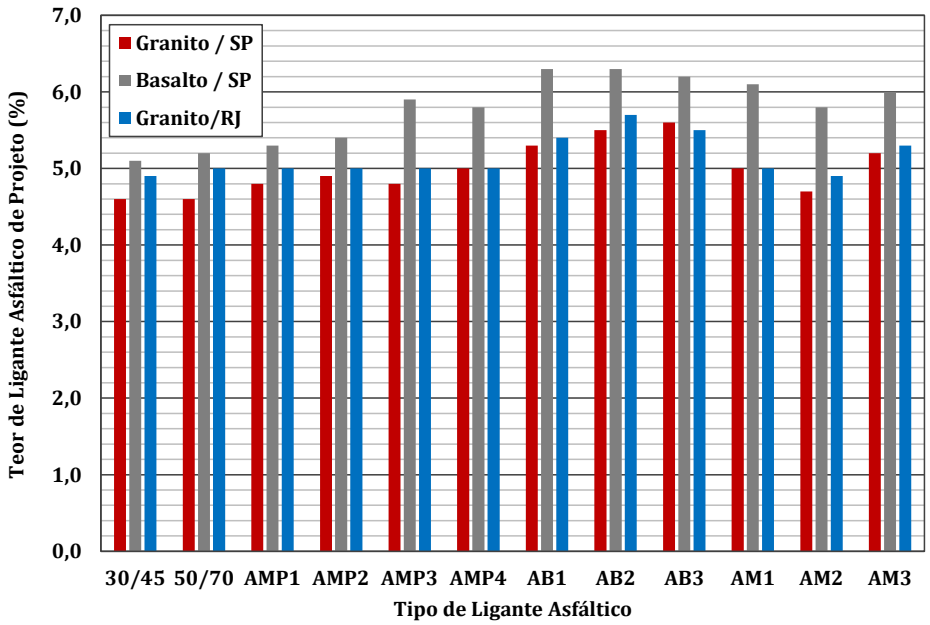


Figura 9: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas Faixa III-DERSA.

Determinação dos Parâmetros Mecânicos e Análise dos Resultados

Nesta seção do relatório apresentam-se os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração, módulo dinâmico e flow number das misturas asfálticas estudadas e é realizada uma análise desses parâmetros mecânicos.

1.1.1.7.Módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT)

O ensaio de MR foi executado na temperatura convencionalmente utilizada no Brasil de 25°C e, de forma complementar, o ensaio foi realizado também nas temperaturas de 21,1°C e 37,8°C, que são as temperaturas intermediárias utilizadas no ensaio de módulo dinâmico. Após execução do ensaio de módulo de resiliência também foi executado o ensaio de resistência à tração (RT) na temperatura de 25°C. Vale salientar que esses resultados apresentados, tanto no parâmetro MR como no RT, são a média de ensaios executados em três corpos de prova compactados no teor de projeto para o volume de vazios de projeto.

Na Figura 10 são apresentados, como exemplo, os resultados de MR das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos em função da temperatura. A construção dessa figura foi realizada da seguinte maneira:

- Os resultados de MR obtidos nas temperaturas de 21,1°, 25,0° e 37,8°C, foram utilizados para obter uma regressão linear para possibilitar o traçado de forma contínua da variação do módulo de resiliência entre 20,0° e 40,0°C,

- Para as misturas asfálticas com ligantes convencionais (CAP 30/45 e CAP 50/70), apresentam-se os valores médios de MR na Figura 7, em função da regressão linear obtida.

No caso das misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados, agruparam-se da seguinte maneira:

- em vermelho: ligantes asfálticos modificados por polímero: AMP1, AMP2, AMP3 e AMP4;
- em verde: ligantes asfálticos modificados por pneu de borracha moída: AB1, AB2 e AB3;
- em azul: ligantes asfálticos de alto módulo: AM1, AM2 e AM3.

Nota-se na Figura 10 que os valores de MR das misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados são apresentados no formato de faixas, as quais foram construídas com os menores e maiores valores obtidos nos ensaios. Com relação aos resultados de resistência à tração, na Figura 11 são apresentados esses valores para as misturas asfálticas estudadas na Faixa III DERSA.

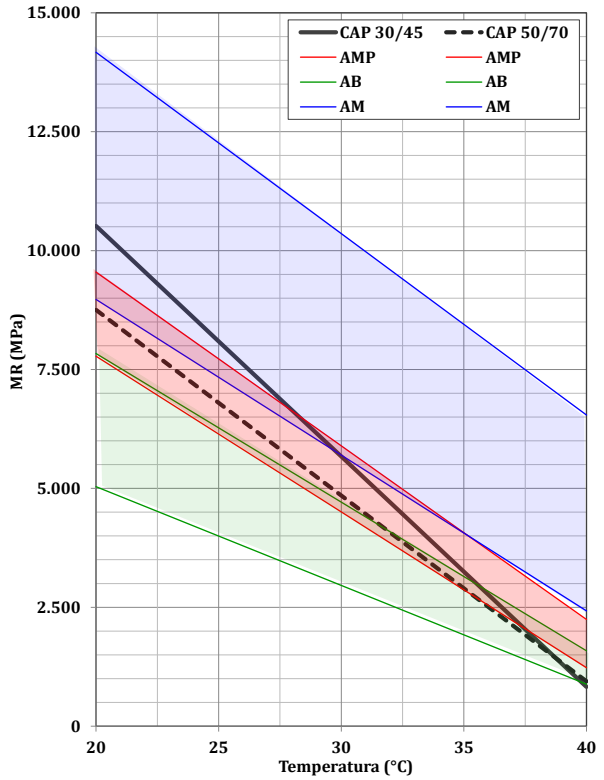


Figura 10: Resultados de MR das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos, em função da temperatura de ensaio.

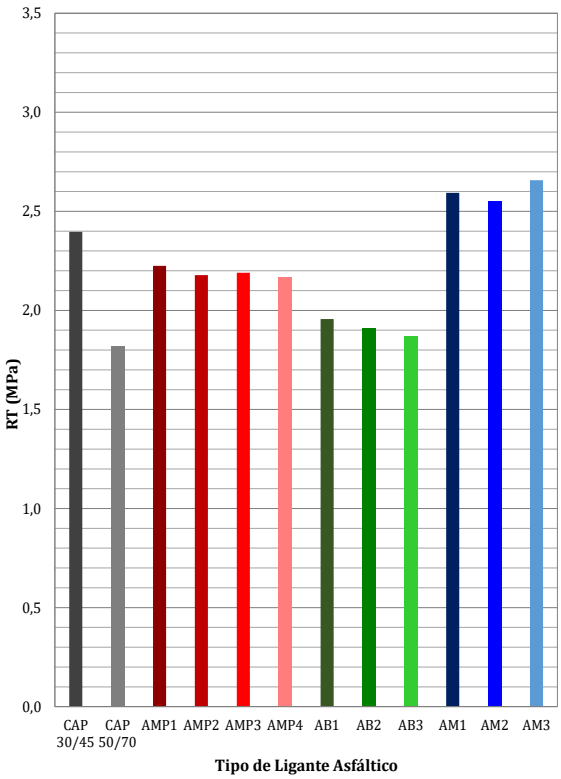


Figura 11: Resultados de RT das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos.

1.1.1.8.Módulo dinâmico

A Figura 12 apresenta as curvas mestres construídas a partir dos resultados de E* na frequência reduzida das misturas asfálticas com granulometria Faixa III-DERSA, agregados graníticos do Estado de São Paulo e com os doze tipos de ligantes asfálticos utilizados neste estudo.

1.1.1.9.Flow Number

Os ensaios de flow number foram executados na temperatura de 54,4°C com tensão desvio de 600kPa e sem confinamento, logo após conclusão do ensaio de MD. De cada mistura, foram determinados o valor médio e o desvio padrão (obtido de 3 CPs) do número de ciclos necessário para atingir o ponto de fluência na mistura asfáltica. Na Figura 13 são apresentados, como exemplo, os resultados obtidos no ensaio de flow number nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo.

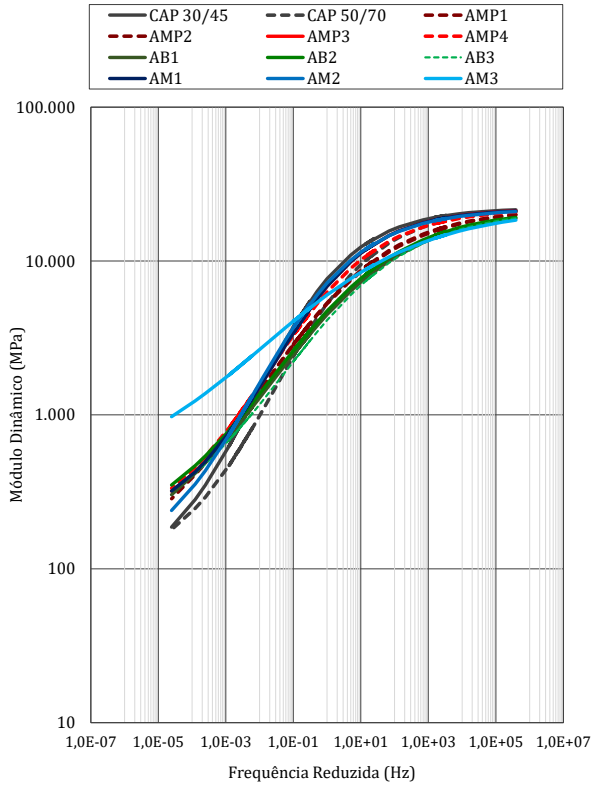


Figura 12: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

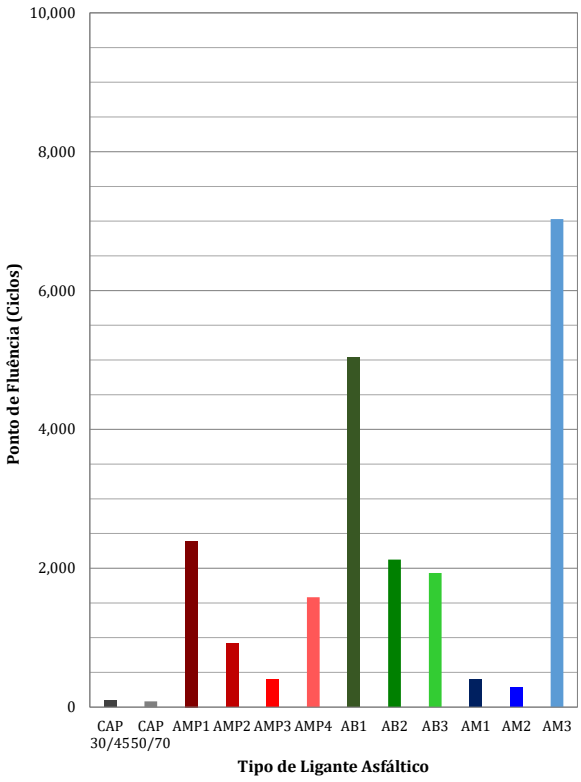


Figura 13: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

Considerações Finais

Os parâmetros mecânicos das misturas asfálticas são recomendados para a adequada caracterização, seleção e dosagem dos materiais empregados na construção e restauração de

pavimentos. Além disso, esses parâmetros são fundamentais nos processos de dimensionamento de estruturas de pavimentos que aplicam conceitos mecanicistas.

Este estudo avaliou o emprego de diversos materiais para compor misturas asfálticas usualmente disponíveis nos Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. As combinações de três fontes de agregados, quatro faixas granulométricas e doze ligantes asfálticos selecionados produziram 144 misturas asfálticas nas quais foram avaliados os parâmetros de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR), módulo dinâmico (E*) e flow number (FN). A análise estatística realizada nesses parâmetros possibilitou avaliar tendências de comportamentos que foram resumidas na Tabela 7.

Excetuando o fator fonte de agregados no módulo dinâmico, observa-se na Tabela 6.1 que todos os parâmetros avaliados neste estudo foram significativos para todos os parâmetros. Assim, conclui-se que é muito importante estudar as propriedades das misturas asfálticas para sua adequada seleção e emprego em projetos de pavimentos rodoviários.

Com relação à fonte de agregados, observou-se que de forma genérica os agregados graníticos do Estado de São Paulo apresentaram os maiores valores de rigidez, resistência à tração e resistência à deformação permanente. Quanto à faixa granulométrica, os resultados mais elevados na RT, E* e FN foram obtidos na EGL 19mm, e para o MR foram obtidos na Faixa III DERSA.

Tabela 7: Observações estatísticas realizadas nos valores médios dos parâmetros avaliados.

Parâmento	Fonte de Agregados	Faixa Granulométrica	Tipo de ligante asfáltico
Módulo de Resiliência	→ Significativo → Maior valor no Granito SP → Menor valor no Basalto SP	→ Significativo → Maior valor na Faixa III → Menor valor no *Gap Graded*	→ Significativo → Maior valor no AM → Menor valor no CAP 50/70
Resistência à Tração	→ Significativo → Maior valor no Granito SP → Menor valor no Basalto SP	→ Significativo → Maior valor no EGL 19mm → Menor valor no *Gap Graded*	→ Significativo → Maior valor no AM → Menor valor no CAP 50/70
Módulo Dinâmico	→ Não Significativo → Maior valor no Granito RJ → Menor valor no Basalto SP	→ Significativo → Maior valor no EGL 19mm → Menor valor no *Gap Graded*	→ Significativo → Maior valor no AM → Menor valor no CAP 50/70
Flow Number	→ Significativo → Maior valor no Granito SP → Menor valor no Granito RJ	→ Significativo → Maior valor no EGL 19mm → Menor valor no *Gap Graded*	→ Significativo → Maior valor no AM → Menor valor no CAP 50/70

Nos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico observou-se que, em temperaturas intermediárias, o ligante asfáltico de alto módulo (AM) produz misturas asfálticas com maior rigidez seguido pelo CAP 30/45, e asfaltos modificados por polímero (AMP), por borracha (AB) e o CAP 50/70 apresentam rigidez muito próxima. No entanto, nas temperaturas elevadas de ensaio, os ligantes asfálticos modificados AM, AMP e AB apresentaram rigidez superior aos

ligantes asfálticos convencionais CAP 30/45 e CAP 50/70. Esse comportamento variável em função da temperatura de execução dos ensaios é um indicativo de que os ligantes asfálticos modificados têm menor susceptibilidade térmica e resistiriam melhor às deformações em pavimentos sujeitos a elevadas temperaturas.

Finalmente, pode se afirmar que os resultados obtidos nesta pesquisa consistem em uma base de dados das propriedades fundamentais das misturas asfálticas para sua futura seleção e emprego em atividades de conservação da Rodovia Presidente Dutra e também para projetos de construção de novas estruturas relacionadas a faixas adicionais e marginais da rodovia. A seleção de materiais adequados ao tráfego e ao clima representa maior durabilidade dos pavimentos, com menores intervenções, gerando economia e trazendo conforto e segurança aos usuários da Rodovia.

3.1.37. Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da BGTC

Introdução

As bases e sub-bases cimentadas são utilizadas no Brasil principalmente na construção de pavimentos submetidos a tráfegos elevados. A britada graduada tratada com cimento (BGTC) é utilizada para atender essa necessidade. A BGTC é definida como o produto resultante da mistura em usina, de pedra britada, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos, em proporção determinadas experimentalmente. Existem poucas especificações que indiquem o tipo de cimento mais adequado que deve ser utilizado na composição da BGTC, nem estudos que tenham investigado as propriedades mecânicas desta mistura com distintos ligantes hidráulicos. Tampouco há estudos no Brasil que tenham abordado os efeitos da demora entre a mistura dos componentes em usina e a compactação em pista, nas propriedades mecânicas da BGTC.

Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas da brita graduada tratada com cimento e o efeito do tempo transcorrido entre a mistura dos componentes da BGTC e a compactação em campo. Para atender ao objetivo principal foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Seleção dos materiais da BGTC, por meio de um programa laboratorial de caracterização;
- Desenvolvimento de um programa laboratorial de dosagem da BGTC.

- Realização de um programa experimental de ensaios para determinar as propriedades mecânicas da BGTC em função do tipo de cimento e da demora entre a mistura e a compactação. Os parâmetros investigados foram:

– resistência à compressão simples (RCS);

– resistência à tração por compressão diametral (RT_{cd})

– resistência à tração na flexão (RT_f)

– módulo de resiliência (MR);

– módulo dinâmico (MD);

– expansão / retração.

- Análise estatística para avaliar a influência dos fatores nos parâmetros citados.

Seleção e Caracterização dos Materiais

1.1.1.10. Agregados

Neste estudo foram selecionados dois agregados, um granito e o outro basalto. Os agregados foram coletados nas suas granulometrias comerciais: brita 2", brita 1", pedrisco e pó de pedra.

- **Granulometria dos agregados:** neste estudo foi selecionada a faixa granulométrica recomendada pela DERSA (ET-DE-P00/2009). A Figura 14 apresenta as granulometrias dos materiais selecionados para este estudo, juntamente com a faixa adotada.

- **Abrasão "Los Angeles"**: esse ensaio foi executado de acordo com as recomendações da norma DNER-ME 038/95. Os resultados obtidos mostram que o basalto (brita 1" = 16%; pedrisco =14%) apresentou maior resistência do que o granito (brita 1"=33,5%; pedrisco=32%).

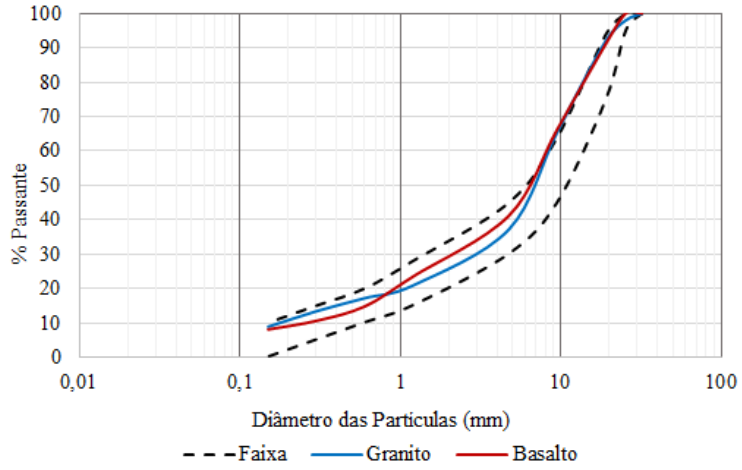


Figura 14: Granulometria da composição da BGTC com agregados graníticos e basálticos

- **Densidade e absorção**: a densidade real, a densidade aparente e a absorção dos agregados foram determinadas de acordo com a AASHTO T-85. Os resultados desses parâmetros são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Densidade real, densidade aparente e absorção dos agregados selecionados.

Fração	Granito			Basalto		
	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)
Brita 2"	2,655	2,634	0,3	2,987	2,892	1,1
Brita 1"	2,661	2,621	0,6	2,980	2,884	1,1
Pedrisco	2,661	2,630	0,8	3,005	2,861	1,7
Pó de Pedra	2,665	2,624	0,6	3,005	2,860	1,7

- **Índice de forma**: foi determinado de acordo com a norma ABNT NBR 7809, pelo método do paquímetro, sendo que os agregados avaliados atenderam a especificação.
- **Durabilidade**: a avaliação da durabilidade dos agregados foi realizada de acordo com as recomendações da norma DNER-ME 089/94, pelo emprego da solução de sulfato de sódio. Neste estudo, todos os agregados atenderam a especificação com perdas inferiores a 12%.

1.1.1.11. Cimento Portland

Para o programa laboratorial desta pesquisa foram selecionados dois tipos de cimentos Portland comumente encontrados na região da Rodovia Presidente Dutra. Um é o tipo CP II E 32 e o outro é o CP III 32.

Dosagem da Brita Graduada Tratada com Cimento

Os parâmetros que devem ser determinados na dosagem da BGTC são massa específica seca máxima (MES_{max}) e umidade ótima (W_{ot}), de forma que o valor da resistência à compressão simples (RCS) se situe no intervalo de 3,5MPa a 6,2MPa, aos 28 dias de cura. As normas nacionais recomendam o emprego da energia intermediária para a determinação dos parâmetros de dosagem. Contudo, na pesquisa desenvolvida por Klinsky e Faria (2015), determinou-se que a energia modificada produz ganhos de resistência e rigidez, inclusive com teores de cimento mais baixos que os habituais.

Em função desses resultados, neste estudo foi empregada a energia modificada e a compactação foi realizada com o emprego de um compactador vibratório, conforme mostra a Figura 15, seguindo as recomendações da Asphalt Academy (2009). Para compactar um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, simulando a energia modificada gerada por um soquete Proctor grande convencional, foi necessário aplicar a compactação vibratória durante 20 segundos em cada uma das quatro camadas de compactação.



Figura 15: Compactador vibratório utilizado para a moldagem dos corpos de prova de BGTC.

Os parâmetros de dosagem das seis misturas de BGTC, com agregados graníticos e basálticos, com distintos teores de cimento CP II E 32 e CP III são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Resultados da dosagem dos agregados graníticos.

Tipo de cimento	**CPII E 32**			**CP III**		
Teor de cimento (%)	**2,0**	**3,0**	**4,0**	**2,0**	**3,0**	**4,0**
Massa específica seca máxima (g/cm3)	2,294	2,294	2,294	2,297	2,334	2,330
Umidade ótima	6,1	6,1	6,1	6,15	6,15	6,2
RCS aos 28 dias (MPa)	2,5	2,5	2,5	2,3	3,6	5,2

Tabela 10: Resultados da dosagem dos agregados basálticos.

Tipo de cimento	**CPII E 32**			**CP III**		
Teor de cimento (%)	**2,0**	**3,0**	**4,0**	**2,0**	**3,0**	**4,0**
Massa específica seca máxima (g/cm3)	2,451	2,475	2,484	2,451	2,475	2,484
Umidade ótima	5,7	6,0	6,6	5,7	6,0	6,6
RCS aos 28 dias (MPa)	2,9	4,4	6,0	2,9	4,4	6,0

Determinação dos Parâmetros Mecânicos

Para alcançar o objetivo foi desenvolvido um planejamento de experimentos (72 experimentos), que foi empregado para elaborar um programa laboratorial que possibilite avaliar a influência dos fatores nos parâmetros mecânicos da BGTC. Os parâmetros obtidos na dosagem foram empregados para a moldagem de, no mínimo, 3 CPs nas dimensões apropriadas para cada um dos ensaios, usando o compactador vibratório.

Na Tabela 11 são apresentados os experimentos para a BGTC com agregados graníticos e com agregados basálticos. Cada experimentou foi submetido aos seguintes ensaios: ruptura por compressão simples (NBR 5739); ruptura por compressão diametral (DNIT ME 136/2010); ruptura à tração na flexão (NBR 12142); módulo de resiliência diametral (DNIT ME 135/2010); módulo dinâmico axial (AASHTO TP 79/2011); retração/expansão (DNIT ME 053/2004).

Tabela 11: Experimentos planejados para a BGTC com agregados graníticos e com agregados basálticos.

Agregados graníticos	Agregados basálticos

Experimento de BGTC	Fonte de Agregados	Tipo de Cimento Portland	Teor de Cimento (%)	Demora (hrs)	Cura (dias)
1	Granito (SP)	CP II	2	0	7
2	Granito (SP)	CP II	2	0	28
3	Granito (SP)	CP II	3	0	7
4	Granito (SP)	CP II	3	0	28
5	Granito (SP)	CP II	4	0	7
6	Granito (SP)	CP II	4	0	28
7	Granito (SP)	CP II	2	2	7
8	Granito (SP)	CP II	2	2	28
9	Granito (SP)	CP II	3	2	7
10	Granito (SP)	CP II	3	2	28
11	Granito (SP)	CP II	4	2	7
12	Granito (SP)	CP II	4	2	28
13	Granito (SP)	CP II	2	4	7
14	Granito (SP)	CP II	2	4	28
15	Granito (SP)	CP II	3	4	7
16	Granito (SP)	CP II	3	4	28
17	Granito (SP)	CP II	4	4	7
18	Granito (SP)	CP II	4	4	28
19	Granito (SP)	CP III	2	0	7
20	Granito (SP)	CP III	2	0	28
21	Granito (SP)	CP III	3	0	7
22	Granito (SP)	CP III	3	0	28
23	Granito (SP)	CP III	4	0	7
24	Granito (SP)	CP III	4	0	28
25	Granito (SP)	CP III	2	2	7
26	Granito (SP)	CP III	2	2	28
27	Granito (SP)	CP III	3	2	7
28	Granito (SP)	CP III	3	2	28
29	Granito (SP)	CP III	4	2	7
30	Granito (SP)	CP III	4	2	28
31	Granito (SP)	CP III	2	4	7
32	Granito (SP)	CP III	2	4	28
33	Granito (SP)	CP III	3	4	7
34	Granito (SP)	CP III	3	4	28
35	Granito (SP)	CP III	4	4	7
36	Granito (SP)	CP III	4	4	28

Experimento de BGTC	Fonte de Agregados	Tipo de Cimento Portland	Teor de Cimento (%)	Demora (hrs)	Cura (dias)
37	Basalto (SP)	CP II	2	0	7
38	Basalto (SP)	CP II	2	0	28
39	Basalto (SP)	CP II	3	0	7
40	Basalto (SP)	CP II	3	0	28
41	Basalto (SP)	CP II	4	0	7
42	Basalto (SP)	CP II	4	0	28
43	Basalto (SP)	CP II	2	2	7
44	Basalto (SP)	CP II	2	2	28
45	Basalto (SP)	CP II	3	2	7
46	Basalto (SP)	CP II	3	2	28
47	Basalto (SP)	CP II	4	2	7
48	Basalto (SP)	CP II	4	2	28
49	Basalto (SP)	CP II	2	4	7
50	Basalto (SP)	CP II	2	4	28
51	Basalto (SP)	CP II	3	4	7
52	Basalto (SP)	CP II	3	4	28
53	Basalto (SP)	CP II	4	4	7
54	Basalto (SP)	CP II	4	4	28
55	Basalto (SP)	CP III	2	0	7
56	Basalto (SP)	CP III	2	0	28
57	Basalto (SP)	CP III	3	0	7
58	Basalto (SP)	CP III	3	0	28
59	Basalto (SP)	CP III	4	0	7
60	Basalto (SP)	CP III	4	0	28
61	Basalto (SP)	CP III	2	2	7
62	Basalto (SP)	CP III	2	2	28
63	Basalto (SP)	CP III	3	2	7
64	Basalto (SP)	CP III	3	2	28
65	Basalto (SP)	CP III	4	2	7
66	Basalto (SP)	CP III	4	2	28
67	Basalto (SP)	CP III	2	4	7
68	Basalto (SP)	CP III	2	4	28
69	Basalto (SP)	CP III	3	4	7
70	Basalto (SP)	CP III	3	4	28
71	Basalto (SP)	CP III	4	4	7
72	Basalto (SP)	CP III	4	4	28

1.1.1.12. Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples, RCS, foi realizado em CPs de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, moldados no compactador vibratório em quatro camadas com aplicação de vibração de 20 segundos em cada camada. Após a compactação, os CPs foram mantidos em câmara úmida durante 7 e 28 dias, conforme o planejamento realizado. Na Tabela 12 são apresentados os resultados do ensaio de RCS nos experimentos realizados com agregados graníticos. De forma geral, nota-se que há uma redução de resistência conforme aumenta a demora entre a mistura e a compactação e que há uma tendência geral da BGTC apresentar maior resistência quando é utilizado o CP III, independentemente do tempo de cura, da demora entre a mistura e a compactação ou o teor de cimento.

Tabela 12: Resultados do ensaio de RCS com agregados graníticos e cimento CP II e CP III.

Tipo de Cimento	**CP II**						**CP III**					
Teor de Cimento (%)	**7 dias**			**28 dias**			**7 dias**			**28 dias**		
	Demora (horas)			**Demora**			**Demora**			**Demora**		
	0	**2**	**4**	**0**	**2**	**4**	**0**	**2**	**4**	**0**	**2**	**4**
2,0	2,59	2,30	2,01	3,00	2,68	2,45	3,14	3,42	2,44	4,76	4,29	3,46
3,0	3,79	3,25	3,34	4,94	4,29	4,67	3,81	4,56	3,35	6,23	6,40	4,96
4,0	5,81	5,62	4,67	7,14	7,20	6,61	6,12	5,25	4,91	10,11	8,81	7,09

Na Tabela 13 são apresentados os resultados de RCS das misturas de BGTC produzidas com agregados basálticos do Estado de São Paulo, onde pode-se observar a tendência de redução de resistência em função do tempo da demora entre a mistura e a compactação para as misturas com 2% de cimento, aos 7 e 28 dias de cura. No entanto, para os teores de 3% e 4%, observa-se também redução de resistência aos 7 dias de cura, mas aos 28 dias de cura observa-se uma tendência inversa.

Tabela 13: Resultados do ensaio de RCS com agregados basálticos e cimento CP II e CP III.

Tipo de Cimento	**CP II**						**CP III**					
Teor de Cimento (%)	**7 dias**			**28 dias**			**7 dias**			**28 dias**		
	Demora (horas)			**Demora**			**Demora**			**Demora**		
	0	**2**	**4**	**0**	**2**	**4**	**0**	**2**	**4**	**0**	**2**	**4**
2,0	3,33	2,66	2,55	4,91	3,87	3,94	3,41	2,86	2,73	4,40	4,03	4,13
3,0	3,82	3,98	3,84	5,24	5,61	5,68	4,50	3,81	4,48	5,62	6,40	6,67
4,0	3,88	5,21	5,36	6,49	5,85	7,78	5,89	5,92	5,33	7,25	9,86	9,43

Quanto aos efeitos comparativos do efeito do tipo de cimento empregado na BGTC na RCS após 0 horas, 2 horas e 4 horas de demora entre a mistura e a compactação, pode-se observar de modo geral que o emprego do CP III produziu misturas de BGTC com valores de RCS superiores aos valores obtidos na BGTC com CP II, quando foram utilizados agregados basálticos.

1.1.1.13. Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio compressão diametral de CPs cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 60 mm de altura foi empregado para obter o parâmetro de resistência à tração (RT). Os CPs foram moldados no compactador vibratório em camada única durante 40 segundos. Os resultados do ensaio de RT das misturas com agregados graníticos mostram uma tendência de redução de resistência após demora entre a mistura e a compactação, e ficou mais evidente após 4 horas, na BGTC com CP II, aos 28 dias. No caso da BGTC com CP III não houve um comportamento muito bem definido. Além disso, os resultados de RT, após 0, 2 e 4 horas de demora mostra que em todos os casos a BGTC com cimento CP III apresentou maior resistência à tração por compressão diametral. Em relação as misturas com agregados basálticos, pode-se observar que não houve um comportamento bem definido quanto ao incremento da demora entre a mistura e a compactação dos corpos de prova e, neste caso, tampouco há uma tendência muito clara quanto a influência do tipo de cimento.

1.1.1.14. Módulo de Resiliência

O ensaio de compressão cíclica diametral de corpos de prova cilíndricos foi empregado para determinação do módulo de resiliência, MR, das misturas de BGTC. Os CPs foram moldados de forma similar aos CPs empregados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A partir dos resultados dos ensaios, pode-se observar que em todas as misturas com agregados graníticos, a rigidez foi sempre superior nas misturas com o cimento CP III, independente do teor de cimento, do tempo de cura ou da demora. No caso das misturas com agregados basálticos, pode-se observar que não há um comportamento bem definido com relação à demora entre a mistura e a compactação da BGTC e também não há um comportamento muito claro do parâmetro de MR quanto ao tipo de cimento empregado na BGTC. No entanto, pode-se comprovar que o incremento de cimento na BGTC e o tempo de cura, aumentam a rigidez deste material.

1.1.1.15. Módulo Dinâmico

O parâmetro módulo complexo ou módulo dinâmico, MD, é empregado em misturas asfálticas para avaliar a rigidez desses materiais em temperaturas e frequências distintas. Neste estudo, o ensaio foi realizado de acordo com AASHTO T 342-11, em CPs de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, compactados com compactador vibratório. O ensaio foi executado com aplicação do carregamento axial nas frequências de 10Hz. A Figura 16 mostra a execução deste ensaio.



a) CP testado na prensa universal b) Detalhe dos LVDTs

Figura 16: Execução do ensaio de módulo dinâmico em CPs de BGTC.

Os resultados de MD das misturas de BGTC com agregados graníticos mostram que há uma tendência de redução de rigidez conforme se incrementa o tempo de demora, para todos os teores de cimento utilizados. Em relação ao tempo de demora de 0, 2 e 4 horas, nota-se que a BGTC produzida com cimento CP III apresentou maior rigidez, quando comparada com cimento CP II. Apenas aos 7 dias com 4% de cimento a BGTC com CP II apresentou maiores valores de MD.

Em relação às misturas produzidas com agregados basálticos, pode-se notar que para o teor de cimento de 2%, houve um decréscimo de rigidez para 2 e 4 horas de demora entre a mistura e a compactação da BGTC. Já nos teores de 3% e 4% de cimento, não houve um comportamento bem definido. Comparando os resultados referentes a demora, observa-se de forma mais ou menos geral que o cimento Portland do tipo CP III produziu BGTC com rigidez superior à BGTC com cimento Portland do tipo CP II.

1.1.1.16. Ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos

Para produzir os CPs para o ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos adotou-se a configuração recomendada pela ASTM C 1609 para determinação do módulo de rigidez na flexão. O procedimento de execução desse ensaio está ilustrado na Figura 17.

5.4.5.5.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão da BGTC produzida com agregados graníticos e das misturas com agregados basálticos mostram que não houve um comportamento muito bem definido quanto à demora entre a mistura e a compactação dos CPs e que o cimento Portland do tipo CP III produziu BGTC com resistência superior à BGTC com cimento tipo CP II. De forma geral, pode-se observar que o incremento do teor de cimento na BGTC aumenta a resistência à tração na flexão, e esses incrementos são mais consideráveis após 28 dias de cura. Com relação à demora entre a mistura e a compactação, nota-se que esse parâmetro é mais crítico no tempo de cura de 7 dias, quando comparado com os efeitos observados nos resultados aos 28 dias de cura.

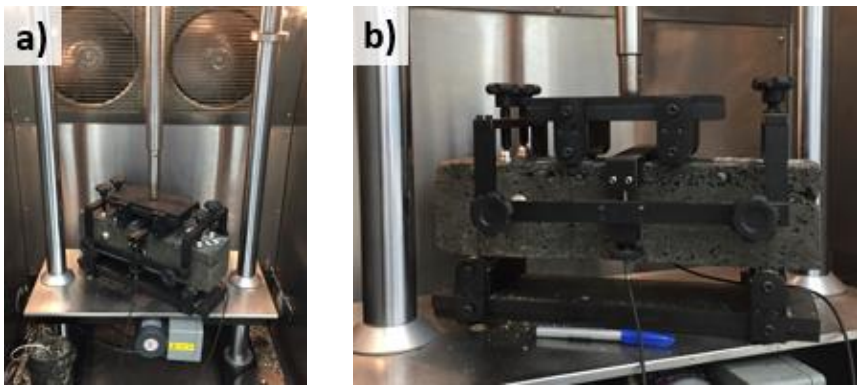


Figura 17: Execução do ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos: a) vista do equipamento na UTM; b) detalhe da fixação lateral dos LVDTs

5.4.5.5.2 Módulo flexural

O ensaio de módulo flexural ou módulo de resiliência na flexão foi executado nos CPs prismáticos com a frequência de carregamento de 1Hz, sendo 0,1s de carregamento e 0,9s de descanso. Os

resultados das misturas BGTC com agregados graníticos mostram que o CP III produziu BGTC com resistência superior à BGTC com CP II. O mesmo comportamento também foi observado para as misturas de BGTC com agregados basálticos. No módulo flexural também foi comprovado o efeito do incremento do teor de cimento na BGTC, conforme aumenta, a rigidez se incrementa. De igual maneira, o tempo de cura de 28 dias mostrou maiores valores de rigidez, quando comparados com o módulo flexural aos 7 dias de cura. Com relação à demora entre a mistura e a compactação, não é notado um comportamento bem definido para BGTC.

1.1.1.17. Ensaio de Expansão / Retração

O ensaio de expansão / retração foi realizado nas misturas de BGTC em CPs moldados também no compactador vibratório, com seção quadrada de 7,5x7,5cm e comprimento de 28,5cm. Após a compactação, os CPs foram deixados ao ar livre na sombra para avaliar a expansão / retração da BGTC durante 28 dias. Pode-se verificar que todas as misturas de BGTC apresentaram retração. Observa-se para a BGTC com agregados basálticos que o incremento de 2% de cimento para 3% de cimento, provocou um leve incremento da retração, mas esse incremento é mais notório quando o incremento do cimento é de 3% a 4%. Para a BGTC com agregados graníticos, o incremento do teor de cimento produziu um menor aumento da retração. Considerando o limite de retração de 200$\mu\varepsilon$ aos 7 dias (AUSTROADS, 2006) para evitar fissuras excessivas no pavimento, pode-se observar que todas as misturas atenderiam essa exigência. Quando analisados os resultados em função do tempo de cura, observa-se que o incremento do tempo de cura incrementa a retração, mas o período mais crítico acontece dos 0 aos 7 dias, principalmente para a BGTC com agregados basálticos e 4% de cimento CPII e CPIII.

Análise dos Resultados

A combinação dos fatores avaliados neste estudo originou um programa fatorial com 72 experimentos, que foi analisado com a ferramenta estatística ANOVA, para os diversos parâmetros mecânicos estudados. A Tabela 14 apresenta um resumo dessa análise onde se observa a significância estatística desses fatores nas propriedades da BGTC.

Tabela 14: Resumo da análise realizada com a ANOVA.

Fatores Avaliados	**RCS**	**RT_{CD}**	**RT_f**	**MR**	**MD**	**MF**	**Retração**
Agregados (A)	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Cimento (B)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Teor de Cimento (C)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Demora (D)	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Cura (E)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Resistência à compressão simples, RCS: pode-se verificar a partir dos resultados de ANOVA que todos os fatores com exceção da demora (D) foram significativos ou influentes neste parâmetro. Assim, pode-se concluir que a demora entre a mistura e a compactação não afeta a

resistência à compressão simples da BGTC, porém, sabe-se que isto não é verdadeiro. Os resultados deste estudo podem não ter mostrado essa influência devido ao curto tempo utilizado nesta demora.

Resistência à tração por compressão diametral, **RT_{CD}**: os resultados de ANOVA para a RT_{CD} também mostraram que a demora não foi um fator significativo estatisticamente, mas que pode ter uma tendência de redução de RT conforme a demora se incrementa.

Resistência à tração na flexão, RT_f: os resultados de ANOVA mostram que neste parâmetro todos os fatores avaliados foram significativos estatisticamente incluindo a demora.

Módulo de resiliência, MR: para o parâmetro MR pode-se observar que apenas o fator Agregados (A) não foi significativo estatisticamente no ANOVA.

Módulo dinâmico, MD: nesse parâmetro foi possível observar que somente a Demora (D) foi um fator não significativo, enquanto que os demais fatores influenciam na rigidez da BGTC.

Módulo flexural, MF: os resultados da ANOVA mostram que todos os fatores avaliados foram significativos, o que denota a influência destes na rigidez avaliada por meio deste ensaio.

Retração: os resultados da ANOVA para a retração mostra que, com exceção do tipo de cimento (B), todos os fatores foram significativos estatisticamente neste parâmetro, indicando à sua influência no comportamento da BGTC.

Conclusões

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica com relação aos efeitos destes fatores no comportamento e desempenho da BGTC e comprovou-se a escassez de estudos recentes no Brasil com relação a este material. Alguns trabalhos com abordagens similares a este estudo foram encontrados em publicações relacionadas a pesquisas desenvolvidas na Austrália, na Europa e nos Estados Unidos.

A partir da observação dos resultados e sua análise por meio da ferramenta ANOVA, podem ser realizadas as seguintes conclusões:

- Com relação ao tipo de cimento utilizado na BGTC, observou-se que o cimento CP-III-40 produziu BGTC com maior RCS, RT_{CD} e RT_f, assim como maior rigidez, quando analisados por meio de ensaios de MR, MD e módulo flexural, em comparação com o CP-II-E-32, e esse comportamento é mais notório para os teores de 4% de cimento aos 28 dias de cura. Vale notar que, a retração também foi maior nos casos em que foi utilizado o CP-III-40.

- Os agregados basálticos produziram, de forma geral, misturas de BGTC com maiores valores de resistência e rigidez, quando comparadas com as misturas produzidas com agregados graníticos. Também se observou que a retração é levemente superior ao se empregar agregados de origem basáltica na BGTC.
- Com relação à demora entre a mistura e a compactação da BGTC, não foi notado um comportamento muito bem definido. Em alguns parâmetros, a ANOVA indicou que é um fator significativo, enquanto que em outros não, como foi observado na Tabela 15. Sabe-se que demora excessiva, entre a mistura e a compactação, é prejudicial para a resistência e rigidez do concreto. Porém, é possível que esse fator não tenha sido tão significativo neste estudo quanto se esperava, em função da forma em que se conservou a mistura da BGTC até a sua compactação. Mesmo assim, é um fator que deve ser considerado e limitado na execução da BGTC para garantir o desempenho adequado deste material.
- Conforme era esperado, o incremento do teor de cimento produziu aumento na resistência e na rigidez da BGTC, assim como na sua retração. Os incrementos foram mais expressivos quando a transição foi de 3 para 4% de cimento, quando comparada com a transição de 2 para 3% de cimento.
- No fator tempo de cura da BGTC observou-se também um comportamento já bem definido para materiais cimentados, conforme se incrementou este tempo os diversos parâmetros mecânicos avaliados neste estudo tenderam a aumentar, assim como a retração.

Finalmente, conclui-se que todos os fatores avaliados neste estudo influenciam de uma maneira ou de outra o comportamento da BGTC. Assim, é necessário continuar estudando este material para poder utilizá-lo de forma mais racional e obter os melhores benefícios da sua aplicação em pavimentos semirrígidos.

3.1.38. Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas

Introdução

O asfalto borracha é utilizado em atividades de pavimentação asfáltica há aproximadamente 50 anos nos Estados Unidos, e no Brasil sua primeira aplicação foi há mais de 15 anos. Desde seus inícios, seu emprego vem sendo aperfeiçoado, para potencializar os seus benefícios mecânicos nos revestimentos asfálticos. A experiência de diversos projetos ao redor do mundo indica que o concreto asfáltico produzido com asfalto borracha apresenta maior durabilidade, devido à sua

maior resistência ao desenvolvimento de trincas por fadiga, trincas por reflexão e menor susceptibilidade térmica, resistindo melhor à deformação permanente.

Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi realizar uma extensa revisão bibliográfica do emprego do ligante asfáltico modificado por borracha e desenvolver um programa laboratorial para avaliar suas principais propriedades reológicas e as características mecânicas de misturas asfálticas que fazem uso deste tipo de asfalto.

Para atender ao objetivo geral deste estudo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de um levantamento bibliográfico do uso do asfalto borracha no Brasil e no mundo, focando nas vantagens que apresenta no desempenho dos pavimentos;
- Execução de um programa laboratorial para analisar as características reológicas do ligante asfáltico modificado por borracha de pneus moídos;
- Realização de um programa experimental para determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com asfalto borracha;
- Desenvolvimento de uma análise estatística dos resultados obtidos para avaliar os resultados obtidos nos programas laboratoriais.

Histórico do Emprego do Asfalto Borracha em Pavimentos

As primeiras aplicações de materiais asfálticos com borracha, em atividades de pavimentação, datam da década de 1930, quando eram utilizados principalmente como selantes, para execução de reparos de conservação e como membranas. Charles McDonald (Figura 18) é considerado nos Estados Unidos o inventor da técnica moderna de asfalto borracha pela via úmida. Esse engenheiro do Bureau of Public Roads, durante sua aposentadoria, na década de 1960, trabalhou no Estado da Arizona pesquisando materiais para revestimentos asfálticos que tivessem boa flexibilidade a temperatura ambiente (WAY, 2011). Nessa época, McDonald concluiu que adicionar borracha líquida ao asfalto seria relativamente fácil mas com custos proibitivos e adicionar borracha sólida vulcanizada demandaria elevadas temperaturas do asfalto (superiores a 260°C) para fundi-la. No entanto, o pesquisador notou que quando aquecia o asfalto junto com a borracha, em temperaturas mais baixas, algum tipo de reação acontecia. Durante seus estudos descobriu que a borracha moída de pneus inservíveis era um material de boas características elásticas e baixo custo. McDonald realizou incontáveis ensaios avaliando os efeitos da porcentagem e o tipo de borracha, o tempo e a temperatura de mistura e observou misturas asfálticas com excelentes características, quando submetidas a elevadas temperaturas (WAY, 2012).

As especificações desenvolvidas naquela época por McDonald eram bastante empíricas, com aplicações e atividades de conservação em regiões quentes e frias no Estado do Arizona. No entanto, os resultados dos seus ensaios mostravam que era necessário adicionar pelo menos 15% de borracha no asfalto para alcançar viscosidade e elasticidade satisfatórias, com teores ideais de 20 a 25%. Também estabeleceu que a temperatura de 177°C e o tempo de mistura mínimo de 45 minutos seriam necessários para otimizar a produção (WAY, 2012). Este processo chamado de "via úmida" foi patenteado por McDonald, em 1978. Outra patente na mesma época foi anunciada pela Arizona Refining Company, e ambas expiraram no ano 1995, mas continuam sendo as técnicas mais populares para ligantes asfálticos modificados por borracha.



Figura 18: Charles McDonald, inventor do asfalto borracha, aplicando sua solução *patch-aid* em reparos de pavimentos asfálticos. Fonte: WAY, 2011.

Na Europa, o asfalto borracha tem sido também utilizado desde a década de 1980, com especial destaque para Portugal, Espanha, Itália, República Checa e Suécia, (LOPRESTI, 2013). Em Portugal, as misturas com asfalto modificado por borracha são utilizadas desde, com vários estudos desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (BATISTA et al., 2006).

A Suécia, desde o ano 2007, desenvolve projetos de pavimentos empregando o asfalto borracha, com objetivo de redução de ruído nas rodovias próximas a centros urbanos (SANDBERG, 2010). Austrália e África do Sul começaram a produzir asfalto borracha para concreto asfáltico e para camadas selantes nas décadas de 1970 e de 1980, respectivamente. Na África do Sul têm sido utilizados os dois processos com sucesso, mas com maior predominância para a "via seca". Na Austrália, o processo "via úmida" tem sido aplicado como solução para melhorar a resistência ao trincamento, mas prevalecem suas aplicações em camadas selantes (LOPRESTI, 2013).

A China, especificamente em Taiwan, tem adotado o emprego de asfalto borracha na construção de pavimentos. Alguns países da América Latina, como Colômbia, Argentina, Uruguai e Chile,

tem executado trechos experimentais com asfalto borracha. Desde o início do milênio, o Brasil já utiliza em grandes proporções o asfalto borracha com muitos trechos construídos, recuperados ou restaurados, muitos deles com sucesso, mas também alguns com dificuldades. Desde então foram realizadas muitas pesquisas pelos centros de pesquisas nas universidades brasileiras (ODA, 2000; BERTOLLO, 2002; SPECHT, 2004; MORILHA, 2004; DIAS, 2005; FAXINA, 2006; BALAGUER, 2012; CAMARGO, 2016) e também pelo setor industrial de asfaltos.

Reaproveitamento da Borracha de Pneus em Pavimentação Asfáltica

A borracha moída de pneus inservíveis pode ser aproveitada na construção de pavimentos asfálticos, sendo que a sua aplicação pode ser realizada por meio de dois processos: via seca e via úmida.

Via seca: nesse processo, as partículas de borracha substituem parte dos agregados pétreos que, com a adição do ligante asfáltico, formam um produto denominado "concreto asfáltico modificado com adição de borracha" (BERTOLLO, 2002).

Via úmida: nesse processo, partículas finas de borracha são misturadas ao ligante asfáltico aquecido, produzindo um novo produto, denominado "asfalto borracha". Essa metodologia pode ser atribuída a Charles McDonald, que observou os benefícios de incremento de elasticidade e viscosidade do ligante asfáltico a elevadas temperaturas, o que leva à formação de uma película mais espessa nos agregados sem riscos de escorrimento do ligante asfáltico nem de exsudação no revestimento asfáltico (LOPRESTI, 2013).

Asfalto borracha no Brasil: o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da Norma DNIT 111/2009-EM, define o "cimento asfáltico de petróleo modificado pela adição por processo via úmida, de borracha moída de pneus inservíveis (partículas passantes na peneira n° 40), resultando em uma mistura na qual a borracha moída representa geralmente de 15 a 20% da massa do ligante". Nessa norma são especificadas as características de dois tipos de asfalto borracha, AB-8 e AB-22:

- AB-8: para as faixas "A", "B" e "C" do DNIT e para a faixa descontínua tipo "*Gap Graded";*
- AB-22: para a faixa descontínua tipo "*Gap Graded"*.

Análise das Propriedades Reológicas

Neste estudo foram selecionados quatro ligantes asfálticos modificados por borracha de quatro fornecedores nacionais distintos (CAP-Borr-1, CAP-Borr-2, CAP-Borr-3 e CAP-Borr-4) e, para serem utilizados como base comparativa, foram selecionados um CAP 30/45 e um CAP 50/70.

1.1.1.18. Ensaios de Caracterização Convencional

Inicialmente os ligantes asfálticos selecionados foram caracterizados de acordo com as especificações tradicionalmente empregadas no Brasil. Os resultados da caracterização desses ligantes asfálticos são apresentados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15: Caracterização dos CAP com borracha.

Características	Unidades	CAP-Borr-1	CAP-Borr-2	CAP-Borr-3	CAP-Borr-4	Especificação AB (8)	Métodos de Ensaios
Densidade Relativa, 25°C	g/dm^3	1,027	1,026	1,025	1,026	1,00 - 1,05	DNER ME-193
Viscosidade Brookfield a 160°C	cP	2250	2140	2255	2290	-	ABNT NBR 15184
Viscosidade Brookfield a 175°C	cP	1470	1360	1475	1510	800 - 2000	ABNT NBR 15184
Viscosidade Brookfield a 185°C	cP	950	840	955	990	-	ABNT NBR 15184
Recuperação Elástica 25°C, 30min	%	70	62	65	65	mínimo 60	NLT 329/91
Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)	0,1mm	57	44	45	43	30 - 70	ABNT NBR 6576
Ponto de Amolecimento (Pa)	°C	59	57	60	61	mínimo 50	NBR 6560

Tabela 16: Caracterização do CAP 30/45 e do CAP 50/70.

Características	Unidades	Resultados		Especificação		Métodos de Ensaios
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 30/45	CAP 50/70	
Densidade	g/dm^3	1,003	1,006	-	-	DNER ME-193
Viscosidade Brookfield a 135oC	cP	490	310	mínimo 374	mínimo 274	ABNT NBR 15184
Viscosidade Brookfield a 150oC	cP	238	156	mínimo 203	mínimo 112	ABNT NBR 15184
Viscosidade Brookfield a 177oC	cP	84	58	76 - 285	57 - 285	ABNT NBR 15184
Penetração (100g, 5s, 25°C) (*Pen*)	0,1mm	34	53	30 - 45	50 - 70	ABNT NBR 6576
Ponto de Amolecimento (*Pa*)	°C	53	49	mínimo 52	mínimo 46	ABNT NBR 6560
Índice de Suscep. Térmica (*I*)	-	-1,3	-1,4	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	ANP-R19
Espuma a 177°C	-	negativo		negativo	negativo	ANP-R19

1.1.1.19. Ensaios de Caracterização Reológica

Para caracterização reológica dos materiais selecionados foram executados ensaios de acordo com a metodologia Superpave. As normas ASTM e AASHTO foram empregadas para execução desses ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) marca *TA Instruments* Modelo DHR-1, do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.

Determinação do Grau de Desempenho (PG): para determinação do PG dos ligantes asfálticos é necessário determinar o módulo complexo de cisalhamento (G*) e o ângulo de fase (δ), em amostra virgem e em amostra envelhecida no RTFOT, empregando o DSR. Para amostra virgem, o parâmetro G*/sen(δ) deve ser maior que 1,0kPa e para amostra envelhecida no RTFOT deve ser maior que 2,2kPa. A partir dos resultados dos ensaios, pode-se observar que todos ligantes asfálticos com borracha apresentam PG igual a 76°C, o que indica que misturas asfálticas

produzidas com esses ligantes resistiriam de forma satisfatória ao fenômeno de deformação permanente até a temperatura de 76°C. Já o CAP 30/45 e o CAP 50/70 obtiveram PG inferior, de 70°C e 64°C, respectivamente.

Ensaio MSCR, *Multiple Stress Creep Recovery*: determina as propriedades reológicas de recuperação elástica e compilância não recuperável, que são consideradas bastante efetivas para avaliar as peculiaridades do comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados (DOMINGOS, 2011). Neste estudo, o ensaio de MSCR foi realizado nas temperaturas de 58°C, 64°C, 70°C a 76°C. Os dados obtidos no ensaio são utilizados para o cálculo da compilância não-recuperável, Jnr (relação entre a deformação não-recuperável e a tensão aplicada) e o percentual de recuperação, %R (razão entre a deformação recuperável e a deformação total). Os resultados obtidos mostram que os valores de Jnr são muito inferiores nos ligantes asfálticos modificados por borracha, quando comparados com os convencionais CAP 30/45 e CAP 50/70. Esse comportamento indica a superioridade dos ligantes asfálticos modificados por borracha para resistir à deformação permanente, já que valores baixos de Jnr são associados a resistir maiores solicitações do tráfego.

Curva Mestre: é uma forma de representar o comportamento reológico dos materiais, em função da frequência de carregamento para uma única temperatura, chamada de temperatura de referência, para um espectro de frequências ou tempos de carregamento. Na análise de uma curva mestre, o efeito de uma temperatura baixa é equivalente ao da frequência alta e, de forma análoga, o efeito da temperatura alta é equivalente ao da frequência baixa. Neste estudo, as curvas mestre foram construídas para os materiais estudados na condição virgem, envelhecidos no RTFOT (curto prazo) e envelhecidos no PAV (longo prazo).

Fadiga pelo parâmetro G*sen(δ): o parâmetro G*senδ determina a temperatura de fadiga de ligantes asfálticos, que representa a temperatura intermediária crítica na qual o material avaliado, após envelhecimento no PAV, deve atender o valor máximo aceitável de 5.000kPa, para evitar os danos por fadiga. Nesse trabalho, pode-se verificar que os ligantes asfálticos modificados por borracha apresentam temperaturas inferiores (18 a 21ºC), quando comparadas com o CAP 30/45 (28ºC) e o CAP 50/70 (25ºC), indicando que, em temperaturas intermediárias, poderiam resistir melhor ao trincamento por fadiga.

Determinação dos Parâmetros Mecânicos

Para avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligante asfáltico modificado por borracha foram selecionados 3 ligantes: o CAP-Borr-1, o CAP-Borr-2 e o CAP 30/45, que foi

usado como parâmetro de referência. Foram selecionadas quatro granulometrias distintas para os três ligantes asfálticos, totalizando doze misturas asfálticas, como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Identificação das misturas asfálticas avaliadas neste estudo.

ID Mistura	Ligante Asfáltico	Faixa Granulométrica
k1	Borr-1	Faixa III-DERSA
k2	Borr-1	EGL 19mm
k3	Borr-1	EGL 9,5mm
k4	Borr-1	Gap Graded
k5	Borr-2	Faixa III-DERSA
k6	Borr-2	EGL 19mm
k7	Borr-2	EGL 9,5mm
k8	Borr-2	Gap Graded
k9	CAP 30/45	Faixa III-DERSA
k10	CAP 30/45	EGL 19mm
k11	CAP 30/45	EGL 9,5mm
k12	CAP 30/45	Gap Graded

Dosagem das Misturas Asfálticas

Para dosagem das misturas asfálticas foram utilizados agregados graníticos da pedreira Jambeiro, usualmente usados CCR no trecho de São Paulo. Vale salientar que foi utilizado 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1, como melhorador de adesividade das misturas asfálticas, que é prática corrente no Grupo CCR. A Tabela 18 apresenta de forma resumida os parâmetros determinados na dosagem das misturas com CAP-Borr-1, CAP-Borr-2 e CAP 30/45. De modo geral, observa-se que os teores de projeto nas misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 são de 0,5% a 1,0% maiores que no CAP 30/45.

Tabela 18: Resumo da dosagem das misturas asfálticas.

ID MISTURA	k1	k2	k3	k4	K5	K6	k7	k8	k9	k10	k11	k12
Faixa Granulométrica	Faixa III DERSA	EGL 19mm	EGL 9,5mm	Gap Graded	Faixa III DERSA	EGL 19mm	EGL 9,5mm	Gap Graded	Faixa III DERSA	EGL 19mm	EGL 9,5mm	Gap Graded
Teor de ligante asfáltico, %	5,1	5,2	5,6	5,5	5,5	5	5,3	5,9	4,6	4,4	4,6	4,9
Absorção, %	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4
Gsb dos agregados, g/cm^3	2,611	2,619	2,611	2,619	2,62	2,619	2,611	2,608	2,613	2,619	2,611	2,608
Gse dos agregados, g/cm^3	2,643	2,645	2,647	2,648	2,647	2,636	2,639	2,641	2,643	2,642	2,639	2,634
Gsb da mistura, g/cm^3	2,352	2,343	2,332	2,313	2,34	2,347	2,344	2,3	2,371	2,37	2,361	2,321
Gmm, g/cm^3	2,446	2,444	2,432	2,437	2,436	2,444	2,44	2,416	2,46	2,467	2,457	2,442
Vv de projeto, %	3,9	4,1	4,1	5,1	3,9	4,0	4,0	4,8	3,6	3,9	3,9	5,0
VAM, %	14,8	15,2	15,9	16,5	15,6	14,9	15	17	13,4	13,5	13,7	15,3
VCA, %	73,8	72,8	74,1	69,3	74,8	73,3	73,6	71,7	72,9	70,9	71,6	67,7
RT, MPa	1,8	1,7	1,5	1,5	1,6	1,5	1,8	1,2	2,5	2,0	2,3	2,0
Relação fíler/asfalto	1,6	1,2	1,4	1,2	1,5	1,2	1,5	1,1	1,8	1,4	1,7	1,4

Parâmetros Mecânicos

Após determinação dos parâmetros de projeto das misturas asfálticas, foram moldados os CPs nas dimensões adequadas para determinação dos parâmetros mecânicos no teor de projeto nos seguintes ensaios:

- resistência à tração (DNIT ME 134/2010);
- dano por umidade induzida (AASHTO T 283-14);
- módulo de resiliência (DNIT ME 135/2010);
- módulo dinâmico (AASHTO T 342/11);
- *flow number* (AASHTO T 342/11);
- fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos (AASHTO T 310-10).

Resistência à tração: de forma geral, as misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 apresentaram valores de RT muito próximos entre si (entre 1,8 e 2,2 MPa) e a RT foi superior nas misturas com CAP 30/45 (2,4 MPa). Esse comportamento era esperado, já que as misturas com asfalto borracha.

Dano por umidade induzida (DUI): avalia a resistência à ação deletéria de água e adesividade, a partir da comparação entre os resultados de RT sem condicionamento e com condicionamento, que resulta a resistência à tração retida, RRT. A RRT mínima de 75% é exigida para que atenda a especificação, garantindo misturas asfálticas com boa resistência à água e boa adesividade. Todas as misturas asfálticas estudadas atenderam a essa especificação.

Módulo de resiliência: os resultados dos ensaios mostraram que as misturas com CAP 30/45 apresentaram os maiores valores de rigidez, seguidos pelas misturas com CAP-Borr-2 e finalmente pelas misturas com CAP-Borr-1.

Módulo dinâmico: os ensaios foram executados nas temperaturas de 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4°C, com frequências de 25; 10; 5,0; 1,0; 0,5 e 0,1Hz. Os resultados desse ensaio foram usados para a construção de curvas mestres. Os resultados mostraram que, em frequências baixas (temperaturas elevadas), todas as misturas com CAP-Borracha apresentam maior rigidez quando comparadas com a mistura com CAP 30/45. Nas frequências intermediárias (temperaturas intermediárias) observa-se que as misturas com CAP 30/45 apresentam rigidez superior às misturas com CAP-Borracha. No entanto, vale lembrar que em temperaturas intermediárias a rigidez elevada pode conduzir com maior facilidade ao trincamento por fadiga.

***Flow Number* (FN)**: o ensaio foi realizado sem confinamento dos CPs, na temperatura de 54,4°C, empregando os mesmos CPs do ensaio de módulo dinâmico. Os resultados obtidos mostram que as misturas com CAP-Borracha apresentaram valores muito superiores, quando comparadas com as misturas com CAP 30/45, independente da faixa granulométrica. Esse comportamento indicaria uma maior resistência à deformação permanente nas misturas com CAP-Borracha e também um maior número de ciclos de carregamento de veículos até atingir um mesmo afundamento de trilha de roda (ATR), quando comparado com misturas produzidas com ligante asfáltico convencional.

Fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos: a temperatura utilizada para o ensaio foi de 21°C e a frequência foi de 10Hz. Os CPs foram submetidos a deformação controlada variável de 300 a 600 microstrain, e adotou-se o parâmetro de redução de 50% da rigidez inicial, como o critério de finalização do ensaio. A Figura 19 mostra o equipamento empregado para execução deste ensaio na CCR NovaDutra.

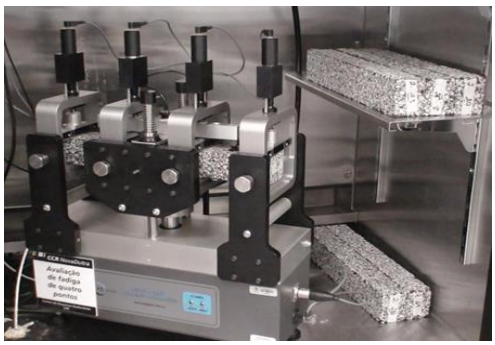


Figura 19: Equipamento empregado no ensaio de fadiga de misturas asfálticas

Foram elaborados gráficos com os resultados dos ensaios de fadiga para as misturas com CAP-Borr-1, CAP-Borr-2 e CAP 30/45, respectivamente, onde pode-se verificar que houve pouca influência da granulometria na vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas. Além disso, também foram construídos gráficos para visualizar o efeito do tipo de ligante asfáltico em cada uma das quatro faixas granulométricas estudadas, onde pode-se observar a resistência à fadiga superior das misturas produzidas com ligantes asfálticos modificados por borracha.

Para analisar os resultados dos ensaios de fadiga de diferentes misturas asfálticas são usualmente construídos modelos para determinar a deformação correspondente ao nível de carregamento adotado (Figura 20). Observa-se que as misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 obtiveram valores de deformação superiores a 200 microstrain, enquanto que para as misturas asfálticas com CAP 30/45, as deformações foram inferiores a 200 microstrain. Essa análise também constata a superioridade das misturas com CAP-Borracha para resistir ao trincamento por fadiga, quando comparadas com misturas asfálticas convencionais.

A rigidez da mistura, medida durante desde o início do ensaio, é o parâmetro utilizado para determinar o início de microtrincas na mistura asfáltica. Na Figura 21 são apresentados os resultados da rigidez inicial do ensaio, onde pode-se observar que as misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 apresentam rigidez inferior, quando comparadas com as misturas com CAP 30/45. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior teor de ligante asfáltico das misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2, que por sua vez conduzem a maiores vidas de fadiga.

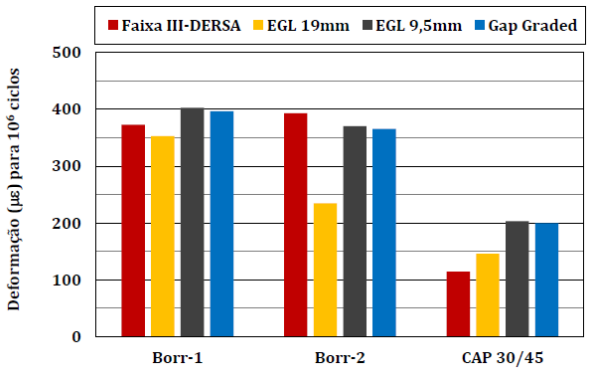


Figura 20: Resultados de deformação para o carregamento de 10^6 ciclos nas misturas asfálticas

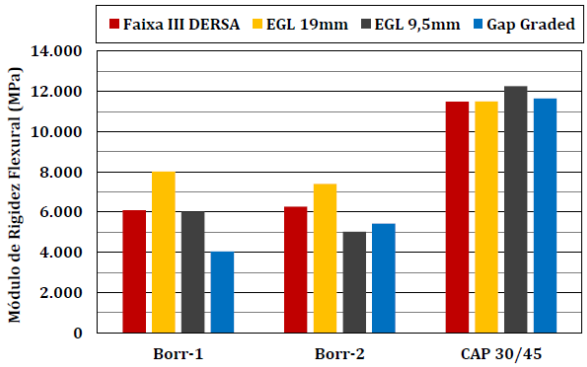


Figura 21: Rigidez flexural inicial das misturas asfálticas no ensaio de fadiga

Outro parâmetro determinado nesse ensaio é o ângulo de fase, que é um indicativo do comportamento das misturas asfálticas, sendo que valores próximos a 0° indicam materiais com comportamento mais elástico, enquanto que valores próximos a 90° estão associados a materiais de comportamento mais viscoso. Os resultados mostraram maiores ângulos de fase para as misturas com CAP 30/45, quando comparadas com as misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2. Esse comportamento poderia ser atribuído ao menor teor de ligante asfáltico das misturas com CAP 30/45, fazendo com que os agregados minerais tenham maior influência no comportamento mecânico.

Conclusões

O asfalto modificado por borracha moída de pneus é utilizado há décadas em diferentes partes do mundo para produzir misturas asfálticas com características mecânicas superiores ás das misturas asfálticas convencionais. A experiência e monitoramento de segmentos de rodovias construídos com esta técnica têm mostrado que seu uso melhora a durabilidade e o comportamento mecânico dos pavimentos de forma geral.

Nesta pesquisa foi desenvolvido um programa laboratorial para analisar o asfalto modificado por borracha, em nível de ligante asfáltico por meio de ensaios empíricos tradicionais e ensaios reológicos e em nível de misturas asfálticas, por meio de ensaios de caracterização mecânica. Para isso, foram avaliados quatro asfaltos borrachas disponíveis no mercado nacional. Também foram incluídos neste programa laboratorial, o CAP 50/70 e o CAP 30/45, bastante utilizados nas atividades de pavimentação no país, para efeitos comparativos. De forma geral, observa-se que o asfalto borracha apresenta melhores características que os asfaltos convencionais, indicando um melhor desempenho quando utilizado na produção de misturas asfálticas para pavimentos.

O programa laboratorial executado em nível de misturas asfálticas empregou dois dos asfaltos borracha coletados e o CAP 30/45. As granulometrias selecionadas para produzir as misturas asfálticas foram a Faixa III do DERSA, EGL 19mm, EGL 9,5mm e *Gap Graded* de 9,5mm. Os ensaios foram selecionados para determinar em laboratório os parâmetros mecânicos e de desempenho das misturas asfálticas. De forma geral, que as misturas asfálticas produzidas com asfalto borracha apresentam comportamento mecânico e de desempenho superior, quando comparadas com as misturas asfálticas com CAP 30/45.

Tanto a revisão bibliográfica como os programas laboratoriais executados neste estudo comprovaram os benefícios mecânicos de empregar o asfalto modificado por borracha na pavimentação asfáltica. Nas misturas asfálticas com asfalto borracha destacaram-se as características de resistência ao trincamento por fadiga e à deformação permanente, quando comparadas com as misturas asfálticas convencionais.

De forma complementar, acredita-se que com os cuidados necessários, um adequado controle de qualidade e o investimento em educação e treinamento das equipes técnicas envolvidas na pavimentação asfáltica, pode se obter o máximo benefício da aplicação do asfalto borracha.

Conclui-se que é uma técnica do asfalto borracha que deveria ser considerada com maior frequência nos projetos de novos pavimentos, para obter rodovias com desempenho superior, mais duráveis e resistentes ao tráfego e às condições climáticas durante maiores períodos de tempo e, portanto, com menores intervenções de manutenção, trazendo maior conforto, segurança e economia para os usuários.

3.1.39. Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto. Etapa 1: Estudo Laboratorial

Introdução

A técnica de fresagem de pavimentos é muito utilizada na Rodovia Presidente Dutra nas atividades de manutenção e restauração de pavimentos. O resíduo gerado dessas atividades é o comumente chamado “material fresado” ou simplesmente “fresado”.

Na atualidade existem várias alternativas para reaproveitar o material fresado. Uma alternativa é na produção de novos concretos asfálticos a quente, para sua aplicação em revestimentos asfálticos. Nesse caso, as porcentagens de fresado reciclado variam de 10% a 30% e podem alcançar até 50% ou mais com o emprego de aditivos rejuvenescedores. Outra possibilidade é reaproveitar o material fresado a frio para restaurar as bases e sub-bases dos pavimentos. Nesses casos 100% do material fresado pode ser reaproveitado por meio de sua estabilização com agentes cimentantes (cimento Portland, cal hidratada), materiais asfálticos (emulsão asfáltica e espuma de asfalto) ou pela combinação destes.

Objetivo

O objetivo desta pesquisa foi estudar a reciclagem de pavimentos a frio, a partir da avaliação em laboratório da técnica de estabilização do fresado com incorporação de espuma de asfalto, agregados novos e cal hidratada.

Materiais e Métodos

Neste estudo foram seguidos os procedimentos de dosagem estabelecidos pela Wirtgen (2012) e pela Asphalt Academy (2009), para a estabilização de material fresado com espuma de asfalto.

3.1.39.1. Material fresado

Inicialmente foi realizada a coleta de 500kg do material fresado em áreas da Concessionária CCR NovaDutra, destinadas para seu armazenamento. Este material foi analisado por meio de ensaios de granulometria e índices de consistência para verificação da necessidade de incorporação de agregados novos e fíler ativo.

Granulometria: foram executados ensaios de granulometria em laboratório, para verificar a necessidade de adição de agregados novos e fíler ativo. Na Figura 22 são apresentados os resultados de granulometria das amostras coletadas em distintos pontos da Rodovia no Estado de São Paulo e no Estado de Rio de Janeiro, junto com a faixa recomendada pela Wirtgen (2012).

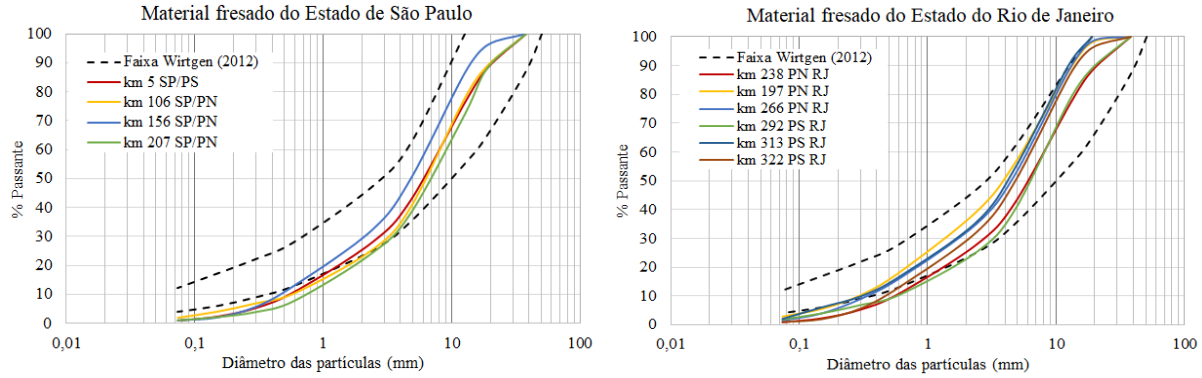


Figura 22: Granulometria do material fresado e faixa granulométrica da Wirtgen (2012).

Teor de ligante asfáltico residual: para determinar o teor residual de ligante asfáltico, o material fresado foi submetido à ignição, conforme a norma ASTM D6307-16. Na Figura 23 são apresentados os resultados de ligante asfáltico residual obtidos da extração de ligante asfáltico dos materiais fresados coletados no Estado de São Paulo e no Estado de Rio de Janeiro.

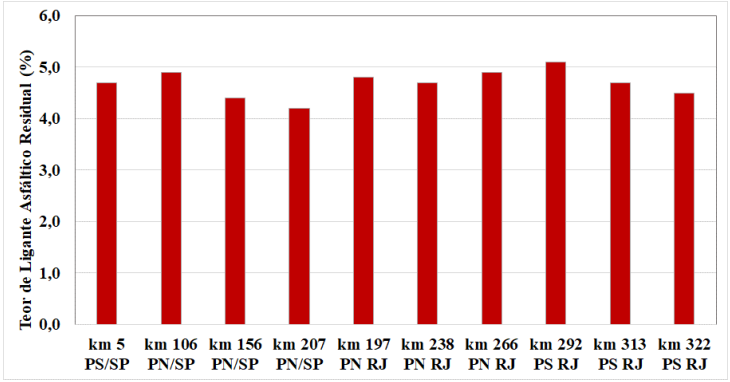


Figura 23: Teores de ligante asfáltico residual no material fresado

Características de resistência ao desgaste: o ensaio de abrasão Los Angeles foi executado nas amostras de material fresado para se obter uma ideia do desgaste desse material. Pode-se verificar que quase todas as amostras apresentaram valores inferiores a 40%, que são os valores usualmente recomendados para agregados empregados na construção de pavimentos, com exceção da amostra do Rio de Janeiro km 197 PN RJ (44%).

3.1.39.2. Ligante asfáltico

Para desenvolvimento deste estudo foi selecionado o CAP 50/70 para a produção da espuma de asfalto. O laboratório móvel da Wirtgen, modelo WLB 10S, foi utilizado para avaliar a espuma de asfalto quanto a sua meia vida e expansibilidade. O teor de 2% de água adicionado ao CAP 50/70 na temperatura de 170°C foi suficiente para produzir espuma de asfalto com expansão superior a 8 vezes e meia vida mínima de 6 segundos, como apresentado na Figura 24.

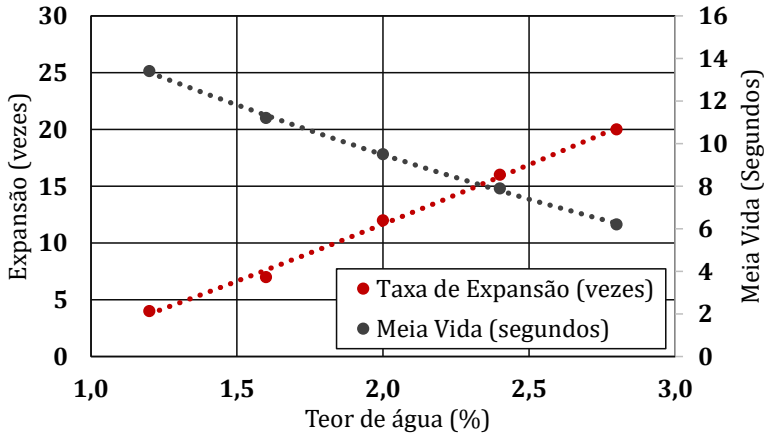


Figura 24: Expansão e meia vida do CAP 50/70 a 170°C com 2% de água.

Dosagem das Misturas de Fresado com Espuma de Asfalto

Neste estudo foi avaliado o uso de cal hidratada e cimento Portland como material de fíler. O material estabilizado granulometricamente foi compactado no Proctor modificado para determinação do teor de umidade ótima (W_{ot}) e massa específica seca máxima ($MES_{máx}$) e, posteriormente para determinar o teor de espuma mais adequado para as diferentes amostras.

Para execução da compactação vibratória foram seguidas as recomendações do Método 8 da Asphalt Academy (2009). No processo de dosagem foram empregados moldes do CBR para obter CPs de 150 mm de diâmetro e 95 mm, compactados em 4 camadas com aplicação de compactação vibratória, na frequência máxima do equipamento, durante 20 segundos, para atingir resultados similares aos obtidos na compactação Proctor com energia modificada.

Inicialmente foi realizada a compactação do fresado com agregados novos, fíler e água, para determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima (Figura 25). Com esses dados, procedeu-se à compactação de CPs com cinco teores de espuma de asfalto. Os 6 CPs compactados para cada teor foram mantidos em estufa ventilada na temperatura de 40°C durante 72 h (Figura 26). Após o período de cura, 3 CPs foram imersos em água durante 24 h na temperatura de 25°C e os outros 3CPs foram conservados em incubadora também a 25°C durante 24 h (Figura 27). Após esse período os CPs foram submetidos ao ensaio de compressão diametral (Figura 28).

Para o ensaio de MR por compressão diametral, os CPs foram moldados no compactador vibratório nas dimensões de 150 mm de diâmetro e 65 mm de altura. Para o ensaio de compressão triaxial

foram moldados com o compactador vibratório CPs de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, e curados durante 72 horas antes do início do ensaio.



Figura 25: Determinação da massa do fresado com agregados novos, fíler e água.



Figura 26: Cura dos CPs com espuma de asfalto em estufa ventilada.



Figura 27: Imersão dos CPs em água.



Figura 28: Ruptura por compressão diametral.

3.1.39.3. Amostras do Estado de São Paulo

Para simplificar a identificação em gráficos e tabelas neste relatório, os materiais fresados do Estado de São Paulo foram identificados como A (km 5 SP/OS), B (km 106 SP/PN) e D (km 207 SP/PN). Nota-se que a amostra C foi analisada com distintos teores de pó de pedra, pelo qual foi identificada como C-7,5 (km 156 SP/PN 7,5%), C-15 (km 156 SP/PN 15%) e C-25 (km 156 SP/PN 25%), sendo que o número indica a porcentagem de pó de pedra utilizada na amostra.

3.1.39.3.1. Correção Granulométrica

A partir da caracterização granulométrica pode-se verificar que o material fresado apresenta baixos conteúdos de finos e, de modo geral, a partir da Peneira N° 30 é mais grossa que a granulometria recomendada pela Wirtgen (2012). Por isso foram adicionados pó de pedra britada e cal para elaborar as granulometrias da Tabela 19. Vale salientar que o material fresado do km 156 SP/PN foi previamente britado em equipamento britador móvel, para verificar a possibilidade de incremento de finos e, assim, reduzir a quantidade de material virgem a ser utilizado. Nessa amostra foi adicionado distintas porcentagens de material fino para analisar o efeito de finos no comportamento mecânico do material.

Tabela 19: Composição granulométrica do fresado de São Paulo com pó de pedra e cal hidratada

ID Amostra				**A**	**B**	**C-7,5%**	**C-15%**	**C-25%**	**D**
Peneira		**Faixa Wirtgen (2012)**		**km 5 SP/PS**	**km 106 SP/PN**	**km 156 SP/PN 7,5%**	**km 156 SP/PN 15%**	**km 156 SP/PN 25%**	**km 207 SP/PN**
N°	**(mm)**	**Min.**	**Max.**						
2"	50,8	100	100	100	100	100	100	100	100
1 1/2"	38,1	87	100	100	100	100	100	100	100
3/4"	19,1	65	100	91	90,8	96,5	96,8	97,2	91,1

1/2"	12,7	55	90	81,7	81,4	87,8	88,8	90,1	78,7
N° 4	4,8	35	62	54,9	49,1	53,9	57,4	62	51,5
N° 8	2,4	25	47	39,5	33,9	36,3	39,7	44,2	36,7
N° 30	0,6	13	28	19,8	16,9	16,6	19,2	22,6	17,4
N° 50	0,3	9	22	11,9	11,4	8,6	10,4	13	10,8
N° 100	0,15	6	17	6,5	6,9	4,1	5,2	6,7	6,3
N° 200	0,074	4	12	4	4,1	2,7	3,4	4,3	4
Fresado (%) =				77	84	91,5	84	74	77
Pó de Pedra Adicionado (%) =				22	15	7,5	15	25	22
Cal Hidratada Adicionada (%) =				1	1	1	1	1	1
TOTAL (%) =				100	100	100	100	100	100

3.1.39.3.2. Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima

Após análise e correção granulométrica do material fresado, foi realizada a compactação de CPs com distintos teores de umidade, para determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima. Na Tabela 20 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para os materiais coletados no Estado de São Paulo.

Tabela 20: Resultados da compactação do material fresado do Estado de São Paulo com pó de pedra e cal hidratada

Local da Coleta	Wot (%)	MESmax (g/cm^3)
km 5 SP/PS	5,5	2,036
km 106 SP/PN	4,9	2,061
km 156 SP/PN	4,9	2,075
km 207 SP/PN	5,4	2,112
km 156 SP/PN + 7,5%	5,8	1,986
km 156 SP/PN + 15%	4,9	2,075
km 156 SP/PN + 25%	6,1	2,054

3.1.39.3.3. Determinação do teor de espuma asfáltica

A determinação do teor de espuma de asfalto é realizada pela incorporação de distintas porcentagens na mistura estabilizada granulometricamente e selecionando aquela que atende aos parâmetros de resistência pré-estabelecidos. Neste estudo a estabilização foi realizada com pó de pedra e fíler do tipo cal hidratada e cimento Portland.

Cal hidratada como fíler: os resultados de RTseca e RTsaturada e da RTR em função do teor de espuma adotado são apresentados na Tabela 21. Pode-se observar que todas as amostras apresentaram valores de RT superiores aos mínimos recomendados (RT Seca = 225MPa e RT Saturada = 110 MPa) pela Wirtgen (2012) para o BSM (Bitumen Stabilized Material), tipo I. Esse comportamento pode ser um indicativo da boa qualidade do material fresado, que precisa de poucas modificações para ser estabilizado e reaproveitado em bases de obras de restauração de pavimentos. Também pode ser observado na Tabela 21 que todas as amostras apresentaram valores de RTR acima do mínimo recomendado (RTR ≥ 50%) pela Asphalt Academy (2009), indicando uma boa resistência dos materiais estabilizados à ação deletéria da água.

Tabela 21: Teores de espuma de asfalto para os materiais fresados do Estado de São Paulo com cal hidratada

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de Espuma Adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	RTR (%)
São Paulo	km 5 SP/PS	A	1,8	331	291	88
São Paulo	km 106 SP/PN	B	2,0	232	202	95
São Paulo	km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	1,8	224	235	105
São Paulo	km 156 SP/PN + 15%	C-15	1,8	273	234	86
São Paulo	km 156 SP/PN + 25%	C-25	1,8	253	253	100

São Paulo	km 207 SP/PN	D	2,0	244	184	75

Cimento Portland como fíler: o material fresado também foi estudado com a estabilização de espuma de asfalto e cimento Portland como material de filer. Na Tabela 22 são apresentados os valores de resistência à tração seca e saturada e da resistência à tração retida em função do teor de espuma adotado. Pode-se verificar nos resultados de resistência retida após imersão dos corpos de prova que todos os teores de espuma obtiveram valores entre 80 e 100%. Esse comportamento indica uma boa resistência dos materiais estabilizados à ação deletéria da água. Vale salientar que os valores adotados foram os mesmos adotados quando foi empregada a cal hidratada, para simplificar os efeitos comparativos entre esses materiais.

Tabela 22: Teores de espuma de asfalto para os materiais fresados do Estado de São Paulo com cimento.

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de Espuma Adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	RTR (%)
São Paulo	km 5 SP/PS	A	1,8	391	353	90
São Paulo	km 106 SP/PN	B	2,0	322	273	85
São Paulo	km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	1,8	301	275	91
São Paulo	km 156 SP/PN + 15%	C-15	1,8	322	275	85
São Paulo	km 156 SP/PN + 25%	C-25	1,8	322	301	93
São Paulo	km 207 SP/PN	D	2,0	291	288	99

3.1.39.4. Amostras do Estado do Rio de Janeiro

Para simplificar a identificação em gráficos e tabelas neste relatório, os materiais fresados do Estado do Rio de Janeiro foram identificados de E (km 197 PN RJ), F (km 238 PN RJ), G (km 266 PN RJ), H (km 292 PS RJ), I (km 313 PS RJ) e J (km 322 PS RJ).

3.1.39.4.1. Correção Granulométrica

Da mesma forma que foi realizado para as amostras do Estado de São Paulo, as amostras do Estado do Rio de Janeiro foram estabilizadas granulometricamente para atender a faixa da Wirtgen (2012) com o pó de pedra. Os resultados das granulometrias obtidas são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Composição granulométrica do fresado do Estado do Rio de Janeiro com pó de pedra e cal hidratada.

ID Amostra				E	F	G	H	I	J
Peneira		Faixa Wirtgen (2012)		km 197 PN RJ	km 238 PN RJ	km 266 PN RJ	km 292 PS RJ	km 313 PS RJ	km 322 PS RJ
N°	(mm)	Min.	Max.						
2"	50,8	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	87	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	65	100	98,3	98,8	98,8	97,4	100,0	98,6
1/2"	12,7	55	90	89,8	93,2	90,9	91,7	92,1	89,9
N° 4	4,8	35	62	60,8	63,3	60,7	58,1	61,2	57,2
N° 8	2,4	25	47	43,8	44,4	43,4	38,6	42,6	40,9
N° 30	0,6	13	28	21,9	23,3	22,6	20,1	22,1	21,6
N° 50	0,3	9	22	13,2	14,1	13,8	12,4	14,0	13,7
N° 100	0,15	6	17	7,6	7,5	7,3	6,7	8,6	7,9
N° 200	0,074	4	12	4,5	4,2	4,0	4,0	4,2	4,6
Fresado (%) =				89,0	84,0	81,0	77,0	84,0	99,0
Pó de Pedra Adicionado (%) =				10,0	15,0	18,0	22,0	15,0	-
Cal Hidratada Adicionada (%) =				1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
TOTAL (%) =				100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

3.1.39.4.2. Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima

Na Tabela 24 são apresentados os resultados da compactação Proctor na energia modificada realizada no material fresado estabilizado com pó de pedra e cal hidratada, para o material coletado no Estado do Rio de Janeiro.

Tabela 24: Resultados de W_{ot} e $MES_{máx}$ do material fresado do Estado do Rio de Janeiro.

Local da Coleta	W_{ot} (%)	MES_{max} (g/cm^3)
km 197 PN RJ	6,2	2,012
km 238 PN RJ	6,0	2,038
km 266 PN RJ	6,1	2,007
km 292 PS RJ	5,8	2,048
km 313 PS RJ	5,5	2,001
km 322 PS RJ	5,6	2,018

3.1.39.4.3. Determinação do teor de espuma asfáltica

Como foi citado anteriormente, neste estudo a estabilização do material fresado foi realizada com pó de pedra e fíler do tipo cal hidratada e cimento Portland e nos itens seguintes são apresentados os resultados obtidos para os materiais coletados no Estado de Rio de Janeiro.

Cal hidratada como fíler: os resultados da dosagem realizada com materiais fresados do Estado de Rio de Janeiro e cal hidratada são mostrados na Tabela 25, onde são apresentados os teores de espuma de asfalto adotados para os materiais do Estado do Rio de Janeiro, e os valores correspondentes de resistência à tração seca, saturada e a resistência à tração retida.

Tabela 25: Teores de espuma de asfalto para os materiais fresados do Estado do Rio de Janeiro com cal hidratada.

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de espuma adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	RTR (%)
Rio de Janeiro	km 197 PN RJ	E	2,0	370	404	136
Rio de Janeiro	km 238 PN RJ	F	2,0	299	313	105
Rio de Janeiro	km 266 PN RJ	G	2,0	398	290	73
Rio de Janeiro	km 292 PS RJ	H	2,0	227	193	85
Rio de Janeiro	km 313 PS RJ	I	2,0	249	279	112
Rio de Janeiro	km 322 PS RJ	J	2,0	395	377	95

Cimento Portland como fíler: o material fresado do Estado do Rio de Janeiro também foi estudado com a estabilização de espuma de asfalto e cimento Portland como material de fíler. Na Tabela 26 são apresentados os valores de resistência à tração seca e saturada com o teor de espuma adotado, assim como os resultados de resistência retida após imersão dos corpos de prova. Vale salientar que os valores adotados foram os mesmos adotados quando foi empregada a cal hidratada, para simplificar os efeitos comparativos entre esses materiais.

Tabela 26: Teores de espuma de asfalto para os materiais fresados do Estado do Rio de Janeiro com cimento

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de espuma adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	RTR (%)
Rio de Janeiro	km 197 PN RJ	E	2,0	393	402	102
Rio de Janeiro	km 238 PN RJ	F	2,0	391	390	100
Rio de Janeiro	km 266 PN RJ	G	2,0	453	398	88
Rio de Janeiro	km 292 PS RJ	H	2,0	412	429	104
Rio de Janeiro	km 313 PS RJ	I	2,0	419	435	104
Rio de Janeiro	km 322 PS RJ	J	2,0	452	421	93

Determinação dos Parâmetros Mecânicos

O ensaio de módulo de resiliência diametral, na condição seca e na condição saturada, foi executado nas amostras de fresado estabilizado com espuma de asfalto tanto com cal hidratada como com cimento Portland, para os materiais coletados no Estado de São Paulo como para o Estado do Rio de Janeiro. De forma complementar, após execução do ensaio de módulo de resiliência, os CPs foram testados também no ensaio de compressão diametral para obtenção do parâmetro de resistência à tração. Salienta-se que esses ensaios não formam parte da metodologia recomendada pela Wirtgen (2012), e esses valores não devem ser utilizados com a finalidade de dimensionamento de pavimentos pela metodologia empírico-mecanicista. Por esse motivo são apresentados apenas um resumo dos resultados.

3.1.39.5. Materiais Coletados no Estado de São Paulo

Módulo de resiliência: na Figura 29 é apresentado um resumo de valores médios de MR que mostra a tendência de obter maiores valores de rigidez para as misturas com cimento Portland, do que com cal hidratada. Observa-se também que para a condição saturada, o cimento Portland produziu um ganho de rigidez, o que poderia ser atribuído à cura do cimento durante a imersão dos corpos de prova.

Resistência à tração por compressão diametral: na Figura 30 apresenta-se um resumo de valores médios de RT nas misturas com cal hidratada e cimento Portland. Observa-se a mesma tendência do cimento Portland produzir misturas estabilizadas com maior resistência à tração do que a cal hidratada.

Ensaios de compressão triaxial: foram realizados pela COPAVEL Consultoria Engenharia de Rodovias e Estradas. Nas Figuras 31 e 32 são apresentados os dois principais parâmetros necessários, coesão e ângulo de atrito, respectivamente, para desenvolver dimensionamento de pavimentos com camadas de BSM (Bitumen Stabilized Material). Os resultados de coesão variaram de 50 até 87kPa, valores considerados um pouco baixos, caracterizando o material como um BSM3, de acordo com a Asphalt Academy (2009). Já os resultados de ângulo de atrito foram em torno de 40°C, caracterizando os materiais, de acordo a esse parâmetro, como BSM1.

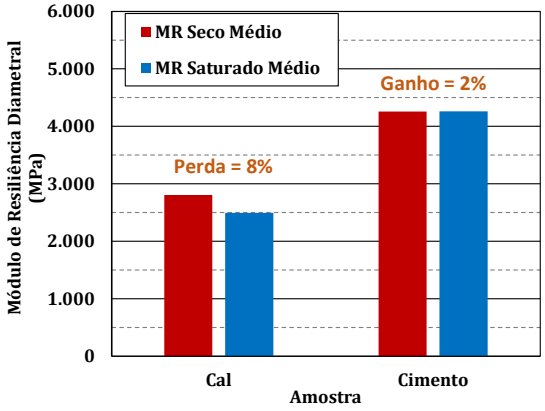


Figura 29: Resultados médios de MR, para as misturas estabilizadas com cal hidratada e cimento.

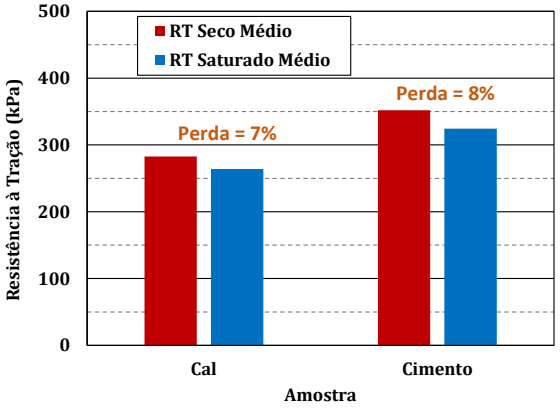


Figura 30: Resultados médios de RT, para as misturas misturas estabilizadas com cal hidratada e cimento.

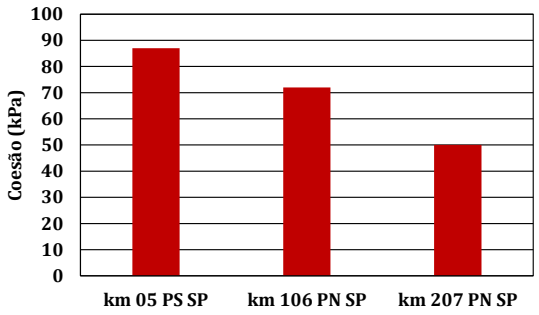


Figura 31: Resultados de coesão nas amostras estudadas.

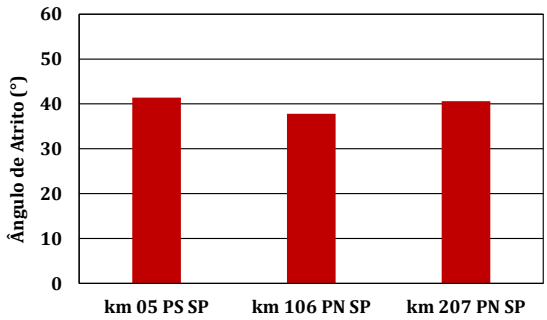


Figura 32: Resultados de ângulo de atrito nas amostras estudadas.

3.1.39.6. Materiais Coletados no Estado do Rio de Janeiro

Módulo de resiliência: na Figura 33 é apresentado um resumo dos valores médios de MR obtidos nas misturas com cimento e com cal hidratada. Constata-se que o cimento produz misturas com maior rigidez também nas misturas com materiais coletados no Estado do Rio de Janeiro.

Resistência à tração por compressão diametral: na Figura 34 apresenta-se um resumo de valores médios de resistência à tração nas misturas com cal hidratada e cimento Portland. Observa-se a mesma tendência citada anteriormente, o cimento tende a produzir misturas estabilizadas de resistência à tração similar à obtida nas misturas que empregaram cal hidratada, para os materiais coletados no Estado do Rio de Janeiro.

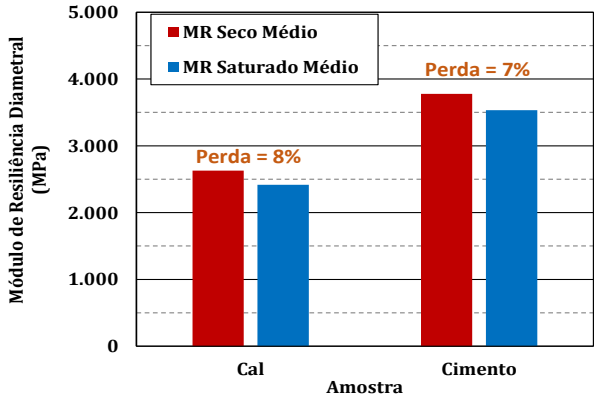


Figura 33: Resultados médios de RT, para as misturas estabilizadas com cal hidratada e cimento.

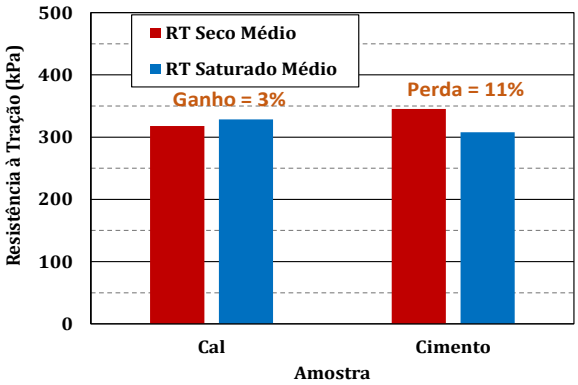


Figura 34: Resultados médios de RT, para as misturas estabilizadas com cal hidratada e cimento.

Considerações Finais

As atividades de manutenção de pavimentos asfálticos por meio da fresagem dos revestimentos geram o passivo ambiental denominado “fresado asfáltico”. Esse material apresenta excelentes características mecânicas para poder ser reaproveitado na conformação de novas camadas de pavimentos com boa contribuição estrutural. O objetivo deste estudo foi avaliar a possibilidade de reutilizar o fresado asfáltico estabilizado com espuma de asfáltico, para obter um material com as características de um BSM (*Bitumen Stabilized Material*).

Os materiais empregados no estudo foram coletados ao longo da Rodovia Presidente Dutra, tanto no trecho do Estado de São Paulo como no Estado do Rio de Janeiro, com o objetivo de conhecer as características do material fresado oriundo de diversas fontes. A caracterização laboratorial desses materiais indicou similitude, sendo necessária a correção granulométrica na maioria dos

casos para atender as faixas recomendadas pela Wirtgen (2012) e adotadas para este estudo. Para realizar essa correção granulométrica adicionou-se pó de pedra, nas proporções de 7,5% até 25%, de acordo à fonte do fresado asfáltico, e 1,0% de cal hidratada ou 1,0% de cimento Portland.

Para a dosagem desses materiais, foi realizada a moldagem de CPs cilíndricos com o soquete Proctor grande e obtiveram-se teores ótimos de umidade de 4,9 a 6,2% de acordo à fonte de origem do fresado asfáltico.

Na determinação do teor de espuma asfáltica ideal, os CPs foram moldados com distintos teores com o auxílio de um compactador vibratório. Os teores de espuma asfáltica de projeto foram de 1,8% a 2,0% para os distintos fresados asfálticos coletados neste estudo, para atender aos critérios de RTseca e RTsaturada recomendadas pela Asphalt Academy (2009).

Após a conclusão das dosagens dos materiais foram realizados ensaios de caracterização mecânica, por meio do ensaio de compressão cíclica diametral de CPs cilíndricos, compressão diametral estática e por meio do ensaio de compressão triaxial estática.

Nos ensaios de compressão cíclica diametral e compressão estática diametral, os CPs foram moldados no compactador vibratório com cal hidratada e com cimento, com o objetivo de avaliar a possibilidade de empregar esses materiais na estabilização do fresado asfáltico. Os resultados indicaram que o emprego de cimento incrementa a rigidez e a resistência à tração do material fresado estabilizado com espuma asfáltica. Também foi observado que, o emprego desse fíler, reduz a perda de resistência e rigidez após saturação, o que indica uma boa resistência à ação deletéria da água. No entanto, os resultados com cal hidratada também foram satisfatórios e atenderam aos parâmetros mecânicos recomendados na bibliografia estudada.

Os resultados dos ensaios mostraram, de forma geral, que o material fresado coletado ao longo da Rodovia Presidente Dutra apresenta excelentes características para poder ser aproveitado na constituição de novas camadas estruturais de pavimentos. A reutilização desse material para novas obras e para atividades de manutenção, se traduziria em diversas vantagens para o meio ambiente, já que estar-se-ia reduzindo a necessidade de explorar novos recursos naturais e também dispor-se-ia o fresado asfáltico de forma correta.

3.1.40. Modelo de Serviço de Telemedicina para atendimento emergencial em rodovia baseada em Centro de Apoio Referenciada para encaminhamentos

Introdução

A CCR Nova Dutra foi a primeira concessionária a receber um projeto piloto de telemedicina em uma de suas onze bases operacionais. Mais precisamente na Base Operacional Número 01 (Um), situada no quilômetro 229 da Rodovia Presidente Dutra, sentido São Paulo, no Bairro Vila Maria, na cidade de São Paulo. O Projeto Telemedicina da CCR Nova Dutra é um programa experimental para determinação da viabilidade da implantação da telemedicina no atendimento pré-hospitalar em rodovias.

Objetivos

O objetivo deste projeto de pesquisa é utilizar o serviço de atendimento pré-hospitalar da concessionária para implantar a telemedicina como suporte para casos médicos de urgência. A interação realizada com médicos especialistas da Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein, parceiro no projeto, fará com que o médico em campo, em tempo real, tenha um suporte extra em sua atividade, proporcionando um aumento na qualidade do atendimento à vítima.

O sistema de telemonitoramento instalado na ambulância permite uma leitura, também em tempo real, dos sinais vitais (pressão arterial, frequência cardíaca, frequência respiratória, saturação sanguínea de oxigênio) por parte da equipe na Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein. A conectividade do sistema se dá através da emissão de dados por sistema semelhante à telefonia móvel.

Após passar pelas fases de testes e avaliações de viabilidade o projeto será expandido para as demais Bases Operacionais da Rodovia Presidente Dutra e, na sequência, para outras rodovias.

Instalação dos Equipamentos

Foi realizada a instalação dos equipamentos de telemedicina em uma ambulância Tipo D (UTI) utilizada regularmente em operações de atendimento pré-hospitalar pela CCR Nova Dutra, pela empresa GetConnect, assim como os testes de conectividade com a central de telemedicina do Hospital Albert Einstein e funcionamento do referido equipamento.

1.1.1.20. Ambulância

A ambulância empregada é do Tipo D (UTI), opera na Base Operacional Número 01 (Um) da CCR Nova Dutra, na qual foram instalados os equipamentos de Telemedicina pela empresa GetConnect.

1.1.1.21. Equipamentos de telemedicina

Os equipamentos utilizados no Projeto Telemedicina da CCR Nova Dutra foram testados quanto ao funcionamento no local e conectividade com a Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein apresentando bom funcionamento em todos os aspectos. A Figura 35 apresenta o equipamento instalado no interior da ambulância e em funcionamento.

Os equipamentos de telemedicina instalados no interior da ambulância foram:

- Monitor multiparâmetro: registra os sinais vitais do paciente que são transmitidos online para a Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein.
- Desktop com software embarcado para aquisição de dados (HealthBox): computador do Sistema de Telemedicina instalado na ambulância.

- Módulo de transmissão WiFi: faz a ligação, sem fio, entre o Tablet e o Desktop.
- Tablet com grau de proteção IP67 e videoconferência embarcada: promove a interface entre o operador em campo, o Sistema e o operador na Central de Telemedicina.
- Módulo de transmissão: trabalha com dois SIM Cards (Chips de telefonia móvel). Estabelece a ligação entre o equipamento na ambulância e a Central de Telemedicina no hospital.
- SIM Card (Chips de telefonia móvel): inseridos no módulo de transmissão, funcionam de forma redundante.

Os equipamentos foram instalados na parede lateral esquerda do salão da ambulância no interior da ambulância.



Figura 35: Equipamento em funcionamento no interior da ambulância

Capacitação Técnica

A equipe de médicos e resgatistas, estes últimos denominados Agentes de Atendimento APH, pois todos têm formação também como técnicos de enfermagem, foi treinada para o uso do equipamento de telemedicina e nos protocolos relacionados ao tema nas dependências da Base Operacional 1. Na Figura 36 é apresentada uma imagem que ilustra uma das práticas de treinamento da equipe médica pelo enfermeiro Walter dos Santos Reis, designado como multiplicador do Projeto de Telemedicina, para a equipe de APH da Base Operacional 1.



Figura 36: Treinamento da equipe no interior da ambulância

Foi elaborada um guia de operações do sistema de telemedicina com a sequência de etapas usada no treinamento para operação do equipamento de telemedicina instalado na ambulância, que incluiu como realizar uma videoconferência, estabelecendo contato com o Centro de Telemedicina do Hospital Albert Einstein.

Através da elaboração de uma diretriz de operação para a conferência e operação dos equipamentos de telemedicina, as equipes de plantão realizaram testes de comunicação entre a unidade móvel, composta por uma ambulância e as centrais de operação da empresa GetConnect e de telemedicina do Hospital Israelita Albert Einstein.

As conferências diárias foram registradas em checklist de operações da equipe de Atendimento Pré Hospitalar da CCR NovaDutra.

Análise dos Resultados

No segmento avaliado, empregou-se a plataforma WebEx para a conectividade entre a equipe da CCR NovaDutra e o Hospital Albert Einstein. Nos primeiros contatos, a transmissão foi realizada com a ambulância parada, e conseguiu-se uma excelente transferência de dados relacionados aos parâmetros de sinais vitais, tais como pressão arterial saturação e pulso. Os dados transmitidos pela CCR NovaDutra eram recebidos no Hospital Albert Einstein com uma atualização de valores inferior a 10 segundos, o que é considerado excelente pela equipe do Hospital. Todas as informações dos chamados foram registradas no servidor instalado na ambulância (Health Box), e a transmissão dos dados armazenados aconteceu imediatamente após o estabelecimento da conectividade durante o percurso da ambulância.

Durante a fase de análise de dados, verificou-se a possibilidade de contato com a equipe de Telemedicina do Hospital Albert Einstein através do sistema Vidyo. No entanto, notou-se que a conexão entre as equipes do hospital e da CCR Nova Dutra encontrava-se instável e sujeita a falhas de comunicação em alguns trechos da rodovia durante a fase de solicitação de segunda opinião através da videoconferência. Entretanto, observou-se que a perda momentânea da comunicação não implicava em perda da qualidade da assistência em saúde, visto que a elaboração de protocolos de atendimento e encaminhamento eram obedecidos e que o período de restabelecimento ocorreu minutos após a perda do sinal de conectividade.

Número de Pacientes Atendidos

No período de fevereiro a julho de 2017 foram atendidos 620 pacientes no segmento rodoviário correspondente ao km 217 ao km 231 da Rodovia Presidente Dutra, em São Paulo. Desse total 38 foram atendidos com o apoio do sistema de telemedicina.

Conclusões

Com base nos dados e observações coletados durante os primeiros 12 meses do Projeto Telemedicina foi observado que o modelo de assistência com telemedicina é viável e traz vantagens tanto para o paciente, por receber no atendimento pré-hospitalar cuidados da equipe especializada em emergência com apoio de especialistas que só poderiam avalia-lo após a chegada ao hospital, assim como para a equipe de APH, por poder iniciar em campo, de forma segura e orientada, procedimentos que, por vezes, só seriam sugeridos e iniciados também após a chegada ao hospital. Essas vantagens se mostrariam ainda mais expressivas em locais remotos onde a carência de médicos, principalmente especialistas, e a grande distância até um hospital adequado se mostram hoje como grandes desafios para o atendimento pré-hospitalar.

Em relação à conectividade do sistema de telecomunicação e transmissão de dados, na área estudada foi satisfatório.

3.1.41. Treinamento e Capacitação Técnica em Pavimentação

Introdução

O objetivo desta pesquisa foi treinar e capacitar equipes técnicas da SUINF da ANTT e da CCR-NovaDutra no dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos. O método de capacitação é o de treinamento presencial da equipe técnica em aulas preparadas por professores especializados nos assuntos abordados. O treinamento foi dividido em quatro etapas para abordar os principais assuntos relacionados ao dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos.

Etapas Executadas

O programa de capacitação técnica foi dividido em quatro etapas, conforme descrição a seguir:

Etapa 1: Materiais de Pavimentação

Etapa 2: Dimensionamento de pavimentos Flexíveis e Semirrígidos

Etapa 3: Avaliação de Pavimentos Rodoviários

Etapa 4: Palestra sobre o Estado da Arte da Pavimentação

1.1.1.22. Etapa 1: Materiais de Pavimentação

Esta Etapa foi executada na Sede da ANTT em Brasília D.F., entre os dias 14 e 17 de Fevereiro de 2017, com uma duração de 24 horas e com a participação da Equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra, como mostra a Figura 37.



Figura 37: Finalização do Módulo 1 na ANTT

Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Agregados: importância dos agregados, amostragem, ensaios de agregados, granulometria, formas, caracterização em geral etc.; produção de agregados; variáveis de projeto de dimensionamento.
- Solos: índices físicos; curva de compactação; CBR; módulo de resiliência; outros ensaios.
- Asfaltos: definição, tipos (CAP, emulsão asfáltica e asfalto diluído); principais características; ensaios de caracterização; ensaios do SHRP (noções).
- Misturas asfálticas: misturas a quente, a frio e mornas. Importância da dosagem de misturas asfálticas. Relação entre dosagem de misturas e problemas em campo. Dosagem Marshall. Dosagem Superpave (noções). Ensaios de desempenho de misturas asfálticas: dano por umidade induzida; módulo de resiliência; módulo dinâmico; flow number; fadiga por compressão diametral; fadiga na flexão de 4 pontos.
- Materiais tratados com cimento e cal hidratada.
- Materiais reciclados na pavimentação: resíduo de construção e demolição; reciclagem a frio com emulsão e espuma de asfalto; reciclagem com cimento.

1.1.1.23. Etapa 2: Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos

Esta Etapa foi executada na Sede da ANTT em Brasília D.F., entre os dias 15 e 18 de Maio de 2017, com uma duração de 24 horas e com a participação da Equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra.

Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Terminologias, funcionamento estrutural do pavimento, distribuição de tensões, mecanismos estruturais das camadas, vida útil, vida de projeto, mecânica de pavimentos. Principais elementos e variáveis para o dimensionamento.
- Princípios do dimensionamento de pavimentos rodoviários.
- Tráfego rodoviário.
- Princípios do dimensionamento de pavimentos rodoviários.
- Tráfego rodoviário.
- Dimensionamento pelo método do antigo DNER.
- Dimensionamento pelo método da AASHTO de 1993.
- Análise mecanicista por meio de software baseado na teoria de sistema de camadas elásticas (TSCE).
- Noções sobre o método de dimensionamento norte americano MEPDG – Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide;
- Estágio atual de desenvolvimento do novo método de dimensionamento que vêm sendo proposto dentro da “Rede Temática de Asfalto”.
- Princípios do dimensionamento de pavimentos rodoviários.
- Tráfego rodoviário.
- Dimensionamento pelo método do antigo DNER.
- Dimensionamento pelo método da AASHTO de 1993.
- Análise mecanicista por meio de software baseado na teoria de sistema de camadas elásticas (TSCE).
- Noções sobre o método de dimensionamento norte americano MEPDG – Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide;
- Estágio atual de desenvolvimento do novo método de dimensionamento que vêm sendo proposto dentro da “Rede Temática de Asfalto”.

1.1.1.24. Etapa 3: Avaliação de Pavimentos Rodoviários

Esta Etapa foi executada na Sede da ANTT em Brasília D.F., entre os dias 19 e 22 de Setembro de 2017, com uma duração de 24 horas e com a participação da Equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra. Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Avaliação de defeitos;
- Análise estrutural de pavimentos: viga Benkelman; *Falling Weight Deflectometer* (FWD); Curviâmetro;
- Retroanálise;
- Avaliação da aderência pneu-pavimento em pistas molhadas;
- Ruído;
- Indicadores progressivos;
- Segurança viária: sinalização horizontal; tipos de pinturas; medidas de retroreflectividade.

1.1.1.25. Etapa 4: Palestra sobre o Estado da Arte da Pavimentação

Esta Etapa foi executada na Sede da ANTT em Brasília D.F., no dia 23 de Novembro de 2017 e foi concluída com a visita ao Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra em Santa Isabel São Paulo, no dia 24 de Novembro de 2017. Nesses dias houve a participação da Equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra, conforme ilustra a Figura 38. Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Novas tecnologias
- Tendências para a pavimentação
- Cenário nacional e internacional



Figura 38: Visita ao Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra

Considerações Finais

Após as conclusões dos treinamentos foi realizado um levantamento de satisfação com os participantes das equipes envolvidas neste treinamento. De forma geral, o resultado foi muito positivo sendo que os participantes ressaltaram a grande abrangência do curso e a excelente organização, além da boa disponibilidade dos professores responsáveis pelo treinamento para

3.1.42. Ecodriving BR – reduzindo custos e ampliando benefícios socioambientais na principal rodovia brasileira

Introdução

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência do aprendizado motor como ferramenta para aprimorar a condução em geral e reduzir suas externalidades socioambientais. Para atender ao objetivo geral deste estudo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- realizar um levantamento de dados disponíveis relativos à utilização da frota da empresa, tais como consumo de combustível, acidentes e infrações;
- realizar um acompanhamento da operação da frota;
- aplicar ações de treinamento e conscientização, composta por duas atividades:

– condução avançada em um veículo real, praticados em pistas específicas para este fim;

– treinamento de percurso rodoviário com foco em redução de consumo de combustível, eco condução e busca de posturas seguras no trânsito como antecipação e distância e seguimento.

- realizar um levantamento de dados pós ações de treinamento e conscientização;
- realizar uma análise estatística para comparar os resultados antes e após treinamento.

Dados da Frota da CCR Novadutra nos Últimos Anos

Os dados fornecidos pela CCR NovaDutra referem-se à operação da frota nos últimos 5 anos ou mais e são divididos em 3 tópicos: consumo de combustível; acidentes; e infrações de trânsito.

Consumo de combustível da frota da CCR NovaDutra: foram fornecidas informações de consumo de combustível de todos os veículos da frota da CCR NovaDutra, de 2012 até 2017, que são compostas por dados dos veículos (região, prefixo, placa, tipo, modelo, ano de fabricação e capacidade do tanque) e os dados variáveis referentes ao combustível (data e hora do abastecimento; quantidade de litros do abastecimento atual; tipo do combustível; hodômetro atual; quilômetros percorridos; desempenho do veículo (Km/l); valor unitário do litro em R$).

Acidentes com a frota da CCR NovaDutra: foram fornecidos informações de acidentes com a frota de todos veículos da CCR NovaDutra, de 2010 até 2017, com os dados variáveis referentes aos acidentes (data da ocorrência; identificação da viatura; local da ocorrência; envolvimento de terceiros; vítima ND; outras vítimas; causa provável; tipo; período; providências).

Infrações sofridas pela frota da CCR NovaDutra: foram fornecidas informações de infrações de trânsito sofridas pela frota da CCR NovaDutra, de 2013 até 2017, que continham os dados variáveis referentes as infrações (data da infração; modelo da viatura; placa de identificação da viatura; tipo de infração; pontuação).

Acompanhamento da Operação de Atendimento ao Usuário

No dia 18 de abril de 2017 foi realizada na sede da CCR NovaDutra em Santa Isabel -SP, uma reunião para apresentação do projeto para os gestores das áreas operacionais. Nessa oportunidade foi solicitado aos gestores de área a autorização para que os pesquisadores do projeto visitassem as bases operacionais e acompanhassem o trabalho dos colaboradores para conhecer as reais condições de atuação dos mesmos, tendo como objetos de análise: as atividades; os riscos envolvidos; os padrões de condução utilizados; as condições das viaturas; as vias, acessos as bases, retornos, pátios de manobras utilizados nas bases operacionais e em postos de serviços.

Métodos e Técnicas Utilizadas na Pesquisa

Para analisar o comportamento do condutor foram aplicados dois questionários e realizadas duas séries de exercícios práticos em condições de condução real, por sujeito. Para os exercícios de condução avançada foi utilizado um veículo de marca Chevrolet modelo Tracker 2.0, ano 2008, monitorado. Para os exercícios de percurso rodoviário foi utilizado um veículo dotado de

computador de bordo com Driving Eco[2] e equipado com *Mobileye*, que possibilita a medição da distância de seguimento. O Driving Eco atribui classificação de 1 a 5 estrelas para os tópicos aceleração, troca de marchas e antecipação e, uma nota geral de 1 a 100 para a condução no trecho com base nos padrões de Eco Driving. O veículo é equipado com *Mobileye* que informa e registra a distância mantida do veículo que segue à frente. Esta ação tem como objetivo monitorar hábitos do motorista relativos ao desempenho do consumo de combustível, a manutenção de uma distância de seguimento e o de antecipação de reação a condições adversas à frente.

Os exercícios de condução avançada foram aplicados em uma pista plana com 200 m de comprimento e 25 m de largura, sem pavimentação, com o piso bem nivelado e cones dispostos conforme Figura 39.

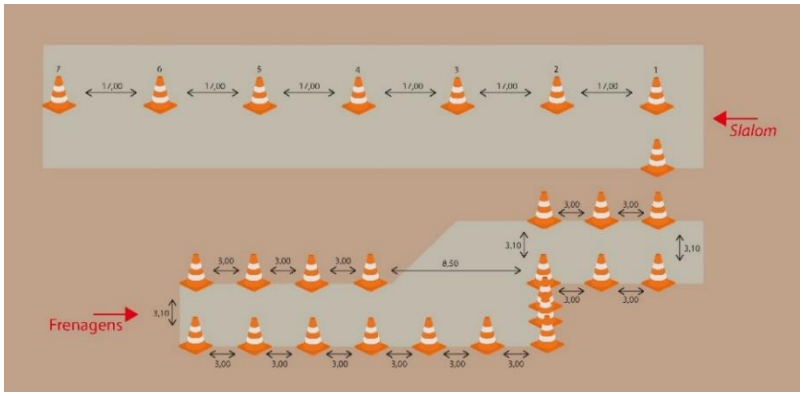


Figura 39: Croqui da disposição dos cones na pista de treinamento.

Os exercícios de condução avançada são compostos por (Figura 40):



Figura 40: Exercícios de condução avançada.

Slalom: exercício de curvas sucessivas de mesmo raio, porém em direções opostas, com cones representando obstáculos, com o objetivo de monitorar a coordenação de controles de visão, de aceleração e posição das mãos no volante;

Frenagem total: exercício de aceleração até a velocidade de 50 km/h em terceira marcha, mantendo a velocidade até receber comando para então frear o mais rápido e eficientemente

possível, com o objetivo de monitorar tempo de reação, regime de giros do motor, posição ergonômica, pressão no pedal de freio, utilização da embreagem e espaço de frenagem;

Frenagem com desvio: exercício de aceleração até a velocidade de 50 km/h em terceira marcha, mantendo a velocidade até receber comando para frear e promover a mudança de faixa de rolamento, devendo concluir a frenagem e o desvio no menor espaço possível. Esse exercício simula uma situação de acidente com obstrução da faixa de rolamento e espaço insuficiente para parar, mas com pequeno espaço livre para mudança de faixa de rolamento à esquerda.

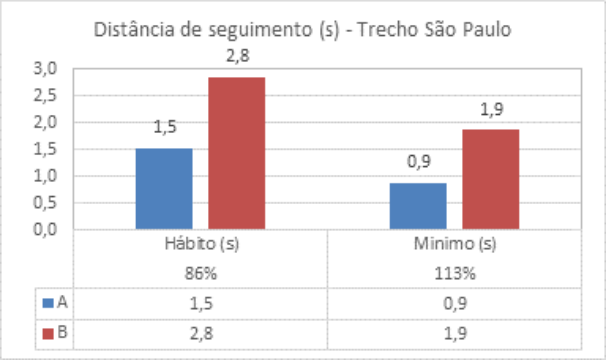
As séries de exercícios práticos foram realizadas sequencialmente, de forma que o participante ficasse o menor tempo possível ocioso durante o treinamento e foram compostas por duas etapas:

- pré-treinamento: quando os sujeitos são submetidos aos exercícios dirigindo da sua maneira usual, ou seja, sem interferência dos pesquisadores;
- pós-treinamento: quando os sujeitos são submetidos aos exercícios após as orientações teóricas.

Os dados de posturas dos motoristas e monitoramento dos veículos foram colhidos nas duas etapas e comparados estatisticamente para verificar se ocorreram mudanças de posturas que possam levar ao impacto socioambiental.

Análise dos Dados Obtidos nas Ações de Treinamento de Percurso Rodoviário

O percurso rodoviário com a metodologia descrita anteriormente foi realizado em dois trechos da Rodovia Presidente Dutra, um no Estado de São Paulo e outro no Estado do Rio de Janeiro. Os resultados apresentaram um incremento da distância de seguimento adotada pós treinamento (bloco B) em comparação com a primeira passagem (bloco A). Esse incremento foi observado no hábito (tempo em segundos que o sujeito procurou manter do veículo que seguia a sua frente) e no mínimo (menor tempo em segundos que o sujeito manteve de um veículo que seguia a sua frente). Os resultados foram semelhantes para os dois trechos com um aumento de 86% no hábito e são apresentados na Figura 41.



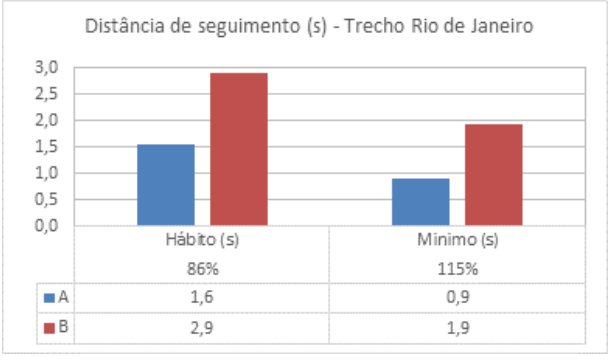


Figura 42: Distância de seguimento média antes (A) e pós treinamento (B).

Os resultados apontam também um incremento no desempenho de quilômetros percorridos com um litro de combustível (km/l), alcançado pós treinamento (bloco B) em comparação com a primeira passagem (bloco A), sendo que o desempenho médio no trecho São Paulo apresentou 11,7% de redução de consumo de combustível, enquanto que a redução do trecho Rio de Janeiro foi de 9,9%. O tempo utilizado nos percursos também sofreu incremento pós treinamento (bloco B) em comparação com a primeira passagem (bloco A), sendo de 11,7% de acréscimo para o trecho São Paulo e de 8,7% para o trecho Rio de Janeiro. As Figuras 42 e 43 mostram, respectivamente, a classificação média quanto a aceleração, troca de marchas e antecipação e a nota geral para a condução, atribuídas pelo Driving Eco para os trechos percorridos.

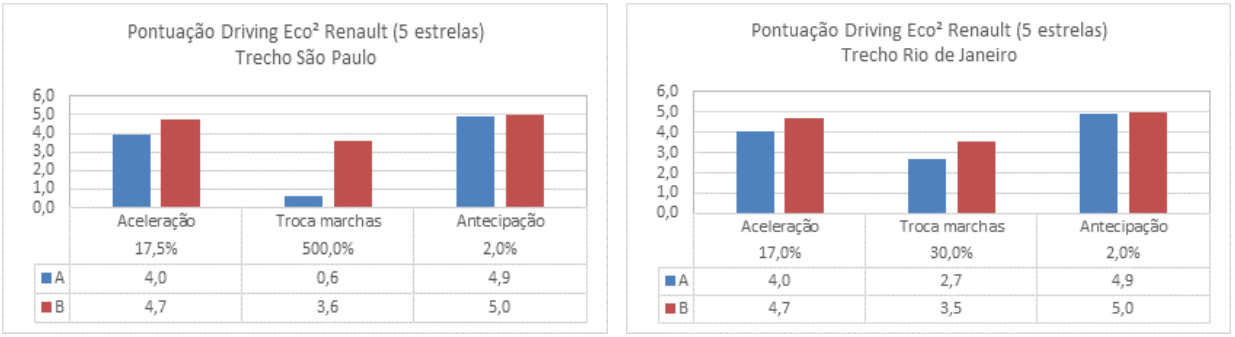


Figura 42: Classificação média do Eco² Renault para os percursos antes (A) e pós treinamento (B).

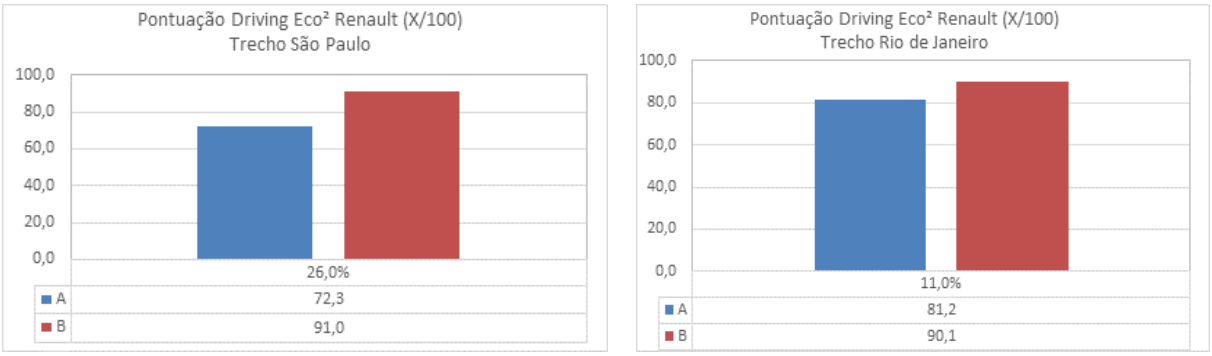


Figura 43: Nota geral média do Eco² Renault para os percursos antes (A) e pós treinamento (B).

Análise dos Dados Obtidos nas Ações de Treinamento de Condução Avançada

As atividades de condução avançada foram realizadas em duas pistas semelhantes, uma no Estado de São Paulo e outra no Estado do Rio de Janeiro. As duas pistas possuíam o mesmo tipo de piso e o mesmo espaçamento entre os cones. Os resultados apresentaram uma redução no ângulo de 11,5% no angulo esterçamento no exercício de *Slalom* adotada pelos sujeitos pós treinamento (bloco B) em comparação com a primeira passagem (bloco A), com as respectivas médias de 153° e 173°.

Análise dos Dados Fornecidos pela CCR NovaDutra sobre Acidentes com a Frota Própria de 2010 a 2017

Com base nos dados fornecidos sobre os acidentes com a frota própria da CCR NovaDutra no período de 2010 a 2017 foram desenvolvidas as análises apresentadas a seguir, com objetivo de identificar, filtrar e requalificar os acidentes ocorridos e identificar os que poderiam ter sido evitados com ações específicas de treinamento dos condutores. Os acidentes ocorridos foram classificados em 7 categorias, quanto a causa provável, e foram divididos em dois grupos:

- **Grupo 1**: desatenção, erro de procedimento, ignorado e imprudência, indicam que pode ter havido falha do colaborador e que o acidente poderia ter sido evitado se o mesmo estivesse melhor treinado para a situação ocorrida.
- **Grupo 2**: falha de terceiros, falha mecânica e imprevisto, indicam que o acidente ocorreria independente da ação do colaborador.

Foram identificados 975 acidentes nesse estudo, sendo que 44% (431) ocorreram por culpa do colaborador, enquanto que 56% (544) dos acidentes não poderiam ser evitados. A análise Ecodriving BR também qualificou os dados por atividades: viatura em deslocamento (41%); viatura em atendimento (21%); tipo de equipamento (11%) e durante o estacionamento e manobras (27%).

A partir da análise Ecodriving BR foram atribuídos os tratamentos necessários para que esses acidentes fossem evitados e também identificados os acidentes que aconteceram por culpa de terceiros, dos quais o colaborador não poderia evitá-lo. Os resultados das análises mostram que em 92% (894) dos acidentes foram encontrados indícios de falha do colaborador e que o evento poderia ter sido evitado se o condutor estivesse melhor treinado para a situação ocorrida. Nos 8% (80) dos acidentes restantes foi considerado que os mesmos ocorreriam independente da ação do colaborador.

A Probabilidade de Acidente em Deslocamento

Em geral o acidente rodoviário é muito complexo, mas esse trabalho é formado por um espaço amostral bem definido e limitado a acidentes com viaturas de uma concessionaria de rodovia, em deslocamento na própria rodovia por ela atendida, veículos e motoristas dedicados a uma mesma função e a um mesmo trecho desta via, é possível determinar a probabilidade de acidente ‘P(Ac)’ a partir da seguinte equação:

$$P(\mathrm{Ac}) = P(\mathrm{si}) \times P(\mathrm{ep}) \times P(\mathrm{rc}) \qquad \text{Equação 7}$$

onde:

- P(si) - Probabilidade de ocorrência de uma situação inesperada: engloba os riscos gerais que podem ocorrer nesse tipo de rodovia estudada e será utilizada como uma constante em comparação das ocorrências dos últimos anos e simulações de ocorrências futuras.
- P(ep) - Probabilidade de estar próximo do veículo que segue a sua frente: considerando o tempo de reação do ser humano de 1 segundo, supõe-se que, caso ocorra uma situação inesperada (i), ocorrerá um acidente sempre que tiver deslocamentos com distâncias de seguimento inferiores a esse tempo. Probabilidade medida no exercício de percurso rodoviário, sendo que as médias foram de 0,9s pré-treinamento e de 1,9s pós-treinamento.
- P(rc) - Probabilidade da reação do condutor ser assertiva em uma manobra de emergência: probabilidade medida no exercício de *Slalom,* onde o ângulo de esterçamento superior a 180° indica perda de controle e suposto acidente se ocorrer situação inesperada (i).

Da base de dados de acidentes com viatura em deslocamento da CCR NovaDutra entre 2010 e 2017 pode-se verificar que a média anual foi de 50 acidentes, com um desvio padrão de 10,5. Considerando um universo de 400 colaboradores motoristas, a probabilidade aleatória de cada um deles se acidentar durante um ano é de 0,125 ou 12,5%, que será adotada como a probabilidade de envolvimento em acidente pré-treinamento: $P(Ac_{preT})=0,125$. Para determinar a probabilidade de acidente pós-treinamento, $P(Ac_{posT})$, foram consideradas as seguintes condições:

- P(si), P(ep) e P(rc) - eventos independentes;
- Cálculo de P(ep) e P(rc) com valores determinados no pré e pós treinamento

Com isso, a probabilidade de acidente pós-treinamento $P(Ac_{posT})$ foi 0,004 ou 0,4%. Essa análise mostra que a probabilidade de um colaborador motorista se acidentar pode ser reduzida de 12,5% para 0,4%, caso esses colaboradores incorporem em seu padrão de condução as atitudes medidas no pós treinamento deste projeto, o que geraria uma economia potencial anual de R$921.761,00 em danos materiais com a frota da CCR NovaDutra, considerando o custo médio para os danos materiais de um acidente rodoviário, sem vítimas com veículos utilitários e caminhões que atualizado pelo IGP-M é de R$ 19.044,65 (IPEA 2006).

Análise de Emissões por Consumo de Combustíveis com Frota Própria da CCR NovaDutra de 2012 a 2017

Com base nos dados fornecidos da CCR NovaDutra no período de 2012 a 2017 sobre o consumo de combustíveis e inventários de emissões de gases de efeito estufa com a frota própria, foram desenvolvidas as Tabelas 27 e 28, com objetivo de destacar as informações anuais do consumo de combustível, assim como de emissões de GEE.

Tabela 27: Consumos anuais da frota da CCR NovaDutra em litros, por tipo de combustível.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Diesel	1.865.754	1.817.202	1.688.813	1.452.944	1.413.184	1.408.952
Gasolina	474.649	39.892	33.402	23.010	15.370	7.136
Etanol	12.299	645.568	647.784	622.978	606.091	622.689
GNV		331		628	2.621	1.472
Total	2.352.703	2.502.994	2.370.000	2.099.561	2.037.268	2.040.251

Fonte: CCR NovaDutra (2018)

Tabela 28: Emissões de GEE anuais da frota da CCR NovaDutra em (tCO2e).

	2012	2013	2014	2015	2016
tCO2e	5.660,10	4.725,49	4.220,64	3.550,90	3.424,58

Fonte: CCR NovaDutra (2018)

Projeções de Redução de Consumo de Combustível e Emissões de GEE

Com base no consumo de combustível da frota da CCR NovaDutra no ano de 2017 foi estimada a emissão de gases de efeito estufa (GEE) da frota neste ano (SENAI, 2017) (Tabela 29).

Tabela 29: Estimativa de emissões de GEE anuais da frota da CCR NovaDutra em (tCO2e) no ano de 2017.

	Consumo (l)	Emissões GEE (tCO2e)
Diesel	1.408.952	3.706,90
Gasolina	7.136	15,94
Etanol	622.689	0,24
GNV	1.472	3,00
Total	2.040.251	3.726,08

Fonte: CCR NovaDutra (2018)

Considerando os resultados obtidos no desempenho de quilômetros percorridos com um litro de combustível (km/l), alcançado pelos sujeitos pós treinamento (bloco B) em comparação com a primeira passagem (bloco A), se os colaboradores incorporarem em seu padrão de condução as atitudes medidas no pós treinamento deste projeto, a CCR NovaDutra teria uma economia potencial anual de 11% do consumo de combustível de sua frota e equivalente redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), conforme ilustrado na Tabela 30.

Tabela 30: Estimativa de redução de consumo de combustível e emissões de GEE anuais da frota da CCR NovaDutra

	Redução consumo (l)	Redução de GEE (tCO2e)
Diesel	154.984	407,76
Gasolina	785	1,75
Etanol	68.496	0,03
GNV	162	0,33
Total	224.427	409,54

Fonte: CCR NovaDutra (2018)

Com isso, pode-se verificar a possibilidade de redução no consumo de combustível da frota, que, com base no consumo anual de 2017, representaria 224.427 litros de combustível e 409 toneladas de CO^2 equivalente em emissões de GEEs. A um preço médio de combustível de 3,26/l, esta redução de consumo geraria uma economia anual da ordem de R$733.128,20.

Considerações Finais

O método de usar as duas atividades de treinamento para medir padrões e desenvolver competência, buscando o distanciamento do risco e a capacidade de reação em situações de emergência, se mostrou robusto para caracterizar o risco de acidente de cada postura de direção adotada pelos participantes. Posturas de direção adequadas que propiciam reduções de impactos socioambientais no pós treinamento não acarretaram grande aumento no tempo do percurso e este, em média foi inversamente proporcional a redução do consumo de combustível.

De forma geral, os resultados obtidos de incremento de distância de seguimento, melhores reações em situações de emergência, redução de consumos de combustível e emissões de GEEs, sinalizam que é possível diminuir acidentes e minimizar impactos socioambientais a partir de posturas desejáveis de condução.

O presente trabalho sinaliza uma potencial economia anual, caso as posturas pós treinamento sejam incorporadas na operação, de R$921.761,00 em damos materiais oriundos de acidente com viaturas em deslocamento, de R$733.128,20 em combustível e também uma redução de 409 toneladas de CO^2 equivalente, em emissões de GEEs.

3.1.43. Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto e cimento Portland, Construção e Monitoramento de um Trecho Experimental

Introdução

A técnica de fresagem de pavimentos é muito utilizada na Rodovia Presidente Dutra nas atividades de manutenção e restauração de pavimentos. O resíduo gerado dessas atividades é o comumente chamado “material fresado” ou simplesmente “fresado”. A reciclagem dos pavimentos asfálticos, por meio do reaproveitamento do fresado, vem se incrementando no mundo inteiro e também no Brasil, como uma técnica atrativa para restaurar pavimentos existentes. A popularidade dessa técnica deve-se principalmente ao fato de atender aos objetivos atuais da sociedade em reduzir o consumo de recursos naturais, de energia e a emissão de poluentes ao meio ambiente.

Na atualidade existem várias alternativas para reaproveitar o material fresado. Uma delas consiste na possibilidade de reaproveitar o material fresado a frio para restaurar as bases e sub-bases dos

pavimentos. Nesses casos, até 100% do material fresado pode ser reaproveitado por meio de sua estabilização com agentes cimentantes (cimento Portland, cal hidratada), materiais asfálticos (emulsão asfáltica e espuma de asfalto) ou por meio de combinações destes.

Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a técnica de reciclagem de pavimentos com espuma de asfalto por meio da construção de um trecho experimental.

Para alcançar o objetivo principal foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- selecionar um segmento para a construção do trecho experimental com espuma de asfalto na Rodovia Presidente Dutra;
- dimensionar a estrutura do pavimento para restauração do segmento considerando o uso de camadas de material fresado estabilizado com espuma de asfalto;
- realizar ensaios de dosagem do material fresado estabilizado com espuma de asfalto, e ensaios em laboratório para a caracterização mecânica;
- realizar o acompanhamento da construção do trecho teste com espuma de asfalto, com os respectivos ensaios de controle tecnológico;
- monitorar o trecho por meio de ensaios de campo, para avaliar a evolução do comportamento frente aos esforços impostos pelo tráfego e pelo clima.

Seleção do Trecho Experimental

A Rodovia Presidente Dutra (BR-116) apresenta elevados volumes de tráfego ao longo de toda sua extensão. Portanto, a seleção do local para executar o trecho experimental foi um desafio, já que Concessionária tem a preocupação de manter o tráfego livre e em condições de máxima segurança para o usuário. O trecho selecionado foi a faixa de aproximação à cabine de pedágio de cobrança automática de número 12, no Município de Jacareí (km 165, Pista Norte, São Paulo) conforme apresenta-se na Figura 44.



Figura 44: Localização da faixa de aproximação à cabine de pedágio de cobrança automática de número 12.

1.1.1.26. Avaliação da estrutura existente

No segmento apresentado na Figura 1 foi realizada uma janela de inspeção para identificar as camadas estruturais do pavimento e suas espessuras e também para obter amostras representativas dessas camadas. Na Figura 45 apresenta-se a estrutura de pavimento na faixa selecionada para construção do trecho experimental. As amostras do material do subleito e da camada de BGS coletadas na janela de inspeção foram submetidas aos ensaios de caracterização.



Figura 45: Estrutura de pavimento do trecho experimental.

1.1.1.27. Localização da estocagem de material fresado

Após definição da localização do trecho experimental, a Concessionária CCR NovaDutra estabeleceu um canteiro de estocagem para o material fresado, originado em diversas obras de conservação da Rodovia Presidente Dutra, próximas à Praça de Pedágio do Município de Jacareí, SP. O canteiro de estocagem do material fresado está localizado no km 158, Pista Norte, São Paulo, próximo do trecho experimental.

Dimensionamento da Estrutura do Trecho Experimental

Para o dimensionamento da estrutura do trecho experimental foi utilizada a metodologia usualmente aceita no Brasil para verificação de tensões e deformações admissíveis nos materiais componentes das diversas camadas. No segmento do trecho teste, o tráfego homogêneo é o seguinte:

- NUSACE = $2{,}4 \times 10^8$
- NAASHTO = $7{,}75 \times 10^7$

Esses níveis de tráfego foram utilizados para determinar a deflexão no topo do pavimento (D), a deformação de tração (ε_t) admissível na fibra inferior do revestimento asfáltico e a deformação vertical (ε_v) admissível no topo do subleito, a partir de modelos usualmente empregados para determinação desses parâmetros. Já que a mistura de material fresado com espuma asfáltica tem baixos teores de asfalto efetivo, nesta camada usualmente não é considerada a fadiga como um mecanismo de ruptura (JENKINS, 2012; COLLINGS e JENKINS, 2011; FU e HARVEY, 2007).

A estrutura concebida para construção do trecho experimental é apresentada na Tabela 31 e na Tabela 32 apresentam-se os resultados da avaliação realizada por meio do software ELSYM5. Nota-se na Tabela 32 que os valores obtidos para a estrutura da Tabela 31 atendem aos parâmetros admissíveis calculados para o tráfego previsto para o trecho experimental para 10 anos de serviço.

Tabela 31: Estrutura para a construção do trecho experimental

Camada	Espessura (mm)	MR (MPa)	Coeficiente de Poisson
Revestimento Asfáltico tipo *Gap Graded*	30	4500	0,30
Fresado estabilizado com espuma de asfalto	310	1500	0,35
Brita graduada simples (remanescente)	80	300	0,35
Rachão (existente)	200	250	0,35
Subleito	-	120	0,40

Tabela 32: Parâmetros admissíveis e obtidos no Elsym5

Parâmetro	Valor admissível	Valor obtido
Deflexão no topo do pavimento (10-2mm)	37,3	28,9
Deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (εt)	6,18E-05	1,36E-06
Deformação vertical no topo do subleito (εv)	2,02E-04	1,40E-04

Dosagem do Fresado Estabilizado com Espuma de Asfalto

Para realização da dosagem do material fresado estabilizado com espuma de asfalto foi utilizado o Manual de Reciclagem a Frio Wirtgen (2012) e o TG2 da Asphalt Academy (2009). Para mais detalhes sobre este processo de Dosagem também pode ser consultado Klinsky e Faria (2018).

1.1.1.28. Granulometria

Inicialmente, o material fresado foi coletado do canteiro de estocagem localizado no km 158, Pista Norte, São Paulo e foi submetido a análise granulométrica. Pode-se verificar que esse material não atendia a faixa recomendada pela Wirtgen (2012) para ser estabilizado com espuma de asfalto. Assim, foi necessário adicionar 15% de pó de pedra para corrigir a granulometria e também 1% de cal hidratada do tipo CH-1.

1.1.1.29. Compactação Proctor

Foi realizada a compactação Proctor na Energia Modificada para determinação do teor de umidade ótima e a massa específica seca máxima da mistura. Os resultados desse foram umidade ótima de 5,4%, para atingir uma massa específica seca máxima de 2,020 g/cm^3.

1.1.1.30. Determinação do teor ideal de espuma de asfalto

Foi empregado um equipamento laboratorial da Wirtgen para a determinação do teor ideal de espuma de asfalto para estabilizar o material fresado. Os teores de espuma asfáltica utilizados na dosagem foram de 1,8 a 2,6%, com intervalos de 0,2%. Após a mistura, foram produzidos CPs de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura com o compactador vibratório. Os CPs compactados para cada teor de espuma de asfalto foram curados em estufa ventilada na temperatura de 40°C durante

72 h. Após o período de cura, metade dos CPs foi imersa em água durante 24 h na temperatura de 25°C e a outra metade foi conservada em incubadora também a 25°C durante 24 h. Após esse período, os CPs foram submetidos ao ensaio de RT por compressão diametral. A partir dos resultados médios de RT foi selecionado o teor de 2,3% de espuma de asfalto, por atender o critério de resistência mínima recomendado pela Asphalt Academy (2009).

1.1.1.31. Caracterização mecânica dos materiais

Após dosagem dos materiais, foram moldados CPs de 150 mm de diâmetro e 65 mm de altura para execução do ensaio de compressão diametral cíclica, com o objetivo de determinar as características de rigidez do material. Após compactação, os CPs foram secados em estufa ventilada a 40ºC até obter um peso constante. Os resultados dos ensaios mostram que os valores de resistência atenderam as exigências da especificação: na condição seca = 240 kPa >225kPa e na condição saturada = 206 kPa >100kPa.

Acompanhamento da Construção do Trecho Experimental

Em seguida serão descritas as atividades executadas para a construção do trecho experimental com material fresado estabilizado com espuma de asfalto.

1.1.1.32. Britagem do material fresado

Para a construção do trecho experimental, o material fresado teve que ser britado, para que atendesse a granulometria (Figura 46). Após a britagem o material fresado foi submetido novamente ao ensaio de análise granulométrica, onde pode-se observar que houve uma variação em comparação com o material utilizado na dosagem. Assim, foi realizado um ajuste na composição granulométrica dos materiais: pó de pedra, cal hidratada e fresado. A Tabela 33 apresenta a nova composição empregada para a execução do trecho experimental.



Figura 46: Material fresado; a) antes da britagem; b) após a britagem

Tabela 33: Composição granulométrica corrigida após britagem do material fresado

Peneira		Faixa Wirtgen		Fresado	Pó de pedra	Cal hidratada CH-1	Mistura obtida
N°	mm	MIN	MAX				
2"	50,8	100	100	100	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	87	100	100	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	65	100	100	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	55	100	90,9	100,0	100,0	92,7
Nº 4	4,8	35	62	51,1	96,3	100,0	59,7
Nº 8	2,4	25	47	33,4	77,6	100,0	42,0
Nº 30	0,6	13	28	14,7	47,6	100,0	21,4
Nº 50	0,3	9	22	8,2	30,9	100,0	13,2
Nº 100	0,15	6	17	4,2	16,8	98,0	7,4
Nº 200	0,074	4	12	1,6	10,5	92,0	4,1
Mistura dos materiais (%)				81	18	1	100

1.1.1.33. Produção da mistura de fresado com espuma asfáltica

Após a britagem do material fresado e correção da composição granulométrica, foi realizada a mobilização da usina para produção da espuma de asfalto e mistura dos componentes. Neste estudo foi utilizada a usina móvel KMA 220 Wirtgen. Antes de serem iniciados os trabalhos de trabalho, a usina foi calibrada.

Foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral em CPs moldados em laboratório com o material fresado estabilizado com espuma de asfalto, na condição seca e após saturação durante 24 horas. Os resultados obtidos mostram que todos os valores obtidos foram superiores aos valores recomendados pela especificação da Asphalt Academy (2009) (na condição seca >225kPa e na condição saturada>100kPa) e foram concordantes com os valores obtidos na etapa de dosagem.

1.1.1.34. Fresagem do pavimento do trecho experimental

O trecho experimental foi fresado na espessura total de 34 cm (Figura 47), para posterior aplicação de 31 cm do material fresado estabilizado com espuma de asfalto e 3 cm de revestimento asfáltico tipo *Gap Graded*. Vale salientar que a fresadora precisou de três passagens para cortar o pavimento na espessura total de 34 cm.



Figura 47: Fresagem do pavimento do trecho experimental.

Após a fresagem do pavimento, foi realizado um levantamento deflectométrico no fundo da caixa de fresagem.

1.1.1.35. Aplicação da Mistura Estabilizada com Espuma Asfáltica

A camada de fresado estabilizado com espuma de asfalto de 31 cm foi aplicada em duas camadas, a primeira de 16 cm e a segunda de 15 cm, com o auxílio de uma vibroacabadora de asfalto. A primeira camada foi compactada logo após o espalhamento com compactador tipo pé de carneiro e finalizada com compactador pneumático (Figura 48).



Figura 48: Aplicação da primeira camada de fresado estabilizado com espuma de asfalto.

Na Figura 49 apresenta-se o acabamento da segunda camada de fresado estabilizado com espuma de asfalto e nota-se que também o espalhamento é realizado com vibroacabadora, mas, nesta camada, emprega-se um rolo compactador de chapa lisa, seguido por um rolo compactador pneumático. O objetivo de utilizar esse tipo de rolo é obter uma superfície lisa e com um acabamento bem regular.



Figura 49: Aplicação da segunda camada de fresado estabilizado com espuma de asfalto

Na primeira camada e na segunda camada de fresado estabilizado com espuma de asfalto foi realizado o controle de compactação por meio do ensaio de frasco de areia (DNER-ME 092/94), onde foram determinados o grau de compactação de cada camada. Os valores médios do grau de compactação das duas camadas foram superiores a 100%, sendo 102% para a primeira e 101,7% para a segunda.

Foi realizado um levantamento deflectométrico com FWD (*Falling Weigth Deflectometer)* também na superfície da superfície da segunda camada de fresado estabilizado com espuma, após concluída a compactação.

Logo após a finalização da compactação da segunda camada de fresado estabilizado com espuma, realiza-se uma fresagem fina, com o objetivo principal de obter uma boa regularidade do acabamento dessa camada. Na continuação, com o auxílio de ar comprimido, realiza-se a limpeza da superfície dessa camada fresada.

1.1.1.36. Aplicação do revestimento asfáltico

Antes de executar o revestimento asfáltico final do tipo *Gap Graded* (Figura 50), na espessura de 3 cm a camada, foi aplicada a pintura de ligação na superfície da segunda camada do fresado estabilizado com espuma de asfalto. A Figura 51 apresenta a aparência final do trecho experimental após uma semana de sua execução. Vale aqui salientar que para finalizar todo o trecho experimental foram necessários três dias de trabalho.



Figura 50: Aplicação do revestimento asfáltico tipo *Gap Graded.*



Figura 51: Trecho experimental após uma semana de sua execução.

Monitoramento do Trecho Experimental

O monitoramento do trecho experimental para avaliar seu comportamento e desempenho no decorrer do tempo e da ação do tráfego foi realizado após 1 semana, 3 meses, 6 meses, 8 meses e 12 meses. Assim, iniciou-se o monitoramento por meio do levantamento deflectométrico já na fase construtiva, com o equipamento FWD (*Falling Weigth Deflectometer*) de acordo com o DNER PRO 273-96, pela empresa COPAVEL. As leituras foram executadas no mesmo dia de execução do trecho experimental, em duas condições: no fundo da caixa de fresagem, no centro da faixa, após fresagem de 34 cm o equipamento realizou as leituras no topo da camada de brita graduada simples remanescente; e no topo da segunda camada de fresado estabilizado com espuma de asfalto, no centro da faixa, antes da aplicação do revestimento asfáltico tipo *Gap Graded*.

Na Figura 52 apresentam-se algumas imagens da superfície do trecho experimental após 1 ano de sua construção, na qual não foi notada nenhuma manifestação patológica à simples vista.



Figura 52: Trecho experimental após 1 ano da sua construção

Para a execução de ensaios laboratoriais e confirmação dos parâmetros mecânicos após este tempo de cura em pista foi realizada a extração de corpos de prova do fresado estabilizado com espuma de asfalto.

1.1.1.37. Levantamento da irregularidade longitudinal

O levantamento da irregularidade longitudinal (IRI) foi realizado com perfilômetro laser, de acordo com a ASTM E 950, após uma semana, um mês, três meses, 6 meses e 1 ano da execução do trecho. A Figura 53 apresenta os resultados de IRI na trilha externa e na trilha interna, nos diversos tempos de aferição após a construção do trecho experimental. Observa-se que houve um pequeno incremento da irregularidade no levantamento após um ano especialmente na trilha de roda externa, entre as estacas 280 e 220. Vale notar que essas estacas referem-se ao trecho final, próximo ao pavimento de concreto na praça de pedágio, cabine N° 12.

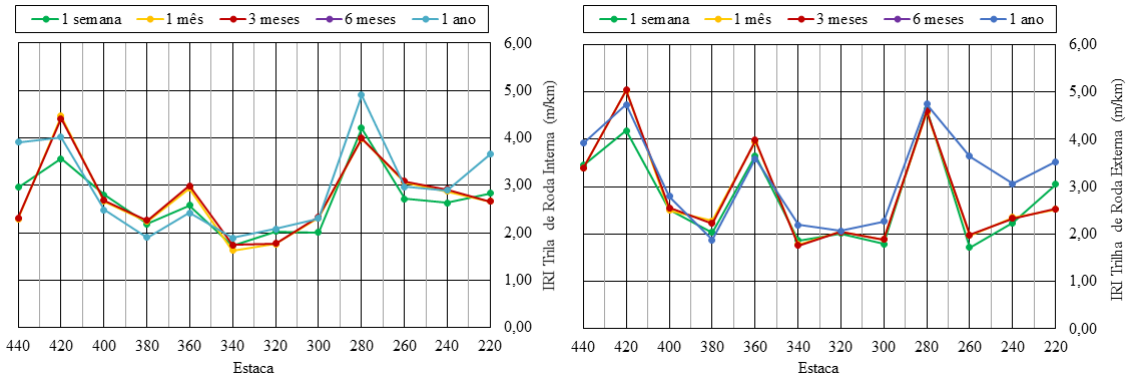


Figura 53: IRI nas trilhas interna e externa.

1.1.1.38. Levantamento da macrotextura

O levantamento da macrotextura foi realizado por meio do ensaio de mancha de areia ASTM E 695-2015, apresentado na Figura 54. Pode-se observar que não houve uma variação significativa

desse parâmetro no decorrer do tempo após abertura ao tráfego (de 1,2 para 1,1 mm), mas após 1 ano, o valor foi reduzido até 0,9 mm de altura de areia (hs).



Figura 54: Monitoramento com ensaio de mancha de areia.

1.1.1.39. Levantamento do afundamento em trilha de roda

O levantamento em trilha de roda foi realizado com régua metálica e trena. A Tabela 34 apresenta o resumo do levantamento de afundamento em trilha de roda realizado no trecho teste com a técnica de reciclagem em espuma asfáltica, em função do tempo de abertura ao tráfego.

Tabela 34: Resultados do levantamento do afundamento de trilha de roda após 1 ano

	1 semana		1 mês		3 meses		6 meses		1 ano	
Km	ATR (mm)		ATR (mm)		ATR (mm)		ATR (mm)		ATR (mm)	
	TRE	TRI	TRE	TRI	TRE	TRI	TRE	TRI	TRE	TRI
165,420	9	9	0	9	0	0	10	0	10	0
165,400	4	4	0	4	0	0	5	0	5	2
165,380	10	11	7	11	8	10	13	10	15	12
165,360	14	15	3	16	3	3	18	3	20	3
165,340	15	15	2	16	3	4	18	4	20	5
165,320	1	1	5	1	7	8	2	8	6	8
165,300	3	4	1	4	2	3	5	3	6	4
165,280	1	2	4	2	5	5	3	5	5	5
165,260	12	12	11	13	12	14	15	14	18	16
165,240	9	9	8	10	9	9	10	9	12	13
165,220	7	7	12	9	13	15	10	15	13	18

1.1.1.40. Levantamento deflectométrico com viga Benkelman

O levantamento deflectométrico com Viga Benkelman foi realizado no trecho experimental de acordo com a Norma DNER-ME 034-94, após uma semana, um mês, seis meses e um ano de abertura ao tráfego. A Figura 55 apresenta a execução desse ensaio no trecho experimental.



Figura 55: Monitoramento com viga Benkelman

Na Figura 56 apresentam-se os resultados da Deflexão D_0 na trilha externa e na trilha interna. Observa-se nessas figuras que com o passar do tempo e da cura do material reciclado com espuma asfáltica, as deflexões no trecho experimental tenderam a se reduzir. Observa-se que após 8 meses e 12 meses da construção do trecho experimental, os valores de D_0 característicos estão em torno de 20 (0,01mm). Esses valores atendem satisfatoriamente as demandas do elevado volume de tráfego da Rodovia Presidente Dutra.

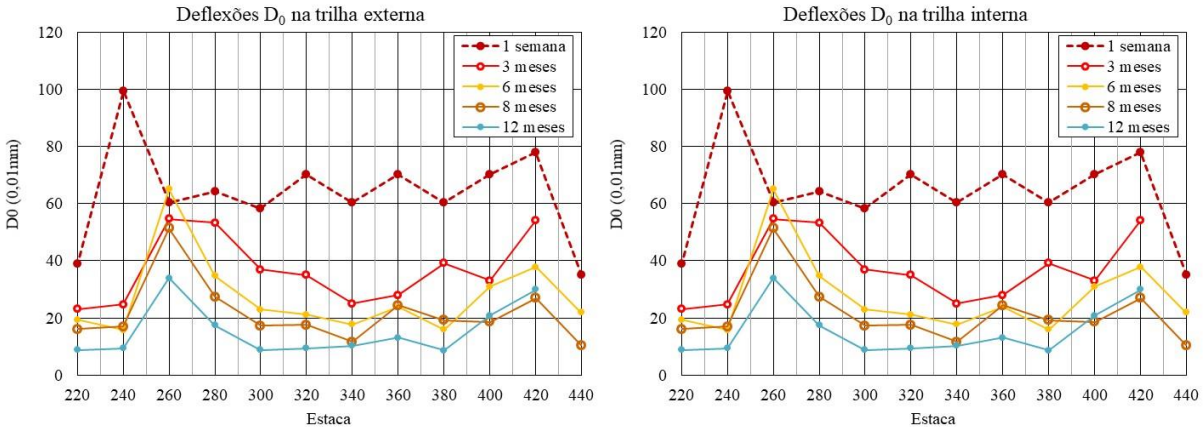


Figura 56. Deflexão D_0 nas trilhas externa e interna do trecho experimental

Vale lembrar que no material reciclado também foi adicionado 1,0% de cal hidratada e esse agente pode ter contribuído com a cura no decorrer do tempo. Esse comportamento é concordante com as observações realizadas na bibliografia sobre o assunto, que indicam o incremento da rigidez do material reciclado com o decorrer do tempo.

1.1.1.41. Levantamento deflectométrico com FWD - Falling Weigth Deflectometer

O levantamento deflectométrico do trecho teste também foi realizado com o equipamento do tipo FWD durante a construção da obra e após diversos tempos após abertura ao tráfego. Esse levantamento foi realizado pela Empresa Copavel Ltda. Na Figura 57 apresentam-se os resultados da deflexão D_0 na trilha de roda externa e na trilha de roda interna. Em todos os casos notou-se uma redução da deflexão após um ano da construção do trecho experimental.

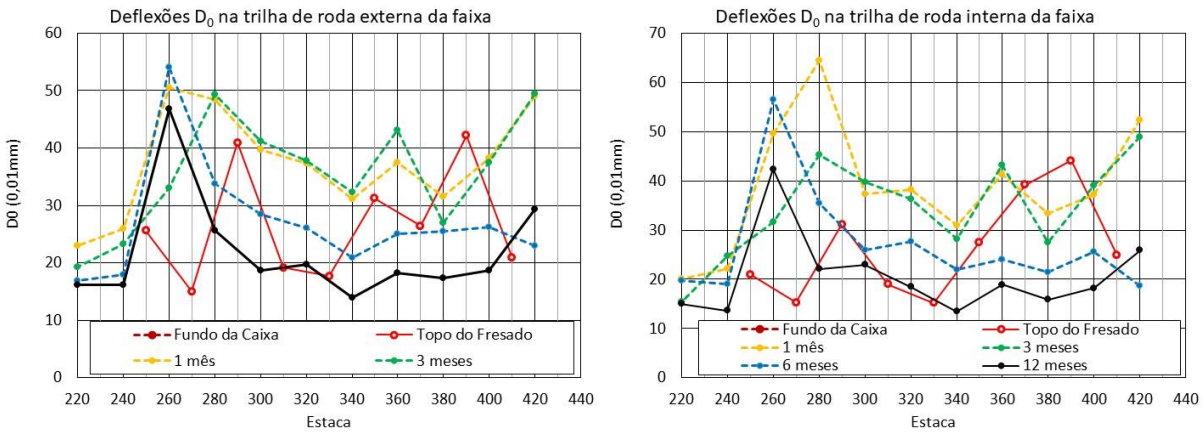


Figura 57: Deflexão D_0 nas trilhas externa e interna do trecho experimental

O levantamento deflectométrico com FWD permite obter a bacia deflectométrica e também é possível calcular o raio de curvatura a uma distância de 25 cm (R_{25}), que varia em função das características elásticas dos componentes da porção superior da estrutura. Um raio de curvatura baixo normalmente indica que o módulo elástico da camada superior do pavimento apresenta valor aquém ao desejável (DNIT, 2006). Pode-se observar que logo após abertura ao tráfego, esses valores eram baixos, indicando, portanto, baixos valores de módulos do material reciclado. No entanto, no decorrer do tempo, o raio de curvatura tendeu a se incrementar, devido ao enrijecimento do material reciclado com espuma asfáltica.

3.1.44. Dosagem de Misturas Asfálticas com Energias Distintas no Compactador Giratório Superpave

Introdução

A conservação e restauração de rodovias com revestimentos asfálticos demanda o emprego de milhares de toneladas de concreto asfáltico. Esse material, produzido a partir de agregados minerais e ligante asfáltico, é objeto de pesquisas inesgotáveis ao redor do mundo, devido ao seu comportamento complexo e sua importância na consolidação da infraestrutura rodoviária. A definição de suas características deve ser realizada a partir da dosagem dos seus componentes.

A dosagem de misturas asfálticas tem como objetivo determinar a proporção dos materiais de modo a conseguir um bom desempenho da mistura em campo. No procedimento de dosagem é realizada uma simulação das condições de campo quanto à produção, construção e desempenho de uma mistura asfáltica. Este processo constitui um dos pontos mais importantes na pavimentação asfáltica e, portanto, deve ser continuamente pesquisado no país, como segue sendo estudado em países mais desenvolvidos, como nos Estados Unidos e na Europa.

Durante a década de 1980, diversas rodovias nos Estados Unidos apresentaram deformações permanentes precocemente, e muitos engenheiros atribuíram este comportamento a um excesso de ligante nas misturas. Na época, acreditava-se que a compactação por impacto das misturas, adotada pela metodologia Marshall, durante a dosagem produzia corpos de prova com densidades que não condiziam com as do pavimento em campo. Entre outros assuntos, este em particular motivou o *Strategic Highway Research Program* (SHRP), a desenvolver um estudo que resultou em um novo procedimento de dosagem, denominado SUPERPAVE (Superior *Peforming Asphalt Pavements*) (BERNUCCI et al. 2008).

Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o emprego de energias distintas na dosagem de misturas asfálticas, no compactador giratório SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*), seguindo as recomendações dessa metodologia.

Para poder atender esse objetivo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um levantamento bibliográfico sobre a metodologia, por meio de consultas as normativas vigentes;
- Executar um programa laboratorial para executar a dosagem de misturas asfálticas de granulometria distinta, duas fontes de agregados e ligantes asfálticos usualmente empregados no Brasil;
- Realizar de uma análise estatística dos resultados obtidos para avaliar os resultados do programa laboratorial.

Dosagem Superpave

No ano 1987, nos Estados Unidos foi criado o SHRP (*Strategic Research Program*) para desenvolver estudos na procura de melhorar o desempenho dos pavimentos daquele país. O produto final deste programa de pesquisa foi denominado de SUPERPAVE, *Superior PERforming Asphalt PAVEments*, sendo que um dos produtos foi o uma nova metodologia de dosagem e análise das propriedades volumétricas das misturas asfálticas, que incluía ensaios e modelos de previsão de desempenho.

Dentro dessa nova metodologia, uma das principais preocupações do SHRP foi desenvolver um método de compactação em laboratório que pudesse produzir corpos de prova com densidades similares às obtidas em campo em pavimentos na escala real e sob condições de carregamento do tráfego (Partl et al 2013). O SHRP identificou dois objetivos principais no desenvolvimento do equipamento de compactação:

- Capacidade para medir a compactabilidade da mistura, com o propósito de identificar misturas mais susceptíveis à deformação permanente;
- Portabilidade adequada do equipamento para poder ser empregado nas atividades de controle de qualidade.

O método de compactação adotado pelo SUPERPAVE foi o de amassamento, que constituiu a principal diferença, em comparação com o método Marshall. O Compactador Giratório Superpave, CGS (Figura 72), aplica um esforço de cisalhamento na mistura asfáltica, similar à aplicada pelos rolos compactadores durante uma obra e, portanto, têm se mostrado mais apropriado para simular em laboratório as condições de campo, produzindo corpos de prova mais similares aos obtidos em campo.



Figura 72: Compactador Giratório Superpave no CPR.

Procedimento Geral da Dosagem

De forma geral, o método de dosagem Superpave é constituído pelas seguintes etapas:

- Seleção dos materiais
- Projeto da Estrutura dos Agregados
- Preparação das misturas experimentais de agregados
- Determinação do teor de asfalto inicial para cada mistura de agregados
- Compactação dos agregados para cada mistura experimental de agregados
- Avaliação das misturas asfálticas compactadas

- Seleção do teor de ligante asfáltico de projeto
- Avaliação da sensibilidade à umidade
- Ajuste da mistura para atender as propriedades volumétricas

Métodos e Técnicas Utilizadas

Foram desenvolvidas as dosagens das misturas asfálticas com diversas energias de compactação, conforme o planejamento fatorial apresentado na Tabela 36.

Tabela 36: Planejamento fatorial para dosagem das misturas asfálticas com distintas energias de compactação

Fator		**Descrição**	**Níveis**
1	Fonte de Agregados	Granito SP	2
		Basalto SP	
2	Tipo de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	CAP 30/45	4
		Asfalto Modificado por Polímero 1	
		Asfalto Modificado por Polímero 2	
		Asfalto Modificado por Borracha	
3	Faixa Granulométrica	12,5mm densa	4
		19,0mm densa	
		9,5mm densa	
		9,5mm descontínua (*Gap Graded*)	
4	Energia de Compactação	50 giros	3
		75 giros	
		100 giros	
Total de Experimentos			96

Para cada experimento foram determinados os seguintes parâmetros de dosagem:

- Energia de Compactação
- Tipo de Ligante Asfáltico
- Teor de Ligante Asfáltico de Projeto (%)
- Massa Específica Aparente (g/cm3)
- Massa Específica Máxima (g/cm3)
- Volume de Vazios (%)
- Vazios de Agregado Mineral (%)
- Volume de Vazios Cheios de Asfalto (%)
- Relação Fíler/Asfalto
- Resistência à Tração (MPa)

Além das análises das propriedades volumétricas durante a dosagem, foram determinados alguns parâmetros mecânicos:

- Determinação da resistência à tração por compressão diametral
- Determinação do Módulo de Resiliência
- Ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI), no teor de projeto

Análise dos Resultados

Os resultados das dosagens e dos ensaios mostraram, de forma geral, as seguintes tendências, conforme a energia de compactação é incrementada na dosagem das misturas asfálticas:

- Incremento da massa específica aparente e, portanto, redução de vazios;
- Redução do teor de ligante asfáltico de projeto;
- Diminuição do volume de vazios de agregados mineral;
- Pouca variação do volume de vazios cheios de asfalto;
- Aumento da relação fíler asfalto;
- Pouca influência no dano por umidade induzida (DUI), considerando que todas as misturas asfálticas empregaram 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1;
- Incremento da resistência à tração (RT);
- Incremento do módulo de resiliência (MR).

Com relação ao tipo de agregado utilizado, observou-se de forma geral que, os agregados basálticos demandam maiores teores de ligante asfáltico para atender aos parâmetros de projeto, quando comparados com os agregados graníticos. É importante notar que o teor inicial de dosagem obtido pelas equações sugeridas na AASHTO R 30 aplicou-se adequadamente para os agregados graníticos, mas, para os agregados basálticos, obtiveram-se valores baixos e, consequentemente, em algumas misturas asfálticas com estes agregados não se atingiram os parâmetros volumétricos de dosagem. Este comportamento poderia ser atribuído ao formato dos agregados basálticos empregados neste estudo, que tendem a apresentar um formato um pouco mais lamelar que os agregados graníticos deste estudo, dificultando a compactação na dosagem.

Foi constatado que o emprego do ligante asfáltico modificado por borracha moída de pneus demanda maiores teores de CAP para atender aos parâmetros volumétricos de dosagem, quando comparado com os demais ligantes asfálticos. Já os teores de projeto obtidos para o CAP 30-45 e para os ligantes asfálticos modificados por polímeros foi muito próximo entre si.

Com relação às faixas granulométricas selecionadas, foi verificado na dosagem Superpave que o emprego de agregados com maior tamanho máximo nominal produz misturas asfálticas com

menores teores de ligante asfáltico e, portanto, misturas asfálticas mais finas demandam maiores teores de CAP para atender aos parâmetros volumétricos de dosagem.

Considerações Finais

A dosagem das misturas asfálticas é uma das atividades que requer mais atenção na construção e manutenção de pavimentos asfálticos. Tradicionalmente é empregada a dosagem Marshall, desenvolvida na primeira metade do Século XX nos Estados Unidos e disseminada no mundo inteiro. No entanto, no final do Século XX, os engenheiros de diversas agências rodoviárias norte-americanas observaram as limitações desta metodologia para prever com maior precisão o comportamento das misturas asfálticas durante a fase construtiva e em serviço durante a vida útil. Assim, foi desenvolvida uma nova metodologia conhecida atualmente como Superpave.

Neste estudo foi utilizada a metodologia Superpave na dosagem de misturas asfálticas tradicionalmente empregadas nas atividades de manutenção de pavimentos asfálticos na Rodovia Presidente Dutra e também na implementação de novas faixas adicionais e marginais.

A dosagem Superpave recomenda diversos níveis de energia de compactação em função do nível do tráfego previsto para o pavimento. Assim, o objetivo deste estudo foi analisar o efeito da energia de compactação em diversas misturas asfálticas, com combinações variadas de granulometria, fontes de agregados e ligantes asfálticos.

Os resultados obtidos nas dosagens das 96 misturas asfálticas constituem um banco de dados para a Rodovia Presidente Dutra. Estes dados constituem, portanto, em uma ferramenta para os engenheiros rodoviários otimizar a seleção de materiais e para adequar as dosagens de acordo com os trechos homogêneos de tráfego da rodovia.

3.1.45. Avaliação da Aderência entre Camadas Asfálticas

Introdução

A aderência entre as distintas camadas asfálticas de um pavimento é fundamental para um bom comportamento do pavimento. A pintura de ligação das camadas asfálticas é um fator que influencia diretamente no desempenho e durabilidade dos pavimentos. A falta de aderência entre as camadas asfálticas aumenta as tensões e deformações na fibra inferior da camada asfáltica mais superficial do revestimento, podendo originar defeitos como deslizamentos, corrugação, fissuras e deformação permanente no revestimento aplicado. Esse comportamento, diminui a vida de serviço das estruturas dimensionadas e causa manifestações patológicas estruturais, que podem

colocar em risco a segurança dos usuários de uma rodovia. Nas atividades de manutenção, uma baixa aderência pode levar a escorregamentos de novos revestimentos asfálticos.

Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a aderência entre camadas asfálticas, por meio do estudo de diversas emulsões asfálticas, com e sem a modificação de polímeros, mediante o emprego de ensaios laboratoriais.

Para atender ao objetivo geral deste estudo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de uma revisão bibliográficas obre a aderência entre camadas asfálticas, por meio de consultas às normativas vigentes e estudos nacionais e internacionais.
- Execução de um programa laboratorial para avaliar características das emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional.
- Execução de um programa laboratorial para avaliar o parâmetro de aderência entre camadas asfálticas com distintos ligantes asfálticos e para misturas asfálticas de diferente granulometria e em distinto estado de conservação.
- Desenvolvimento de uma análise estatística dos resultados obtidos para avaliar os resultados do programa laboratorial.

Materiais e Métodos Utilizados

Para a elaboração deste estudo foram selecionadas cinco emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional para a aplicação em pintura de ligação, sendo que uma emulsão asfáltica é convencional do tipo RR-2C e as outras quatro são do tipo RR-2C-E, modificadas por polímeros (Tabela 37).

Tabela 37: Emulsões asfálticas selecionadas para utilizar na pintura de ligação entre camadas asfálticas

ID	Descrição
RR -2C	Emulsão asfáltica de ruptura rápida
RR -2C-E-1	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 1
RR -2C-E-2	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 2
RR -2C-E-3	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 3
RR -2C-E-4	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 4

As emulsões asfálticas foram submetidas aos ensaios convencionais. Os ensaios reológicos foram realizados no resíduo da emulsão asfáltica obtida por meio de dois procedimentos. O primeiro foi por meio da tradicional determinação do resíduo seco em estufa pela NBR 14896, na temperatura de 110°C. O segundo procedimento seguiu as recomendações da FHWA (2015), para obter o resíduo seco em estufa ventilada na temperatura de 60°C.

Para avaliação da aderência entre as camadas asfálticas foram realizados os ensaios de cisalhamento *Leutner*, de acordo com o procedimento suíço da "*Swiss Federal Laboratories for MaterialsTestingandResearch"*, referenciado como *Swiss Standard SN 671 961*. Foi elaborada uma série de combinações de misturas asfálticas características das obras realizadas na Rodovia Presidente Dutra, conforme planejamento fatorial apresentado na Tabela 38.

Tabela 38: Planejamento fatorial de misturas asfálticas utilizado nesta pesquisa.

Fator		**Camada asfáltica Inferior**	**ID**	**Níveis**
1	Combinação de Camadas	19mm - 12,5mm	19-12,5	12
		19mm - 9,5mm	19-9,5	
		19mm - Gap Graded	19-G	
		12,5mm - 9,5mm	12,5-9,5	
		12,5mm - Gap Graded	12,5-G	
		9,5mm - Gap Graded	9,5-G	
		Gap Graded - Gap Graded	G-G	
		Pavimento Asfáltico Oxidado - 9,5mm	PAO-9,5	
		Pavimento Asfáltico Oxidado - Gap Graded	PAO-G	
		Pavimento Asfáltico Fresado - 12,5mm	PAF-12,5	
		Pavimento Asfáltico Fresado - 9,5mm	PAF-9,5	
		Pavimento Asfáltico Fresado - Gap Graded	PAF-G	
2	Emulsão Asfáltica	Sem	N	6
		RR -2C	EA-1	
		RR -2C-E-1	EAE-1	
		RR -2C-E-2	EAE-2	
		RR -2C-E-3	EAE-3	
		RR -2C-E-4	EAE-4	
Total Experimentos				72

Para avaliação da aderência, os CPs para o cisalhamento direto são compostos de uma camada asfáltica inferior e de uma camada asfáltica superior. O procedimento de preparação desses CPs é ilustrado na Figura 73.



Figura 73: Processo de compactação do CP para o ensaio de cisalhamento direto Leutner.

Finalizada a preparação dos CPs, estes foram submetidos ao ensaio de cisalhamento direto, com a aplicação de um carregamento monotônico constante na velocidade de 50 mm/min A Figura 74 mostra a execução desse ensaio no Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.

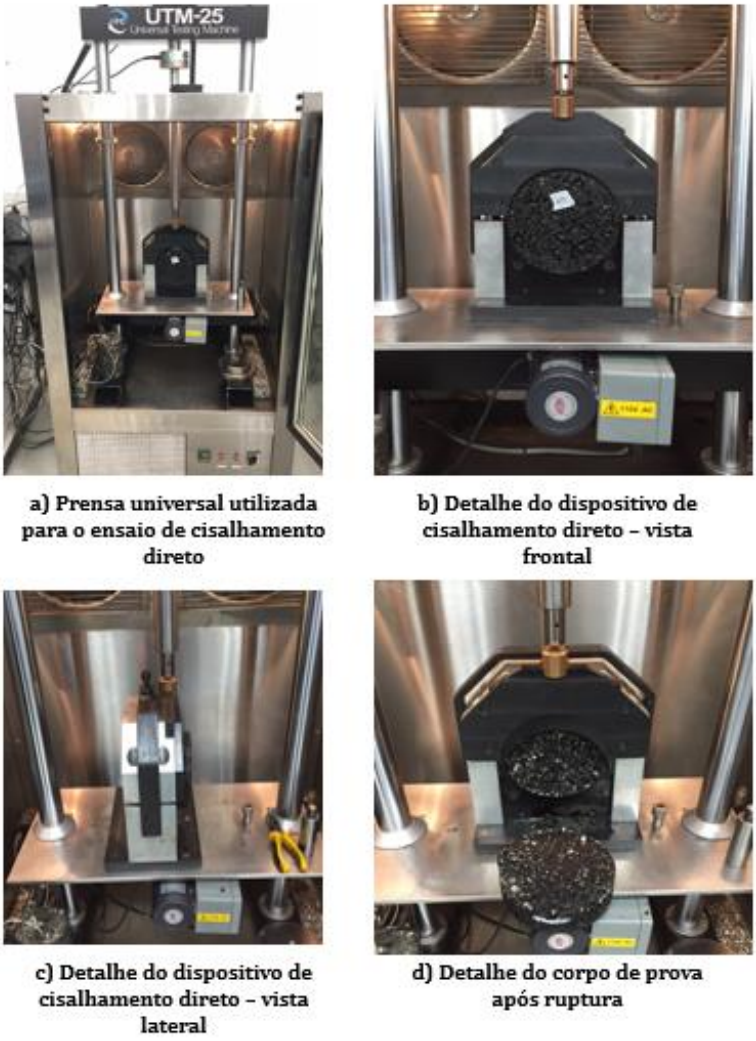


Figura 74: Execução do cisalhamento direto no dispositivo Leutner

Resultados e Análises dos Resultados

Pode-se observar na Figura 75 que as combinações que têm o substrato produzido em laboratório, apresentam, de forma geral, menores valores de força de ruptura, portanto, menor aderência com o revestimento asfáltico aplicado. Os maiores valores são notados para as combinações que utilizaram o pavimento fresado no substrato, seguido pelo substrato de pavimento oxidado, da Rodovia Presidente Dutra.

Com relação ao tipo de revestimento asfáltico aplicado, observa-se que, o emprego de revestimentos asfálticos do tipo Gap Graded conduz a menores valores de força de ruptura no cisalhamento, com exceção das combinações que têm por substrato a Faixa III DERSA. Vale notar que a norma Suíça utilizada neste estudo como referência de ensaio, recomenda um valor mínimo de força de ruptura no cisalhamento de 15.000 N. Assim, observa-se que, neste estudo, todas as combinações quase que dobraram essa especificação. No entanto, a especificação refere-se a

corpos de prova extraídos integralmente de pavimentos asfálticos nos quais foi executada a pintura de ligação e a posterior aplicação de um revestimento asfáltico.

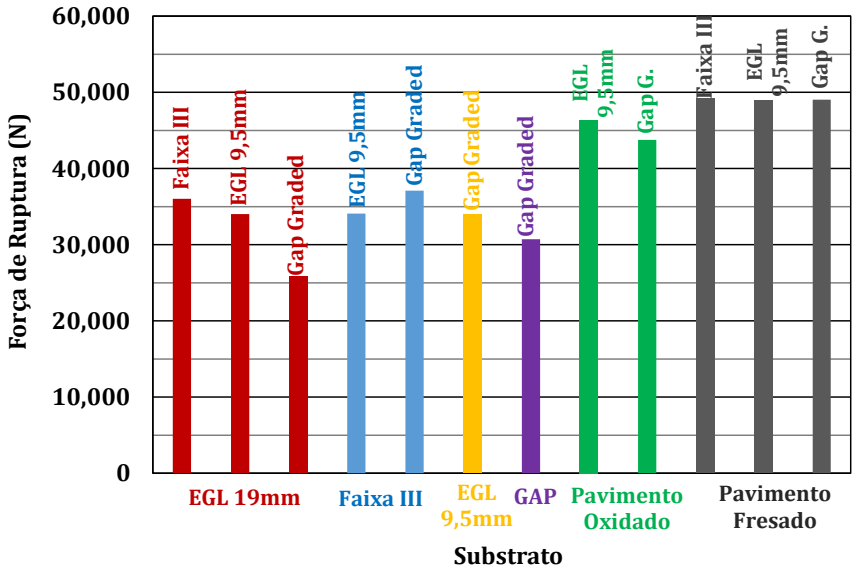


Figura 75: Resultados médios das distintas condições de substrato e revestimento.

Considerações Finais

A aderência entre as camadas asfálticas é um parâmetro ainda pouco considerado em nível de projeto de pavimentos rodoviários. De forma geral, as normas nacionais recomendam utilizar emulsões asfálticas de cura rápida com taxas residuais em torno de 0,3 a 0,4 l/m^2. Em alguns casos, recomenda-se utilizar a emulsão asfáltica modificada por polímeros.

No Brasil ainda não existe norma para avaliação da resistência ao cisalhamento entre camadas asfálticas, com o objetivo de determinar a aderência entre estas. Por esse movito, foi selecionado o ensaio conhecido como "*Leutner Test*", para realizar a avaliação de diversas emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional para emprego como pintura de ligação.

Os ensaios realizados nas emulsões asfálticas neste estudo indicam que é possível realizar a caracterização reológica no resíduo obtido, tanto na temperatura de 110°C, como na temperatura de 60°C em estufa ventilada. Os ensaios reológicos permitiram diferenciar adequadamente a emulsão asfáltica convencional das modificadas por polímero. No entanto, não foram observadas correlações com os resultados obtidos no ensaio de ruptura por cisalhamento.

Com relação ao ensaio de cisalhamento direto na configuração Leutner, observou-se simplicidade para sua execução, já que é suficiente uma prensa usualmente utilizada no Marshall convencional para poder executar esse ensaio. No entanto, a dificuldade principal seria obter os CPs na configuração do ensaio em laboratório, pois a norma suíça utilizada como referência, considera

apenas CPs de 150mm de diâmetro. Para CPs extraídos de pista, seria suficiente substituir a coroa da extratora para obter esse diâmetro.

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto indicam que:

- Há pouca influência do tipo de emulsão asfáltica na força de ruptura cisalhante, no caso em que o substrato e o revestimento são constituídos por misturas asfálticas novas;
- O emprego de misturas asfálticas do tipo *Gap Graded*, tende a apresentar menores valores de força de ruptura cisalhante, possivelmente pela menor área de contato que essa mistura asfáltica de granulometria descontínua apresenta;
- O emprego de pintura de ligação parece ser mais importante nos casos em que o substrato é constituído por um pavimento oxidado;
- Para substratos com superfície fresada, não houve um comportamento muito bem definido, quanto ao emprego da pintura de ligação.

Na análise estatística foi comprovado que tanto as condições do substrato e a granulometria do revestimento, assim, como o tipo de emulsão asfáltica utilizada como pintura de ligação são significativos na força de ruptura por cisalhamento direto, e portanto, influenciam na aderência entre as camadas asfálticas. A principal conclusão dessa análise estatística indica que o emprego de alguma pintura de ligação incrementa a resistência ao cisalhamento, quando comparada com as condições em que não foi utilizado nenhuma emulsão asfáltica.

3.1.46. Avaliação do Emprego de Polímeros do tipo RET em Misturas Asfálticas

Introdução

O tráfego crescente nas rodovias brasileiras e o incremento da tolerância de peso por eixo nos caminhões têm acelerado o processo de degradação dos pavimentos asfálticos. A evolução dos materiais rodoviários e o emprego de novos produtos mais sofisticados, são uma alternativa interessante para aplicar em pavimentos extremamente solicitados, para, assim, resistir melhor a essas solicitações impostas pelo tráfego.

O emprego de asfaltos modificados por polímero (AMP) na produção de misturas asfálticas podem contribuir para melhorar a resistência e a durabilidade dos revestimentos asfálticos, os quais estão diretamente sujeitos às ações do tráfego e das condições climáticas. O AMP é produzido a partir de reações químicas entre o polímero virgem, por exemplo, o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) que é um material manufaturado e especificado pela indústria petroquímica, e o cimento asfáltico

de petróleo (CAP), sob condições padronizadas de processo (temperatura e cisalhamento), (BERNUCCI et al, 2008).

No Brasil, o uso de asfaltos modificados por polímeros elastoméricos teve início a partir dos anos 90, sendo que o polímero mais empregado têm sido o SBS (estireno-butadieno-estireno), seguido do SBR (borracha estireno-butadieno).

Recentemente no mercado nacional têm surgido a opção de polímeros do tipo RET, que em português significa Terpolímero Elastomérico Reativo, que é produzido especificamente para a modificação de ligantes asfálticos. Esse polímero foi desenvolvido na década de 1980 na procura de um modificador de asfalto que pudesse ser facilmente incorporado e cujas propriedades viscoelásticas fossem similares a de asfaltos com outros modificadores utilizados como os Copolímeros de Estireno Butadieno (Negrão, 2007). Na atualidade existem no mercado nacional dois tipos de polímeros do tipo RET disponíveis para a modificação de ligantes asfálticos, fornecidos por duas companhias distintas.

Objetivos

O objetivo principal foi desenvolver um programa laboratorial para avaliar as principais propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados por polímeros do tipo RET (Terpolímero Elastomérico Reativo) e as características mecânicas de misturas asfálticas que fazem uso deste tipo de asfalto. Para poder atender ao objetivo principal foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma revisão bibliográfica acerca dos ligantes asfálticos modificados por polímeros.
- Executar um programa laboratorial para analisar as características reológicas do ligante asfáltico tipo RET.
- Realizar um programa experimental para determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com asfalto do tipo RET. Os parâmetros investigados foram:
  - Resistência à tração (RT);
  - Dano por umidade Induzida (DUI);
  - Módulo de resiliência (MR);
  - Módulo Dinâmico (MD);
  - *Flow Number* (FN);
  - Fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos.

- Desenvolver uma análise estatística dos resultados obtidos para avaliar os resultados obtidos nos programas laboratoriais.

Seleção dos Materiais

Para desenvolvimento desse estudo foram selecionados ligantes asfálticos disponíveis no mercado nacional: dois modificados por polímeros do tipo RET (Terpolímero Elastomérico Reativo), um ligante asfáltico modificado por SBS (estireno-butadieno-estireno) e dois ligantes asfálticos convencionais denominados CAP 30-45 e CAP 50-70, conforme apresentados na Tabela 39.

Tabela 39: Ligantes asfálticos selecionados para o estudo

Ligante Asfáltico	ID
Modificado por polímero tipo RET	CAP-RET-1
Modificado por polímero tipo RET	CAP-RET-1
Modificado por polímero tipo SBS	CAP-SBS
CAP 30/45	CAP 30/45
CAP 50/70	CAP 50/70

Os ligantes asfálticos foram inicialmente caracterizados por ensaios comumente realizados no país, de acordo com as especificações da ANP (Agência Nacional de Petróleo. Pode-se verificar que os ligantes asfálticos modificados por polímero tipo RET e por SBS, apresentam elevados valores de PA, em torno de 70°C, seguidos pelo CAP 30-45 com 53°C e pelo CAP 50-70 com 49°C.

Os resultados de viscosidade obtidos no viscosímetro Brookfield na temperatura de 135°C mostram que os ligantes asfálticos modificados pelo polímero tipo RET apresentam viscosidades em torno de 2000 cP, enquanto que o CAP com SBS apresentou valores em torno de 1600cP. Já os ligantes asfálticos CAP 30-45 e CAP 50-70 apresentaram menores valores de viscosidade, conforme era esperado em função das especificações desses materiais.

Os três ligantes asfálticos modificados por polímeros foram submetidos ao ensaio de recuperação elástica por torção e apresentaram valores muito similares próximos ao limite de 70% de recuperação elástica. Esses ligantes também foram submetidos ao ensaio de estabilidade à estocagem para verificar a compatibilidade dos modificadores e o ligante asfáltico durante o tempo de estocagem nos tanques das usinas. A estabilidade é verificada através da comparação entre as temperaturas de ponto de amolecimento de amostras do topo e do fundo do recipiente usado no ensaio. Pode-se verificar que os três ligantes modificados por polímero apresentaram valores muito inferiores ao limite (inferior a 5ºC) estabelecido pela norma DNER-ME 384/99.

Os ligantes asfálticos selecionados foram submetidos a diferentes ensaios reológicos para determinação das suas propriedades e para determinação do grau de desempenho ou performance grade (PG). Na Figura 76 apresentam-se os resultados do grau de desempenho e grau de desempenho verdadeiro dos ligantes asfálticos. Observa-se que os ligantes asfálticos modificados

por RET-1 e RET-2 foram classificados como PG 70 e PG 64, respectivamente, enquanto que o CAP SBS alcançou um grau de desempenho superior, de PG 76. Os ligantes asfálticos convencionais CAP 30-45 e CAP 50-70 foram classificados como PG 70 e PG 64, respectivamente.

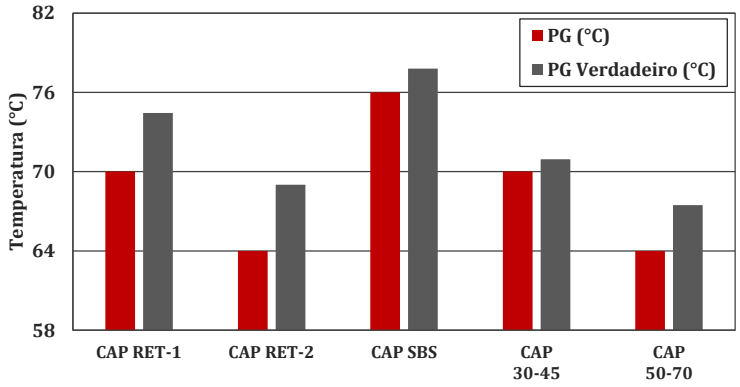


Figura 76: Grau de desempenho e grau de desempenho verdadeiro das amostras de ligantes asfálticos

Métodos e Técnicas Utilizadas

Após a caracterização dos ligantes asfálticos, foi realizada a dosagem das misturas asfálticas compostas pelos cinco ligantes asfálticos e quatro faixas granulométricas distintas. A identificação das vinte misturas asfálticas resultantes é apresenta na Tabela 40. Na dosagem das misturas asfálticas foi utilizado o compactador Marshall com energia de 75 golpes por face.

Tabela 40: Identificação das misturas asfálticas definidas neste estudo

ID	Ligante Asfáltico	Faixa Granulométrica
U1	RET -1	III-DERSA
U2	RET -1	EGL 19
U3	RET -1	EGL 9,5
U4	RET -1	Gap
U5	RET -2	III-DERSA
U6	RET -2	EGL 19
U7	RET -2	EGL 9,5
U8	RET -2	Gap
U9	SBS	III-DERSA
U10	SBS	EGL 19
U11	SBS	EGL 9,5
U12	SBS	Gap
U13	30-45	III-DERSA
U14	30-45	EGL 19
U15	30-45	EGL 9,5
U16	30-45	Gap
U17	50-70	III-DERSA
U18	50-70	EGL 19
U19	50-70	EGL 9,5
U20	50-70	Gap

Na Figura 77 é apresentado o teor de ligante asfáltico de projeto obtido na dosagem das misturas asfálticas. Observa-se nessa figura que para as misturas asfálticas do tipo Faixa III DERSA e EGL 19mm obtiveram-se valores em torno de 4,2 a 4,6% e não foi notada diferença significativa entre os ligantes asfálticos utilizados, sejam eles convencionais ou modificados por polímeros. Com relação às misturas asfálticas com tamanho máximo nominal (TMN) inferior, isto é, a EGL 9,5mm e o Gap Graded 3/8”, os valores de teor de ligante asfáltico de projeto foram superiores, em torno de 4,6% a 5,3%. Este comportamento pode ser atribuído à maior superfície específica que as granulometrias destas misturas asfálticas apresentam, demandando maior quantidade de ligante asfáltico para recobrir as partículas dos agregados.

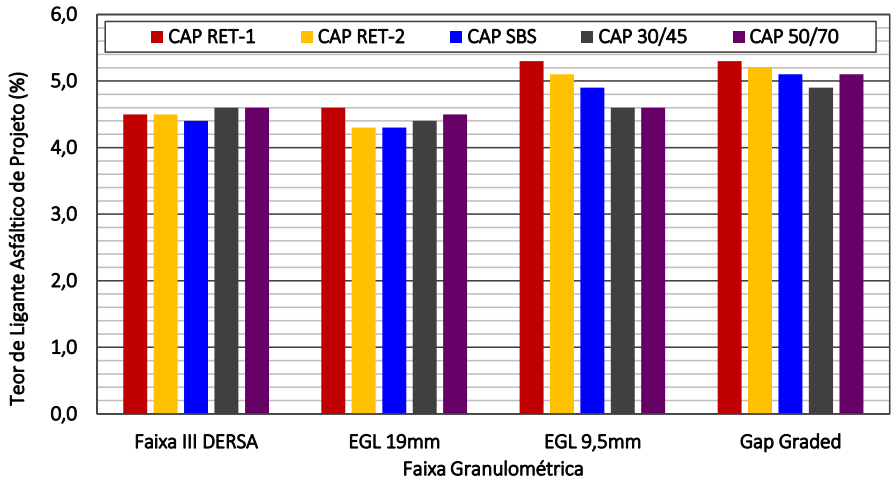


Figura 77: Teor de ligante asfáltico de projeto obtido na dosagem das misturas asfálticas

Análise dos Resultados

Em relação à caracterização convencional e reológica dos ligantes asfálticos modificados por polímeros, observou-se tanto nos ensaios empíricos como nos ensaios da metodologia SUPERPAVE que estes materiais apresentam características superiores aos ligantes asfálticos convencionais CAP 30-45 e CAP 50-70, utilizados neste estudo para fins comparativos. As principais observações realizadas nos AMPs nesses ensaios concordam com os relatos encontrados na bibliografia, e são os seguintes:

- Maior ponto de amolecimento no ensaio de anel e bola;
- Maior viscosidade em elevadas temperaturas;
- Maior retorno elástico no ensaio de recuperação elástica torsional;
- Módulo de rigidez (G*) superior em temperaturas elevadas;
- Ângulo de fase (δ) inferior aos ligantes asfálticos convencionais;
- Menores valores no parâmetro Jnr, obtido no ensaio de MSCR;
- Valores elevados de recuperação elástica no ensaio de MSCR.

Quanto aos resultados das dosagens das misturas asfálticas, observou-se que o tipo de ligante asfáltico, seja AMP ou seja asfalto convencional, não tem influência significativa na definição do teor de ligante asfáltico de projeto. Esse parâmetro é mais influenciado pela granulometria selecionada para a mistura asfáltica. Já nos ensaios mecânicos e de desempenho realizados nas misturas asfálticas com granulometria distinta, observaram-se os seguintes comportamentos:

- O dano por umidade induzida foi satisfatório para todas as misturas asfálticas, independente da faixa granulométrica ou do tipo de ligante asfáltico, considerando que em todas foi utilizado 1,5% de cal hidratada;
- Os valores de resistência à tração oscilaram de 1,5MPa até 2,5MPa, sendo que os menores valores foram observados nas misturas asfálticas que utilizaram o CAP 50-70 e a granulometria tipo binder EGL 19mm. Para as demais combinações não houve um comportamento muito bem definido.
- O módulo de resiliência foi muito parecido para as misturas asfálticas com os ligantes asfálticos modificados por polímeros e com os ligantes asfálticos convencionais, mas observou-se menor influência da temperatura no primeiro. Os maiores valores foram observados nas misturas asfálticas com CAP 30-45.
- No módulo dinâmico observou-se que as misturas asfálticas com ligante asfáltico modificado por polímeros apresentaria melhor resistência à fadiga e à deformação permanente;
- O ensaio de *flow number*, associado à resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, mostrou que o ligante asfáltico modificado por SBS apresenta valores muito superiores, quando comparado com os demais asfaltos avaliados neste estudo.
- No ensaio de fadiga observou-se também que as misturas asfálticas produzidas com ligante asfáltico modificado por polímero SBS apresentam maior resistência ao trincamento por fadiga, seguidas das misturas com RET-1 e RET-2, e finalmente pelo CAP 50-70 e pelo CAP 30-45.

Considerações Finais

O crescimento do volume de tráfego e do peso por eixo nos veículos têm significado a deterioração precoce dos pavimentos asfálticos. Em paralelo, observa-se, de acordo com a revisão bibliográfica realizada neste estudo, que a qualidade dos ligantes asfálticos convencionais têm se reduzido também ao redor do mundo. Esses dois fatores têm motivado nas últimas décadas os engenheiros, químicos e pesquisadores a desenvolver novos materiais que possam atender as necessidades reais dos pavimentos, associadas ao tráfego elevado e aos climas extremos.

O emprego de polímeros na modificação dos ligantes asfálticos têm sido uma alternativa viável para incrementar a qualidade e desempenho das misturas asfálticas nos pavimentos rodoviários. O estudo da bibliografia mostra que os benefícios de utilizar asfaltos modificados por polímeros (AMP) são:

- Melhoria da elasticidade do ligante asfáltico;
- Redução da susceptibilidade térmica;
- Maior resistência à deformação permanente;
- Vida de fadiga elevada.

A utilização dos AMP também pode acarretar algumas desvantagens, principalmente associadas ao seu transporte, armazenamento e produção. Com relação ao transporte e armazenamento, existe o risco em que alguns polímeros possam se separar da fase asfáltica, criando uma fase segregada de polímeros. Esse risco pode ser reduzido consideravelmente pelo apropriado condicionamento do AMP e também pelo emprego de polímeros do tipo RET (Terpolímero Reativo).

De forma geral, os ensaios convencionais e reológicos indicam que os ligantes asfálticos modificados por RET-1, RET-2 e por SBS apresentam melhores características quando comparados com os ligantes asfálticos convencionais 30-45 e 50-70.

Na avaliação de parâmetros mecânicos e de desempenho das misturas asfálticas produzidas com estes ligantes asfálticos, observa-se que existe um comportamento superior daquelas misturas asfálticas produzidas com os ligantes asfálticos modificados por polímeros, principalmente no que diz respeito dos ensaios que estimam a resistência à fadiga e à deformação permanente.

3.1.47. Emprego de Perfis de Fibras de Carbono na Recuperação de Placas de Concreto Fissuradas

Introdução

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o emprego de perfis de fibras de carbono na recuperação de placas de concreto fissuradas em um trecho experimental, com a finalidade de aumentar a vida útil, e impedir a progressão das fissuras existentes e o aparecimento de novas fissuras no pavimento.

Para avaliar o desempenho da técnica empregada, foram efetuados levantamentos deflectométricos antes e depois das intervenções.

Materiais

Os materiais empregados consistem em laminados de fibra de carbono e resina com as seguintes características:

- Laminados de fibra de carbono S&P 150/2000 – 20x1,4mm;

- seção do laminado 28mm²;
- módulo de elasticidade: 168 kN/mm²;
- quantidade utilizada na placa de aproximadamente 6 x 3,5m entre 45 e 55m.

- Resina: S&P 55;
- quantidade utilizada na placa: entre 12 e 18 kg;
- tempo de secagem aproximadamente de 2 a 4 horas a 25°C.

Execução do Trecho Experimental

A Rodovia Presidente Dutra (BR-116) possui 2 km de pavimento rígido na Pista Marginal em Guarulhos, entre o km 218,900 e o km 216,700 sentido São Paulo/Rio de Janeiro, próximo ao aeroporto de Guarulhos, local crítico, com dificuldades de interdição de longo prazo.

A definição do trecho experimental se deu após a identificação dos defeitos existentes no pavimento rígido, limitadas às fissuras transversais e longitudinais, com ausência de movimentação vertical sob ação do tráfego (placa bailarina).

Durante o mês de junho de 2019 foi executado o levantamento visual de defeitos existentes nas placas de concreto constituintes da pista marginal. A partir disso, como trecho experimental, foram selecionadas 7 placas a serem restauradas com a aplicação de perfis de fibras de carbono, identificadas na 35.

Tabela 35: Identificação das placas a serem tratadas

Placa	Defeito Identificado	Faixa de Rolamento
368	TLL	1
369	TLL	1
370	TLL	1
371	TLL	1
403	TLL+TT	2
418	TT	2
440	TLL+FC-3	1

As obras de recuperação das placas foram executadas entre os meses de julho e agosto de 2019. Todos os serviços foram realizados durante o período noturno, devido às restrições operacionais da rodovia, conforme plano de ocupação da concessionária em conjunto com Policia Rodoviária Federal.

Para cada placa foi elaborado o mapeamento das fissuras existentes (Figura 58) e programada a quantidade e dimensão das ranhuras a serem executadas.

O sistema de reforço, consiste na execução de ranhuras (Figura 59), perpendiculares à fissura existente, preenchidas com resina epóxica e colocação dos perfis de fibra de carbono. Para a aplicação do sistema de reforço, foram seguidas as etapas descriminadas a seguir.

- **Preparação da superfície:** demarcação das linhas onde serão executadas as ranhuras;
- **Corte das ranhuras:** o corte foi realizado com serra policorte com disco diamantado a seco (Figura 60) com espessura e profundidade adequadas às dimensões do perfil de fibra de carbono a ser implantado;
- **Limpeza da ranhura:** com auxílio de soprador de ar;
- **Verificação da profundidade das ranhuras:** após a limpeza, procede-se a checagem da profundidade da ranhura, confirmando a profundidade mínima para aplicação do perfil;
- **Limpeza dos perfis:** para garantia da aderência dos perfis de fibras de carbono, estes devem ser limpos com álcool, eliminando sujeiras e gorduras;
- **Aplicação da resina e inserção dos perfis:** a resina epóxica (Figura 61) é aplicada diretamente na ranhura e na sequência é inserido o perfil (Figura 62);
- **Acabamento e liberação ao uso** (Figura 63)**:** após a inserção dos perfis, as fissuras devem ser novamente preenchidas com a mesma resina empregada na colagem dos perfis e é realizado o desempeno da resina em toda a superfície. Após a cura da resina, de cerca de 6 a 8 horas, o pavimento pode ser liberado ao tráfego de veículos.



Figura 58: Identificação das fissuras



Figura 59: Demarcação das ranhuras



Figura 60: Corte seco



Figura 61: Preenchimento com resina

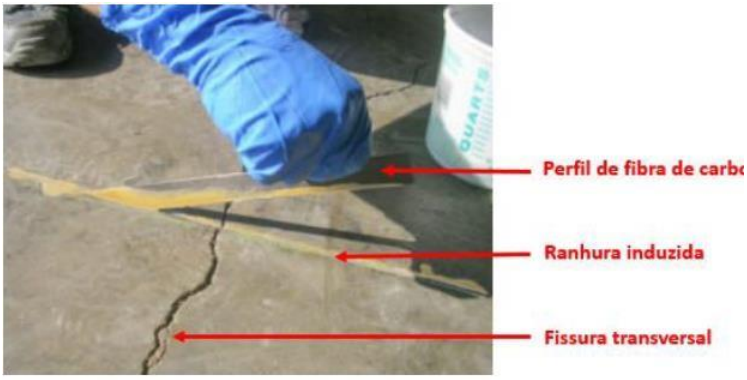


Figura 62: Inserção da fibra de carbono



Figura 63: Acabamento

Monitoramento e Avaliação

Para avaliar o desempenho da técnica foram realizadas campanhas de levantamentos antes (Junho/2019) e pós obras (Outubro/2019 e Janeiro/2020). Para tal fim, foram utilizados os equipamentos FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e CAM (*Crack Activity Meter*), mostrados nas Figuras 64 e 65.



Figura 64: Levantamento com FWD



Figura 65: Crack Activity Meter – CAM

O FWD é um equipamento utilizado para simular a deflexão do pavimento causada por um veículo em movimento, através de uma carga dinâmica gerada pela queda de um peso, transmitida à superfície do pavimento por um disco circular com diâmetro de 30 cm. O pulso gerado pela carga do FWD deforma momentaneamente o pavimento em uma forma de bacia. Os deslocamentos na

superfície do pavimento são medidos por geofones, que fornecem a informação da bacia de deflexão daquele ponto. No caso de pavimentos de concreto de cimento Portland, o FWD pode ser utilizado para determinar o grau de travamento entre placas adjacentes, a partir da eficiência da transferência de carga entre placas, sendo este valor normalmente chamado de LTE (Load Transfer Efficiency). A medida do LTE é realizada posicionando o disco do FWD tangente à um lado da junta (ou trinca) a ser analisada. A carga é então aplicada e são feitas medidas de deflexão equidistantes de cada lado da junta. Em uma junta em que as deflexões têm o mesmo valor, esta é considerada como perfeitamente eficiente. Já para a maioria das juntas, a deflexão medida na placa adjacente à carga é menor do que a medida na placa carregada (FHWA, 2006).

O Crack Activity Meter (CAM) é um equipamento desenvolvido pelo Instituto Nacional de Transportes da África do Sul, que permite medir os movimentos diferenciais entre as paredes da trinca originada pela passagem de uma carga de roda através de dois medidores de deslocamento resistivo do tipo LVDT's (Linear Variable Differential Transformers). O primeiro LVDT, colocado na posição horizontal, mede o incremento na abertura da trinca ou junta durante a passagem de uma carga de roda à flexão (Figura 66) e o segundo LVDT mede o movimento vertical relativo entre as paredes de uma trinca em cisalhamento (Figura 67). O movimento vertical relativo entre as paredes de uma trinca é um importante parâmetro que serve para caracterizar a condição de transferência de carga entre as paredes de uma trinca por causa do entrosamento de agregados.

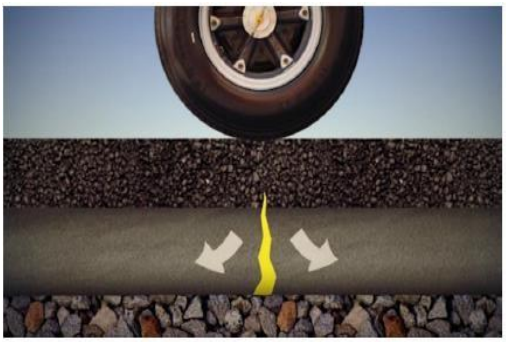


Figura 66: Posição flexão

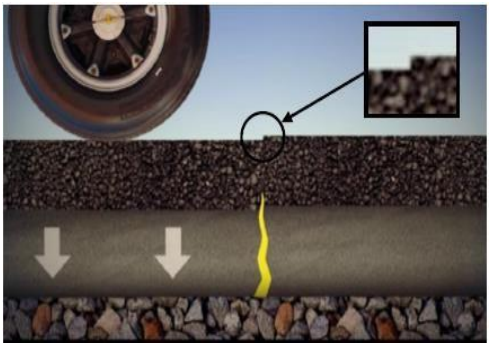


Figura 67: Posição cisalhamento

Os levantamentos foram realizados nas juntas transversais de entrada e saída das placas (sentido do tráfego) e perpendicularmente às trincas/ fissuras identificadas.

Análise dos resultados

A partir dos levantamentos realizados foram traçadas as bacias de deflexões, provenientes das saídas do FWD para as situações anterior e posterior às obras (Figuras 68 e 69).

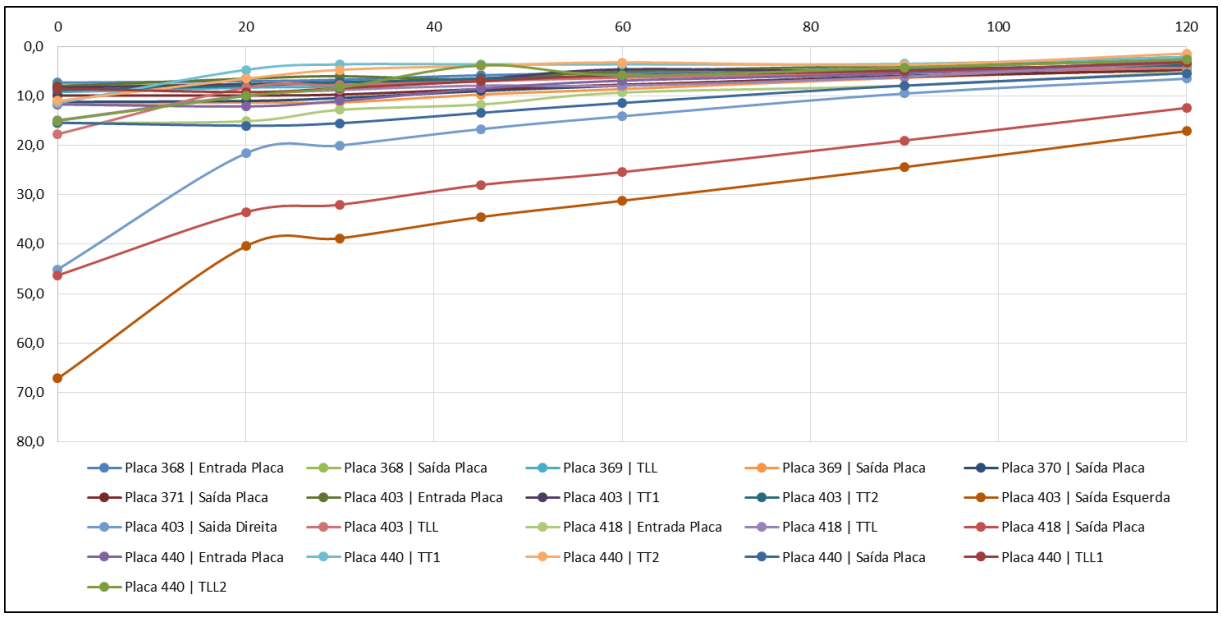


Figura 68: Bacias deflectométricas – Junho/2019

Observa-se que as placas 403 e 418 apresentaram elevados valores de deflexão (D0), indicando maior grau de severidade das trincas.

As demais placas apresentaram baixos valores de deflexão, cuja as bacias indicam comportamento similar de resposta a solicitação de cargas.

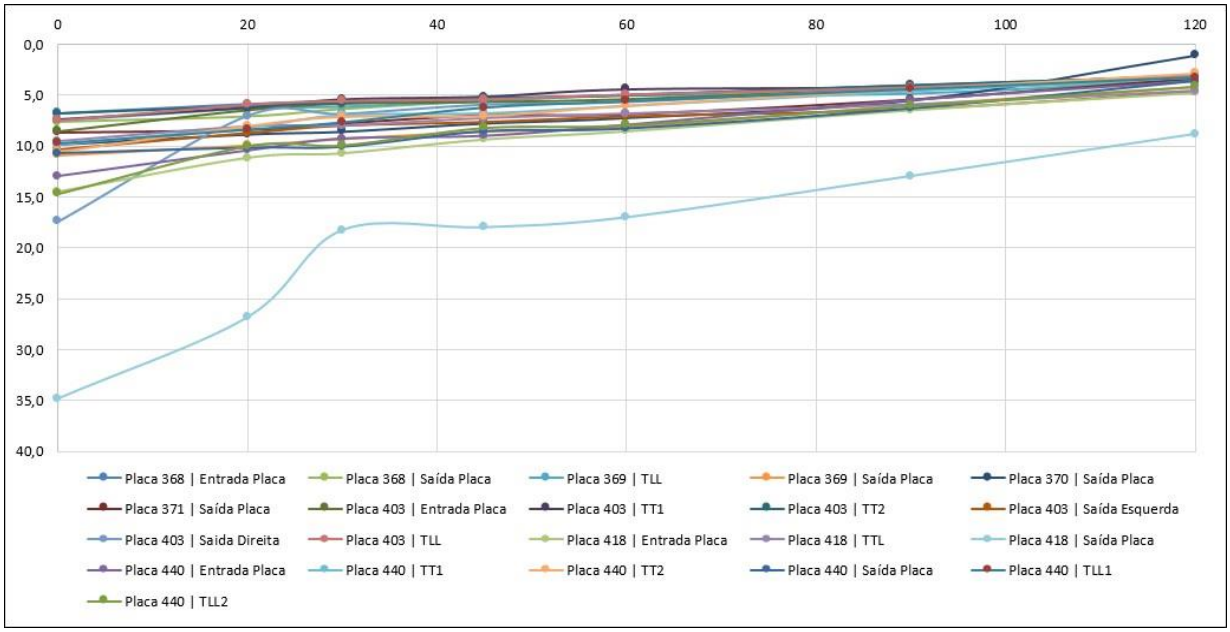


Figura 69: Bacias deflectométricas – Janeiro/2020

A partir da figura 69, verifica-se para as placas 403 e 440 um ganho expressivo na resposta a aplicação da carga com a diminuição dos valores de deflexão. O valor referente a saída da placa 418, ou seja, carga aplicada na placa 419 não apresentou melhora significativa após o tratamento

das fissuras existentes na placa 418. Tal fato pode ser decorrente de patologia não identificada visualmente na placa subjacente (419).

Com os dados de FWD, determinou-se os percentuais de LTE. Segundo FHWA (1990), avalia-se como satisfatória a transferência de carga para valores de LTE iguais ou superiores a 70%. Pode-se observar que, na maioria das vezes em que o LTE encontrava-se abaixo de 70%, após a intervenção estes valores passaram a ser satisfatórios. Nos casos onde não foi superado o limite de 70% após a obra, a redução nos valores de deflexões indica ganho de rigidez e melhor distribuição de carga.

Apesar de haver por vezes um decréscimo de LTE após a execução do tratamento, os valores de deflexão permaneceram no mesmo patamar ou até mesmo diminuíram. Embora esta variação influencie no cálculo do LTE, proporcionalmente os valores de deflexão apresentaram melhora substancial.

Já com os levantamentos realizados com Crack Activity Meter (CAM), foi possível medir os movimentos diferenciais entre as paredes das trincas (Figuras 70 e 71) e pode-se observar uma redução em todas as placas. Vale ressaltar que no momento dos levantamentos ocorreram restrições operacionais que impediram a avaliação de alguns pontos.

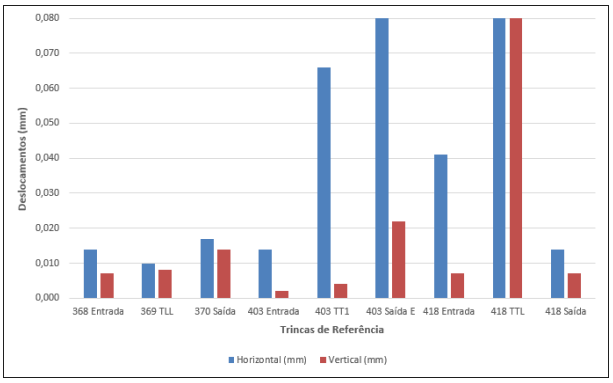


Figura 70: Movimentos diferenciais (Verticais e Horizontais) – Junho/2019.

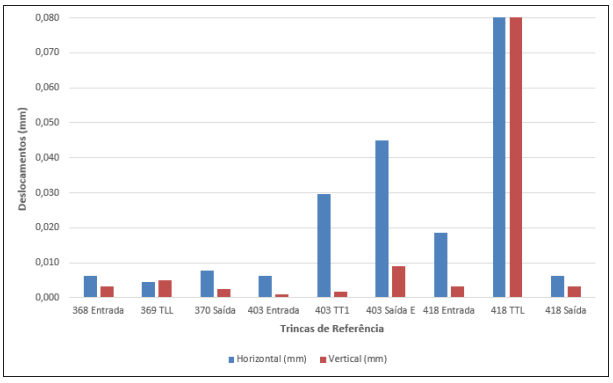


Figura 71: Movimentos diferenciais (Verticais e Horizontais) – Janeiro/2020.

Considerações Finais

Com base nos resultados decorrentes da aplicação da técnica de inserção de fibras de carbono nas fissuras das placas de concreto, podem ser estabelecidas as seguintes considerações:

- A execução de tal técnica confirmou-se operacionalmente vantajosa, permitindo a liberação ao tráfego poucas horas após a conclusão dos serviços;

- Verificou-se que para as placas, cujas patologias justificavam a reconstrução parcial ou total, a técnica apresentada mostrou-se eficiente, resultando num ganho expressivo de LTE e numa diminuição das deflexões;
- A selagem das trincas evita a deterioração do apoio das placas, posto que a infiltração de agua é minimizada, e consequentemente o processo de bombeamento de finos é mitigado e isso irá gerar um ganho no índice de condição do pavimento;
- A partir dos ganhos observados, há expectativas de que com a adoção da técnica apresentada, a durabilidade das placas se estenda, postergando assim a necessidade de reconstrução parcial ou total da placa;
- Pode-se afirmar que, apesar do custo do CARBOFIT apresentar valores um pouco acima (R7.363,34) do custo de reconstrução (R$6.746,03), as vantagens operacionais e ambientais compensam adotar a técnica do CARBOFIT;
- Ressalta-se que as placas permanecerão sob monitoramento para melhor avaliação da técnica e desempenho ao longo do tempo.

3.1.48. Vídeo Registro dos Ensaios Realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias

Introdução

O Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra iniciou as primeiras pesquisas no ano 1999, com o objetivo de intensificar o processo de melhoria contínua das condições de segurança, conforto, economia e durabilidade. Desde seu primeiro ano, desenvolvem-se pesquisas que beneficiam todas as rodovias brasileiras, empregando os Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), disponibilizados pela ANTT.

No ano 2011 inaugurou-se um novo prédio para poder melhorar a instalação de equipamentos laboratoriais modernos, empregados no mundo inteiro para avaliação de materiais rodoviários, como mostra a Figura 1.



Figura 78: Prédio do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra

Com a aquisição desses novos equipamentos, novos ensaios foram incorporados às atividades de pesquisa e apoio ao controle tecnológico desenvolvidos pela Concessionária. Na atualidade são 122 ensaios realizados em materiais rodoviários relacionados a solos, agregados, misturas asfálticas, entre outros.

Todos os ensaios executados no CPR seguem normativas nacionais, e no caso da inexistência destas no âmbito nacional, recorre-se a normas norte-americanas, europeias, sul-africanas ou australianas, muitas vezes não comuns para agências rodoviárias nacionais.

Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é realizar um vídeo registro dos 122 ensaios executados pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR Nova Dutra, relacionados à caracterização de materiais rodoviários, controle tecnológico e pesquisa, com o propósito de divulgar estes ensaios no formato de vídeo-aulas e criar um banco de dados acessível ao público geral, mas em específico, a profissionais e técnicos dedicados a pesquisa e controle tecnológico no Brasil

Para poder atender ao objetivo geral deste estudo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma organização geral dos ensaios, de acordo com o tipo de material analisado, materiais asfálticos, solos, materiais estabilizados e concreto.
- Desenvolver *scripts* ou roteiros para as diversas etapas que constituem a execução de cada um dos ensaios, para facilitar o entendimento por meio de vídeo-aulas.
- Realizar a filmagem dos *scripts* ou roteiros dos ensaios.
- Validar e editar as filmagens finais.

Propõe-se que o material gerado possa ser visualizado por meio da página web da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT).

Desenvolvimento do Projeto

1.1.1.42. Preparação e Execução dos Ensaios

Todos os ensaios desenvolvidos pelo CPR serão organizados de acordo com o tipo de material analisado. Dessa forma, os vídeos poderão ser mais facilmente consultados na edição final e disponibilizados no site da ANTT, se assim for definido.

Os ensaios serão executados pelos colaboradores do CPR, demandando horas das suas atividades para elaboração dos procedimentos frente às câmaras da empresa terceirizada. A participação dos colaboradores do CPR é fundamental, pois eles irão preparar de forma antecipada os equipamentos laboratoriais e os materiais necessários para a execução de cada um dos ensaios, além de ajudarem na produção de ambientes adequados no CPR para as filmagens.

1.1.1.43. Filmagem dos Ensaios

Uma empresa terceirizada realizará a filmagem dos 122 tipos de ensaios atualmente executados no CPR, organizados conforme a listagem apresentada na Tabela 41, em dias que serão programados.

Tabela 41: Ligantes asfálticos que serão estudados nesta etapa da pesquisa

Material	**Número de Ensaios**
Agregados	23
Ligante asfáltico	16
Emulsões asfálticas	11
Cal	2
Concreto asfáltico	19
Solos	16
Concreto de cimento Portland	10
Brita graduada tratada com cimento	8
Solo cimento	6
Solo cal	4
Fresado asfáltico	7
TOTAL	122

1.1.1.44. Validação das Filmagens

Após a filmagem e edição de todos os ensaios pela empresa terceirizada, o trabalho será revisado novamente em conjunto com a equipe do CPR da CCR NovaDutra, para realizar a validação das filmagens realizadas nos ensaios. Estas atividades irão demandar horas de dedicação dos colaboradores, para concordar com as filmagens, textos e áudios finais dos vídeos elaborados, realizando as correções necessárias e até a elaboração de novas filmagens, caso necessário. Esta atividade tem como objetivo garantir que os vídeos dos ensaios gravados não contenham erros ortográficos ou de interpretação no procedimento dos ensaios, que possam causar mal-entendidos aos usuários das vídeo-aulas.

3.1.49. Livro: Pesquisas desenvolvidas durante 20 anos do Centro de Pesquisas Rodoviárias

O objetivo desta pesquisa é resumir em uma única publicação, todas as pesquisas desenvolvidas no Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra com Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), durante mais de 20 anos.

3.2.Etapa B - Revisão final e formatação

Nesta etapa foi realizada a revisão final do e-book para ser entregue à ANTT.

3.3.Etapa C - Edição e impressão do livro e e-book

A impressão do livro não foi possível devido a incompatibilidade do orçamento aprovado no plano de trabalho com o orçamento realizado no final da pesquisa, sendo superior ao original.

3.4.Etapa D - Elaboração de relatórios

Os relatórios parciais propostos no cronograma de execução da pesquisa foram entregues de acordo com os prazos estabelecidos. Os quatro relatórios parciais foram entregues respectivamente em outubro de 2018, em abril de 2019, em outubro de 2019 e em abril de 2020. E este documento se refere ao relatório final que contempla todos os resultados alcançados por esta pesquisa.

4. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS GERADOS

O objetivo geral foi concluído, pois todas as pesquisas desenvolvidas no Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra com Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), durante mais de 20 anos foram resumidas em um livro. Mas os objetivos específicos desta pesquisa foram parcialmente concluídos, foi possível concluir o e-book e não o livro impresso.

A Etapa A denominada "Redação de capítulos do livro, para cada pesquisa" foi concluída. Foram listadas nesta etapa 49 pesquisas desenvolvidas, sendo elas resumidas abordando os seguintes tópicos - introdução e objetivos; metodologias utilizadas; resultados e conclusões.

A Etapa B também foi parcialmente concluída, já que o conteúdo foi apenas revisado e não formatado para impressão.

A Etapa C, "Edição e impressão do livro e e-book", foi parcialmente concluída porque o livro não foi impresso, apenas disponibilizado como e-book.

A Etapa D da Elaboração dos Relatórios foi totalmente concluída.

A vantagem deste projeto consiste na sintetização de todas as pesquisas desenvolvidas pela concessionária CCR NovaDutra com os Recursos de Desenvolvimento Tecnológico ao longo dos mais de 20 anos em um único documento.

Valéria Cristina de Faria

Gerente de Engenharia de Projetos de Pavimentos

Centro de Pesquisas Rodoviárias – CCR NovaDutra

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C.

AASHTO M 323-07. Superpave Volumetric Mix Design. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M 323-04, Washington, D.C., 2007.

AASHTO MP 325. Stone Matrix Asphalt. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO MP 325-08, Washington, D. C., 2008.

AASHTO PP 2. Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO PP2-01, Washington, D.C., 2001.

AASHTO pp 28. Standard Practice for SUPERPAVE Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO PP28-01, Washington, D. C., 2001.

AASHTO T 305. Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO PP28, Washington, D.C., 2009.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. AASHTO Designation: MEPDG-1. Washington, DC, July 2008.

ABNT NBR 12891. Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 12891:2003, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ABNT NBR 15140. Determinação do Desgaste por Abrasão Cantabro. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15140:2004, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

AFNOR - Association Française de Normalisation. (1999). Enrobés Hydrocarbonés: Couches d'assises: enrobés à module élevé (EME): NF P 98-140. Paris.

AMARGO, F. F. (2016). Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

ASPHALT ACADEMY (2009). Método 8. The determination of the maximum dry density and optimum moisture content of materials using the vibratory hammer compaction. Pretória, República da África do Sul.

ASTM - American Society for Testing and Materials. (2009). Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test: D 7369-09 West Conshohocken, PA.

AUSTROADS, Guide to pavement technology part 4D: Stabilised materials, AGPT04D-06, Austroads, Australia, 2006.

BALAGUER, M. (2012). Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em asfalto-borracha elaborado pelo processo de produção contínua em usina. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ.

BALBO, J. T. (2007). Pavimentação Asfáltica, materiais, projeto e restauração. Livro. Oficina de Textos. São Paulo, SP.

BALBO, J. T. (2009). Pavimentos de concreto. Oficina de Textos: São Paulo, SP.

BERNUCCI,, L. L. B.; Motta, L. M. G. da; Ceratti, J. A.; Soares, J. B. Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros. ABEDA. PETROBRAS. 1ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

BERTOLLO, S. A. M. (2002). Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo.

BOSSCHER, P. (2000). Relationship between pavement temperature and weather data. In: 79th TRB Annual Meeting, Washington, DC.

BROSSEAUD, Y. (2002). Revestimentos asfálticos franceses: panorama das técnicas, balanço de comportamento. In: 16º Encontro do Asfalto. IBP, Rio de Janeiro.

CASTAÑEDA LÓPEZ, M. A. Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Código de Trânsito Brasileiro , www.denatran.gov.br

COLLINGS, D. e JENKINS, K. J. (2011). The Long-term behavior of Bitumen Stabilided Materials (BSMs). 10th Conference on Asphalt Pavements for South Afriva (CAPSA11), KwaZulu-Natal, South Africa.

CORTÉ, J-F. (2001). Development and uses of hard grade asphalt and of high modulus asphalt mixes in France. Transportation Research Circular: Perpetual Bituminous Pavements, Washington, DC, n. 503, p. 12-31.

CRONEY, P.; CRONEY, D. (1998). The design and performance of road pavements. 3rd Edition. McGraw-Hill: New York.

D'AVILA, V. E. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento: comportamento à flexão de misturas contendo BGTC e fresado asfáltico. 2015. 82 p. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.

DELORME, J.L., Goyon V. e Gavalda, A. (1996). Asphaltic concrete with high modulus (EME): description, use, performance. In: Proceedings of 1st Eurasphalt & Eurobitumie Congress.

DES CROIX, P. e Planque, L. (2004). Experience with optimised hard grade bitumens in high modulus asphalt mixes. In: Eurasphalt & Eurobitume Congress, 3, Viena, 2004. Proceedings... Bruxelas: EAPA, v.1, p.159-172.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros – Relatório Final. Ministério dos Transportes. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Tomos I, II e III. Brasília, 1998.

DNER - Departamento Nacional de Rodagem (1994). Pavimento. Determinação das deflexões pela viga benkelman: DNER-ME 024/94.

DNER ES 386. Pavimentação - Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero - Camada porosa de atrito. DNER ES 386/99. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ, 1999.

DNIT (2006). Manual de Estudos de Tráfego. DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR. Publ. 723). Rio de Janeiro, 384 p., 2006

DOMINGOS, M.D.I. (2011). Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FAXINA, A. L. (2002). Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

FARUOLO L. B., J. L. Farnades D.Sc., M.R. Brochado D.Sc. "Key factors in road vehicles weigh-in-motion", XVII, IMEKO, Rio de Janeiro, 2006.

FARUOLO Luciano Bruno, “Análise de confiabilidade da pesagem dinâmica de veículos rodoviários”, dissertação de mestrado em tecnologia, CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 2007.

FARUOLO Luciano Bruno, M.T. e Paulo José Brochado Martha, “Medição dinâmica da massa de veículos rodoviários em transporte de cargas líquidas para aplicação de trânsito” I - CIMMEC- Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, Rio de Janeiro, Setembro, 2008.

FEDRIGO, W. Dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos com camadas recicladas com cimento. Tese em andamento (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FEDRIGO, W. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: Definição das bases para um método de dosagem. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FHWA (1990). Pavement Rehabilitation Manual. FHWA - Federal Highway Administration. FHWA-ED-88- 025, Washington, D.C., 1990.

FHWA (2006). LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements, Version 4.1. FHWA - Federal Highway Administration. FHWA-HRT-06-132, Washington, D.C., 2006.

FU, P. e HARVEY, J. T. (2007). Temperature sensivity of foamed asphalt mix stiffness: field and lab study. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 8. No. 2, 137-145,

FUJII, W. Y. – Avaliação do Desempenho dos Elementos de Sinalização Viária em Rodovias. 2017. 169 p. Versão corrigida – Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP – Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2017.

GRASSIOLI, G. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento: Comportamento mecânico de misturas contendo fresado asfáltico e solo laterítico. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia civil) – UFRGS, Porto Alegre.

Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. NCHRP 1-37A, National Research Council, Washington, D. C., March 2004.

HAAS, R. e Hudson, W. R. (1978). Pavement management systems. New York: McGraw Hill. 457 p.

HUANG, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design. 2nd Ed. Pearson Prentice Hall, 775p.

KANDHAL, P. S. e R. B. Mallick. Open-Graded Friction Course: State of the Practice. Transportation Research Circular Number E-C005, Transportation Research Board - TRB, Washington D.C., 1998.

JENKINS, K. J. (2012). Cracking Behaviour of Bitumen Stabilised Materials (BSMs): Is ther such a thing? Em: 7th RILEM Internation Conference on Cracking in Pavements. Volume 4, RILEM Book Sereis, pp 1007-2015.

KLEINERT, T. R. Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KLEINERT, T. R. Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KLINSKY, L. M. G. e FARIA, V. C. (2018). Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto Etapa 1: Estudo Laboratorial. Relatório Final de Pesquisa elaborado para a ANTT.

KLINSKY, L. M. G. E FARIA. V. C. (2015). Estudo da Influência do Teor de Cimento Portland, da Energia de Compactação e da Umidade no Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados. CCR-ND-BGTC- RTF-NOV/2015. pp.153. Relatório elaborado para à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Brasília, D.F.

KIM, Y.R., Lee, Y., e Ranjithan, S. R. (2000). Flexible pavement condition evaluation using deflection basin parameters and dynamic finite element analysis implemented by artificial neural networks. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Thrid Volume, ASTM STP 1375, S. D. Tayabji and E. O. Lukanen, Eds, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp 514 - 530.

KOPPERMAN, S., Tiller, G., e Tseng, M. (1986). ELSYM-5: interactive microcomputer version user´s manual: IBM PC and compatible version. Federal Highwal Administration, Report no. FHWA-TS-87-206, Final Report, dec. Washington, D.C.

LCTC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, D. Labry, V. Dolcemascolo, B. Jacob, F. Romboni, “Performance of a ls-wim system by testing” ICWIM4, Taipei, Taiwan, february, 2005.

LTPP (1998). LTPP data analysis: improved low pavement temperature prediction. Report FHWA RD-97-104U, 4p.

MAGALHÃES, S. T. (2004). Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho. Dissertação de Mestrado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 185 p.

MCDONALD, Charles, Pantent No. 4.085.078, Abril de 1978.

McGENNIS, R.B. et al. (1994). Background of Superpave asphalt mixture design and analysis. Report FHWA-SA-95-003, 160p.

MEDINA, J., e Motta, L. M. G. (2005). Mecânica dos pavimentos. 2. ed. Rio de janeiro: UFRJ. 2005. 570 p.

MOHSENI, A.; CARPENTER, S. (2004). Development of enhanced algorithm for Superpave high temperature Performance Grade (PG) selection and new software version. LTPP Report, FHWA.

MONTGOMERY, D.C., e Runger, G.C. (1999). Applied Statistics and Probability for Engineers. New York: John Wiley, 2nd Ed.

MOURÃO, F. A. L. Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

NASCIMENTO, L. A. H. Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NCHRP - National Cooperative Highway Research Program. Research Results Digest Number 285 (2004). Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design.

NCHRP. A Mix Design Manual for Hot Mix Asphalt. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP 09-33. Transportation Research Board, 2005.

ODA, S. (2000). Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

Ofício Inmetro/Dimel n.º 018/2008.

PINTO, S. Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

Relatório de ensaios de pesagem, rodovia dos Imigrantes, fevereiro de 2010.

Resolução Contran n.º 258/2007, www.denatran.gov.br

Relatório INPERPAV (2003). Relatório Final do Projeto “Avaliação de Cimentos Asfálticos de Petróleo para emprego em pavimentação. Relatório Técnico CD 02523. São Paulo, SP.

ROHDE, L. (2007). Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos. Tese de Doutorado, PPGEC / UFRGS, Porto Alegre, 246 p.

SANDBERG, U. (2010). Asphalt rubber pavements in Sweden – Noise and rolling resistance properties. Em: Inter Noise Congress. Lisboa, Portugal.

SENAI, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Cartilha inventário de emissões de gases de efeito estufa. Disponível em: <http://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8A5E3A0127015E3EE5A2310EB8>. Acesso em: 22 nov. 2018.

SPECHT, L.P. (2004). Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SUZUKI, C.Y. (1992). Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (subbase cimentada). Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo.

VAVRIK, W. R.; Huber, G.; Pine, W.; Carpenter, S. H.; Bailey, R. Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design. Transportation Research Board of the National Academies. Transportation Research E-Circular. Number E-C044, Washington, D. C., EUA. Outubro, 2002.

WAY, G. B. (2012). Asphalt-Rubber 45 Years of Progress. Em: Proceedings Asphalt Rubber Conference. Munique. Alemanha.

WAY, G. B.; KALOUSH, K. E.; BILIGIRI, K. P. (2011). Asphalt Rubber Standard Practice Guide. First Edition. Final Report. 121pp. Rubber Pavements Association. Arizona, Estados Unidos.

WIRTGEN (2012). Tecnologia de reciclagem a frio. Windhagen. 365p. Disponível em: http://www.wirtgen.de/. Acesso em: 24 out. 2014.

WSDOT - Washington State Department of Transportation. (1995). Pavement Guide for Design Evaluation and Rehabilitation.

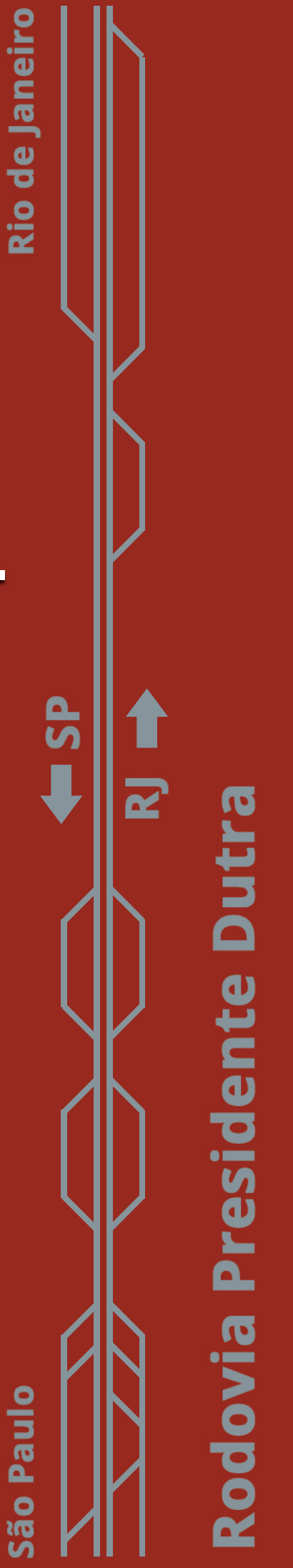
YODER, E. J., e Witczak, M. W. (1975). Principles of pavement design. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, 711 p

CCR NovaDutra

20 ANOS DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS DA CCR NOVADUTRA

Panorama das Pesquisas Desenvolvidas com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico - RDT





BR116

4.610 km de extensão



Via Dutra

402 km de extensão

PERÍODO DE CONCESSÃO:

03/1996 a 02/2021

Sumário

Prefácio		6
Depoimentos		9
Capítulo 1 – A Rodovia		30
Capítulo 2 – A Concessionária		32
Capítulo 3 – O CPR		35
Capítulo 4 – A Gerência de Pavimentos		53
Capítulo 5 – A ANTT		63
Capítulo 6 – Pesquisas RDT		65
6.1	Elaboração de Especificações Particulares de Serviço	69
6.2	Treinamento e aprimoramento de profissionais na área de pavimentação	70
6.3	Avaliação da utilização da cal hidratada para combater susceptibilidade de misturas betuminosas à ação da água e melhorar a adesividade do ligante ao agregado	71
6.4	Avaliação de danos por umidade induzida, módulo de resiliência e fadiga em misturas confeccionadas com diversos polímeros	73
6.5	Comparativo da qualidade entre misturas betuminosas executadas em usinas gravimétricas e *Drum Mixers*	75
6.6	Análise dos métodos DNER e ASTM para o ensaio de densidade de corpos de prova Marshall	77
6.7	Utilização do Elvaloy como aditivo ao ligante no CBUQ	78
6.8	Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação no Brasil	80
6.9	Avaliação do equipamento "*Grip Tester*" para medição de atrito	82
6.10	Relação de óxido de cálcio na cal hidratada para efeito de adesividade	84
6.11	Avaliação do teor de asfalto em volume dos projetos de misturas utilizados na Rodovia Presidente Dutra	86
6.12	Avaliação da necessidade de aplicação do método Rice para controle do volume de vazios de ar obtido no campo em misturas asfálticas	87
6.13	Determinação em laboratório da resistência à fadiga de misturas asfálticas	88
6.14	Avaliação do desempenho de camadas de mistura asfáltica reforçada com geogrelha flexível em relação à trincamento por fadiga e à reflexão de trincas de camadas inferiores do pavimento	90
6.15	Estudo de desempenho de pavimento com distintos ligantes asfálticos	92
6.16	Estudo com relação à deformação permanente das misturas asfálticas	96
6.17	Critério de otimização de projetos de ponte a partir de espectros de acelerações induzidas por veículos nos tabuleiros	100
6.18	Estudo comparativo do comportamento de fadiga de misturas betuminosas com diferentes teores de asfalto	102
6.19	Ensaios para avaliação dos concretos moldados em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfegos de veículos	105
6.20	Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes	107
6.21	Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfáltica de elevado módulo	111

6.22	Avaliação da pesagem de veículos em movimento com cargas líquidas	113
6.23	Diretrizes para implementação do guia de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (MEPDG) para a concessionária NovaDutra	116
6.24	Elaboração do projeto funcional da nova pista de subida da serra das araras e adequação do projeto funcional da pista ascendente existente em pista descendente	118
6.25	Capacitação da equipe técnica do CPR para uso dos novos equipamentos adquiridos	120
6.26	Capacitação da equipe técnica – Método Superpave	122
6.27	*Free Flow* – Implantação de pontos com novo sistema automático de arrecadação para testes (1ª etapa)	123
6.28	Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados com cal hidratada	125
6.29	Revestimentos asfálticos sustentáveis: estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas	127
6.30	Estudos para incorporação de conceitos de sustentabilidade em passarelas ao longo da Rodovia Presidente Dutra	130
6.31	Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados	132
6.32	Determinação da resistência à fadiga de misturas asfálticas a partir de dois métodos de ensaio com diferentes tipos de asfalto	135
6.33	Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland - desenvolvimento de método de dimensionamento e avaliação de processos construtivos	137
6.34	Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade	140
6.35	Materiais de sinalização horizontal: avaliação do desempenho para elevados volumes de tráfego	143
6.36	Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e *Flow Number* de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas	145
6.37	Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento (BGTC)	147
6.38	Asfalto borracha: revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas	151
6.39	Reciclagem de pavimentos asfálticos com espuma de asfalto. Etapa 1: estudo laboratorial	153
6.40	Modelo de serviço de telemedicina para atendimento emergencial em rodovia baseada em centro de apoio referenciada para encaminhamentos	156
6.41	Treinamento e capacitação técnica em pavimentação	158
6.42	Ecodriving BR - reduzindo custos e ampliando benefícios socioambientais na principal rodovia brasileira	160
6.43	Reciclagem de pavimentos asfálticos com espuma de asfalto e cimento Portland, construção e monitoramento de um trecho experimental	162
6.44	Dosagem de misturas asfálticas com energias distintas no compactador giratório Superpave	165
6.45	Avaliação da aderência entre camadas asfálticas	167
6.46	Avaliação do emprego de polímeros do tipo RET em misturas asfálticas	170
6.47	Emprego de perfis de fibras de carbono na recuperação de placas de concreto fissuradas	172
6.48	Vídeo registro dos ensaios realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias	174
Capítulo 7 – O Futuro		177

As pesquisas apresentadas neste livro foram realizadas pela concessionária CCR NovaDutra e financiadas por Recursos de Desenvolvimento Tecnológico – RDT, do contrato de Concessão da Rodovia Presidente Dutra – BR 116, da Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT.

Prefácio

“A Rodovia Presidente Dutra está parecendo um tapete! Parabéns pelo trabalho, está maravilhoso dirigir por aqui”.

Foram ligações como essa, recebidas através do Disque CCR NovaDutra, elogiando a pavimentação da Rodovia que recebi ao longo dos anos. E, como uma boa mãe, recebo este reconhecimento com orgulho! Digo isto, pois, considero cada quilômetro desta Rodovia como se fosse um filho, uma vida que eu cuidei e vi se transformar.

Há mais de 15 anos à frente do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra, aprendi a observar e colher informações diversas à cerca dos pavimentos da BR-116 – Rodovia Presidente Dutra. Com a força e união de uma equipe de técnicos e engenheiros com expertise em pavimentos, juntos e com muita dedicação, pesquisamos, desenvolvemos e aplicamos diversas tecnologias sempre em busca de qualidade e sustentabilidade. Todo planejamento, monitoramento, projetos, estudos de caso, construção de trechos experimentais, controle tecnológico e pesquisas (campo e laboratório) relacionadas com os pavimentos da Rodovia caminharam juntos com sincronicidade para promover uma melhoria contínua, os quais passaram pelas minhas mãos e estão registrados para pesquisas futuras.

Iniciei a carreira na área de engenharia durante a adolescência, no curso técnico de edificações, por influência do meu pai, que era projetista. Recém-formada em Engenharia Civil, ingressei na CCR NovaDutra em 1996, no início da concessão. Na época o desafio era enorme, pois a Via Dutra era conhecida como a Rodovia da morte! Em 1999 passei a fazer parte do time de pavimentos a convite do Eng. José Mario Chaves, responsável pelo desenvolvimento tecnológico. Percebi que estava entrando em um universo até então pouco explorado.

A via Dutra estava com três anos de concessão e muitas obras já tinham sido feitas no pavimento. Eu precisava entender os motivos, as consequências e o comportamento desses trabalhos. “Por onde eu começo?”, me questionei. Fui buscar respostas na teoria. Me matriculei em uma pós-graduação em engenharia de infraestrutura e mergulhei no processo de investigação minuciosa da documentação já existente da Rodovia. Foram muitas caixas de arquivos espalhadas na minha sala. e levei mais de um ano imersa nessa pesquisa. O objetivo era um só: extrair e digitalizar todas as informações para saber como seguir daquele ponto em diante. Imagine conhecer cada metro quadrado dessas centenas de quilômetros?

Foi assim que iniciei a criação do banco de dados que teve continuidade todos estes anos e é fundamental para atestar todo desenvolvimento tecnológico. A estruturação do nosso banco de dados, permite acessar o registro de cada ação tomada na Via Dutra, um verdadeiro histórico, quilômetro a quilômetro, mais de 10 milhões de m^2, ao longo dos últimos 25 anos, com dados de projeto, monitoramento, ensaios de controle tecnológico, as builts, pesquisas e outros.

Através do trabalho rigoroso de documentação, pude fazer intervenções e previsões calculadas, além de muito assertivas. E posso garantir: o passado traz respostas valiosas, assim como indica a melhor solução para o presente e, consequentemente, aponta as previsões mais assertivas para o futuro. Uma decisão que faz total diferença nos dias de hoje!

Em uma rodovia, o pavimento representa o maior custo do empreendimento. Para ter qualidade e evitar prejuízos, é preciso desenvolver segurança na tomada de decisão, ancorada nos resultados de profundos estudos. Não se trata só de adotar uma nova tecnologia, é necessário monitorar por anos até você ter a certeza que é viável. Tenho o sentimento de quem conhece cada detalhe do próprio trabalho. Segurança é fio condutor de tudo o que fizemos por aqui.

No total, são 402 km, que passam por 36 cidades, alternando regiões metropolitanas, áreas rurais, encostas e serras, em uma rodovia que faz ligação entre as duas maiores regiões metropolitanas do país, São Paulo e Rio de Janeiro. Foram muitas idas e vindas neste trecho ao longo dos anos. Aprendi que a pavimentação é como um filho, a cada ano um aprendizado, uma evolução. É preciso estar por perto, atenta e consciente para conquistar a intimidade necessária com os pavimentos de uma rodovia.

Os anos seguintes ilustram o avanço significativo para o CPR, assim como a consolidação da minha carreira. Em 2004, fui selecionada para um intercâmbio de três meses em Portugal. Deixei meu filho, com três anos na época, aos cuidados do pai, e cruzei o oceano para aprender e trazer melhorias para o Brasil.

O reconhecimento do trabalho também se deu na forma de diversos convites para palestrar sobre Gestão de Pavimentos, nos principais congressos rodoviários por todo o Brasil e visitas internacionais em busca de novas tecnologias.

Chegamos em 2011, um dos marcos mais importantes desta história: a inauguração do novo Centro de Pesquisas Rodoviárias do Grupo CCR. Um prédio três vezes maior, que recebeu um laboratório moderno, com os melhores equipamentos do mundo, importados da Austrália, Estados Unidos e Alemanha. O desafio era enorme, e veio a pergunta: Como fazer tudo aquilo se transformar em pesquisas? Convidamos a Prof. Sandra Oda, que detinha os conhecimentos necessários para calibrar os equipamentos e treinar a minha equipe para avançarmos no desenvolvimento tecnológico.

A aquisição destes equipamentos contribuiu para que o laboratório do CPR estivesse na vanguarda para atender aos requisitos de métodos de dimensionamento de pavimentos modernos, tipo mecanístico empírico, porém a contratação, em 2013, do pesquisador Luis Miguel fez toda diferença, elevando o nível das pesquisas e trazendo um olhar mais acadêmico para o CPR.

Hoje o nosso laboratório de pavimentação realiza mais de 100 tipos diferentes de ensaios na área de asfalto, concreto e solos, inclusive a CCR NovaDutra está produzindo vídeos aulas de cada um destes ensaios que ficarão como legado para o meio acadêmico e rodoviário.

O nosso laboratório se tornou uma referência no país. Ver o crescimento do CPR foi sentir que toda dedicação jamais foi em vão.

Para o nosso cliente, a pavimentação é vista apenas pela superfície. Se não há buracos, por exemplo, está tudo bem. Mas, do lado de cá, há uma engenharia muito mais profunda. Conhecer o comportamento dos materiais, resistência, forma, peso, assim como conhecer as técnicas disponíveis com seus equipamentos, sejam de laboratórios ou de campo, normas e especificações são algumas das muitas variáveis a serem estudadas. Tudo isso levando em consideração as análises de mistura de componentes asfálticos, topografia, geologia, clima e as características do tráfego. Não há atalhos: a gestão de pavimentos é um trabalho de extrema dedicação, treinamento, pesquisas e experimentos. Os desafios são proporcionais às realizações.

Eu nunca temi os problemas porque aprendi a amar a sensação de encontrar soluções. Ser uma mulher à frente de um projeto tão importante é também motivo de orgulho. Espero assim deixar um legado e que mais mulheres se interessem pela engenharia rodoviária.

Neste momento em que escrevo, ano de 2021, estamos chegando ao fim da primeira concessionária de rodovias brasileiras, a CCR NovaDutra. A Rodovia Presidente Dutra está no ranking entre as mais bem avaliadas do país, segundo pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT). Esse é um dos muitos resultados tangíveis e comprovados a partir de dados. Mas, muito além do que é possível mensurar, a maior recompensa para as incontáveis horas de estudos e milhares de ensaios realizados é ver que a qualidade da pavimentação de uma rodovia interfere e transforma diretamente a vida de uma sociedade, evitando acidentes, proporcionando conforto, segurança e economia. Essa é a verdadeira retribuição que fazemos com o nosso trabalho. Estamos cuidando de gente!

Dedicação é a palavra que melhor representa os últimos 25 anos. Uma trajetória que contou também com a parceria de muitas universidades como o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Universidade de São Paulo (USP), Universidade de São Paulo – São Carlos (USP São Carlos), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal do Ceará (UFC) e empresas como a Petrobrás, entre muitas outras no desenvolvimento de pesquisas.

Esse livro traz um resumo de todas as pesquisas fomentadas pelo RDT, depoimentos e um pouco da história e curiosidades do CPR. Para além disso, esse livro deixa um legado para a Engenharia Rodoviária.

Deixo aqui meus sinceros agradecimentos à ANTT, ao grupo CCR, a todos os meus líderes que de perto ou à distância me apoiaram e, principalmente a todos os colaboradores que estiveram ao meu lado nesta jornada.

Eng. Valéria Cristina De Faria

Gerente de Engenharia- Projetos de Pavimentos (03/1999 – Atual)

Depoimentos

Inovação para a mobilidade humana

O Grupo CCR foi formado com o DNA da inovação e seu propósito é cuidar dos serviços de infraestrutura para que as pessoas possam cuidar melhor de seus caminhos. O que a CCR faz impacta e torna melhor a mobilidade das pessoas. Ao longo de sua história de mais de 20 anos, a empresa tem inovado na gestão dos aeroportos, dos sistemas de transporte público de passageiros (trilhos e barcas) e contribuído para tornar mais eficiente a gestão de rodovias, um dos mais importantes modais utilizados no Brasil. Nesse contexto, o Centro de Pesquisa Rodoviária (CPR) é um exemplo de como a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico são capazes de oferecer à sociedade brasileira um novo padrão de serviços nas estradas, principalmente em relação à qualidade do pavimento que garante grande conforto e segurança aos nossos clientes.

Isso não surgiu por acaso: a CCR criou um modelo de negócio – a prestação de serviços públicos de infraestrutura a partir do qual tem sido possível oferecer estrutura moderna e eficiente, de maneira proporcional às necessidades de um país com as dimensões continentais que temos no Brasil. O CPR faz parte desse modelo de negócio e integra também o esforço científico e tecnológico no desenvolvimento de estruturas de conservação, manutenção e operação de rodovias, reconhecidamente de primeiro mundo. Temos orgulho do conhecimento que construímos e compartilhamos para a gestão de rodovias e que hoje serve aos nossos clientes em todas as concessões administradas pela CCR no país.

Marco Antonio Souza Cauduro

Diretor-presidente do Grupo CCR

Pelos bons caminhos

O Centro de Pesquisa Rodoviária (CPR) faz parte de uma estrutura de serviços, engenharia, TI, pesquisa e inovação que serve de apoio a todas as concessões do Grupo CCR. Esta obra literária demonstra, portanto, como uma companhia de concessões de serviços públicos em infraestrutura mobiliza capital humano para gerar inteligência e desenvolvimento qualificado, compartilhando conhecimentos com a sociedade. O trabalho do CPR para manter a qualidade da liga asfáltica utilizada em cada região e clima no Brasil demonstra como o Grupo respeita os clientes que se utilizam de cada um dos mais de 4,6 mil quilômetros de rodovias administradas pelo Grupo, especialmente no que diz respeito aos aspectos de segurança.

Em toda a malha, há estudos, pesquisas e inovações geradas no Centro de Pesquisa Rodoviária, em Santa Isabel (SP). O Grupo CCR investe no CPR e em todas as empresas de engenharia e tecnologia, como CCR Engelog e a CCR EngelogTec, que continuam a inovar e desenvolver pesquisa e gerar conhecimento que estão ou irão servir aos nossos clientes em todo o Brasil. Esse esforço é um compromisso da companhia em promover a modernização da infraestrutura brasileira. A CCR tem orgulho deste legado e continuará investindo na ciência e no desenvolvimento tecnológico que, acima de tudo, contribui para salvar vidas. Esse é o papel de uma companhia moderna e comprometida com o país. Esta é a história contada neste livro.

Marcio Yassuhiro Iha
Diretor de Global Business Services (GBS)

25 anos de CCR NovaDutra

Ao longo desses 25 anos, uma das nossas maiores prioridades – senão a maior - tem sido oferecer condições adequadas de fluidez e segurança ao tráfego da Via Dutra, com especial atenção ao pavimento. A Via Dutra é a principal ligação rodoviária entre duas grandes capitais do país e tem um dos maiores volumes de tráfego do Brasil. Isso representa uma enorme quantidade de desafios. O maior deles talvez seja lidar com o desgaste do pavimento. Foi por conta disso que escolhemos investir em pesquisas.

O Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) trouxe excelentes resultados alcançados pelas pesquisas no setor de pavimento rodoviário. Não é exagero afirmar que estamos contribuindo com a melhoria das condições de fluidez e segurança não só da Via Dutra, mas das rodovias brasileiras como um todo, visto que os projetos estarão disponíveis também aos órgãos públicos e às demais concessionárias.

O CPR é um símbolo do comprometimento da Concessionária com a qualidade e o desenvolvimento de novas soluções para a melhoria da malha viária do País.

Carla Fornasaro
Diretora-Presidente CCR NovaDutra

Contribuição para a engenharia rodoviária

Muito lisonjeada e orgulhosa de ver de perto toda a contribuição que o CPR – Centro de Pesquisas Rodoviárias do grupo CCR deixou para a engenharia rodoviária do nosso país.

Muito trabalho, dedicação e pioneirismo dos nossos profissionais para fazer do Centro de Pesquisa uma referência de alto nível técnico, na vanguarda das pesquisas desenvolvidas e aplicadas na nossa querida Rodovia Presidente Dutra – que completou 70 anos!!

Juntamente com a Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, que fomentou e nos instigou para o desenvolvimento e aprimoramento de nossas pesquisas, alcançamos os 25 anos de concessão com muitos motivos para se orgulhar e mais que isso, de poder colocar todo o aprendizado à serviço da comunidade técnica do setor.

Parabéns a todo o time do CPR!

Cristiane Soares Araújo Valias

Gerente de Contrato de Concessão

A importância da pesquisa

Ao longo de vários anos, tive a grande satisfação de presenciar o significativo trabalho conduzido pela competente equipe que integra o Centro de Pesquisas Rodoviárias da NovaDutra e de participar de alguns encontros e visitas com a presença de profissionais de destaque da engenharia de pavimentos no cenário nacional e internacional, bem como de congressos, onde foram apresentados trabalhos de grande relevância. Essa publicação vem reforçar a importância global da pesquisa, que é o grande catalisador do processo de desenvolvimento tecnológico, de inovação, de busca por soluções sustentáveis e pela excelência no ambiente da engenharia rodoviária, e deixa um importante legado."

Eng. Luiz Felipe Alves
Diretoria – Engelog

Por que criar um Centro de Pesquisas?

Obviamente, um dos principais itens de custo e de importância significativa nos resultados finais de uma concessão é o pavimento. Portanto, era mais do que evidente que tínhamos de buscar uma maneira mais eficiente e inteligente de administrar este item no nosso Contrato de Concessão da Rodovia Presidente Dutra.

Ficava claro também que a busca de novas soluções não era apenas com a finalidade de diminuir os valores relativos ao custo, mas também a busca de inovação e tecnologia que permitisse uma implantação dos produtos na pista que minimizasse o impacto na operação da rodovia. Cada intervenção na recuperação do pavimento causava filas de congestionamentos e, consequentemente, um aumento enorme nos tempos de deslocamentos e um grande impacto negativo para os clientes da rodovia. Sem dizer que também era mais um item de aumento dos riscos de segurança e causador de acidentes para o próprio usuário e para os trabalhadores durante a execução destas obras.

Nos primeiros anos da concessão, fizemos algumas viagens para os EUA com a finalidade de verificar o que estava sendo feito por lá, quais as novas tecnologias que estavam adotando e quais poderíamos trazer também para o Brasil.

Além das novidades em termos de novos produtos, dos quais trouxemos vários exemplos para o Brasil, me chamou a atenção que em todos os DOT´s (Departamentos Estaduais de Transportes) em todos os estados que visitamos contava sempre com um Centro de Pesquisas especializado em pavimentos.

A finalidade destes Centros de Pesquisas era, principalmente, desenvolver novas misturas asfálticas de tal forma que se identificasse para cada região e para cada rodovia qual deveria ser a melhor solução para aquele tipo de situação, o que é totalmente racional, pois cada região e, portanto, cada rodovia, pode ter características totalmente

diferente umas das outras. As condições climáticas podem ser totalmente diversas, os materiais disponíveis na região com certeza terão características diferentes e faz todo o sentido que as soluções sejam customizadas para ajustar às particularidades de cada intervenção.

E por que não praticarmos também a mesma metodologia? Foi a partir desta constatação que decidimos implantar o Centro de Pesquisas Rodoviárias voltado, num primeiro momento, para as pesquisas de pavimento.

Sem dúvida, hoje fica claro para todos nós que os ganhos ao longo destes 20 anos são imensuráveis.

Foram desenvolvidos vários estudos que fazem parte do escopo desta obra, trazendo novas técnicas, novos produtos e novas soluções, com resultados fantásticos, tanto na questão da redução dos custos de implantação e de manutenção com efeito significativo na vida útil destes produtos, como também na redução dos impactos nas intervenções na pista, trazendo menos incômodos aos usuários e contribuindo com menos prejuízos ao meio ambiente.

A partir do momento que decidimos implantar o Centro de Pesquisas até a data que o mesmo ficou pronto – e, para não perder tempo, uma vez que os trabalhos de recuperação da Rodovia tinham um cronograma a ser cumprido –, fomos buscar uma parceria com a Petrobrás, que já tinha um laboratório de pesquisa de produtos asfálticos em funcionamento, na região de São José dos Campos (SP). Esta experiencia foi muito positiva, pois consolidou nossa percepção de que era extremamente necessária a criação deste laboratório.

Vale a pena aqui relembrar a participação decisiva, no processo de montagem do Centro de Pesquisa, do Eng. José Mário C. Chaves, que, juntamente comigo, esteve nestas viagens aos EUA, onde pudemos conhecer e, posteriormente, consolidar e validar junto à Diretoria da Concessionária, a real necessidade da implantação desta importante área de pesquisas.

Vários outros profissionais e técnicos tiveram participação efetiva na história deste Centro de Pesquisas. Uma das principais, senão a principal, pois foi sem dúvida quem conduziu e ainda conduz os trabalhos ao longo desses anos, é a Eng. Valéria Faria, autora deste trabalho e a quem parabenizo pela dedicação e contribuição para o sucesso de todos estes estudos que trouxeram enormes ganhos para a nossa engenharia e para a gestão e administração da operação de rodovias no Brasil.

Tenho bastante orgulho de ter sido um dos criadores da ideia e da materialização deste projeto, principalmente vendo hoje todos os resultados que foram alcançados.

E, vejo estes resultados, não apenas na questão do pavimento, cujos estudos serão apresentados ao longo deste trabalho, mas por termos sido inovadores em vários outros itens aplicáveis às rodovias, como, por exemplo, na sinalização viária. Fomos pioneiros no desenvolvimento, juntamente com os fornecedores especializados, das tintas de sinalização horizontal à base de água, que não eram usadas no Brasil, em substituição aos produtos com outros solventes, que causavam vários malefícios aos colaboradores que os manuseavam e também ao meio ambiente. Outro item que foi desenvolvido também com os fornecedores são os diversos tipos de tachas refletivas, que apresentavam um sério problema de fixação, o que foi melhorado com estas novas experiências.

Tivemos também o desenvolvimento de outro produto de segurança rodoviária, que hoje é amplamente usado em praticamente todas as rodovias, que é a tela antiofuscante extrudada e fixada com o uso de cola à base de epóxi.

No pavimento, vale a pena lembrar também o pioneirismo e a inovação em trazer para o Brasil o primeiro equipamento de selagem de trincas, amplamente usado nos EUA. Quantos anos de extensão na vida útil de pavimentos não foram acrescidos com esta técnica? E tudo isso foi possível a partir da disponibilidade de um Centro de Pesquisas Rodoviárias capacitado para levar à cabo estes estudos e desenvolvimento de soluções.

Não temos dúvidas de que trabalhar buscando sempre as melhores práticas e as melhores ideias, através de estudos, pesquisas e desenvolvimento de novas técnicas, é a única maneira de se obter sucesso e resultados positivos para todos, sejam estes os usuários, os clientes, o meio ambiente, os acionistas das concessionárias ou os colaboradores.

Leonardo Couto Vianna

CEO da CCR (08/2018 – 07/2020)

Início do CCR NovaDutra

Em 1998, para viabilizar as soluções apresentadas pelas construtoras contratadas pela NovaDutra, foi necessário criar uma equipe para analisar técnica e economicamente as mais interessantes, buscando adotar aquelas que apresentassem melhor custo *versus* benefício. Além disso, havia necessidade de garantir a qualidade das obras, embora as construtoras fossem responsáveis pelo controle de qualidade dos serviços. Também era necessário acompanhar o desempenho a longo prazo das soluções adotadas. Para análise técnica das propostas de soluções e seu acompanhamento a longo prazo esta equipe necessitava de ferramentas adequadas.

A proposta de se criar um centro de pesquisas rodoviárias foi então concretizada.

Inicialmente, começamos a trabalhar em um laboratório de obra, cedido pela Construtora Andrade Gutierrez S.A.

Em 1999, gentilmente, a BR Distribuidora nos cedeu um laboratório existente na área da refinaria do Vale do Paraíba (REVAP). Neste laboratório iniciamos, efetivamente, os trabalhos de pesquisa e de garantia da qualidade das obras em execução.

Em agosto de 2000, concluiu-se a sede do Centro de Pesquisas em Santa Isabel.

Eng. José Mário Cortes Chaves
Consultor (1998 – 2004)

Minha experiência com o Centro de Pesquisas Rodoviárias

Ainda me lembro quando, pela primeira vez, em 1997, ouvi um engenheiro de projetos da NovaDutra mencionar sobre a vontade da concessionária em ter um Centro de Pesquisas Rodoviárias para realizar estudos do pavimento da Rodovia Presidente Dutra. O intuito era termos mais qualidade, inovação e otimizações nos custos de recuperação, conservação e manutenção da malha viária.

Na época, achei a ideia ótima, pois a responsabilidade havia "mudado de lado" e, agora, sob tutoria do setor privado, era a oportunidade perfeita para focarmos no desenvolvimento de novas técnicas de estudos de pavimento, trazendo mais seriedade e proporcionando enormes benefícios para os usuários da Rodovia e para a tecnologia brasileira.

Finalmente, em 2000, a concessionária construiu seu primeiro Centro de Pesquisas Rodoviárias. O prédio contava com uma área de aproximadamente 300 m2 com equipamentos para caracterização de materiais, desenvolvimento e avaliação de misturas asfálticas. Em 2003 vimos a necessidade de aquisição de uma viga Benkelman eletrônica para controle das camadas do pavimento que passavam por manutenção e implantação. Em 2010, o CPR tomou a iniciativa de elaborar os projetos de manutenção nos pavimentos da Rodovia, deixando de terceirizar este serviço. Foi necessário adquirir um equipamento para medir a irregularidade da via. Em 2011, um perfilômetro a laser foi adquirido pelo CPR.

A aquisição desses equipamentos permitiu o aprimoramento dos projetos de pavimentos, tornando-os mais assertivos e confiáveis, agilizando a tomada de decisões, o que levou a Rodovia Presidente Dutra ao patamar de ser considerada uma das melhores do Brasil. Essa revolução pioneira passou a ser difundida para todas as demais obras de recuperação, de manutenção e de conservação viária do grupo CCR.

Além de atuar em pesquisas para aperfeiçoar os projetos de misturas asfálticas, caraterização de ligantes asfálticos, para aprimoramento de camadas de base e sub-base, o CPR também proporcionou um local de convívio, onde todos os colaboradores envolvidos com serviços de pavimentação puderam colaborar com a discussão de problemas decorrentes, auxiliando em sua resolução e no controle de qualidade das obras – que incluíam implantações de marginais, faixas adicionais, trevos, recuperação, manutenção e conservação da Rodovia –, sempre dentro dos parâmetros de excelência da Concessionária NovaDutra, garantindo segurança, qualidade e durabilidade nas soluções adotadas.

Eng. Cássio Levada

Gerente de Engenharia de Obras da CCR NovaDutra (1997 – Atual)

Modernização do Centro de Pesquisas Rodoviárias

O CPR tem como um dos seus principais objetivos o desenvolvimento de novas tecnologias para pavimentação.

Neste sentido, em novembro de 2007, como representante da Engelog, participei de uma viagem de pesquisa aos EUA para ampliação dos conhecimentos do Grupo CCR na utilização de asfalto borracha em camadas de pavimento flexível.

Nesta viagem houve uma visita à Arizona State University em Phoenix com apresentações dos professores Mathew Witczak e Kamil Kaloush, ambos pesquisadores com alto conceito na comunidade internacional voltada para pavimentação.

O Prof. Dr. Witczak é reconhecido especialista na área de pavimentos rodoviários e aeroportuários. É coautor, com o Prof. E.J. Yoder, de um dos mais importantes livros sobre técnicas modernas de dimensionamento de pavimentos: “Principles of Pavement Design”.

O conhecimento e até amizade desenvolvida com estes dois professores foi de muita valia para o trabalho do CPR.

Em princípio de 2008 em vista da realização do 19º Encontro do Asfalto promovido pelo IBP para junho deste mesmo ano, a NovaDutra enviou convite ao Prof. Witczak para uma apresentação sobre “Técnicas de dimensionamento de pavimentos”, o que foi prontamente aceito.

Na sua visita e já previamente programado com o Prof. Witczak foram efetuadas diversas inspeções nos pavimentos da NovaDutra, AutoBAn e ViaOeste.

Em resumo o Prof. Witczak elogiou bastante o estado do pavimento e a operação das rodovias.

Apesar dos elogios, ele fez comentários relativos aos equipamentos em utilização no laboratório do CPR, que estariam ultrapassados e não atenderiam na aplicação a novas técnicas desenvolvidas pela comunidade internacional e ele, pelo que viu do porte das concessões do Grupo CCR, recomendaria fortemente a modernização do CPR.

Estas impressões e comentários foram levados para o presidente da NovaDutra, Maurício Soares Negrão e em pouco tempo houve a aprovação do Centro Corporativo da CCR da construção de uma edificação projetada especificamente para ter um laboratório de alto padrão, capacitado a receber os mais modernos equipamentos para atendimento às demandas futuras do desenvolvimento tecnológico da concessionária.

O novo CPR foi inaugurado em 27 de julho de 2011.

Eng. Décio de Rezende Souza

Consultor do Grupo CCR

Minha experiência no Centro de Pesquisas Rodoviárias

No período de 2013 a 2019, tive a enorme satisfação de trabalhar no Centro de Pesquisas Rodoviárias, da CCR NovaDutra, e fazer parte da sua história. Ao chegar, logo percebi que o desafio era grande, pois tinha a responsabilidade de contribuir e liderar a equipe do laboratório do CPR, a qual já tinha um alto nível técnico e uma história muito bem-sucedida. A motivação constante e a orientação da Eng. Valéria Faria, assim como o apoio e a vontade de superação da equipe, foram fundamentais para desenvolver esse trabalho e transformar o CPR em um centro de investigação rodoviária de referência no Brasil.

Além da capacitação da equipe do laboratório, tive também a responsabilidade de elaborar e desenvolver as pesquisas financiadas pelo Recurso de Desenvolvimento Tecnológico – RDT, da ANTT. Nesse período, tive a oportunidade que muitos pesquisadores sonham: poder aliar os conhecimentos acadêmicos à engenharia prática para a resolução de problemas reais, que encontramos no dia a dia, durante a construção e manutenção de rodovias. O investimento que a CCR NovaDutra havia realizado no laboratório do CPR era enorme, e contávamos com todas as ferramentas necessárias para realizar um trabalho com qualidade internacional. Assim, nesses quase sete anos, desenvolvemos estudos e pesquisas relacionadas a quase todos os materiais de pavimentação, sempre com um pé no laboratório e com o outro na rodovia. Muitas dessas pesquisas foram pioneiras no âmbito rodoviário no Brasil e o seus resultados constituíram o passo inicial para aplicar novos materiais e técnicas na Rodovia Presidente Dutra e em outras estradas brasileiras.

No CPR, as pesquisas foram desenvolvidas com uma estrutura participativa da indústria e da academia – uma integração que considero o melhor caminho para realizar pesquisas para melhorar a infraestrutura do país. Por um lado, a indústria oferece ao mercado novos produtos e soluções, e desafia os consumidores a avaliar e validar essas técnicas. Do outro lado, a academia, contribuindo com o estado da arte, a capacitação técnica e o espírito de crítica construtiva. Acredito que a integração desses atores indústria-academia-consumidor é um exemplo a seguir por outros centros de investigação, repetindo os ótimos resultados obtidos pelo CPR ao longo de mais de duas décadas. Hoje, considero que esse exemplo é um dos principais legados do Centro de Pesquisas Rodoviárias, além das mais de 40 pesquisas desenvolvidas ao longo desse período, que compõem um extenso banco de dados de conhecimento rodoviário para o Brasil.

Foram quase sete anos de muito aprendizado, que contribuíram para o meu crescimento profissional e aumentaram a minha paixão pelas rodovias. Agradeço à cada uma das pessoas com as quais tive o prazer de trabalhar nesse período: Valéria, Lenice, Honório, Tiago, Márcia, Alessandra, Adriana, Charles, Cassimiro, Lucas, Burê, Geraldo, Daili, Rubens, Nelson, Cleto, José Carlos, Ronaldo, Cezar, Danielson. Sem dúvida, cada um contribuiu para o meu desenvolvimento pessoal e para o crescimento do CPR.

Eng. Luis Miguel Gutiérrez Klinsky, *PhD*

Pesquisador do Centro de Pesquisas da CCR NovaDutra

(04/2013 – 02/2020)

Desafio profissional

Em junho de 2013 eu comecei o meu caminho na CCR NovaDutra e no início de 2018 eu fui convidada pela Eng. Valéria, a fazer parte da equipe do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra. Eu havia me formado recentemente em Engenharia Civil e tinha a certeza que seria um grande desafio e presente, iniciar a carreira trabalhando em um centro de referência no Brasil, no qual o meio acadêmico sempre enalteceu.

A recepção não poderia ser melhor, e entendi de imediato que o CPR na verdade era uma grande família, onde todos se dedicavam extremamente nas atividades propostas, e que os procedimentos eram realizados como uma dança perfeita, porque cada indivíduo sabia exatamente como executar a sua parte.

A história do pavimento da via Dutra está toda imortalizada no banco de dados, cada quilômetro possui a sua própria biografia.

Para o monitoramento são utilizadas tecnologias modernas que possibilitam os levantamentos das condições: estruturais, de superfície, conforto, aderência e imagens de toda malha rodoviária.

Todo esse conteúdo possibilitou elaborar projetos mais precisos, atendendo as necessidades de campo, proporcionando melhorias contínuas para os pavimentos.

Mas o trabalho não acaba quando o projeto é enviado, porque ele é apenas um produto obtido através de uma diversidade de dados, dentro de uma gerência de pavimentos bem detalhada. Anualmente são revisitadas as necessidades da Rodovia, como um ciclo sempre se renovando criando cenários atuais e futuros.

Hoje já são 8 anos olhando para a via Dutra como um filho e três anos na equipe do CPR. Durante esse tempo pude colocar em prática o conhecimento obtido na faculdade além do convívio com profissionais com mais 20 anos de experiência e dedicação à Rodovia Presidente Dutra, que fez toda a diferença para o meu crescimento profissional e pessoal.

Minha jornada é curta comparada a trajetória do CPR. Mas cresci e amadureci neste curto período de tempo. Rotina e zona de conforto são palavras que não se encaixam neste ambiente, o trabalho é diferente e desafiador todos os dias, e talvez esse seja o segredo do sucesso.

Se todo recém-formado tivesse uma escola assim e com professores tão dedicados como a Eng.ª Valéria, teríamos profissionais bem-sucedidos com consciência que a engenharia não é apenas construir casas, edifícios, ruas, pontes, rodovias, mas sim cuidar de pessoas, cuidar de vidas.

Obrigada a todos pela oportunidade de fazer parte da história da mais importante Rodovia do país.

Eng. Márcia Helena Leal
Analista de Engenharia Viária

O desenvolvimento humano

Posso voltar no tempo e sentir o início de tudo, encontrar os primeiros colaboradores, deparar com os primeiros ensaios realizados; posso falar das dosagens asfálticas, dos controles de compactação, das caracterizações dos CAPs, agregados, solos, concreto, obras e diversas pesquisas; por conseguinte, de cada profissional que pôs a mão na massa e se dedicou com satisfação e ética.

Nestes 20 anos no CPR, foram muitos ingressos, convívio e despedidas de colegas. A empatia foi fundamental para a convivência com uma diversidade de personalidades, ao longo de inúmeros treinamentos, cursos, festas, conquistas, alegrias e tristezas.

Na vida, temos vários objetivos onde tentamos granjear, mas por um motivo ou outro ficam apenas no planejamento e às vezes consideramos a falta de oportunidades ou mesmo não consideramos nossa capacidade para tanto; e não conseguimos dar o primeiro passo em busca dos nossos propósitos.

Um acontecimento pessoal acabou influenciando em meu caminho acadêmico, quando minha gerente, a Eng. Valéria Faria, me disse que eu limitaria minha carreira à técnico, caso não me formasse em Engenharia Civil.

Da minha trajetória no CPR, posso dizer que levo de aprendizado minha atuação, valorização profissional, apoio familiar e a alegria de acompanhar o crescimento profissional de muitos amigos na área da engenharia rodoviária.

Eng. Geraldo Pereira

Técnico do Laboratório do CPR (11/1998 – Atual)

Desafios na construção de trechos experimentais

Entrei para trabalhar como Engenheiro de Segurança do Trabalho na Serveng, no início de abril de 1996, no contrato de obras da Dutra. O trecho de obra iniciava na divisa de São Paulo com o Rio e vinha até o km 150, em São José dos Campos. Os serviços compreendiam equipes de pavimentação, drenagem, capina e roçada, mureta de concreto New Jersey, construção da Ponte do Pororangaba (que caiu nos primeiros dias da concessão), entre outros. O efetivo era bem expressivo para uma obra desse tipo, algo em torno de 500 pessoas.

Um fato engraçado que aconteceu comigo foi no trecho entre Caçapava e Taubaté. Passei por uma obra e vi a sinalização desorganizada, confusa, enfim, uma anarquia. Parei o carro e já saí dando bronca em todo mundo. Perguntei quem era o Encarregado da frente de serviço e apontaram um senhor. Quando fui falar com o encarregado, não o reconheci. Estranhei e percebi que aquela equipe não era da Serveng. Muito sem jeito e pedindo com muita calma, solicitei mais atenção na sinalização, pois estava perigoso e com muita chance de acidentes. Os desafios do início da concessão eram muitos. Na parte de Segurança da Nova Dutra, tinha uma equipe, que desenvolvia um excelente trabalho tanto na parte de segurança do trabalho, como na sinalização de obras e sinalização viária. Foram 4 anos de obras, onde a Serveng executou as marginais na Dutra, em São José dos Campos, em Guarulhos, além de viadutos em Moreira Cesar e obras também no km 92. Os acidentes de trânsito eram graves, pois não existiam as muretas de concreto New Jersey. Fomos nós que também executamos essas muretas para auxiliar e tentar diminuir a gravidade desses acidentes. Voltei a trabalhar na Dutra, em 2004, quando a Serveng ganhou um contrato de fresagem e pavimentação. Em 2005, passei para a área de produção e depois para a gerência de obras. Foi nessa época que comecei a ter contato com o Eng. Zé Mário, o Vagner e a Eng.Valéria, do CPR e frequentar o laboratório da Nova Dutra. Com a saída do Zé Mário, a Valéria passou a gerenciar o CPR. Construíram instalações novas, compraram equipamentos de ponta e contrataram pesquisadores, entre eles o Eng. Professor Doutor Luís Miguel Gutiérrez. Com a determinação da Valéria e da sua equipe, o CPR participou do desenvolvimento de diversos tipos de pavimento no Brasil. Abriu oportunidades para que alunos da USP, UNICAMP e outras universidades fizessem suas teses de Doutorado e Mestrado, executando pavimento com CAP modificados como Asfalto Morno, Asfalto Alto Módulo e asfaltos com polímeros. Aqui na Dutra, no ano de 1997, a Ipiranga Asfalto aplicou pela primeira vez em uma Rodovia de grande porte o Microrrevestimento a Frio, processo que era coordenado pelo Eng. Marcelo. Para conhecer a aplicação deste novo pavimento, diversos engenheiros e até de outras concessionárias de rodovias vieram acompanhar. Hoje, o Micro a Frio é muito aplicado nas estradas do Brasil. Também executamos junto com a coordenação da equipe do CPR, base com material reciclado com espuma de asfalto. Um dos testes que tivemos o prazer de participar aconteceu em Jacareí, com a aplicação do reciclado de asfalto com adição de um rejuvenescedor, fornecido pela Empresa Cargill. Tivemos diversas reuniões no CPR, junto com os técnicos da Cargill para adequar a granulometria do reciclado, dosagem do rejuvenescedor, como iríamos aplicar e a escolha do local, que na época ficou definido como sendo o acostamento do km 168 da PS-SP, em Jacareí. Fizemos a aplicação a noite porque no outro dia já estaríamos desmobilizando os equipamentos para outra frente de serviço. Fui antes das 7:00 horas verificar como o pavimento estava se comportando. Ao pisar nele, percebi que não estava coeso. Fiquei preocupado, e como ainda havia projetos para serem executados neste km, não mudei os equipamentos. Telefonei para a Valéria, expressando minha preocupação. Ela muito calma e com a

certeza das pesquisas, falou que era assim mesmo e que a cura aconteceria. O acostamento ficou interditado por um dia e está intacto até hoje. Cabe destacar a grande parceria que a Serveng teve com o CPR, à disposição para testes, pesquisas e desenvolvimento de novas alternativas em pavimentos contribuindo com Universidades e empresas do setor rodoviário. O apoio e a disponibilidade de todos sempre foi um item a ser destacado. Agradeço muito pelos ensinamentos e trocas de ideias. A determinação da Eng.Valéria e de sua equipe no objetivo de encontrar o tipo de pavimento mais adequado para uma rodovia com o tráfego que tem a Presidente Dutra é um item que merece ser elogiado. Se dá certo aqui, o pavimento pode ser executado em qualquer outra Rodovia do País.

Eng. Frederico Ozanan Pereira de Melo

Gerente de Produção – Serveng

Parceria entre empresa privada e academia

Tive a honra de ver os primeiros passos de montagem do CPR, ainda no final da década de 90, para estudar os problemas de adesividade das misturas asfálticas e problemas de desagregação de revestimentos asfálticos decorrentes desta falha. Conheci uma equipe de experientes engenheiros: José Mario Chaves, Décio Rezende de Souza e a Valéria Faria. Aprendi com eles o uso da cal como melhorador de adesividade e presenciei a pesquisa nascendo dentro de uma Concessionária de Rodovias, a NovaDutra, Rodovia-tronco, de especial importância no Sudeste, com excepcional volume de tráfego e numerosos desafios a serem gerenciados, e o compromisso de implementar melhorias em uma rodovia tão antiga, com problemas variados e de alta complexidade. Equipamentos novos foram concebidos, alguns outros equipamentos comprados e muitos estudos realizados.

Mais tarde, vi nascer o projeto do grande laboratório do CPR. Recordo-me de ver o projeto nas mãos da Valéria Faria, mostrando para o Dr. Maurício Negrão, então presidente da Nova Dutra, e ele dizia “não quero um puxadinho”, todos rimos muito e entendi que o projeto tinha apoio e seria emblemático, que a CCR acreditava na importância da pesquisa para melhoria da tecnologia na área rodoviária. Isto ocorreu durante o excelente 6°Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões (CBR&C), promovido pela ABCR, sendo aquela edição em Florianópolis, no ano de 2009.

Pois saiu do papel, o sonho se concretizou e em 2011 pude participar de sua inauguração. Foi emocionante ver a CCR, com seu pessoal da ENGELOG e da NOVADUTRA, conversando e interagindo com a Academia e com a ANTT. Todos presentes comemoraram o empreendimento. Equipamentos muito modernos, equipe capaz, brilho nos olhos de todos. Sai de lá emocionada, sabendo que o CPR deixaria legado na história brasileira. Muitas pesquisas, desenvolvimentos e sempre com muita coragem e garra os trabalhos foram executados. Vocês têm muito a comemorar, muito a contar e muita a registrar na história. O legado está garantido! Parabéns a toda a CCR por acreditar no valor da tecnologia para a melhoria das obras e atendimento de toda a sociedade.

Liedi L. B. Bernucci

Professora Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

CCR NovaDutra

É impossível pensar em rodovia e não lembrar da Via Dutra...

A Via Dutra é considerada a Rodovia mais importante do Brasil, ligando as duas principais metrópoles do país. Lembro das minhas viagens pela Via Dutra durante a minha tese, no final da década de 1990. Naquela época, a Rodovia tinha acabado de ser privatizada e ainda não apresentava a qualidade que tem hoje.

No final de 2010, em um evento da área de pavimentação, tive o prazer de conhecer a engenheira Valeria Faria, que me convidou para colaborar na implantação do novo laboratório do CPR da CCR NovaDutra. Equipamentos modernos e sofisticados, da mais alta tecnologia, foram adquiridos para que fosse possível o desenvolvimento de pesquisas avançadas com diferentes materiais e novas técnicas, visando a melhoria da qualidade do pavimento.

O CPR, com certeza, possui um dos melhores laboratórios de pavimentação do país, com equipamentos modernos e pessoal técnico altamente capacitado. As pesquisas desenvolvidas no CPR representam um avanço muito importante na área de pavimentação do Brasil, pois, além de avaliar diferentes materiais e misturas através de ensaios no laboratório, também são avaliadas no campo, a partir da construção de trechos experimentais monitorados periodicamente.

Durante o período que estive no laboratório do CPR tive a oportunidade de conhecer as atividades desenvolvidas pelas equipes técnicas (laboratório e campo) e conhecer o dia a dia da concessionária e, principalmente, de acompanhar o desenvolvimento de diversas pesquisas, que contribuíram para a melhoria da qualidade do Rodovia Presidente Dutra.

A convivência com profissionais dedicados e experientes foi, sem dúvida, uma das melhores experiências vivida desde a minha formação em Engenharia Civil.

Hoje, passando pela Rodovia, posso afirmar que ela evoluiu de forma excepcional e, certamente, as pesquisas desenvolvidas no CPR contribuíram para essa transformação, fazendo com que a Via Dutra fosse considerada, além de mais importante, uma das melhores rodovias do Brasil.

Prof. Dra. Sandra Oda

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Os desafios para implantação da pista marginal da Dutra em pavimento rígido



PELLA Construções e Comercio Ltda., foi contratada pela NovaDutra logo após a conquista da concessão que agora está prestes a se encerrar, para executar um trecho de aproximadamente 2 quilômetros, da pista marginal sentido Rio de Janeiro, desde o entroncamento com o acesso do Aeroporto de Cumbica até o entroncamento com a Avenida Santos Dumont, com três faixas de rolamento, mais acostamento e faixa de segurança e nos acessos faixas de aceleração e desaceleração.

O desafio

Lançar com uma pavimentadora de formas deslizantes, duas pistas simultaneamente (vide foto) com 7,20 m de largura, e 0,24 m de espessura, resultando num volume de concreto por metro linear de 1,73 m^3. Na faixa 1 acrescentava-se ainda 0,90 m da faixa de segurança totalizando 8,10 m e praticamente 2 m^3 por metro linear. Para que o trabalho tivesse a qualidade que ali foi aplicada era necessário que a pavimentadora fizesse o lançamento a uma velocidade de 2 m por minuto, ou seja, um nominal total 120 m^3 teórico de produção. Mais, a pavimentadora não poderia e não deveria parar nunca, pois marcaria a pista, e o concreto lançado a sua frente perderia as condições de lançamento dependendo do tempo de espera para a retomada. A PELLA então, utilizou uma central de concreto da ERIE STRAYER com misturador de 7 m^3, cujo tempo de mistura era de 1 minuto, isso mesmo, não há erro de digitação 1 minuto, num processo de dosagem que era procedido durante a mistura e descarga, com tempo de 1´e 30". Essa produção teórica garantiu uma produção real de 100 m^3 entregues na frente da pavimentadora. A distância econômica e logística foi estimada em até 5 km, com uma frota de caminhões de qualidade em número de 10, para que nunca faltasse concreto à frente da máquina. Outro ponto, foi a constância do traço de concreto, com uma central automatizada, e um "pitbull" ao lado do balanceiro, permitiu a entrega do concreto sempre com a mesma consistência e homogeneidade. A pavimentadora executou todo o pavimento com pouca ação manual por parte dos operários e com isso garantiu um greide com muita qualidade e conforto. Para a cura a PELLA importou o produto (Curing) de composto a base de água, com pigmento branco e aplicou a taxa de 0,6 l por m^2. A serragem foi acompanhada com aferição da temperatura de hidratação provocada pelo cimento com água, e seu corte feito sempre no tempo correto, em lances de 10 m para o primeiro corte de alívio e voltando para completar o corte intermediário de 5 m, com serras de concreto de 65 HPs autopropelidas. Simples assim, o bem-feito, leva o mesmo tempo que fazer malfeito, e com isso, o PLANEJAMENTO assume um papel fundamental, como o ALFAIATE que mede três vezes antes de cortar uma roupa.

Eng. Sérgio A. Palazzo

PELLA Construções e Comércio Ltda.

Desenvolvimento da sinalização horizontal na Rodovia Presidente Dutra

O Instituto Mauá de Tecnologia tinha um contrato para controlar a qualidade dos materiais utilizados para melhorar a Segurança Viária dos usuários. Na década de 1980 fomos acionados para contribuir na avaliação dos materiais de segurança empregados na Via Leste, inaugurada em 1982 com o nome de Rodovia dos Trabalhadores que hoje leva o nome de Rodovia Airton Senna. Como a Rodovia estava em obras, para ir de um trecho ao outro usávamos a Rodovia Presidente Dutra e comentava com os colegas: quando a Trabalhadores entrar em operação, a Dutra terá uma redução significativa no tráfego, pois a Via Leste era uma rodovia muito mais moderna com novos conceitos de segurança.

Após 25 anos vejo que estava completamente enganado, pois a Dutra continua sendo a rodovia preferida dos usuários-caminhoneiros, pois os conceitos implantados e o aprimorando à sinalização, com melhor visibilidade, permitem aos usuários uma condução confortável.

Em 1996 vimos nascer a NovaDutra, uma rodovia federal com trechos urbanos, sendo dividida de forma convencional com duas faixas em cada sentido e com acostamentos pavimentados. Fui testemunha da grande transformação que ocorreu, com correção de curvas e trechos perigosos, instalação de barreiras, telas anti-ofuscamento e início dos estudos de pavimentos para melhorar a aderência pneu-pavimento, que é um dos parâmetros muito importantes à segurança viária.

A introdução destes novos conceitos de pavimentos, trouxe aos técnicos em sinalização horizontal um grande desafio para atender às exigências contidas no Plano de Exploração da Rodovia- PER em manter a visibilidade durante o dia e a noite. A visibilidade diurna se dá pelo contraste entre a sinalização e o pavimento e a visibilidade noturna se dá pela retrorrefletividade, fenômeno possível pela adição de microesferas de vidro conforme norma ABNT-NBR 16184-Esferas e Microesferas de Vidro.

O PER exigia que na sinalização horizontal se utilizasse material termoplástico conforme norma do DNER-EM 372, mas as empresas que estavam prestando serviços utilizavam tintas que atendiam a norma DNER-EM 368 que não apresentavam a performance desejada.

O PER exigia que a sinalização horizontal fosse feita com material termoplástico conforme norma do DNER-EM 372, mas as empresas que estavam prestando serviços para as construtoras contratadas pela concessionária, utilizavam tintas que atendiam a norma DNER-EM 368 que não apresentavam a performance desejada.

Eu fui chamado para uma reunião com a diretoria de operações e de engenharia da concessionária, para indicar o produto mais adequado para a situação de obras que se encontrava a rodovia. O material indicado foi a tinta que atendia a norma da DERSA OP-06-21 e que tinha sido utilizada na Rodovia dos Trabalhadores.

Em 1999, a diretoria de operações da concessionária, após adquirirem dois equipamentos da empresa Elgimaq Indústria e Comercio Ltda., internalizaram os serviços de sinalização utilizando um equipamento para aplicação e tinta e o outro que aplicava materiais termoplástico e tinta.

Nesta época, a Indutil Indústria de Tintas Ltda. atuou em parceria com a empresa Rohm And Haas Química Ltda com tecnologia desenvolvida no centro de pesquisa da empresa na Philadelphia, recomendando a utilização de tintas que atendiam a norma ABNT NBR 13699 – Tinta Acrílica à base de água.

Os estudos seguiram, novas tecnologias de pavimentos começaram a ser utilizadas e quando compararam o custo/benefício entre os materiais,

tomaram a decisão de utilizar somente os produtos que atendiam a norma ABNT NBR 13699, por se tratar de produto ecologicamente correto e que apresentava a performance desejada.

Na atualidade a Nova Dutra continua utilizando os materiais que atendem a norma ABNT NBR-13699, mas devemos ressaltar que novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, como exemplo a tinta ABNT NBR-16800/2020 Tinta Acrílica à Base de Epóxi Emulsionada em Água que já está sendo estudada e que se apresenta como um novo desafio. Começamos de novo!

Hélio Antônio Moreira

Diretor Geral Indutil

Valorização e oportunidades para a Engenharia Rodoviária

Com o advento das concessões rodoviárias, a partir de 1996, a Concessionária NovaDutra iniciou um processo de forte valorização e oportunidades para Engenharia Rodoviária.

Nesse mesmo ano, assumindo em São Paulo a gestão da Ipiranga Asfaltos S/A (Empresa Petróleo Ipiranga precursora em tecnologia em asfaltos), tivemos o privilégio e o belo desafio de desenvolver em parceria, com a equipe da NovaDutra, com a projetista Dynatest e também com o IPR (que ainda formava opinião na Rodovia Presidente Dutra), soluções inovadoras com utilização de Ligantes Asfálticos Performados em aplicações de Microrrevestimento a Frio com Fibras e de CBUQ de Alto Desempenho com Polímeros.

Com a estruturação de um completo e avançado Centro de Desenvolvimento Tecnológico a Concessionária NovaDutra promoveu a disseminação de estudos e pesquisas intensificando a implementação de novas tecnologias que privilegiam a performance por excelência dos pavimentos, com interação e comprometimento de todos os agentes – projetistas, cadeia de fornecedores e executores – envolvidos na implantação.

Com base nas oportunidades e experiências vividas junto a Concessionária vale ressaltar que nossa parceria e nossos desafios se renovaram através de um novo projeto/empresa especializada em ligantes e especialidades asfálticas customizadas.

Eng. Paulo Brandi Sastre

CAP Customização em Asfaltos e Pavimentos

CAPÍTULO 1

A Rodovia

Uma das mais importantes rodovias do país completou 70 anos. A Rodovia Presidente Dutra conecta as duas maiores regiões metropolitanas do Brasil: Rio de Janeiro e São Paulo.

No dia 19 de janeiro de 1951, quando foi inaugurada pelo Presidente da República, General Eurico Gaspar Dutra, em solenidade realizada na altura de Lavrinhas (SP), a então BR-2, nova rodovia Rio-São Paulo, ainda não estava completamente pronta, mas já permitia o tráfego de veículos entre a então Capital Federal, Rio de Janeiro, e o polo industrial de São Paulo. Da então ligação Rio-São Paulo, 339 quilômetros estavam concluídos, junto com todos os serviços de terraplenagem e 115 obras de arte especiais (trevos, viadutos, pontes e passagens inferiores). Faltava, porém, a pavimentação do trecho entre Guaratinguetá (SP) e Caçapava (SP), e seis quilômetros em um pequeno trecho situado nas proximidades de Guarulhos (SP).

A BR-2 contava com pista simples, operando em mão-dupla em quase toda sua extensão. Em dois únicos segmentos havia pistas separadas para os dois sentidos de tráfego: nos 46 quilômetros compreendidos entre a Avenida Brasil e a garganta de Viúva Graça (hoje, Seropédica), no Rio de Janeiro, e nos 10 quilômetros localizados entre São Paulo e Guarulhos, no trecho paulista.

A nova rodovia foi construída com as mais modernas técnicas de engenharia da época e com equipamentos especialmente importados para isso, o que permitiu a redução da distância rodoviária entre as duas capitais em 111 quilômetros, comparando-se o novo caminho com o traçado da velha rodovia, inaugurada em 1928.

A maior parte dessa redução foi possível com a superação de obstáculos naturais, basicamente nos banhados da Baixada Fluminense e na área rochosa da garganta de Viúva Graça, na região de serras entre Piraí e Cachoeira Paulista, e no segmento da Várzea de Jacareí.

Além disso, sua concepção avançada permitiu a construção de aclives e declives menos acentuados e curvas mais suaves. Tudo isso representou uma significativa queda no tempo de viagem, de 12 horas, em 1948, para seis horas. O tempo de viagem foi reduzido pela metade!

Considerado um projeto autossustentável, no total, 1,3 bilhão de cruzeiros foi investido na construção da BR-2, quantia altíssima para os padrões da época. Gastos muito criticados por setores da sociedade civil e pela imprensa, que classificava a obra como “luxuosa”. O Governo Federal argumentava que o desbravamento do Brasil dependia de caminhos que pudessem ser abertos com rapidez e eficiência e que a modernização da ligação Rio-São Paulo era fundamental para o desenvolvimento nacional.

Foi essa, por exemplo, a linha de argumentação no discurso de inauguração da rodovia, feito pelo então ministro de Viação e Obras Públicas, general João Valdetaro de Amorim Mello. “Com um tráfego mínimo de 1.000 veículos diários (...) e tendo em conta a economia resultante do custo de operação dos veículos rodando sobre uma estrada deste modelo (...) em 10 anos, a economia nos transportes efetuados sobre esta rodovia atingirá a casa dos 10 bilhões de cruzeiros”.

Tudo isso, lembrava ele, sem contar a economia de divisas com a redução nos gastos com combustíveis, lubrificantes e peças de reposição, todos importados.

As obras da nova rodovia representavam, ainda, um grande desafio de engenharia para a época. O “retão” de Jacareí (SP), por exemplo, foi um trecho que causou controvérsia entre os técnicos, por ser construído sobre terreno instável, cuja transposição era considerada quase impossível. No entanto, o trecho foi finalizado com a utilização de 12 milhões de metros cúbicos de terra, o equivalente a 1,6 milhão de caminhões cheios, em um aterro submerso de 15 metros de profundidade. Projeto inovador na concepção e na execução.

No trecho fluminense, a transposição de um trecho rochoso ao pé da Serra das Araras, chamado de “garganta de Viúva Graça”, também representou um grande desafio para os engenheiros empenhados na construção da nova rodovia, que comandaram complexas escavações, permitindo o rebaixamento em 14 metros do paredão de granito.

Os números que envolveram a construção impressionam ainda hoje, em um esforço de engenharia que envolveu 35 empreiteiras, milhares de trabalhadores e movimentação de toneladas dos mais diversos materiais. Grande obra, grandes números.

- 2.657.746 m² de pavimentação;
- 1,3 milhão de sacos de cimento;
- 8 mil toneladas de asfalto;
- 20 mil toneladas de alcatrão;
- 15.000.000 m³ de movimento de terra;
- 300.000 m³ de cortes;
- 7.021 m de extensão em 115 pontes, viadutos e passagens;
- 19.086 m com 315 bueiros;
- 30 milhões de m² de faixa de domínio.



CAPÍTULO 2

A Concessionária

No dia 1º de março de 1996, início do renascimento da via Dutra, a CCR NovaDutra assumiu a administração da rodovia em uma época em que ninguém sabia direito o que era concessão de rodovia, administrar a principal rodovia do país, trouxe uma responsabilidade a mais à empresa. Quando a CCR NovaDutra iniciou os trabalhos, a rodovia apresentava um cenário de deterioração, com pistas esburacadas, sinalização precária, defensas metálicas retorcidas, mato alto no canteiro central e muita sujeira ao longo dos seus 402 quilômetros. Para mudar este cenário, a Concessionária empreendeu um dos mais intensos cronogramas de obras da engenharia brasileira para a reforma de uma rodovia. Durante os 180 primeiros dias - período de trabalhos emergenciais - a CCR NovaDutra tinha de garantir condições adequadas de segurança e fluidez de tráfego aos usuários.

A cada semana, eram mantidos 100 novos pontos de obras ao longo de toda a Dutra. Foram realizados serviços de recuperação da pavimentação dos trechos mais críticos em toda a rodovia. Mais de um mil hectares de acostamentos e canteiro central foram roçados e capinados. Todos os viadutos, pontes e passarelas foram emergencialmente recuperados e limpos e foi colocada nova sinalização onde não existia. As placas existentes foram limpas e recuperadas. Somente em faixas de sinalização de pista foram implantados mais de 142 mil m², além de 176 quilômetros de novas defensas metálicas (guard rail) e de 28 quilômetros de barreiras rígidas.

O pioneirismo na execução de grandes obras e serviços e a transformação da velha Dutra para uma rodovia moderna e segura fortaleceu o processo de passagem de rodovias à iniciativa privada.

Após a realização dos serviços emergenciais, o cenário já era outro, com a rodovia em condições adequadas de segurança e fluidez de tráfego. Hoje, a via Dutra está totalmente renovada e quem trafega pela rodovia conta com uma infraestrutura composta por equipes de socorro médico e mecânico 24 horas, monitoramento, conservação, atendimento telefônico gratuito (Disque CCR NovaDutra), 804 telefones de emergência (callboxes) ao longo da rodovia, 1 a cada quilômetro nos dois sentidos da rodovia, entre outros serviços de auxílio e orientação aos motoristas. Tudo isso proporciona uma viagem mais segura e confortável.

Desde sua inauguração, em 19 de janeiro de 1951, A rodovia abrange uma região altamente desenvolvida, o caminho por onde é transportado cerca de 50% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro passou por transformações que acompanharam o crescimento populacional e econômico do país. Cerca de 25 milhões de pessoas em 36 municípios, incluindo as capitais São Paulo e Rio de Janeiro, habitam o entorno dos 402 quilômetros da via Dutra.

Em 25 anos de administração, a ligação RJ-SP ganhou investimentos e ações que garantiram mais segurança e conforto aos seus usuários. Com o compromisso de reduzir o número de acidentes e o número de vítimas fatais, a Concessionária, realizou investimentos mais de R$ 23 bilhões. Os recursos foram investidos em melhorias operacionais, obras, modernização da via, aquisição de equipamentos, conservação e pagamento de impostos, além de realizar massivamente ações e campanhas mensais de segurança.

Os investimentos englobam a construção de 94,6 quilômetros de pistas marginais, sendo: 41 km na Grande São Paulo, 28,6 na Baixada Fluminense

e 25 km em outros trechos da rodovia; 417,5 quilômetros de muros de concreto, 38 novas pontes e viadutos, recuperação de 153 pontes, 107 viadutos, 50 passarelas e 24 milhões de m² de recuperação de pavimentos de pistas, trevos e acessos. Instalação de 186,8 kms de telas anti-ofuscantes; implantação de 3,4 milhões de m² de sinalização horizontal.

Para atender aos usuários da rodovia, a concessionária implantou um dos mais modernos sistemas de operação rodoviária do país, com equipes operacionais treinadas e especializadas, distribuídas em 11 bases operacionais localizadas em pontos estratégicos da rodovia de maneira a atender rapidamente as ocorrências.

Todo este aparato é comandado a partir de um Centro de Controle de Operações localizado em Santa Isabel (SP) que monitora os 402 quilômetros da rodovia através das 102 câmeras de CFTV (circuito fechado). Os usuários contam com 38 painéis de mensagens variáveis e 804 telefones de emergência instalados a cada quilômetro nos dois sentidos da rodovia.

Os atendimentos também são realizados através do Disque CCR NovaDutra pelo número 0800-0173536 que recebe em média 12 mil ligações por mês, média de um atendimento a cada minuto.

Hoje, 70 anos depois, a via Dutra é referência nacional e internacional no setor viário.

De acordo com a 23ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias 2019, realizada pela Confederação Nacional de Transporte (CNT), a rodovia Presidente Dutra (BR-116), ocupou a 10ª colocação no ranking entre as rodovias mais bem avaliadas do país. A via Dutra subiu nove posições em relação ao último levantamento. Além da ligação Rio-São Paulo, todas as rodovias sob gestão do Grupo CCR foram avaliadas como ótimas.

O levantamento contempla dados de mais de 100 mil quilômetros de estradas pavimentadas, em trechos Federais e Estaduais, nas cinco regiões do País, e leva em consideração os critérios como Pavimento, Sinalização e Geometria da Via. A pesquisa considerou, ao todo, 423 km da rodovia, o que inclui outras ligações não administradas pela CCR NovaDutra, como trechos da BR-040 e da BR-101 no trecho fluminense.

As ótimas posições no ranking refletem os investimentos maciços que o Grupo CCR tem feito em segurança, educação e boas práticas, que são essenciais para melhorar a qualidade do tráfego nas rodovias do País.

Redução na violência do tráfego de 1996 a 2020.

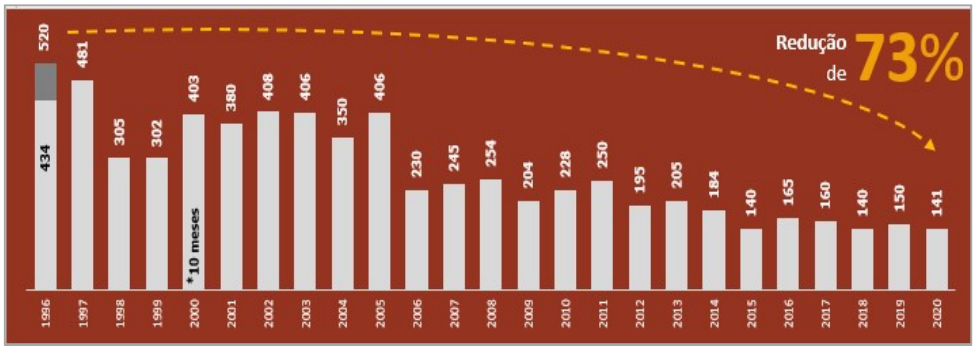


Figura 1. Redução de Acidentes e Mortes – 1996 a 2020 - Número de mortos na Rodovia

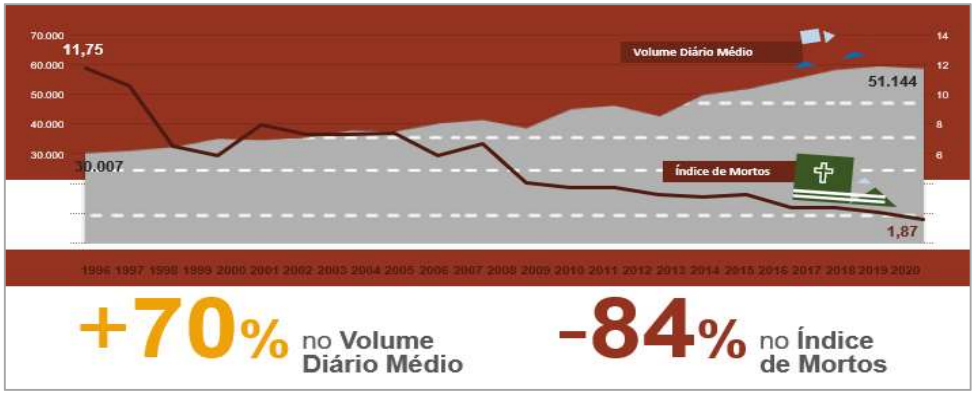


Figura 2. Acidentes x Volume de Tráfego – 1996 a 2020

CAPÍTULO 3

O CPR - Centro de Pesquisas Rodoviárias

Após o período de Trabalhos Iniciais, em 1997, a concessionária iniciou o programa de restauração dos pavimentos da rodovia, também chamados de projetos de primeira intervenção. Os projetos de restauração eram elaborados por empresa terceirizada e indicavam a utilização de misturas asfálticas com CAP modificados com polímeros, pioneiros no Brasil. A NovaDutra decidiu, após estudos realizados pelo IPR-DNER juntamente com a Ipiranga Asfaltos, adotar cimentos asfálticos de petróleo modificados com polímero SBS na proporção de 4% (CAPM) na execução dos Concretos Betuminosos Usinado a Quente (CBUQM). Uma das vantagens do uso do polímero era a redução de espessuras de reforço, em relação ao convencional, de, no mínimo, 70%. Em agosto de 1997 as obras foram iniciadas, adotando esta premissa. A elaboração do projeto de dosagem do CBUQ, não previu nenhum tipo de aditivo melhorador de adesividade ligante-agregado, visto que as informações da época apresentavam o CAP modificado com polímero, como autossuficiente em termos de adesividade ligante-agregado. Durante o período de execução das obras apareceram problemas, principalmente nas trilhas de roda com desagregação da camada de rolamento, dando origem a uma ampla pesquisa de aditivos, que levou à conclusão da necessidade de aditivo melhorador de adesividade ligante-agregado mesmo em se tratando de CAP modificado por polímero.

Hoje a utilização de CAP's modificados por polímeros é largamente difundida no Brasil, com sucesso. Muitas outras experiências de inovação passaram pela Rodovia Presidente Dutra como:

- Microrrevestimento a Frio (trecho experimental de 8 km executado em 1997 na cidade de Caçapava, pista norte - SP);
- Misturas tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) trecho experimental de 2 km executado em 1998 na cidade de Guarulhos, pista marginal norte - SP;
- Reciclagem de Base com Cimento, trecho experimental de 6 km executado em 1998 na cidade de Piraí, pista norte-RJ;
- Construção de Pavimento de Concreto, trecho experimental de 2,3 km, inaugurado em 1999 na cidade de Guarulhos, pista marginal norte – SP, que já completou 20 anos; considerado um dos melhores Pavimentos de Concreto do Brasil.
- Construção com Stone Matrix Asphalt (SMA), de trecho experimental na cidade de Arujá pista sul -SP, executado em 2001,

Com os desafios impostos pela Rodovia, com a demanda de soluções inovadoras apresentadas nos projetos e a necessidade de acompanhar os serviços executados pelas construtoras contratadas pela NovaDutra (embora elas fossem responsáveis pelo controle de qualidade dos serviços), foi necessário estruturar uma equipe de profissionais com expertise em pavimentação rodoviária para validar as diversas alternativas, buscando adotar aquelas que apresentassem melhor desempenho, dentro de uma análise de valor. Além disto, o time de pavimentos necessitava de ferramentas adequadas, como por exemplo o suporte de um laboratório de pavimentação para estudos e controles dos materiais. A proposta de se criar um centro de pesquisas rodoviárias foi então idealizada.

3.1 História do CPR

1.1.1. 02/02/1998 - 20/07/1998

Inicialmente, começaram a utilizar um laboratório de obra, cedido pela Construtora Andrade Gutierrez S.A (AG), localizado próximo à Rodovia Governador Carvalho Pinto, permanecendo neste local durante o período de 02/02/1998 até 20/07/1998. Durante este período, além da verificação de projetos e acompanhamento das obras em campo, foram realizadas as seguintes atividades no laboratório da AG:

- Determinação de projetos de misturas asfálticas, manualmente;
- Determinação da massa específica máxima - método Rice adaptado;
- Análise da granulometria de diversos agregados.

1.1.2. São José dos Campos - 20/07/1998 - 15/08/2000

Alguns meses depois, através de uma parceria, a BR Distribuidora cedeu um laboratório existente na área da refinaria da Petrobrás do Vale do Paraíba (REVAP) em São José dos Campos. Este local oferecia condições mais adequadas à realização de atividades de pesquisas e controle de qualidade das obras em execução. O laboratório contou com equipamentos da NovaDutra e da BR Distribuidora. Neste momento notou-se também a necessidade de monitorar o desempenho das soluções já adotadas. Era imprescindível organizar a documentação referente ao período decorrido das obras, como projetos, as builts, projetos de misturas asfálticas, certificados de ensaios de laboratório, especificações particulares de serviço, tráfego e dados dos monitoramentos anuais (levantamentos de deflectometria, de irregularidade, de superfície, de segurança e estrutura), criando um histórico para gerenciar os parâmetros de qualidade dos pavimentos da Rodovia ao longo do tempo (Deflexões,Irregularidade (IRI) , Indice de Gravidade Global (IGG), Valor de Serventia Atual (VSA),porcentagem de Área Trincada (%TR)). Desta forma iniciou-se a construção do banco de dados da Rodovia.



FIGURA 3. CPR INSTALADO NO LABORATÓRIO DA PETROBRAS, EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (SP).

1.1.3. Santa Isabel - 15/08/2000 - 27/07/2011

Em agosto de 2000, concluiu-se a sede do Centro de Pesquisas Rodoviárias – CPR em Santa Isabel, km184,3 da Rodovia Presidente Dutra, pista sentido Rio de Janeiro. Com uma edificação de aproximadamente 300m² com um laboratório que contava com equipamentos, voltados principalmente para a caracterização de materiais, elaboração de projeto de misturas asfálticas, ensaios de controle tecnológico das obras em andamento.

Foram contratados novos colaboradores para elaboração de ensaios direcionados à supervisão das obras, com a padronização de controles e rapidez na execução de pesquisas necessárias ao melhor desempenho das misturas usadas na pista.

Em poucos anos de existência do CPR era possível citar alguns processos importantes praticados na concessionária, que hoje são adotados no Brasil:

- Adoção da Cal hidratada como um agente melhorador de adesividade das misturas asfálticas, desde abril 1999.
- Adoção do método de ensaio AASHTO T-283 – Danos por Umidade Induzida (DUI) para avaliação da susceptibilidade à água das misturas asfálticas.
- Adoção do método de ensaio AASHTO T-209 – Densidade máxima teórica de misturas soltas (RICE) para melhorar o processo de dosagem de concretos asfálticos.
- Adoção do método de ensaio AASHTO T 166 para densidade aparente de corpos de prova em substituição do método do DNER.
- Adoção de um aparelho de Soxlet gigante, permitindo maior precisão no processo de extração de betume e atendendo às necessidades de massa de amostra para o ensaio de granulometria – adotado por diversas concessionárias nos seus controles de obra.
- Adoção de descontos na planilha de medição dos serviços de aplicação de concreto asfáltico - adotado por diversas concessionárias.

Os exemplos aqui citados fazem parte da história de benefícios trazidos pelo CPR ao meio técnico brasileiro, sem contar o benefício direto para a Concessionária.

Outro trabalho importante era a tradução de publicações técnicas, elaboração de especificações particulares e a preparação dos modelos de certificados utilizados no laboratório baseados nos métodos de ensaio, além da documentação elaborada especificadamente para capacitação dos técnicos do CPR, mantendo o padrão na realização de ensaios e garantindo a confiabilidade nos resultados apresentados através dos certificados de ensaios.

As equipes contratadas pelas construtoras também recebiam treinamento em Workshops organizados pelo CPR, através de palestras:

- A iniciativa privada e a pesquisa rodoviária no Brasil;
- A durabilidade de pavimentos asfálticos;
- Pavimentos com qualidade;
- Utilização de camadas delgadas de concreto asfáltico com polímero na recuperação de pavimentos.

Atividades desenvolvidas neste período:

a) Realização de pesquisas na área de misturas asfálticas buscando a melhoria contínua da qualidade dos pavimentos;
b) Busca da qualidade assegurada dos serviços, através de ensaios de verificação no laboratório do controle de qualidade das misturas betuminosas executadas nas obras;
c) Avaliação de problemas de qualidade constatados na pista para correções em procedimentos futuros;
d) Monitoramento dos serviços executados para avaliação das melhores soluções a serem adotadas no futuro;
e) Análise de projetos de restauração de pavimentos;
f) Registro da história dos serviços executados;
g) Emissão de especificações técnicas de obra;
h) Tradução de publicações técnicas internacionais, tais como manuais técnicos, artigos, métodos de ensaios e especificações de serviço;
i) Treinamento de pessoal da Concessionária na operação e controle de qualidade na área de pavimentação;
j) Acompanhamento do desenvolvimento técnico mundial através congressos, afiliação a associações técnicas internacionais e troca de experiências com técnicos de renome internacional;
k) Apresentação de palestras:

- 1999 – IBC – Utilização de camadas delgadas de concreto asfáltico com polímeros na recuperação de pavimentos;
- 2000 – Brasília – Durabilidade de Pavimentos Asfálticos;
- 2001 – Foz do Iguaçu – A iniciativa privada e a pesquisa rodoviária no Brasil;
- 2001 – IBC – São Paulo – Pesquisa, aplicação e monitoramento de diversos tipos de Revestimento asfáltico de alta aderência – Casos Práticos da Rodovia Presidente Dutra;
- 2002 – Florianópolis – Pavimentação com qualidade.



FIGURA 4. PRIMEIRO LABORATÓRIO DO CPR, LOCALIZADO NA SEDE DA CONCESSIONÁRIA, EM SANTA ISABEL (SP).

1.1.4. 27/07/2011 - Atual

Em 2010, com mais de 10 anos de atuação do CPR no desenvolvimento de atividades relacionadas com a gerência de pavimentos da Via Dutra, com destaque às pesquisas, a CCR percebeu a necessidade de uma modernização no centro, principalmente no laboratório, que não comportava mais a disposição de novos equipamentos. Foi quando a organização decidiu construir um novo prédio, três vezes maior e mais moderno. O prédio foi construído em Santa Isabel, km 184 da Rodovia Presidente Dutra na sede da concessionária NovaDutra, com uma área de aproximadamente 1000 m², contou com investimentos na ordem de 3,5 milhões de reais na construção e 3 milhões na aquisição de equipamentos de última geração, da mais alta tecnologia, importados dos Estados Unidos, Alemanha e Austrália. A aquisição destes equipamentos foi fundamental para o desenvolvimento de pesquisas com inovações de tendência mundial, destacando o Grupo CCR no âmbito nacional da pavimentação rodoviária. A inauguração aconteceu no dia 27-07-2011 e contou com a participação de importantes convidados como a diretoria da ANTT, diretoria da CCR, diretoria da Engelog, professores de renomadas universidades e equipe do CPR.



FIGURA 5. NOVO LABORATÓRIO DO CPR, LOCALIZADO NA SEDE DA CONCESSIONÁRIA, EM SANTA ISABEL (SP).

O contrato de concessão e a realidade da Rodovia Presidente Dutra apresentaram ao CPR os seguintes desafios permanentes para manter a qualidade dos pavimentos:

a) Conduzir o RDTse adaptando às mudanças nos critérios de elaboração e aprovação das pesquisas, desde a gestão do DNER até ANTT;
b) Manter os parâmetros funcionais e estruturais dos pavimentos de acordo com o PER, permanentemente;
c) Monitorar (Relatórios de Monitoração Anual dos Pavimentos Flexíveis e Pavimento Rígido) e acompanhar a evolução dos defeitos,
d) Conhecer e compreender o impacto do elevado tráfego na vida das estruturas físicas da Rodovia, ou seja, no pavimento e nas pontes e viadutos (VDM, número N, Fator de Veículos, geometria, % de veículos na faixa de pesados, crescimento anual);
e) compreender os mecanismos de degradação dos pavimentos nos 402 km de extensão da Rodovia, diagnosticar e corrigir as deficiências em uma malha de 10,5 milhões de m2, garantindo a vida de projeto;
f) Identificar a necessidade de implantação de sistemas de drenagem;
g) Conhecer as restrições operacionais que dificultam a execução de obras em horários que trazem retenção de tráfego, obrigando a adotar soluções técnicas que levem a menor interrupção do tráfego e consequentemente mais onerosas;
h) Acompanhar a evolução custos elevados (diferenciados do mercado) para os serviços de pavimentação na Via Dutra (baixa produção);
i) Internalizar a elaboração dos projetos de manutenção e orçamento de pistas, marginais, trevos e acessos para agilizar e atender as demandas de obras (desde 2011);
j) Identificar as soluções mais adequadas de manutenção para as condições de segurança, tráfego e clima:
    - Fresagens com espessuras variáveis
    - Reconstrução
    - Sistemas de Drenagem
    - Reforço estrutural
    - Gap Graded
    - Microrrevestimentos a frio e a quente – MRF - MRQ
    - Tratamento Superficial Duplo com Borracha – TSD Borracha
    - Micro fresagens
    - Camada Porosa de Atrito
    - Stone Matrix Asphalt – SMA
    - Pré Misturado a Quente -PMQ,
    - Brita Graduada Simples e tratada com cimento -BGS -BGTC
    - Reciclagem com material fresado (cimento, espuma de aasfalto, emulsões, rejuvenescedores de asfalto)
    - Tipos de CAP modificados com polímeros (SBS, RET, Borracha, TLA, Alto Módulo, HIMA)
    - Reforço estrutural: com geogrelhas (Poliester, Vidro), reforço metálico (RoadMesh®)
    - Pavimentos de concreto: identificar e validar materiais e técnicas mais modernas (cimento de cura rápida, selantes de juntas, resinas, Carbofit® (fibra de carbono)
    - Solos: solos melhorados ou estabilizados quimicamente
k) Entender as condições climáticas (estruturar banco de dados com informação de 4 estações do INMET) no eixo da Via Dutra, chuvas prolongadas, altas temperaturas que aceleram o desgaste do pavimento e customizar soluções de engenharia;
l) Identificar e caracterizar materiais de pavimentação no eixo da Rodovia (solos e agregados);
m) Elaborar projetos de misturas asfálticas utilizados nas obras da concessionária (desde 1999)
n) Estudar e validar novos produtos utilizados na Rodovia (laboratório e campo);
o) Identificar e pesquisar soluções ambientalmente corretas;

p) Estudos laboratoriais, complementados com construção e monitoramento de trechos experimentais;

q) Disseminar o conhecimento em eventos rodoviários:

- Workshop ANTT Brasília anual
- Rio+20-Rio de Janeiro 2012
- AGETOP-Goiânia 2015
- EGR-Porto Alegre 2017
- Prefeitura de São Paulo 2018
- Tribunal de Contas Prefeitura Municpal de São Paulo 2018
- 9º Congresso IberoAmericano de Hormigón-Paraguai 2018
- 13th **ISAP** Conference on Asphalt Pavements -Fortaleza 2018
- Paving Expo-São Paulo 2019
- XX CILA - Congresso Ibero Latino Americano De Asfalto-México 2019
- Enacor Brasília 2019
- Universidades (semana da engenharia)

r) Apoiar o desenvolvimento de trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado;

s) Atuar como guardião das informações inerentes a gestão dos pavimentos, mantendo atualizado o banco de dados.

t) Verificar a qualidade dos serviços executados através de ensaios de controle tecnológico e emitir certificados de ensaios aos engenheiros de obras (aproximadamente 50 mil certificados e 170 mil ensaios nos 20 anos de CPR).



FIGURA 6. CERTIFICADOS DE ENSAIOS.



FIGURA 7. IMAGENS DO NOVO LABORATÓRIO DO CPR, LOCALIZADO NA SEDE DA CONCESSIONÁRIA, EM SANTA ISABEL (SP).

1.1.5. Colaboradores (Equipe Técnica)

Colaboradores que participaram da história do CPR:

- José Mario Cortez Chaves - Engenheiro Civil (1998 – 2004)
- Vagner Cecílio Alba – Técnico (1998 – 2008)
- Geraldo Pereira – Técnico (1998 – atual)
- Nelson Matias – Técnico (1998 – 2019)
- Rubens Castro Menezes - Técnico (1998 - 2018)
- Valeria Cristina de Faria - Engenheiro Civil (1999 - atual)
- Geraldo Cleto Damasceno - Técnico (2001 - atual)
- Sabrina Graziele Barreto Oliveira – Estagiário (2001 - 2003)
- Daniele Rodrigues dos Santos - Estagiário (2003 - 2004)
- Adriano Moreira de Melo – Estagiário (2003 - 2004)
- Samira Aramburu Liberato - Estagiário (2003 – 2004)
- Adriana C. R. L. Gonçalves - Administrativo (2004 - 2017)
- José Carlos Galvão da Cruz – Técnico (2005 - atual)
- Martha Manhães Savi Daniele - Estagiário (2005 - 2006)
- Eduardo Takai - Engenheiro Civil (2006 - 2009)
- Mônica S. Nishibe Moraes - Engenheiro Civil (2008 - 2011)
- Darli Marques Ribeiro - Técnico (2008 - 2016)
- Lenice Mirian da Silva - Engenheiro Civil (2009 - 2018)
- Antônio Donizete Leal - Técnico (2010 - atual)
- César Marques Viana - Técnico (2010 - atual)
- Lucas de Araújo Barbosa - Técnico - (2010 - 2018)
- Osvaldo Cassimiro dos Santos Júnior – Técnico (2010 - 2014)
- Charles Magno Silva - Técnico (2011 - 2015)
- Lucas Medeiros Menezes - Técnico (2011 - 2015)
- Alessandra dos Santos Mendes - Técnico (2011 - atual)
- Danilo R. S. de Lima - Auxiliar de Laboratório (2011 - 2013)
- Honório Resende Moraes - Engenheiro Civil (2012 - 2013)
- Ronaldo Aparecido dos Santos - Técnico - (2011 - atual)
- Luis Miguel Gutierrez Klinsky – PHD - Pesquisador (2013 - 2020)
- Gustavo Vinicius dos Santos - Auxiliar de Laboratório (2013 - 2016)
- João Paulo Primeiro Garcia - Auxiliar de Laboratório (2013 - 2016)
- Milena Barbosa - Auxiliar de Laboratório (2014 - 2016)
- Tiago Simione Azzone - Engenheiro Civil (2014 - 2018)
- Márcia Helena Leal - Engenheiro Civil (2016 - atual)
- Marco Salles Chamouton - Engenheiro Civil (2018 - 2019)
- Júlia Friggi de Oliveira - Administrativo (2018 – atual)
- Danielson Gomes de Sousa - Técnico (2018 – atual)
- Isabelle Cristine Pellegrini Lamin - Estagiário (2019 - atual)
- Luan de Mello Rodrigues - Aprendiz (2010 - 2012)
- Milena Barbosa - Aprendiz (2013 - 2014)
- Barbara Fernanda Santos de Oliveira - Aprendiz (2014 - 2016)
- Bianca Alves Dias - Aprendiz (2016 - 2018)
- Caroline Moreira dos Santos Silva - Aprendiz (2016 - 2018)
- Bianca Aparecida de Souza - Aprendiz (2017 - 2018)
- Júlia Friggi de Oliveira - Aprendiz (2017 - 2018)
- Luana Vitoria Santilli Silva - Aprendiz (2018 - 2020)
- Ana Beatriz Gonçalves dos Santos - Aprendiz (2019 - 2021)



FIGURA 8-EQUIPE DO CPR 2021 – CENTRO DE PESQUISA RODOVIÁRIAS

1.1.6. Atividades Desenvolvidas no CPR

1.1.6.1. Laboratório

Desde a criação do CPR, o laboratório de pavimentação tem sido uma das principais ferramentas para verificar a qualidade dos pavimentos da Rodovia. O grupo CCR não mediu esforços para equipar o laboratório com a mais alta tecnologia e treinar seus colaboradores. Hoje o laboratório desenvolve atividades de pesquisa, controle tecnológico, desenvolvimento de projetos de misturas asfálticas, caracterização de materiais e validação de produtos. O laboratório realiza atualmente mais de 100 ensaios na área de solos, agregados, ligantes asfálticos, misturas asfálticas, concretos, materiais reciclados, além de ensaios de campo. Segue a relação dos ensaios praticados no CPR e normas de apoio:

➢ **Relação de ensaios de Solos**

- 1-Preparação de amostras para ensaios de caracterização
  DNER-ME 041/94;
- 2-Coleta de amostras deformadas
  DNER-PRO 003/94;
- 3-Análise granulométrica de solos
  DNER-ME 080/94;
- 4-Análise granulométrica de solos
  DNER-ME 051/94;
- 5-Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas
  DNER-ME 162/94;
- 6-Determinação do teor de umidade de solos
  DNER-ME 213/94;
- 7-Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura
  DNER-ME 256/94, DNER-ME 258/94 e DNER-CLA 259/96;
- 8-Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas
  DNER-ME 049/94;
- 09-Determinação do limite de plasticidade
  DNER-ME 082/94;
- 10-Determinação do Limite de Liquidez
  DNER-ME 122/94
- 11-Determinação da densidade real dos solos
  ME 093/94;
- 12-Determinação do módulo de resiliência de solos
  DNIT134/2010 ME e AASHTO T 307;
- 13-Determinação do teor de matéria orgânica em solos por queima a 440°C
  ABNT NBR 13600;

➢ Relação de ensaios de Agregados

- 14-Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo

  DNER-ME 081/98, AASHTO T-85 e ASTM C 127-12;

- 15-Determinação da absorção e da densidade de agregado miúdo

  DNER-ME 084/94, ABNT NBR NM 52:2009, AASHTO T-84 e ASTM C 128-97;

- 16-Determinação da abrasão "Los Angeles"

  DNER-ME 035/98, ABNT NBR 6465, AASHTO T96 e ASTM C131;

- 17-Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio

  DNER-ME 089/94, AASHTO T 104 e ASTM C 88-05;

- 18-Equivalente de Areia

  DNER-ME 054/97, ABNT NBR 12052:1992, AASHTO T 176 e ASTM D 2419;

- 19-Análise Granulométrica de Agregados

  DNER-ME 083/98, ABNT NM 248, AASHTO T 27 e ASTM C 136;

- 20-Agregados para Concreto de Cimento Portland

  ABNT NBR 7211;

- 21-Determinação do Índice de Forma de Agregados

  DNER-ME 086/94 e ABNT NBR-7809;

- 22-Determinação do Índice de Forma de Agregados

  ASTM D 4791;

- 23-Determinação da porcentagem de partículas fraturadas nos agregados graúdos

  AASHTO TP 61 e ASTM D 5821;

- 24-Determinação de vazios em agregados miúdos não compactados

  AASHTO 304-11 e ASTM C 1252;

- 25-Ataque ao ácido clorídrico em agregados de origem calcária;

- 26-Determinação da massa unitária de agregado em estado solto

  DNER-ME 152-95, ABNT NM 45:2006, AASHTO T 19 e ASTM C29;

- 27-Determinação da massa unitária de agregado em estado compactado seco

  DNER-ME 153-95, ABNT NM 45:2006 e ASTM C29;

- 28-Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório

  DNER-PRO 199/96, ABNT NM 27, AASHTO T 248 e ASTM C 702;

- 29-Determinação do teor de materiais pulverulentos em agregados

  DNER-ME 266/97, ABNT NBR 7218, AASHTO T 113 e ASTM C 142-04;

- 30-Índice de Degradação após compactação Proctor (IDp) dos Agregados

  DNER-ME 398/99;

- 31-Índice de Degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante (IDML) e sem ligante (IDM)

  DNER-ME 401/99;

- 32-Detecção qualitativa de argilas prejudiciais do grupo esmectita em agregados utilizando azul de metileno

  AASHTO TP 57;

- 33-Adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico

  DNER-ME 078/94;

- 34-Adesividade do agregado miúdo ao ligante asfáltico

  DNER-ME 079/94;

- 35-Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

  ABNT NBR 15577-4:2008;

- 36- Determinação do módulo de resiliência de solos e agregados

  DNIT 134/2010 ME

- 37- Determinação da absorção e da densidade de agregados finos

  AASTHO-T84/2004

➢ Relação de ensaios de cal

- 38- Porcentagem de Óxido de Cálcio (CaO) da Cal Hidratada

  ABNT NBR 7175 e ASTM C 110-09;

- 39-Análise granulométrica de Cal Virgem ou Cal Hidratada para estabilização de solos

  ASTM C 977;

➢ Relação de ensaios de Ligantes Asfálticos

- 40-Determinação da Densidade de Produtos Betuminosos Líquidos e Semi-Sólidos

  DNER-ME 193/96, ABNT NBR 6296:2012, AASHTO T 228-06 e ASTM D 70;

- 41-Ensaio de formação de espuma no ligante asfáltico

  DNIT 031/2004 ES ANP-R-19 ASTM D 946;

- 42-Determinação da penetração de material asfáltico

  DNIT-ME 155/2010, ABNT-NBR 6576, AASHTO M 20-70 e ASTM D5;

- 43-Determinação do ponto de amolecimento pelo método do anel e bola em materiais asfálticos

  DNIT-ME 131/2010, ABNT-NBR 6560e e AASHTO ASTM D36;

- 44-Determinação dos pontos de fulgor e de combustão (Vaso aberto Cleveland) de materiais betuminosos

  DNIT-ME 148/94, ABNT NBR 11341/2004, AASHTO T 48 e ASTM D 92;

- 45-Recuperação elástica por torsão de ligantes asfálticos modificados

  NLT 329/91;

- 46-Destilação a vapor de filmes asfálticos

  ASTM D 255-95.

- 47-Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional

  DNIT 095/2006-EM, ABNT-NBR 15184 e ASTM D 4402;

- 48-Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional

  DNIT 111/2009-EM e ABNT-NBR 15529;

- 49-Estabilidade ao armazenamento de asfalto modificado

  DNER_ME 384/99;

- 50-Determinação do efeito do calor e ar em película fina de ligante asfáltico

  ABNT NBR 15235:2009, AASHTO T 240-13 e ASTM D 2872;

- 51-Envelhecimento de ligante asfáltico em vaso pressurizado

  AASHTO R 28 ASTM D6521;

- 52-Especificação para determinação do grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos

  ASTM D 7175 ASTM D 6373-07;

- 53-Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla

  AASHTO TP70, T 350 e ASTM D7405-10a;

- 54-Índice de tolerância à fadiga e modelo de vidade de fadiga - Ensaio de LAS

  AASHTO TP 101-14;

- 55-Determinação da curva mestre de ligantes asfálticos

  ASTM D 7552-09;

➢ Relação de ensaios de Emulsões Asfálticas

- 56-Determinação do resíduo seco por evaporação

  ABNT NBR 14896:2012;

- 57-Determinação da viscosidade Saybolt Furol

  ABNT 14491:2007;

- 58-Determinação da peneiração de emulsões asfálticas

  DNER-ME 005/94, ABNT NBR 14393:2007;

- 59-Determinação da sedimentação estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas

  ABNT NBR 6570:2016;

- 60-Determinação de retorno elástico no resíduo de emulsões asfálticas polimerizadas

  NLT 329/91;

- 61-Determinação da penetração de emulsão asfáltica de imprimação em bases de pavimentos Bibliografia de MCR (Nogami e Villibor 1995)

- 62-Determinação da aderência entre camadas de concreto asfáltico Leutner Shear Test;

- 63- Determinação da aderência entre camadas asfálticas através do cisalhamento direto

  ZTV SIB90;

➢ Relação de ensaios de Misturas Asfálticas

- 64-Massa específica máxima e densidade de misturas asfálticas

  AASHTO T 209 e ABNT 15169.

- 65-Massa específica aparente de misturas asfálticas compactadas usando amostras saturadas - superfície seca

  DNER-ME 117-94;

- 66-Massa específica aparente de misturas asfálticas compactadas usando selagem automática a Vácuo

  DNER-ME 117-94;

- 67-Determinação do dano por umidade induzida de misturas asfálticas

  AASHTO T 283 e ABNT NBR 15617;

- 67-Determinação das características de escorrimento de misturas asfálticas não compactadas

  ASTM D 6390 e AASHTO T 305;

- 68-Análise mecânica de agregados extraídos

  AASHTO T 30;

- 69-Teor de ligante asfáltico pelo método da ignição

  AASHTO T 308 e ASTM D 6307;

- 70-Compactação de misturas betuminosas à quente

  DNER-ME 043-95;

- 71-Compactação de misturas betuminosas à quente

  AASHTO T 312 e ASTM D 6925-15;

- 72-Compactação de misturas betuminosas à quente

  ASTM D 7981;

- 73-Determinação da Resistência à tração por Compressão Diametral de Misturas Asfálticas

  DNIT-ME 136/2010 e ASTM D 6931-12;

- 74-Determinação da vida de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos

  AASHTO T 321-14 e ASTM D 7460-10;

- 75-Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas

  DNIT-ME 135/2010, AASHTO TP 31 e ASTM D 4123-82;

- 76-Determinação do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas

  AASHTO T 342-11 e AASHTO PP 62-09;

- 77-Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida

  ABNT NBR 16505 e AASHTO T 342-11;

- 78-Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro

  DNIT-ME 383/99;

- 79-Dosagem de Mistura asfáltica

  AASHTO R35

- 80-Preparação e determinação da densidade de misturas asfálticas a quente através do compactador giratório

  AASHTO-T312;

➢ Relação de ensaios de concreto de cimento Portland

- 81-Dosagem Racional e Experimental de Concreto de Cimento Portland

  ABNT NBR 12821 ABNT NBR 5738;

- 82-Determinação da retração/expansão de concreto

  DNIT 053/2004, ABNT NBR 15577-6 e ASTM C490;

- 83-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

  ABNT NBR 5739;

- 84-Determinação da resistência à compressão simples de argamassa de alta resistência

  ABNT 14041:2012;

- 85-Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

  ABNT 7222:2011;

- 86-Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos de concreto

ABNT NBR 12142;

- 87-Determinação do índice de fluidez e da vida útil de calda de cimento para injeção

  ABNT NBR 7681-2;

- 88-Determinação dos índices de exsudação e expansão da calda de cimento para injeção

  ABNT NBR 7681-3;

- 89-Determinação da resistência à compressão da calda de cimento para injeção

  ABNT NBR 7681-4;

- 90-Determinação da absorção de água por capilaridade em argamassa ou concreto

  ABNT NBR 9779:2012;

- 91-Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – concreto de cimento Portland

  DNER ME 404/2000;

- 92-Moldagem e cura de corpo de prova cilíndrico ou prismáticos

  NBR 5738

- 93-Preparo de calda de cimento para injeção

  ABNT NBR 7681

➢ Relação de ensaios de Brita Graduada Tratada com Cimento

- 94-Dosagem de brita graduada tratada com cimento

  ABNT NB 1344 e ABNT NBR 5738;

- 95-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

  ABNT NBR 5739;

- 96-Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

  ABNT 7222:2011;

- 97-Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos de concreto

  ABNT NBR 12142;

- 98-Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas

  DNIT-ME 135/2010, AASHTO TP 31 e ASTM D 4123-82;

- 99-Determinação da retração/expansão de concreto

  DNIT 053/2004, ABNT NBR 15577-6 e ASTM C490;

- 100-Percentagem de Cimento por Titulação Química

  ABNT NBR 16174:2013,

- 101-Determinação do módulo de resiliência à tração por flexão em brita graduada tratada com cimento

  AS 1012.11/2000;

- 102-Determinação da resistência a tração na flexão de corpos de prova prismáticos de concreto

  ABNT NBR 12142

➢ Relação de ensaios de fresado

- 103-Análise granulométrica do material fresado

  Manual Wirtgen de Reciclagem a Frio (2012);

- 104-Dosagem de fresado asfáltico estabilizado com cimento asfáltico

  Manual Wirtgen de Reciclagem a Frio (2012);

- 105-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndicos

  ABNT NBR 5739 Manual Wirgen;

- 106-Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

  ABNT 7222:2011 Manual Wirtgen;

- 107-Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas

  DNIT-ME 135/2010, AASHTO TP 31 e ASTM D 4123-82;

➢ Relação de ensaios de solo cimento

- 108-Dosagem para emprego do solo cimento como camada de pavimento

  ABNT NBR 12253 e DNIT 143/2010 - ES;

- 109-Compressão axial de corpos de prova cilíndricos de solo cimento

DNER-ME 201/94 e DNER-ME 202/94;

- 110-Determinação da Resistência à tração por Compressão Diametral de Misturas Asfálticas

  DNIT-ME 136/2010, ASTM D 6931-12 e DNER-ME 202/94;

- 111-Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas

  DNIT-ME 135/2010 AASHTO TP 31;

- 112-Determinação da absorção de água no solo cimento

  DNER-ME 274/96 e ABNT NBR 13555:2012;

- 113-Ensaio de durabildiade por molhagem e secagem do solo cimento

  ANBT NBR 13554:2012

➢ Relação de ensaios de solo cal

- 114- Determinação do teor de cal ideal em função do pH (Método Eades e Grim)

  ASTM D6276;

- 115- Determinação da resistência à compressão simples

  DNER-ME 180/94;

- 116- Determinação da resistência à tração por compressão diametral

  DNER-ME 181/94;

- 117-Determinação do módulo de resiliência de solos

  DNIT 134/2010 ME e AASHTO T 307

➢ Outros ensaios

- 118- Aferição de Viga Benkelman DNER-PRO 175-94;
- 119- Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman

  DNIT 133/2010

- 120- Leituras de deflexão com Viga Benkelman;
- 121– Avaliação da infiltração ou penetração da EAI em BGS ou solos;
- 122-Execução de concreto em central – procedimento



FIGURA 9. CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DE PESQUISAS REALIZADAS NO CPR, EM SANTA ISABEL (SP).

1.1.6.1.1. Registro Fotográfico do Laboratório



Ligante asfáltico

Agregados





Corpos de prova

1.1.6.1.2. Equipamentos e ensaios para caracterização dos agregados minerais



Análise granulométrica por peneiramento

Forma de agregados





Ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles

1.1.6.1.3. Ensaios e equipamentos caracterização dos ligantes asfálticos



Ensaio de viscosidade: Viscosímetro Brookfield

Ensaio de penetração: Penetrômetro





Ensaio de envelhecimento de curto prazo - RTFO (*rolling thin film oven*)



Ensaio de ponto de amolecimento - Anel e Bola



Ensaio de envelhecimento de longo prazo - PAV (*pressure aging vessel*)



Ensaio de cisalhamento dinâmico: DSR (*dynamic shear rheometer*)

1.1.6.1.4. Equipamentos para produção e compactação de misturas asfálticas em laboratório e exemplos de campo

Usina de asfalto





Misturador em laboratório

1.1.6.1.5. Ensaios mecânicos: Dano por Umidade Induzida (DUI)



Compactor Marshall



Compactor giratório Superpave



Rolo compactador

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral





16 horas a -18ºC

24 horas a 60ºC





Análise da resistência da mistura à ação deletéria da água

1.1.6.1.6. Ensaios mecânicos: *Flow Number*



Ensaio para verificar a deformação permanente em temperaturas elevadas

1.1.6.1.7. **Ensaios mecânicos: Módulo Dinâmico ou Módulo Complexo e Módulo de Resiliência**



Prensa UTM – Universal Testing Machine

1.1.6.1.8. **Ensaios mecânicos: Fadiga de Misturas Asfálticas**



Pressbox: Equipamento para moldagem de corpos de prova prismático

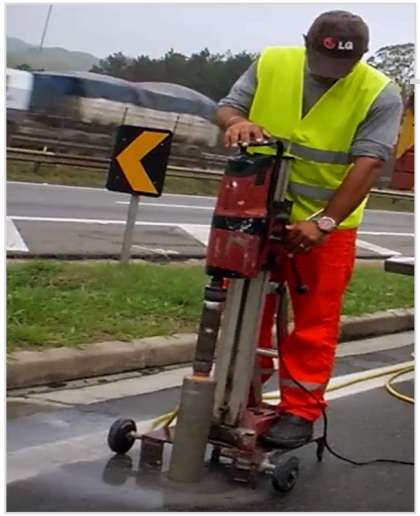
Autosaw: Equipamento para corte das vigas prismáticas





Four Point Bending: Equipamento para ensaio de viga apoiada em quatro pontos

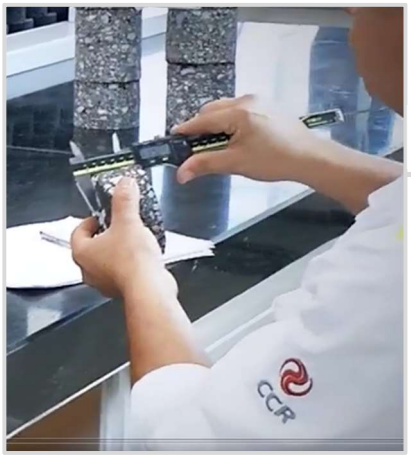
3.1.6.1.9. Controle de qualidade: concreto asfáltico



Extração de corpo de prova



Forno NCAT - Extração de ligante,granulometria e vazios



Espessura das camadas



Verificação de irregularidade

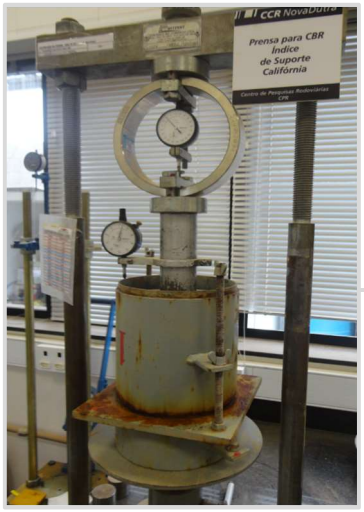
3.1.6.1.10. Controle de qualidade: solos e agregados (base, sub-bases, reforço do subleito e subleito)



Granulometria



Ensaios de caracterização



Compactação Proctor e CBR

Módulo de Resiliência



Compactação Proctor e CBR

1.1.6.1.12. Controle de qualidade: concreto de cimento Portland (Obras de Artes Especiais-OAE)



Tipos de materiais avaliados

Produção do concreto em betoneira





Verificação de traços e Resistência de CP aos 28 dias

1.1.6.1.13. Ensaios laboratoriais e na Rodovia para validação de produtos de concreto



Resistência à compressão simples - RCS

Compressão diametral





Tração na flexão

Expansão/retração



1.1.6.2. Monitoramento e avaliação de pavimentos

Parâmetros estruturais: medida de deflexões

Viga Benkelman eletrônica





FWD Dynatest

Parâmetros de segurança:
Aderência pneu-pavimento



Grip tester



Mancha de areia

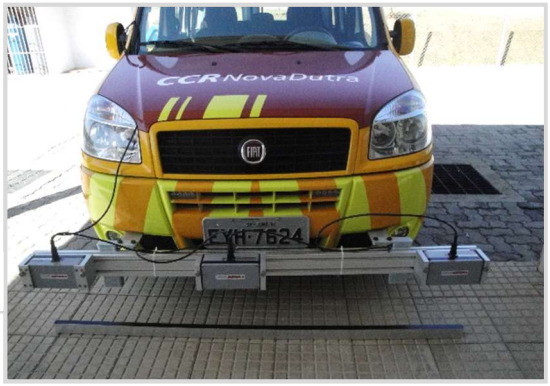


Pêndulo britânico

Parâmetros conforto: medida de irregularidade



Perfilômetro a laser



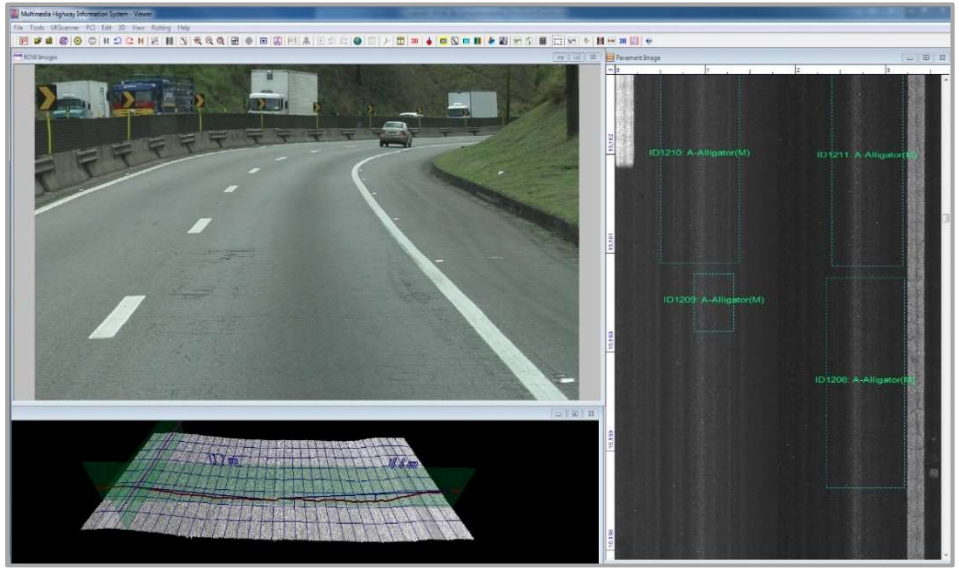
Irregularidades – QI e IRI



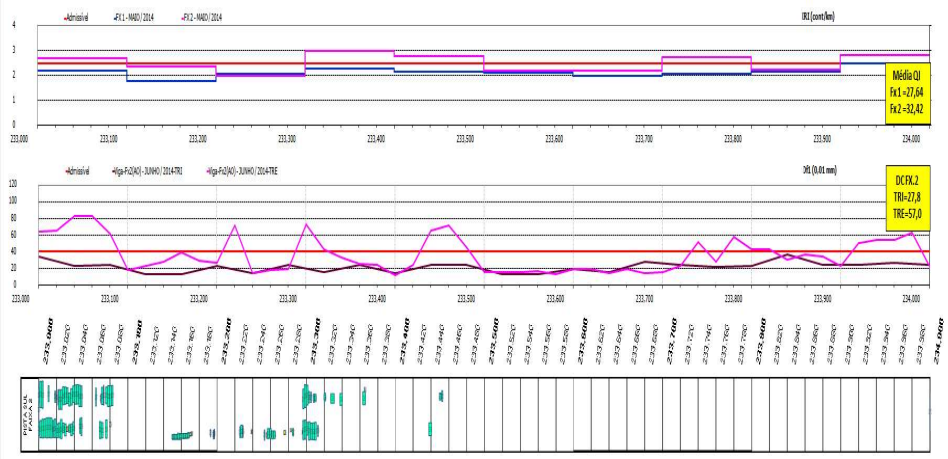
PavScan
Vídeo Registro

LVC -LVD- IGG - VSA

1.1.6.3. Projetos de manutenção: análise das condições estruturais e funcionais dos pavimentos



Dados de deflexões, irregularidade e defeitos de superfície



1.1.6.3.1. Soluções de projeto -registro fotográfico das obras



Gap Graded – Serra das Araras

conforto e segurança



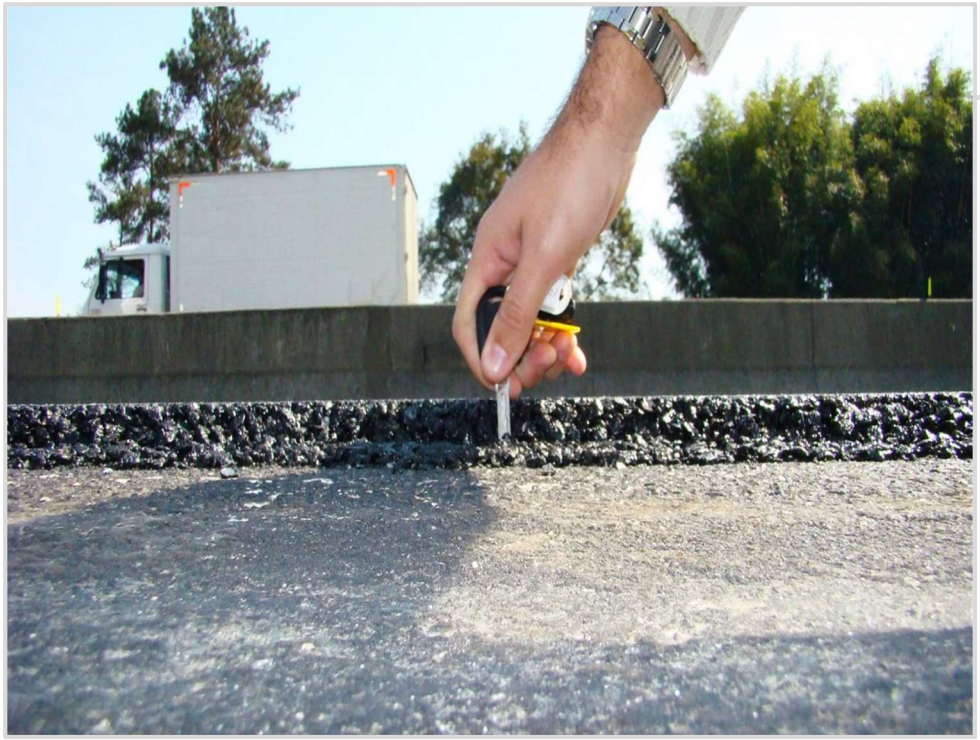
Fresagens com espessuras variáveis

Correção de defeitos e ATR



Execução de drenos longitudinais e transversais

correção da drenagem



Aplicação de camada de reforço

adequação estrutural



Reconstrução total de segmentos críticos

Reciclagem e/ou materiais virgens



Serviços de Microfresagem

correção de irregularidade e ATR



Microrevestimento a Quente
(2 a 3 cm com asfaltos modificados com polímeros ou borracha)

Segurança e impermeabilização da superfície

Micrrevestimento a Frio
(< 2 cm)

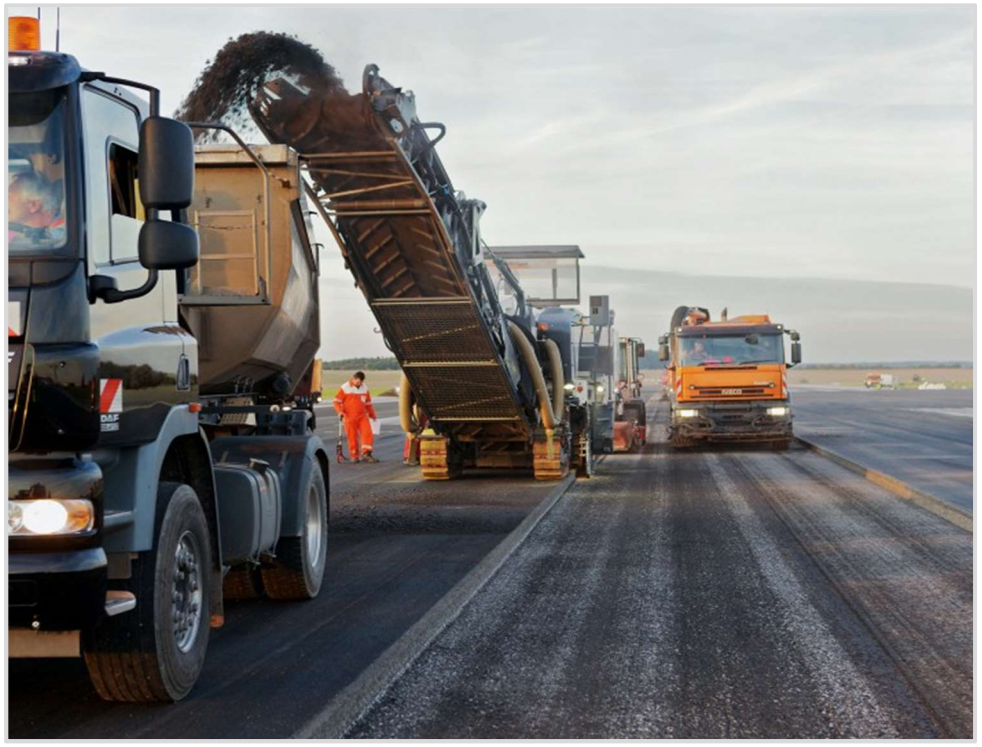
Segurança e impermeabilização da superfície





Base reciclada com cimento

Correção estrutural na camada de base



Pesquisa de fresado com cimento

Correção estrutural na camada de base



Manutenção de pavimento rígido

Técnica Carbofit® - fibras de carbono



Manutenção de pavimento rígido

Pequenos Reparos

CAPÍTULO 4

Gerência de Pavimentos

Após a construção de um pavimento, inevitavelmente, a estrutura sofre processos de deterioração gradual de seus componentes físicos ao longo do tempo, devido ao carregamento cíclico das cargas do tráfego e da ação deletéria das intempéries. Por mais bem fundamentados que sejam, os métodos de projeto, estes não são capazes de reproduzir, com acurácia, as interações da estrutura de um pavimento sob as condições ambientais e de tráfego. Assim, há uma incerteza inerente no processo e minimizá-la pura e simplesmente pode inviabilizar economicamente o empreendimento, uma vez que exija elevados investimentos. O meio para lidar com o risco não é evitá-lo, mas sim gerenciá-lo e neste caso a Gerência de Pavimentos auxilia, de forma eficaz e racional, os órgãos gestores nas tomadas de decisões da seguinte forma: Define o nível de risco aceitável para a implantação de uma infraestrutura rodoviária dentro do contexto econômico e operacional e coloca em prática procedimentos para que a manutenção e as futuras intervenções possam vir a ser realizadas de forma sustentável.

A gerência de pavimentos, em seu sentido mais amplo, inclui todas as atividades envolvidas no planejamento, no projeto, na construção, na manutenção (conservação e restauração) e na avaliação dos pavimentos que fazem parte de uma infraestrutura viária (rodoviária, aeroportuária ou urbana). Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é um conjunto de ferramentas ou métodos para auxiliar os que tomam decisões a encontrar estratégias ótimas para construir, avaliar e manter os pavimentos em uma condição funcional aceitável, durante um certo período. A função de um SGP é aumentar a eficiência das tomadas de decisão, expandir seu escopo, fornecer "feedback" quanto às consequências das decisões, facilitar a coordenação das atividades dentro da organização e assegurar a consistência das decisões tomadas em diferentes níveis de gerência dentro da mesma organização. Uma organização que administre uma rede pavimentada, seja rodoviária, aeroportuária ou urbana, pode executar as atividades envolvidas na manutenção e melhoria das condições operacionais de sua rede por meio de uma série de formas, que vão desde a execução dispersa das diversas atividades por departamentos ou setores com pouca ou nenhuma interconexão até a existência de um Sistema de Gerência de Pavimentos, definido como um conjunto de procedimentos e metodologias destinadas a assegurar a execução coordenada, pela organização, de todas as atividades envolvidas na manutenção e melhoria da rede. Tal coordenação visa, basicamente, garantir coerência na tomada de decisões em todos os níveis, de modo a que os recursos disponíveis sejam utilizados da forma mais eficiente possível, minimizando o custo total do transporte, ao mesmo tempo em que as funções da rede pavimentada são plenamente realizadas. Em alguns sistemas, a rede não pavimentada e as pontes e viadutos são também incluídos no processo, quando se passa a ter um Sistema de Gerência da Infraestrutura Viária. A finalidade básica de um SGP é auxiliar a organização responsável pela administração de uma rede viária a responder à seguinte questão: "Sob certas restrições orçamentárias, quais as medidas de conservação e de restauração que deveriam ser executadas, bem como quando e onde, de modo a se preservar o patrimônio representado pela infraestrutura existente e se obter o máximo retorno possível dos investimentos a serem realizados? Além disso, qual parcela dos recursos disponíveis deveria ser alocada para novas pavimentações?" Um SGP deve ser capaz de auxiliar a tomada de

decisões por parte de usuários em diversos níveis dentro da organização. Para a mais alta administração, o SGP deve responder às seguintes questões:

- Qual será o padrão futuro da rede, em função dos recursos disponíveis para sua manutenção?
- Qual é a estratégia de manutenção e de construção que resultará no máximo retorno para a sociedade dos investimentos a serem efetuados?

Para os engenheiros que fazem os projetos, o SGP deve auxiliar na definição das soluções técnicas de manutenção e de construção que sejam as mais eficazes. O SGP pode operar, assim, em dois níveis fundamentais: em nível de rede, quando se trata do planejamento de estratégias e da alocação de recursos para toda a rede, e em nível de projeto, quando aplicado dentro de um determinado projeto apenas.

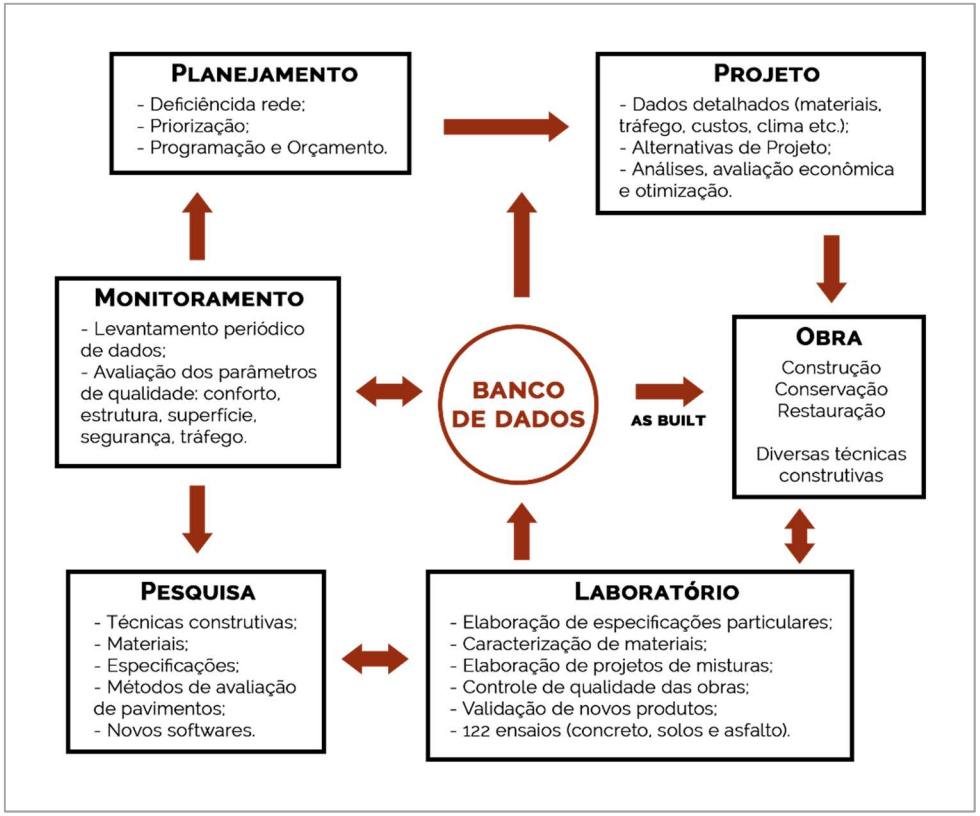
Os SGP's são estruturados dentro do conceito da Engenharia de Sistemas, onde todas as atividades necessárias à gerência de uma rede viária são interligadas, de modo a que as decisões sejam bem embasadas e, ao longo do tempo, o monitoramento das condições da rede forneça um "feedback" para todo o processo, de modo a permitir que se efetue "correções de rota", por meio da análise crítica do grau em que os objetivos do sistema estão sendo atingidos. Os princípios em que se fundamenta um SGP completo e operacional são, portanto, os mesmos que norteiam a administração de uma empresa de médio ou grande porte, bastando se encarar todo o processo como um negócio, que pode dar lucro ou prejuízo, dependendo de onde e como o capital é aplicado.

Dentre as atividades da Gerência de Pavimentos, o planejamento utiliza as informações de monitoramento em nível de rede, isto é, de toda malha viária, no processo de estabelecimento de prioridades e no desenvolvimento de uma programação, com seu orçamento correspondente. A programação desenvolve os programas reais para novas restaurações de pavimentos da rodovia, dentro das restrições orçamentárias, restrições operacionais e das recomendações da organização. O projeto converte cada projeto selecionado de um item programado para um conjunto de planos e especificações. A construção transforma o projeto de um pavimento novo ou restaurado em realidade. A conservação adequada e oportuna dos pavimentos ao longo de sua vida de projeto é essencial para a proteção do grande investimento representado pelo pavimento e para a preservação de um nível de serviço adequado para os usuários. As propriedades e a uniformidade dos materiais utilizados na construção, restauração e conservação constituem um aspecto de crucial importância para a qualidade e a economia de todo o processo. As condições ambientais, tais como umidade e temperatura, têm um efeito significativo no projeto e no desempenho dos pavimentos. Informações razoavelmente acuradas quanto às cargas do tráfego para os diversos segmentos são necessárias para se avaliar adequadamente os pavimentos. Informações quanto à segurança e acidentes, na medida em que se relacionem à condição e ao desempenho dos pavimentos, são benéficas no processo de se determinar o que deveria ser feito e quando. A pesquisa deve ser um processo contínuo na gerência de pavimentos, tanto para se aperfeiçoar o sistema como na procura de materiais e métodos melhores e mais eficazes.

Principais atividades e decisões dentro da Gerência de Pavimentos

Blocos de Atividades Básicas	Gerência em Nível de Rede	Gerência em Nível de Projeto
Dados	1- Segmentos homogêneos 2 - Dados: a) Inventário de campo (irregularidade, deterioração de superfície, atrito, deflexão, geometria); b) Outros (tráfego, custos unitários). 3 - Processamento de dados	1 - Dados detalhados (estruturais, de materiais, tráfego, clima e de custos unitários) 2 - Subtrechos homogêneos 3 - Processamento de dados
Critérios	1 - Mínimos: serventia, atrito, adequação estrutural. Máxima deterioração 2 - Custos máximos: do usuário e de conservação 3 - Custos máximos para os programas de obras 4 - Critérios de seleção (benefícios máximos e máxima eficácia dos investimentos)	1 - Máxima irregularidade após a construção; mínima adequação estrutural e atrito 2 - Custos máximos para o projeto 3 - Interrupção máxima do tráfego 4 - Critérios de seleção (como menores custos totais)
Análise	1 - Necessidades atuais da rede 2 - Previsões de desempenho e necessidades futuras 3 - Alternativas de conservação e de restauração 4 - Avaliação técnica e econômica 5 - Análise para priorização 6 - Avaliação de níveis orçamentários alternativos	1 - Alternativas inerentes ao projeto 2 - Análises técnicas (previsões de desempenho e de deterioração) 3 - Análises econômicas no ciclo de vida
Seleção	1 - Priorização final dos projetos de restauração e de construção 2 - Programação final das operações de conserva	1 - Melhor alternativa para o projeto (restauração ou reconstrução) 2 - Medidas de conserva para diversas seções
Implementação	1 - Programação, contratos 2 - Monitoração do programa 3 - Atualização do planejamento orçamentário e financeiro	1 - Atividades de construção, controle dos contratos e registros do andamento das obras 2 - Atividades de conserva, gerenciamento da conservação e registros associados

Sistema de Gerência de Pavimentos



Benefícios Reais Resultantes da Gerência de Pavimentos

1. Uma metodologia objetiva para a tomada de decisões;
2. Informações acuradas e oportunas;
3. Uma avaliação quantitativa da condição da rede;
4. Informações quanto ao desempenho dos pavimentos, que são utilizadas para se prever a condição futura da rede;
5. Uma forma de se avaliar diversas estratégias de restauração;
6. Uma forma objetiva de se julgar e classificar as necessidades da

rede por prioridade;

7. Uma base consistente para a alocação de recursos;
8. Uma forma para se analisar as conseqüências de diversos níveis orçamentários;
9. Um aumento da credibilidade da organização junto ao público e aos níveis superiores da administração;
10. Transferência de tecnologia e um valioso "feedback" que aperfeiçoam a tecnologia do projeto de pavimentos, da restauração, da conservação, dos materiais e da construção;
11. Uma avaliação da deterioração dos pavimentos da rede causada por mudanças nas dimensões e nas cargas dos caminhões;
12. De modo geral, a capacidade de as organizações monitorarem e aperfeiçoarem continuamente seus sistemas.

Os seguintes estágios de desenvolvimento produzem seus próprios benefícios:

1. O estágio de Inventário descrevendo a extensão e o tipo da rede existente;
2. O estágio de Condição fornecendo uma avaliação atualizada e contínua da serventia da rede;
3. O estágio de Priorização determinando quais necessidades deveriam ser atendidas, identificando-se as situações mais críticas existentes na rede;
4. O estágio de Previsão de Desempenho fornecendo aos administradores a capacidade de fazerem projeções mais assertivas das necessidades futuras;
5. O estágio de Otimização de Estratégias permitindo a avaliação das conseqüências de estratégias alternativas nos níveis de rede e de projeto;
6. Gestão Completa e Operacional: após 25 anos, utilizando a metodologia de gestão dos pavimentos, podemos afirmar que as informações coletadas pelo monitoramento passam a influir na reavaliação periódica do Programa Plurianual de Investimentos, um verdadeiro Feedback System.

O desenvolvimento ou aperfeiçoamento da Gestão de Pavimentos na Concessionária CCR NovaDutra se tornou eficaz devido:

1. Interesse e empenho por parte da direção da CCR NovaDutra;
2. A criação do CPR, que juntamente com a equipe de obras, ficaram encarregados da direção do processo (CCR Engelog);
3. Pessoal qualificado e motivado, compondo um departamento específico, encarregado da centralização das operações da Gestão dos pavimentos da Rodovia.

Fonte: *"Apostila de Gerência de Pavimentos"*, Prof. Régis Martins Rodrigues (Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA)

CAPÍTULO 5
A ANTT

A Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, criada pela Lei nº 10.233, é uma autarquia sob regime especial, que tem sede no Distrito Federal e unidades regionais e postos de fiscalização espalhados pelo país. "Tem por finalidade regular, supervisionar e fiscalizar as atividades de prestação de serviços e de exploração da infraestrutura de transportes, exercidas por terceiros, visando garantir a movimentação de pessoas e bens, harmonizar os interesses dos usuários com os das empresas concessionárias, permissionárias, autorizadas e arrendatárias, e de entidades delegadas, preservado o interesse público, arbitrar conflitos de interesses e impedir situações que configurem competição imperfeita ou infração contra a ordem econômica".

Uma das competências da ANTT é a concessão de rodovias federais, que tem que fiscalizar a execução dos contratos de concessão rodoviária, de acordo com as atividades de exploração da infraestrutura definidas previamente. O Programa de Concessão de Rodovias no Brasil teve início na década de 1990 com o objetivo de solucionar o problema da falta de recursos para expansão, recuperação, manutenção e melhoria da malha rodoviária do país. A concessão de rodovias consiste em um contrato firmado entre o governo e uma empresa privada, uma concessionária, que necessita cumprir as exigências e determinações estabelecidas no contrato, a partir de melhorias e da manutenção das vias, mantendo-as em boas condições de tráfego no que se refere à pavimentação, iluminação, sinalização e outros, devendo realizar as obras previstas e os serviços necessários dentro dos prazos estabelecidos no Programa de Exploração Rodoviária (PER).

A grande vantagem da concessão rodoviária é que as estradas passam a oferecer muito mais comodidade e segurança, pois, além de manter a rodovia em boas condições de tráfego, a concessionária também oferece serviços de apoio ao usuário, em especial, o atendimento médico de emergência em acidentes (resgate e UTI Móvel) e o serviço de guincho para veículos avariados na rodovia, troca de pneus, apreensão de animais na faixa de domínio, combate a incêndios e viaturas de inspeção de tráfego.

Além disso, em alguns contratos de concessão rodoviária federal são previstas verbas anuais para Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (Recursos para o Desenvolvimento Tecnológico – RDT), que correspondem a alíquota de 0,25% da receita bruta de pedágio da concessionária. A Resolução nº 483, de 24 de março de 2004, alterada pela Resolução ANTT nº 5.172, de 25 de agosto de 2016, dispõe sobre a aplicação desses recursos para o fomento da pesquisa e desenvolvimento tecnológico na área de engenharia rodoviária, sendo que para sua utilização as concessionárias devem possuir projetos de pesquisa aprovados pela ANTT. A portaria Nº 68, de 6 de março de 2019 estabelece os procedimentos a serem observados pelas concessionárias de rodovias federais e pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT para a fiscalização e o acompanhamento dos projetos desenvolvidos com a verba de RDT.

As concessionárias que possuem este recurso aplicam em estudos e pesquisas na área da engenharia rodoviária.

Os projetos e pesquisas devem atender às seguintes diretrizes:

a) promover a modernização da infraestrutura, visando à melhoria da eficiência, produtividade, qualidade e segurança dos serviços de exploração das rodovias;

b) visar o desenvolvimento e a modernização das concessões de rodovias federais; e

c) difundir o conhecimento científico e tecnológico.

Os projetos e as pesquisas devem ter como objetivos a inovação e o desenvolvimento de métodos e técnicas construtivas; tecnologia básica e aplicada; soluções técnicas para problemas específicos; soluções de integração com o meio ambiente; e capacitação técnica. Os projetos e pesquisas podem ser executados pelas concessionárias isoladamente ou com a participação de entidades públicas e privadas.

A ANTT organiza workshops anuais para difundir o conhecimento científico e tecnológico gerado nesses estudos, promovendo também a aproximação entre as concessionárias e instituições de pesquisa de todo o Brasil.

Nestes encontros as concessionárias têm a oportunidade de apresentarem suas pesquisas através de palestras.

CAPÍTULO 6
Pesquisas RDT

A manutenção e operação das estruturas físicas do trecho da BR 116 entre as cidades do Rio de Janeiro/RJ e São Paulo/SP, denominada Rodovia Presidente Dutra, ligando as duas maiores cidades do País, com o altíssimo volume de mercadorias e passageiros que por ela são transportados, nos direciona para a análise dos seguintes aspectos:

- Alto valor do investimento/patrimônio aplicado na Rodovia e a evidente necessidade de se otimizar estes gastos, através de projetos e métodos de dimensionamento modernos e adequados ao tráfego esperado e considerando os materiais disponíveis;
- Alto custo de manutenção e restauração e, também neste caso, a sua otimização sem prejuízos para a qualidade/vida útil;
- Custos antecipados, por vida útil do pavimento inferior à projetada, em decorrência do excesso de carga;
- Obrigação dos órgãos e empresas gerenciadoras da rodovia de oferecer adequadas condições de conforto e segurança ao usuário/contribuinte do sistema.

Estes aspectos incentivam, principalmente nos países mais desenvolvidos, um processo contínuo de desenvolvimento tecnológico através de pesquisa, treinamento e implementação de novas técnicas e métodos construtivos, tendo sempre como objetivos básicos a aplicação ótima dos recursos provenientes dos pedágios pagos pelos usuários e o fornecimento de melhor nível de serviço nas rodovias.

Nos últimos anos, grande número de pesquisas foi desenvolvido pela NovaDutra, com as transferências dos resultados diretamente aos usuários, principalmente no que se refere à melhoria do conforto, segurança e fluidez do tráfego.

No Brasil os recursos disponíveis para a pesquisa rodoviária são mais limitados, mas diversos estudos continuam sendo desenvolvidos em Universidades, como, por exemplo, na USP, UFRJ, UFRG, no Instituto de Pesquisas Rodoviárias e também através de empresas privadas, fornecedoras de insumos para as obras rodoviárias, que atuam principalmente na adaptação de novas tecnologias desenvolvidas na Europa, USA e África do Sul às condições brasileiras.

As concessionárias das rodovias federais, tem permanentemente incentivado seus parceiros fornecedores, sejam fabricantes de produtos ou prestadores de serviços, para o contínuo desenvolvimento de soluções que venham resultar em benefícios aos que trafegam por suas rodovias e este progresso faz com que toda a malha rodoviária nacional seja indiretamente beneficiada.

Para que a melhoria da prestação de serviço público nas rodovias federais concessionadas seja contínua, é fundamental os recursos disponibilizados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT através do RDT, principalmente num cenário nacional onde há poucos recursos disponíveis para pesquisas rodoviárias.

Com base nas diretrizes e objetivos preconizados pela ANTT através da Resolução No 483 de 24 de março de 2004, a NovaDutra através do seu Centro de Pesquisas Rodoviárias se enquadrou dentro das premissas básicas para a otimização e eficiência na utilização destes recursos. Há duas décadas os estudos e pesquisas desenvolvidos no CPR promovem um avanço tecnológico em todo o país, viabilizando soluções mais sustentáveis e duráveis.

Neste capítulo serão apresentadas as informações mais relevantes de cada uma das pesquisas desenvolvidas sob a gestão do CPR utilizando o RDT:

1. **Elaboração de especificações particulares de serviço**
2. **Treinamento e aprimoramento de profissionais na área de pavimentação**
3. **Avaliação da utilização da cal hidratada para combater susceptibilidade de misturas betuminosas à ação da água e melhorar a adesividade do ligante ao agregado**
4. **Avaliação de danos por umidade induzida, módulo de resiliência e fadiga em misturas confeccionadas com diversos polímeros**
5. **Comparativo da qualidade entre misturas betuminosas executadas em usinas gravimétricas e *drum mixers***
6. **Análise dos métodos DNER e ASTM para o ensaio de densidade de corpos de prova Marshall**
7. **Utilização do Elvaloy como aditivo ao ligante no CBUQ**
8. **Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação no Brasil**
9. **Avaliação do equipamento "*Grip Tester*" para medição de atrito**
10. **Relação de óxido de cálcio na cal hidratada para efeito de adesividade**
11. **Avaliação do teor de asfalto em volume dos projetos de misturas utilizados na Rodovia Presidente Dutra**
12. **Avaliação da necessidade de aplicação do método Rice para controle do volume de vazios de ar obtido no campo em misturas asfálticas**
13. **Determinação em Laboratório da resistência à fadiga de misturas asfálticas**
14. **Avaliação do desempenho de camadas de mistura asfáltica reforçada com geogrelha flexível em relação à trincamento por fadiga e à reflexão de trincas de camadas inferiores do pavimento**
15. **Estudo de desempenho de pavimento com distintos ligantes asfálticos**
16. **Estudo com Relação à Deformação permanente das misturas asfálticas**
17. **Critério de otimização de projetos de ponte a partir de espectros de acelerações induzidas por veículos nos tabuleiros**
18. **Estudo comparativo do comportamento de fadiga de misturas betuminosas com diferentes teores de asfalto**
19. **Ensaios para avaliação dos concretos moldados em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfegos de veículos**
20. **Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes**

21. **Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfáltica de elevado módulo**

22. **Avaliação da pesagem de veículos em movimento com cargas líquidas**

23. **Diretrizes para implementação do guia de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (MEPDG) para a concessionária NovaDutra**

24. **Elaboração do projeto funcional da nova pista de subida da Serra das Araras e adequação do projeto funcional da pista ascendente existente em pista descendente**

25. **Capacitação da equipe técnica do CPR para uso dos novos equipamentos adquiridos**

26. **Capacitação da equipe técnica – Método Superpave**

27. ***Free flow* - Implantação de pontos com novo sistema automático de arrecadação para testes (1ª etapa)**

28. **Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados com cal hidratada**

29. **Revestimentos asfálticos sustentáveis: estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas**

30. **Estudos para incorporação de conceitos de sustentabilidade em passarelas ao longo da Rodovia Presidente Dutra**

31. **Estudo da influência do teor de cimento portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados**

32. **Determinação da resistência à fadiga de misturas asfálticas a partir de dois métodos de ensaio com diferentes tipos de asfalto**

33. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento portland - desenvolvimento de método de dimensionamento e avaliação de processos construtivos**

34. **Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade**

35. **Materiais de sinalização horizontal: avaliação do desempenho para elevados volumes de tráfego**

36. **Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e *flow number* de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas**

37. **Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento (BGTC)**

38. **Asfalto borracha: revisão bibliográfica, avaliação reológica do Ligante Asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas**

39. **Reciclagem de pavimentos asfálticos com espuma de asfalto. Etapa 1: estudo laboratorial**

40. **Modelo de serviço de telemedicina para atendimento emergencial em rodovia baseada em centro de apoio referenciada para encaminhamentos**

41. **Treinamento e capacitação técnica em pavimentação**

42. **Ecodriving BR - Reduzindo custos e ampliando benefícios socioambientais na principal rodovia brasileira**

43. **Reciclagem de pavimentos asfálticos com espuma de asfalto e cimento Portland, construção e monitoramento de um trecho experimental**

44. **Dosagem de misturas asfálticas com energias distintas no compactador giratório Superpave**

45. **Avaliação da aderência entre camadas asfálticas**

46. **avaliação do emprego de polímeros do tipo RET em misturas asfálticas**

47. **Emprego de perfis de fibras de carbono na recuperação de placas de concreto fissuradas**

48. **Vídeo registro dos ensaios realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias**

49. **Livro – 20 anos de Pesquisas no Centro de Pesquisas Rodoviárias**

6.1. Elaboração de Especificações Particulares de Serviço

A CCR NovaDutra iniciou seus serviços de manutenção do pavimento no ano de 1996.

Durante as intervenções realizadas por empresas terceirizadas, contratadas pela concessionária, até o ano de 1998, observou-se a necessidade da criação de especificações de serviços particulares que pudessem agregar as experiências já vividas pelos técnicos em obras sobre o regime de concessão. Esta iniciativa buscava um processo de melhoria contínua no padrão de qualidade das obras. Foram então criadas especificações particulares para executar os seguintes serviços:

- Concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ);
- Micro-revestimento asfáltico à frio (MRAF);
- Micro-revestimento betuminoso à quente (MRBQ);
- Pré-misturado à quente tipo macadame (PMQM);
- Concreto Asfáltico à Quente tipo Stone Matrix Asphalt (SMA);
- Tratamento superficial duplo (TSD) e capa selante com asfalto modificado por polímero.

Para elaboração das especificações de serviço foi realizada a consulta de manuais, guias e normas nacionais e internacionais, das quais vale destacar:

- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER);
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- American Society for Testing and Materials (ASTM);
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO);
- International Slurry Surfacing Association (ISSA);
- British Standards (BS).

As especificações foram organizadas para orientar as empresas em todas as atividades relacionadas à aplicação de misturas asfálticas, e elaboradas da seguinte forma:

- estabelecimento dos critérios, normas e ensaios para a seleção dos materiais (agregados minerais e ligantes asfálticos) constituintes das diversas misturas asfálticas usinadas à frio ou à quente;
- definição dos equipamentos necessários para a produção e aplicação das misturas asfálticas;
- aplicação dos conceitos de qualidade em todas as atividades realizadas pelas empresas terceirizadas;
- definição dos critérios de medição e pagamento.

As especificações redigidas pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra buscaram otimizar os serviços de terceiros. Além de disponibilizar estes documentos, também foram realizados treinamentos para conscientizar engenheiros, técnicos e auxiliares.

Pode-se concluir que o investimento realizado neste estudo foi muito bem aplicado, já que os resultados foram satisfatórios para todos os participantes na execução de obras de manutenção no pavimento rodoviário, devido principalmente ao maior índice de aceitação dos serviços e à menor necessidade de refazer os serviços, observado nos meses e anos seguintes. Também concluiu-se que as especificações de serviço facilitaram a disseminação das boas práticas para atividades com utilização de misturas asfálticas.

Foi uma atividade precursora no meio, com objetivo de obter pavimentos mais duráveis, seguros e econômicos, o que possibilita oferecer mais qualidade ao usuário da rodovia.

6.2. Treinamento e Aprimoramento de Profissionais na Área de Pavimentação

Nas primeiras obras de pavimentação realizadas na CCR NovaDutra, NovaDutra notou-se a necessidade de reciclagem e aprimoramento dos técnicos e auxiliares encarregados das atividades de fiscalização das obras. Este processo foi iniciado pela realização de palestras de instrução para a operação adequada dos equipamentos associados à pavimentação de rodovias. O desenvolvimento de treinamentos para técnicos das empresas contratadas tornou-se umas das atividades iniciais do Centro de Pesquisas Rodoviárias. A seguir são listadas as palestras realizadas com uma breve descrição dos tópicos abordados.

- **Curso de dosagem de misturas asfálticas**

Este curso teve por objetivo desenvolver um treinamento relacionado aos ensaios e procedimentos necessários para realizar a dosagem completa de uma dosagem de misturas asfálticas usinadas à quente. Foi realizada toda a abordagem referente aos estudos nos agregados minerais, introduzindo os conceitos de absorção de asfalto em agregados com elevada absorção de água. Posteriormente, foram descritos os ensaios relacionados à caracterização de ligantes asfálticos e à compactação da mistura asfáltica com equipamento Marshall.

- **Curso de operações de caminhões**

Neste curso foi realizado um treinamento padrão por meio de cartilhas para serem distribuídas aos motoristas dos caminhões que fazem o transporte das misturas asfálticas, desde as usinas de asfalto até os locais das obras. Também foram abordados os temas de controle de qualidade e segurança durante as operações realizadas dentro das usinas de asfalto relacionadas ao carregamento, no trajeto e na região da obra de pavimentação asfáltica – onde é realizado o descarregamento da mistura asfáltica na vibro acabadora. Ressalta-se a importância da realização contínua deste curso, dado que os motoristas nem sempre estão conscientes da importância do trabalho deles na cadeia produtiva de um pavimento asfáltico, devido à rotatividade destes colaboradores nas empresas terceirizadas.

- **Curso de operações da acabadora com qualidade**

Desde o início das atividades da Concessionária da Rodovia Presidente Dutra, considerou-se a qualidade como um esforço conjunto com as empresas terceirizadas. Um dos aspectos mais importantes durante os serviços com misturas asfálticas é o seu espalhamento adequado.

- **Curso de operação de rolos com qualidade**

Este treinamento teve como foco o processo de compactação, visando assegurar as melhores condições disponíveis de operação dos rolos, garantindo acabamento e densidade dentro dos padrões especificados. Para o treinamento, elaborou-se um documento com as descrições dos fatores chaves envolvidos na execução da camada de revestimento de alta qualidade, desempenada e que atenda às densidades específicas.

Durante o treinamento, constatou-se a importância de obter a rolagem correta para garantir uma melhor durabilidade do pavimento de CBUQ. Os participantes foram lembrados de que focar no processo de compactação também significa certificar-se de que as melhores condições possíveis estão disponíveis para a equipe atender às especificações. Isso inclui gerenciamento tanto na produção da usina como nos caminhões de transporte, para garantir que a acabadora possa rodar continuamente, executando uma camada de massa uniforme para ser compactada.

Foram considerados fatores de seleção de equipamento para cada tipo de mistura asfáltica, além de sua adequada inspeção, manutenção e operação. Temas relacionados ao controle dos custos também tiveram um amplo escopo no material de treinamento.

Por fim, foram abordados os fatores que influenciam no procedimento de compactação, tais como os materiais, as espessuras de trabalho e as condições climáticas no dia da compactação. Além disso, foi dada ênfase ao emprego de trechos experimentais no início das obras e quando ocorrer mudanças de materiais.

6.3. Avaliação da Utilização da Cal Hidratada para Combater Susceptibilidade de Misturas Betuminosas à Ação da Água e Melhorar a Adesividade do Ligante ao Agregado

A cal hidratada é um aditivo bastante utilizado na composição de misturas asfálticas. Seu uso e os benefícios decorrentes são bem referenciados há muitas décadas, mas adquiriu especial atenção a partir dos anos 1970, nos Estados Unidos, como consequência da redução da qualidade dos ligantes asfálticos – por sua vez, devido à crise do petróleo de 1973. Nessa década, foi notório o incremento de defeitos em pavimentos asfálticos, atribuídos à falta de aderência do ligante asfáltico aos agregados. A cal hidratada foi considerada o aditivo mais eficaz para reverter essas deficiências e hoje em dia muitos países e agências rodoviárias recomendam seu emprego para essa finalidade.

Nesta pesquisa foi utilizado o procedimento da AASHTO T283 para prever a susceptibilidade ao descolamento de película de asfalto a longo prazo e para avaliar aditivos melhoradores de adesividade, a partir da avaliação do dano por umidade induzida. Nesta metodologia, corpos de prova (CPs) cilíndricos de são compactados no Marshall com 75 golpes por face.

Após a compactação, três CPs são saturados até preencher de 70% a 80% dos vazios com água, e são condicionados durante 18 horas na temperatura de -18°C e, após esse período, durante mais 24 horas no banho-maria a 60°C. Imediatamente, os CPs são resfriados até temperatura constante de 25°C para execução do ensaio de compressão diametral e obtenção do parâmetro de resistência à tração por compressão diametral (RT). Os CPs condicionados devem apresentar resistência retida à tração (RRT) de, no mínimo, 70%, em comparação aos

CPs não condicionados. Vale salientar que a norma DNIT 031/2006-ES, especifica no mínimo valores de 0,65 MPa para concreto asfáltico convencional.

Nesta pesquisa, o objetivo foi verificar os benefícios trazidos pelos diferentes tipos de polímeros (SBS, SBR, EVA) disponíveis na época com relação ao Dano por Umidade Induzida.

Esta avaliação foi realizada para a granulometria do micro revestimento asfáltico usinado à quente. Todas as misturas avaliadas utilizaram a mesma fonte de agregados e o mesmo teor de ligante asfáltico

Os resultados obtidos mostram que as misturas asfálticas que não fizeram o uso de cal hidratada apresentaram valores de relação de resistência à tração (RRT) inferiores a 75%. Pode-se verificar, na Figura 6, que os CPs sem adição de cal apresentam descolamento do ligante asfáltico dos agregados minerais mais graúdos, constatando a má adesividade dos agregados utilizados neste estudo. Além disso, pode-se observar que nos CPs com a adição de cal hidratada não houve um comportamento similar na ruptura, e que o ligante asfáltico manteve-se aderido aos agregados minerais mais graúdos.



FIGURA 6. APARÊNCIA DOS CPS CONDICIONADOS APÓS RUPTURA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados indicaram que a adição da cal nas misturas asfálticas melhora suas características de adesividade. O teor de 1,5% de cal hidratada, utilizado neste estudo, mostrou-se adequado para alcançar resultados satisfatórios que atendam aos parâmetros mínimos de qualidade.

A experiência no Grupo CCR, tanto em obras de conservação como na construção de novos pavimentos, indica excelentes resultados quanto à durabilidade e resistência à ação deletéria da água nas misturas asfálticas que fizeram uso da cal hidratada em sua composição.

6.4. Avaliação de Danos por Umidade Induzida, Módulo de Resiliência e Fadiga em Misturas Confeccionadas com Diversos Polímeros

Desenvolvida em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-PTR-EPUSP), a pesquisa teve como objetivo avaliar a durabilidade de misturas asfálticas quando submetidas à ação da água. As misturas asfálticas utilizadas foram características da região da divisa entre o Estado de São Paulo e o Estado do Rio de Janeiro, onde, na época, haviam problemas recorrentes associados à adesividade. Para desenvolvimento desse estudo, um planejamento laboratorial foi realizado para a execução de ensaios com diferentes tipos de ligantes asfálticos (CAP20; CAP Polímero SBS e CAP Polímero EVA), conteúdos de cal (1,0%) e melhoradores de adesividade (0,25%) adicionados ao ligante asfáltico.

As misturas asfálticas foram submetidas aos seguintes ensaios realizados no LTP da EP-USP:

- **Deformação permanente em trilhas de roda em equipamento tipo LCPC** para todos os CPs sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- **Módulo de Resiliência** de corpos de prova (CPs) extraídos de placas compactadas em mesa compactadora tipo LPC com aproximadamente 4% de vazios para todos os CPs sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- **Resistência à tração por compressão diametral** de corpos de prova extraídos de placas compactadas em mesa compactadora com cerca de 4% de vazios para todos os CPs sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- **Módulo de Resiliência** de corpos de prova compactados no Marshall com aproximadamente 4% de vazios para todos os CPs sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).
- **Resistência à tração por compressão diametral** de corpos de prova compactados no Marshall com aproximadamente 4% de vazios para todos os CPs sem condicionamento e com condicionamento (imersão em água a 60°C por 4 dias).

RESULTADOS DO ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A norma francesa estabelece a porcentagem aceitável de deformação permanente de até 10% em 30.000 ciclos, sendo que esta condição correlaciona-se com camada de rolamento de até 5,0 cm de espessura para tráfego pesado. Os resultados para as amostras condicionadas a seco e condicionadas em água com temperatura de 60°C durante 96 horas mostram que o condicionamento teve pouca ou nenhuma influência nos valores de deformação permanente. Assim, os resultados de deformação permanente de todas as misturas mostraram-se bastante satisfatórios.

RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado em CPs extraídos das placas moldadas na mesa compactadora tipo LCPC e em CPs moldados no compactador Marshall, com e sem condicionamento. Pode-se observar que os ligantes asfálticos modificados com EVA e SBS apresentaram valores de resistência à tração na ordem de 0,8 a 1,0 MPa, tanto para CPs com cal como aditivo químico (dope), como melhoradores,

e também com ou sem condicionamento. Nos casos em que foi utilizado o asfalto modificado com SBR, foram obtidos valores de RT de 0,6 até 0,8MPa, e, com CAP20, esse parâmetro variou de 0,8 até 1,3MPa, sendo que os maiores valores foram obtidos para corpos de prova extraídos de placas. Considerando os valores de RT dos CPs extraídos de placas, pode-se observar que não há praticamente perdas em presença de água, constatada neste ensaio, principalmente para os asfaltos modificados. O CAP20 apresenta uma perda de RT de 20 a 30%, se comparado com a RT de CPs sem condicionamento prévio. Notou-se que por meio do condicionamento aplicado em CPs com ligantes asfálticos modificados para o ensaio de RT não foi possível detectar problemas de adesividade ligante/agregado.

RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os valores de módulo de resiliência, MR, obtidos para o ligante CAP20, tanto com uso de aditivo químico como o uso da cal, como melhoradores de adesividade ligante/agregado, mostraram-se bastante elevados para corpos de prova extraídos de placas quando não submetidos previamente ao condicionamento. Os valores de MR de corpos de prova extraídos de placas dosadas com CAP20 e submetidos previamente ao condicionamento – 96 horas de imersão em água à temperatura de 60°C – apresentaram valores inferiores. Isso demonstra que o CAP20 dosado com aditivo químico ou cal mostrou-se bastante sensível ao condicionamento. A perda no valor de MR para o ligante CAP20, quando submetido previamente ao condicionamento, foi da ordem de 60% para misturas dosadas com cal e de 35% para misturas dosadas com aditivo químico. Isso demonstra que o aditivo químico, como melhorador de adesividade, ligante/agregado, obteve maior efetividade.

Com os demais ligantes modificados com SBR, SBS e EVA, os resultados de MR sem condicionamento não foram tão elevados, se comparados com o valor de MR do CAP20, mostrando a flexibilidade e retorno elástico melhor conferido às misturas asfálticas pelos ligantes modificados. Quando submetidos previamente ao condicionamento, os valores se mantiveram, exceto para o ligante modificado por SBS, que apresentou um módulo de resiliência mais baixo. As camadas de rolamento constituídas por misturas asfálticas devem possuir mobilidade suficiente para suportar a flexibilidade exigida, compatível com toda a estrutura e magnitude das cargas.

Misturas asfálticas com valores de MR elevados, portanto, bastante rígidas, podem vir a desenvolver rapidamente trincamento por fadiga se a espessura e a compatibilização estrutural não suportarem as amplitudes dos deslocamentos impostos. As misturas asfálticas, como utilizadas no Brasil em pavimentos flexíveis na maior parte das rodovias, devem possuir flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego, caracterizando-as como não tão rígidas.

RESULTADOS DO ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Os resultados dos ensaios realizados na mistura asfáltica sem melhorador de adesividade, com cal e com aditivo químico, mostram que, para o CAP20 sem nenhum agente melhorador de adesividade, as perdas ocasionadas pelo condicionamento foram de aproximadamente 60%; a adição de cal e do aditivo químico reduziram a perda, incrementando o valor da relação da resistência à tração retida (RTR). As misturas asfálticas moldadas com os ligantes asfálticos modificados de SBR e EVA apresentaram perdas de resistência à tração na ordem de 30% a 40%.

A relação da resistência retida das misturas asfálticas dosadas com ligantes modificados e com CAP20 com cal e com aditivo químico apresentaram valor de relação de resistência retida da ordem de 60 a 70%.

O valor de 70% é considerado como sendo o limite inferior recomendável para misturas asfálticas com bons desempenhos de campo. Assim, conclui-se que a mistura estudada com CAP20 sem melhoradores de adesividade não deve ser utilizada. Já as misturas com melhoradores de adesividade estudadas, seja esta com CAP20, como com os ligantes modificados com polímeros, mostram-se com comportamento quanto à adesividade ligante/agregado melhor do que o CAP20 puro, porém não atingem valores considerados bons em relação à resistência retida. Ou seja, seria recomendável nesses casos um aumento da porcentagem de cal ou de aditivo químico líquido, embora nada se possa afirmar sem resultados de ensaios. Dependendo dos valores obtidos, poder-se-ia rejeitar a pedreira em questão.

6.5. Comparativo da Qualidade entre Misturas Betuminosas Executadas em Usinas Gravimétricas e *Drum Mixers*

A produção de uma mistura asfáltica está relacionada à mistura de agregados minerais com um ligante asfáltico, em proporções determinadas no projeto de dosagem laboratorial, com a finalidade de produzir uma massa homogênea. Para as misturas asfálticas que fazem uso do cimento asfáltico de petróleo (CAP), o agregado deve ser aquecido previamente para remoção de umidade e aumento da sua temperatura, possibilitando o envolvimento completo com o ligante asfáltico. Para realização desses procedimentos, é necessário um local com instalações apropriadas com equipamentos adequados, conhecidos como usinas de asfalto, uma simplificação da designação, visto que se trata de usinas para a produção de misturas asfálticas a quente. Caso o ligante utilizado seja emulsão asfáltica, as usinas são para misturas a frio.

Existem dois tipos básicos de usina de asfalto: a usina de produção por batelada ou gravimétrica (Figura 7), que produz quantidades unitárias de misturas asfálticas, e a usina de produção contínua ou *drum mixer* (Figura 8), cuja produção é contínua, como a própria designação classifica. Os dois tipos de usinas têm condições de produzir as misturas asfálticas em uso corrente no país – ao longo da Rodovia Presidente Dutra, existem diversos fornecedores que fazem uso de ambas as tecnologias.

O objetivo deste estudo foi verificar se haveria diferenças significativas nos produtos finais de ambas as usinas. Assim, foi realizada a aferição do desvio do teor de ligante asfáltico aplicado por usinas *drum mixers* ou contínuas e por usinas por bateladas ou gravimétricas. A seleção das usinas foi definida em função do fornecimento de misturas asfálticas à CCR NovaDutra na época de realização da pesquisa. Os dados foram coletadas

de todas as usinas que fornecem misturas asfálticas para as atividades de conservação do pavimento da Rodovia Presidente Dutra. Ao todo, foram três usinas *drum mixers* e duas usinas do tipo gravimétrica.

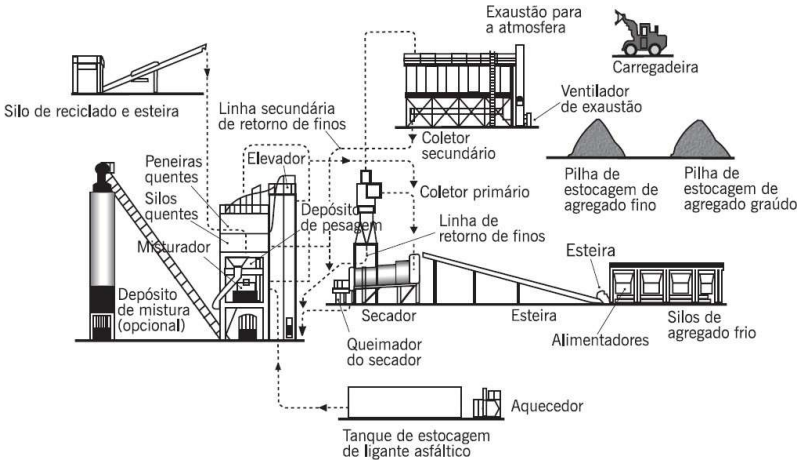


FIGURA 7. ESQUEMA DE UMA USINA ASFÁLTICA POR BATELADA. FONTE: BERNUCCI ET AL. (2008)

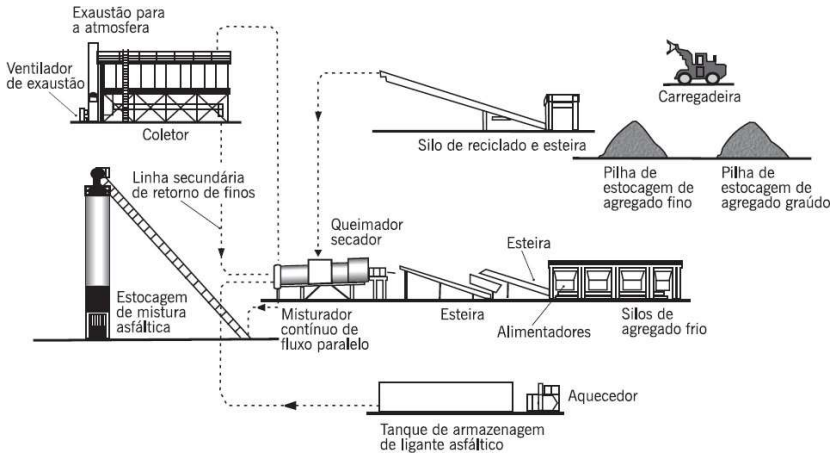


FIGURA 8. ESQUEMA DE UMA USINA ASFÁLTICA CONTÍNUA FONTE: BERNUCCI ET AL. (2008)

Os resultados mostraram que houve pouca variação em todas as usinas asfálticas, sejam do tipo *drum mixer* ou gravimétrica. Concluiu-se então que o tipo de usina não influencia significativamente na precisão do teor de ligante asfáltico adicionado nas misturas asfálticas. Durante o monitoramento desta pesquisa, o fator humano demonstrou ser mais significativo neste parâmetro, o qual é influenciado diretamente pelo treinamento adequado e experiência dos operadores.

6.6. Análise dos Métodos DNER e ASTM para o Ensaio de Densidade de Corpos de Prova Marshall

A diferença básica entre os dois métodos (DNER e ASTM) está no procedimento para determinação da densidade sem capeamento com parafina. No método do DNER, o capeamento com parafina é obrigatório, quando o índice de vazios ultrapassa 7%. No método da ASTM, o uso de parafina é recomendado quando a absorção de água pelo corpo de prova ultrapassa 2%.

Para este estudo, foram analisados 469 corpos de prova extraídos da pista das rodovias Anhanguera/Bandeirantes e Dutra. Novos corpos de provas foram também moldados em laboratório, utilizando-se os diferentes métodos de ensaio. As Figuras 9 e 10 mostram os resultados encontrados.

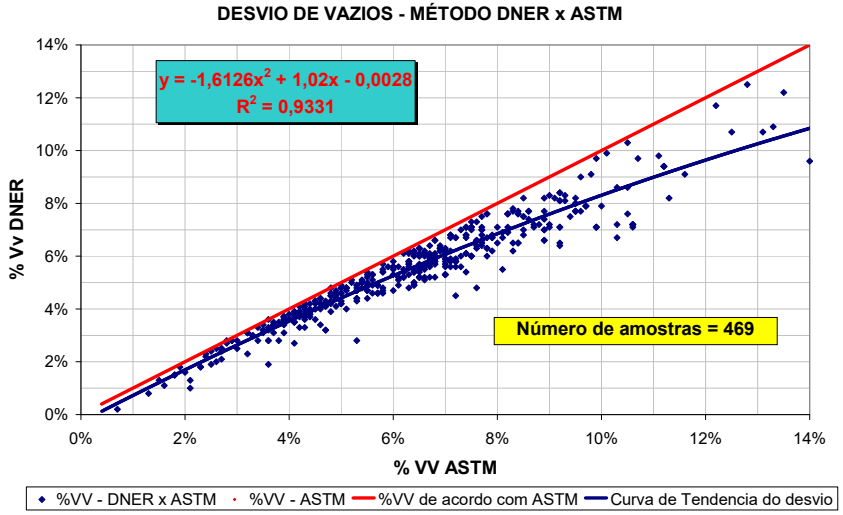
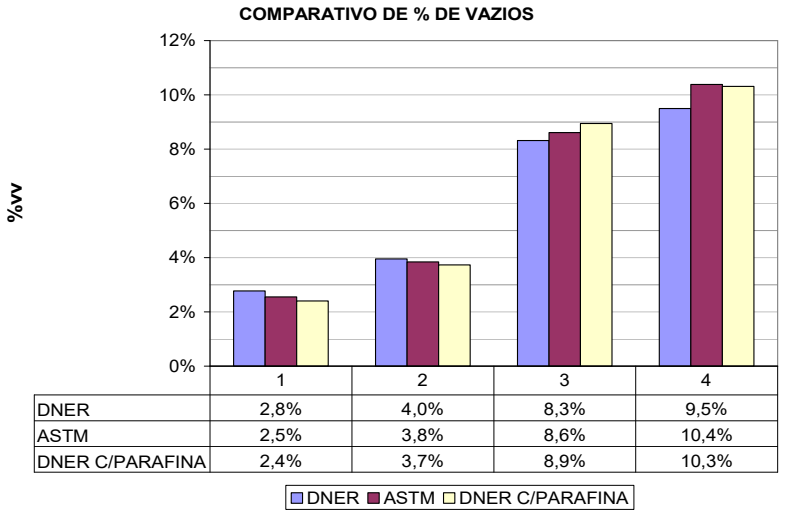


FIGURA 9. COMPARAÇÃO ENTRE PORCENTAGEM DE VAZIOS DETERMINADOS PELOS MÉTODOS DNER E ASTM.



	1	2	3	4
DNER	2,8%	4,0%	8,3%	9,5%
ASTM	2,5%	3,8%	8,6%	10,4%
DNER C/PARAFINA	2,4%	3,7%	8,9%	10,3%

FIGURA 10. COMPARATIVO ENTRE PORCENTAGEM DE VAZIOS DETERMINADOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS.

Pode-se constatar pelos gráficos das Figuras 9 e 10 que o método adotado atualmente pela ASTM tem uma precisão maior do que o adotado pelo DNER. Vale ressaltar que o ensaio feito com corpos de prova com volume de vazios com parafina é necessário, pois não permite a entrada de água dentro dos mesmos.

6.7. Utilização do Elvaloy como Aditivo ao Ligante no CBUQ

A evolução das tecnologias de materiais rodoviários traz para o mercado diferentes métodos e soluções que podem ser aplicados na construção e manutenção dos pavimentos. Nesta pesquisa, especificamente foi avaliada a utilização do polímero do tipo "Elvaloy" em ligantes asfálticos para a produção de misturas asfálticas.

Produção do ligante asfáltico modificado

A incorporação do polímero Elvaloy foi realizada diretamente em um tanque da usina de asfalto, que contava com um sistema de aquecimento por óleo térmico. Neste tanque foram colocados dois eixos misturadores, situados em seu quartil longitudinal, de maneira a garantir uma agitação completa do ligante asfáltico. Também foi montado um sistema de alimentação para a introdução do polímero Elvaloy e ácido polifosfórico no tanque.

A incorporação do polímero Elvaloy, fabricado pela DUPONT, ao CAP40, foi realizada na usina de asfalto da Construtora Estrutural, situada nas proximidades de Campinas (SP), conhecida como BASALTO 6. A incorporação, orientada pelos técnicos da DUPONT e DYNATEST, foi realizada na proporção de 1,5% Elvaloy com 0,2% de ácido fosfórico – o qual foi usado como catalisador –, em relação ao peso do CAP. A temperatura do ligante para incorporar o Elvaloy é de 185°C ± 5°C.

A colocação do polímero foi realizada de manualmente. A agitação para homogeneização foi de aproximadamente 3 horas, sendo o ensaio de retorno elástico do ligante utilizado como o parâmetro de controle para verificar a completa incorporação do polímero no ligante asfáltico.

Dosagem das misturas asfálticas

Para a execução dos serviços, foram elaboradas duas dosagens de misturas asfálticas no CPR, sendo uma com o CAP40, usado como dosagem de controle, e outra com o CAP40 modificado com 1,5% de Elvaloy (Tabela 1). A faixa granulométrica adotada foi a Faixa III do DERSA, correspondente também à Faixa Mix Ivb do Asphalt Institute.

Tabela 1. Resultados das dosagens das misturas asfálticas realizadas no CPR

ENSAIOS	CAP40	CAP40 + 1,5% Elvaloy
Ligante asfáltico de projeto (%)	**5,3**	**5,9**
Ligante asfáltico efetivo (%)	**5,1**	**5,7**
Absorção de ligante (%)	**0,2**	**0,2**
Massa específica máxima teórica (g/cm^3)	**2,503**	**2,484**
Massa específica aparente da mistura (g/cm^3)	**2,404**	**2,387**
Resistência à tração (7 ± 1%VV) (MPa)	**1,2**	**1,6**
Danos por umidade induzida – AASHTO T 283 (%)	**89,0**	**79,0**
Volume de vazios (Vv) (%)	**3,9**	**3,9**
Vazios do Agregado Mineral (VAM) (%)	**16,1**	**17,2**
Relação betume x vazios (RBV) (%)	**75,6**	**77,5**
Estabilidade Marshall (kgf)	**1.444**	**2.073**
Fluência (pol)	**15,2 x 0,01**	**19,9 x 0,01**
Relação fíler x betume	**1,4**	**1,3**
Cal hidratada CH-1 (% da mistura total)	**1,4**	**1,4**

Vale destacar que, na mistura asfáltica com CAP40 + 1,5% de Elvaloy, a estabilidade Marshall foi maior, indicando uma melhor resistência à deformação permanente, quando comparado com a mistura asfáltica de controle, com CAP40.

EXECUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS

Para avaliação da aplicação desta tecnologia, foram executados trechos experimentais em segmentos contínuos de comportamento estrutural similar, com mesmo volume de tráfego, sem ação de outras variáveis no experimento. Os trechos foram divididos da seguinte maneira:

- **Pista de referência**: realização de serviço de reparos localizados, fresando-se 4 cm, preenchidos com CBUQ, faixa III do DERSA, usando como ligante CAP20. Neste segmento, foi então prevista a execução de CBUQ, faixa III do DERSA, porém usando CAP40 na espessura de 4 cm.
- **Trecho experimental**: para comparar com a pista de referência e com o mesmo tipo de pavimento, houve fresagem de 4 cm e preenchimento com CBUQ, com previsão de reforço de 4 cm, a ser executado com CAP40 modificado com 1,5% de Elvaloy, conforme orientação da DYNATEST, responsável pela pesquisa.
- **Trecho para avaliar ganho de vida útil**: foi projetado um reforço de 8 cm, dividido em duas camadas de 4 cm cada – a primeira com CBUQ usando como ligante CAP 20 e a segunda com CAP 40 modificado com 1,5% de Elvaloy.
- **Trecho com espessura maior para avaliar ganho de vida útil**: foi projetado um reforço de 6 cm, executado com CBUQ, usando como ligante CAP 40 modificado com 1,5% de Elvaloy.

Antes da aplicação das misturas asfálticas em estudo, a pista foi varrida, eliminando qualquer tipo de material estranho solto. Em seguida, foi aplicada uma pintura de ligação com emulsão RR-2C na faixa a ser pavimentada.

Para garantir uma boa compactação da mistura asfáltica na pista, a temperatura de mistura na usina variou de 170°C a 185°C. Na pista, a temperatura de descarga na acabadora foi mantida acima de 165°C. Com isto, garantiu-se a compactação sem problemas, com o índice de vazios inferior a 7%, previsto pela especificação, no caso das misturas asfálticas densas com asfalto modificado. A Figura 11 apresenta algumas imagens da aplicação das misturas asfálticas nos trechos experimentais.

O controle de execução, realizado pelo laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias, da CCR NovaDutra, indicou que os serviços atenderam aos parâmetros de qualidade para produção, aplicação e compactação. Devido à sua maior flexibilidade – retorno elástico por torção maior que 60% –, o trecho experimental com o ligante asfáltico modificado pelo polímero Elvaloy apresentou maior vida de fadiga quando comparado com o trecho executado com a mistura asfáltica de controle.



FIGURA 11. CONSTRUÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS.

6.8. Avaliação de Cimentos Asfálticos de Petróleo para Emprego em Pavimentação no Brasil

A partir da coleta de amostras de ligantes asfálticos nas refinarias da Petrobras (referência), nos caminhões transportadores e nos tanques das usinas produtoras de misturas asfálticas, esta pesquisa teve como objetivo verificar a qualidade e o atendimento desses materiais às normas vigentes.

As amostras coletadas nos caminhões transportadores possibilitaram verificar a presença de contaminações por resíduos de produtos anteriormente transportados e possíveis impactos na consistência do material em decorrência do tempo de permanência do CAP no caminhão – desde o carregamento na refinaria até o descarregamento na usina – e do aquecimento do material antes do descarregamento.

Com o material coletado dos tanques das usinas produtoras verificou-se a ocorrência de alteração do CAP durante a estocagem. Misturas asfálticas preparadas em usinas gravimétricas e Drum Mixer foram recolhidas nos locais de aplicação, para análise em laboratório de possíveis alterações nas características do CAP.

Os ensaios com as amostras coletadas foram realilzados no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP, no Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), no CENPES, na COPPE, na Concessionária CCR NovaDutra e na Ipiranga Asfaltos.

A partir dos resultados dos ensaios realizados, considera-se que o asfalto satisfaz às especificações vigentes, embora alguns resultados encontrados estejam muito próximos ou, em alguns casos, ultrapassando os limites.

Apesar do ligante asfáltico satisfazer às atuais especificações, não elimina a constatação de **heterogeneidade** do produto, face aos resultados dispersos encontrados em amostras de uma mesma refinaria ou em refinarias distintas. A heterogeneidade apresenta-se bem evidente quando comparados aos resultados do fracionamento químico.

É preocupante constatar que, na falta de asfalto na região de abrangência de uma refinaria, a região é atendida por outra, cujo material pode apresentar características química e reológica muito diferentes. Essa ocorrência pode provocar consequências drásticas no abastecimento das usinas de misturas asfálticas (problemas de tancagem, mistura de asfaltos diferentes, dosagem), o que pode vir a comprometer seriamente a qualidade do serviço. É necessário exigir, do fabricante do asfalto, o certificado de análise contendo resultados de caracterização, determinados pela especificação, correspondente à data de fabricação ou ao dia de carregamento e transporte para o canteiro de serviço. Novas análises de confirmação deverão ser realizadas, caso o período entre essas duas datas exceder o período de 5 dias.

Entre as medidas de consistência do asfalto, a penetração a 25ºC apresenta satisfatória precisão, sendo bastante difundida mundialmente e a que mais se aproxima à nossa realidade, pois diz respeito à simplicidade, ao custo e à possibilidade de estabelecer correlações com a evolução do ligante durante a aplicação. *A priori*, é necessário estabelecer o valor da relação (penetração antes e após o teste RTFOT) a um mínimo de 60% para penetração residual para o CAP 30/45 e CAP 50/60 e 55% para o CAP 85/100 (excluir da especificação o CAP 150/200). Essa relação possibilita limitar a degradação do ligante sofrida durante o processo de usinagem, sendo um fator importante na ocorrência de desordens em revestimentos betuminosos.

- **Limitar o Índice de Suscetibilidade Térmica aos valores de -1 a +1:** excluir petróleos que produzam asfaltos com acentuada suscetibilidade às variações de temperatura, diminuindo a incidência

à formação de trilha de rodas em revestimentos asfálticos submetidos ao trafego pesado e à temperatura elevada.

- **Limitar em 8°C a diferença do ponto de amolecimento antes e após RTFOT:** diminuir os riscos de fissuramento por fadiga térmica, permanecendo viva a propriedade auto-reparadora em revestimentos expostos às grandes variações de temperaturas diurnas e noturnas.
- **Determinação da viscosidade (SSF ou Brookfield):** tem por finalidade conhecer a temperatura ótima para bombeamento e estocagem, além de possibilitar a construção da curva de viscosidade *versus* temperatura, com a finalidade de indicar a faixa de temperatura para o projeto de mistura asfáltica.
- **Limitar a perda por aquecimento em 0,5% em massa, determinada no ensaio RTFOT:** promover uma melhoria ao meio ambiente e uma resistência ao envelhecimento precoce do asfalto.
- **Adotar o ensaio de destilação por arraste limitando o valor da perda em massa em 1%:** minimizar o aumento da consistência do CAP durante a usinagem em usina tipo Drum Mixer.

Uma indicação quanto à natureza química dominante (aromático ou naftênico) poderá constar no certificado emitido pelo fabricante. Esta indicação tem por objetivo auxiliar o projetista da mistura asfáltica na seleção mais adequada do ligante betuminoso para o serviço a que se propõe (misturas densas ou misturas com elevado teor de vazios), visando maior resistência ao envelhecimento.

É necessário excluir o emprego de asfaltos obtidos de misturas de resíduos em unidades de refino com diluentes, tais como extrato aromáticos e óleos de xisto sem comprovação prática. O desequilíbrio do sistema coloidal do asfalto pode acarretar fenômenos drásticos como, por exemplo, a exsudação ou espelhamento em revestimentos asfálticos.

O asfalto deve possuir características que permitam apresentar condição para usinagem na temperatura mais baixa possível e que corresponda a viscosidade 80 ± 5 SSF.

A ação da insolação e temperatura ambiente elevada exercem modificações significativas nas características do asfalto aplicado. Em termos genéricos, o Brasil é considerado um pais de clima tropical e, por conseguinte, sob a influência dominante de temperaturas elevadas. A reprodução desses efeitos em laboratório permanece ainda no campo duvidoso, muito embora uma infinidade de trabalhos tenha sido feita, alguns com boa aproximação e aceitação para climas continental e temperado. Entre esses trabalhos de pesquisa, o teste RTFOT+ PAV, desenvolvido no projeto SHRP, é adotado na especificação do Superpave. Da mesma forma, o LCPC, em trabalhos de avaliação do asfalto em serviço, tem adotado o teste RTFOT+PAV como sendo o único parâmetro que correlaciona o ligante envelhecido artificialmente com a rodovia. Para as nossas condições de clima, torna-se imprescindível a confirmação dessa correlação através da realização de trechos experimentais devidamente monitorados ao longo do tempo em serviço.

Não obstante, o asfalto pode não representar mais do que 2% do consumo total dos produtos de petróleo, porém é um material de grande importância e suficientemente oneroso para a construção rodoviária, devendo ser tratado como um bem durável e reciclável. Qualquer tentativa no sentido de garantir resistência ao envelhecimento é válida.

6.9. Avaliação do Equipamento "Grip Tester" para Medição de Atrito

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o emprego do "*Grip Tester*" em diferentes trechos da Rodovia Presidente Dutra, com texturas superficiais distintas, para medição de resistência à derrapagem do revestimento, por meio do coeficiente de atrito determinado na pista, chamado de "*Grip Number*" (GN).

Nos pavimentos rodoviários, o atrito ou aderência pneu-pavimento é imprescindível para garantir a segurança dos usuários desse meio de transporte e dos bens através dele transportados. Na prática, qualquer revestimento de pavimento apresenta valores suficientes de resistência à derrapagem enquanto seco e sem outro elemento lubrificante sobre si. Isso equivale a dizer que só haverá problemas de insuficiência de atrito que possam causar um acidente se algum outro líquido for acidentalmente espargido ou na presença de um filme de água sobre a superfície do revestimento do pavimento, lubrificando o contato pneu-pavimento.

Nos ensaios de atrito, monitora-se a situação menos favorável, ou seja, a situação de chuva – simulada, no caso da medição do atrito pelo "*Grip Tester*", pelo espargimento de água com vazão constante na frente da roda teste do equipamento. A vazão utilizada é proporcional à velocidade de deslocamento do equipamento, sendo essa suficiente para criar uma película de água com espessura de 0,25 mm.

O atrito presente no contato pneu-pavimento pode ser classificado em uma escala em função da segurança que ele garante, que varia de insuficiente a suficiente, conforme as rampas, as curvas e as interseções em nível presentes na via, e a velocidade diretriz preconizada.

As situações extremas de necessidade de aderência pneu-pavimento são:

- **Mínimas:** no caso de via expressa (sem interseções em nível), com rampas pouco acentuadas e raios de curvas horizontais grandes, permitindo velocidade diretriz alta; e
- **Máximas:** no caso de via urbana com abordagem à travessia de pedestres em nível.

O equipamento "*Grip Tester*", disponibilizado pela COPAVEL Consultoria de Engenharia Ltda., opera segundo o princípio de roda freada e arrasto fixo, com as forças vertical e horizontal sendo continuamente medidas e totalizadas a cada 10 m do levantamento. Neste estudo, empregou-se uma caminhonete Ford Courier equipada com um tanque de 400 L de água e equipamento controlador de vazão desta, espargindo-a sob a roda teste proporcionalmente para cada velocidade de levantamento, de modo a garantir um filme de água de espessura fixa igual a 0,25 mm. Na Figura 12 apresenta-se o equipamento utilizado neste estudo.



FIGURA 12. EQUIPAMENTO UTILIZADO NO MONITORAMENTO DO COEFICIENTE DE ATRITO.

No Brasil, ainda não existem normas para este levantamento de resistência à derrapagem ou para coeficiente de atrito aplicado aos pavimentos rodoviários. No entanto, a publicação do IPR-DNER "Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros", de 1998, indica, em seu Relatório Final, uma sugestão de avaliação das condições de Resistência à Derrapagem, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Avaliação das condições de segurança em função do coeficiente de atrito.

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA	
ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO OU RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM (CA - COEFICIENTE DE ATRITO)	
CLASSES DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM	
1. PERIGOSA	**< 0,24**
2. MUITO LISA	**0,24 - 0,30**
3. LISA	**0,31 - 0,37**
4. INSUFICIENTEMENTE RUGOSA	**0,38 - 0,44**
5. MEDIANAMENTE RUGOSA	**0,45 - 0,51**
6. RUGOSA	**0,52 - 0,72**
7. MUITO RUGOSA	**> 0,72**

FONTE: PUBLICAÇÃO IPR-DNER (1998).

Durante a pesquisa, realizada em julho de 2003, foi monitorado o coeficiente de atrito em 100 km de segmentos da Via Dutra, divididos em função de tipo de revestimento existente e em pontos considerados problemáticos pela operação da rodovia. A metodologia utilizada para a análise dos trechos foi separá-la por segmentos que tinham o mesmo tipo de revestimento e fazer uma avaliação individual dos mesmos. Posteriormente, os segmentos de mesmo revestimento foram agrupados para termos uma avaliação geral de resultados de "Grip Test" das diferenças entre os diversos tipos de revestimento. Os resultados de *"Grip Number"* para os diferentes tipos de pavimento, obtidos na Via Dutra, são apresentados na Tabela 3 e na Figura 13.

Tabela 3. Resultados de "Grip Number" em distintos revestimentos da Via Dutra

TIPO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO	*GN*
CBUQ COM ATÉ 4 ANOS	**0,37**
CBUQ COM ATÉ 7 ANOS	**0,35**
CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)	**0,37**
MICROREVESTIMENTO À FRIO	**0,40**
MICRO REVESTIMENTO À QUENTE (FAIXA III ISSA)	**0,39**
MICRO REVESTIMENTO À QUENTE (RUGOSO)	**0,45**
STONE MATRIX ASPHALT (SMA)	**0,43**

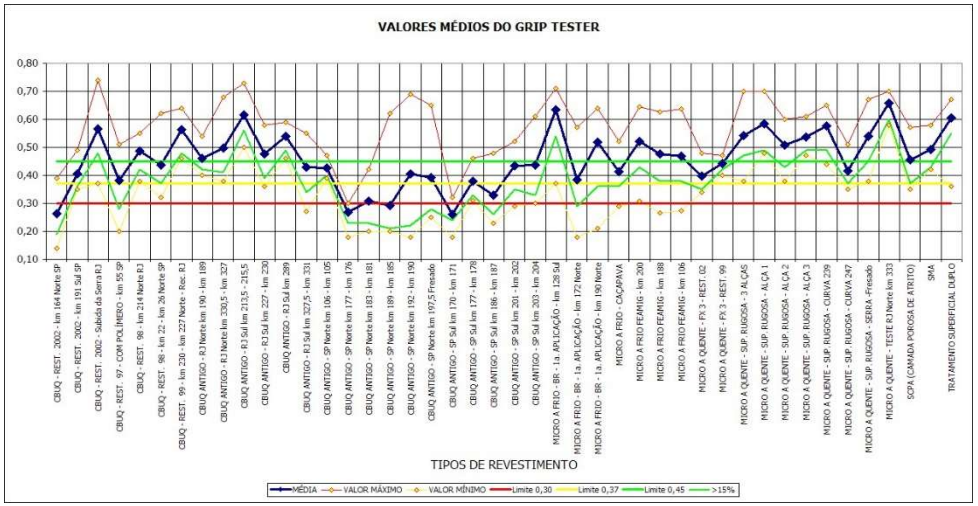


FIGURA 13:. VALORES MÉDIOS DO *"GRIP TESTER"* OBTIDOS EM DIFERENTES SEGMENTOS DA VIA DUTRA

6.10. Relação de óxido de cálcio na cal hidratada para efeito de adesividade

Depois da avaliação do comportamento da cal hidratada como aditivo melhorador de adesividade, constatou-se que algumas davam resultados aquém do esperado. Foi iniciada então uma avaliação do teor de óxido de cálcio para avaliar a qualidade dos cales. A necessidade de se ter uma avaliação do comportamento das diferentes cales levou ao desenvolvimento desta pesquisa.

Foram utilizados agregados de matrizes diversas para a avaliação do comportamento de uma mistura betuminosa com diferentes teores de Óxido de Cálcio (CaO).

Foram utilizadas diversas faixas granulométricas, mas resultados obtidos em ensaios anteriores mostraram que a adição de cal hidratada a uma mistura betuminosa melhora significativamente a adesividade da mistura independente da matriz da rocha e da curva granulométrica. O teor de cal adotado em todas as misturas foi 1,5%, escolhido por se tratar do teor mínimo para confiabilidade de dosagem na usina.

Como se pode perceber, as porcentagens de Óxido de Cálcio disponíveis ultrapassavam os 40%, o que nos davam valores de danos por umidade induzida – AASHTO T283 acima de 75%. O resultado do Resíduo da Resistência à Tração – RRT - obtido com a mistura sem cal foi 30%. Com isto foi traçado um gráfico mostrando uma relação direta entre a porcentagem de óxido de cálcio e o Resíduo de Resistência a Tração.

20 - Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfálticas de elevado módulo - Concessionária Nova Dutra/ ENGELOG / Grupo CCR/Escola Politécnica da USP

O objetivo deste projeto de pesquisa é analisar a viabilidade técnica da utilização de misturas de elevado módulo, conhecidas na França por “Enrobé à Module Élevé", produzidas com ligantes de alta consistência, com valores de penetração a 25 °C entre 10 e 25 décimos de milímetro, bem como estabelecer indicadores de desempenho que possam servir de base ao desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de camadas de reforço de alto módulo baseada nos seus desempenhos mecânicos.

As misturas de elevado módulo (MEM) têm sido utilizadas com sucesso em alguns países europeus, notadamente na França, nos casos em que as condições locais não são favoráveis, seja pela insuficiência de agregados de boa qualidade, seja pela baixa capacidade de suporte do solo de fundação ou pela alta solicitação do tráfego.

São utilizadas em camadas estruturais de pavimentos rodoviários e aeroportuários e apresentam desempenho superior, quando comparada às misturas convencionais, face aos mecanismos de ruína considerados no dimensionamento (trincas por fadiga e deformação permanente nas trilhas de roda).

Tratando-se de um material de pavimentação ainda não utilizado no Brasil, este trabalho objetiva identificar as situações em que a utilização de misturas de alto módulo pode apresentar vantagens técnicas significativas em relação aos materiais convencionais.

Para a avaliação das propriedades mecânicas em laboratório, as misturas convencionais e de elevado módulo serão submetidas ao ensaio de compressão diametral dinâmico para determinação do módulo de resiliência, ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ao ensaio para determinação da vida de fadiga por método similar, além de deformação permanente em trilha de roda. Além dos ensaios para caracterização mecânica da mistura, será executado um trecho

experimental, submetido a tráfego real, para avaliação de seu desempenho estrutural e funcional.

Por meio de um estudo paramétrico, tem-se como meta verificar o comportamento deste novo material, utilizado principalmente em camada intermediária do revestimento asfáltico, através da análise computacional de tensões e extensões em pontos específicos do pavimento.

6.11. Avaliação do Teor de Asfalto em Volume dos Projetos de Misturas Utilizados na Rodovia Presidente Dutra

Normalmente os projetos de dosagem indicam sempre o teor de asfalto em porcentagem sobre o peso da massa. Este tipo de informação pode estar distorcido, visto que, com a variação da densidade do agregado, a quantidade de asfalto em volume é alterada, surgindo discussões e dúvidas em relação à porcentagem de asfalto nas misturas.

Nesta pesquisa foram analisados 66 projetos de misturas betuminosas, com diferentes percentuais de asfalto elaborados no CPR nos últimos anos para avaliar a sua porcentagem em volume, ou seja, a quantidade de asfalto realmente disponível para a mistura. Foram empregados em todos os processos o método de dosagem Marshall como indicado pelo "The Asphalt Institute", adotando os novos métodos de ensaios da AASHTO e algumas das recomendações para projeto do SUPERPAVE.

Pode-se observar que há uma menor variação nos teores quando avaliados a porcentagem de asfalto em volume, para misturas com granulometrias dentro dos limites da faixa III da DERSA, similar à faixa B' adotada na Rodovia Presidente Dutra.

Em função dos resultados encontrados foram obtidos os seguintes parâmetros calculados:

Considerando o teor ótimo de asfalto adicionado:

- Para teores de asfalto em peso, o coeficiente de variação absoluto é de 50 % e o estatístico é de 24 %.
- Para teores de asfalto em volume, o coeficiente de variação absoluto é de 33 % e o estatístico é de 20 %.
- Teor médio de asfalto em volume de 12,6 % e 80 % dos valores calculados estão entre 11,5 % e 13,8 %.
- Considerando o teor ótimo de asfalto efetivo, temos:
- Para teor médio de asfalto em volume de 11,6%, 80 % dos valores calculados estão entre 10,7 % e 12,6 %.
- Para teores de asfalto em peso, o coeficiente de variação absoluto é de 41 % e o estatístico é de 21 %.
- Para teores de asfalto em volume, o coeficiente de variação absoluto é de 30 % e o estatístico é de 18%.

Conclusão e Recomendação

Considerando os valores encontrados pode-se verificar que a dosagem de asfalto por volume é mais precisa, porque elimina o efeito da variação da densidade.

Em função disso, recomenda-se que nos projetos de misturas asfálticas e nos controles de rotina das usinas de asfalto, seja considerado na análise crítica, além do teor de asfalto em peso, o teor de asfalto em volume, e suas tolerâncias.

6.12. Avaliação da Necessidade de Aplicação do Método Rice para Controle do Volume de Vazios de Ar Obtido no Campo em Misturas Asfálticas

O controle de obras é um processo que envolve ensaios que, se não aplicados corretamente, podem levar a conclusões distorcidas do estado de uma camada betuminosa na pista.

Pode-se chegar à conclusão de haver porcentagem de vazios baixa (<2%) ou alta (>7%) quando a realidade é que os mesmos estão dentro de limites aceitáveis. A recíproca também é verdadeira, pode se aceitar um segmento com porcentagem de vazios fora da especificação, o que pode levar a uma falência prematura da camada.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar se a Densidade Máxima Efetiva da Mistura Solta (DMT), AASHTO T 209, chamado de método de Rice, é efetivo como controle de obra, em função das variações diárias que ocorrem na usina.

Observou-se que, em pedreiras comerciais, com várias bancadas, há uma variação da densidade da rocha, o que pode gerar teores de asfalto diferentes e também à porcentagem de vazios alteradas.

Para a avaliação da porcentagem de vazios, foram adotados os valores encontrados no controle diário de compactação da Construtora Via-Dragados, tendo sido feito uma Densidade Máxima Efetiva da Mistura Solta (DMT) diariamente, no laboratório do CPR. Dos valores de densidade de pista, foi extraída uma média diária dos resultados e estes valores foram comparados.

Na obra foram usados dois projetos de mistura betuminosa sendo o primeiro do dia 15/03/04 até o dia 30/06/04, quando foi substituído por outro. Os teores de asfalto adicionado permaneceram iguais, 4,7% em peso. A densidade da rocha e a absorção variaram significativamente.

A DMT do projeto variou. No projeto de mistura executado no dia 15/03/04 era 2,555 e no de 02/07/04 a DMT passou para 2,572. É usual no Brasil, controlar a densidade de pista em relação às de projeto, seja por grau de compactação ou por porcentagem de vazios.

Estas variações de densidade da rocha são complicadoras para o controle de qualidade visto que na Usina de asfalto, podem ocorrer alterações significativas na porcentagem de asfalto. Quando a Densidade da Rocha é alterada, o volume do agregado pesado na usina varia e como o asfalto é dosado em peso da mistura total ocorre um aumento ou redução do teor de asfalto na massa.

Esta variação também ocorre em relação à densidade de pista, pois uma rocha mais leve vai levar a uma densidade aparente mais baixa, gerando um grau de compactação aparentemente menor, o que pode levar a uma não conformidade da camada, por não atender aos limites especificados. Da mesma maneira ocorre quando a densidade da rocha aumenta, e muitas vezes se chega à porcentagem de vazios negativos, se não se avalia constantemente o valor encontrado.

CONCLUSÕES

Pode-se verificar que o método de Rice para controle de obra é bastante efetivo, principalmente quando a pedreira tem várias bancadas e pontos diferentes de exploração. O controle efetivo de qualidade acontece quando são consideradas todas as variações ocorridas, tanto no agregado como na dosagem da mistura na usina de asfalto, principalmente se levar em conta que as densidades dos agregados graúdos e miúdos são também diferentes. O método RICE mede a densidade da massa solta com todos os seus componentes, tais como, agregados, cal hidratada e Cimento

asfaltico.

RECOMENDAÇÃO

Recomenda-se que nos controles de rotina das usinas de asfalto, seja considerado para efeito de cálculo da porcentagem de vazios na pista, o método de Densidade Máxima Efetiva da Mistura Solta (DMT), AASHTO T 209, "RICE", medida no dia da aplicação da massa na pista.

6.13. Determinação em Laboratório da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas

Esta pesquisa foi a primeira desenvolvida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias no âmbito de investigar a resistência à fadiga de misturas asfálticas em laboratório, por meio de ensaios simples, utilizados na época da sua execução. O objetivo principal deste estudo foi avaliar a resistência à fadiga de misturas asfálticas usualmente utilizadas na Rodovia Presidente Dutra no ano 2000, com ligantes asfálticos convencionais e modificados por polímero e por borracha moída de pneus.

A Tabela 4 mostra quatro misturas asfálticas que foram ensaiadas no CPR da NovaDutra, à temperatura de 25°C, utilizando três velocidades de carregamento (0.2, 0.5 e 1.3 mm/min, em termos nominais).

Tabela 4. Misturas asfálticas ensaiadas

LIGANTE	PENETRAÇÃO A 25°C (0,1 MM)	VV (%)	PB (%)	% #200
CAP 20	**55**	**4,1**	**4,7**	**6,6**
CAP 40	**36**	**4,1**	**5,0**	**6,6**
CAP COM BORRACHA	**52**	**4,1**	**5,8**	**6,6**
CAP COM SBS	**57**	**4,0**	**4,7**	**6,6**

Toda a caracterização foi efetuada utilizando os corpos de prova cilíndricos que são adotados no Método de Dosagem Marshall através de um procedimento de ensaio rápido o bastante para ser incorporado a uma dosagem convencional, de modo a se dispor de uma avaliação quantitativa do potencial que diferentes formulações para a mistura asfáltica têm em termos de resistir à formação de trincas por fadiga.

Em um ensaio de fadiga, realizado em cargas repetidas com pulsos de

tensão de tração ▫ de duração ▫t_c, haverá uma perda de energia de ligação produzida por um pulso de tensão individual dada por:

$$\delta W_R = \frac{-1}{\eta}\frac{\sigma^n}{W_{R0}^{n-2}}\Delta t_c$$

de modo que, após N_f repetições de carga, a energia de ligação total W_{R0} estará completamente exaurida, levando à formação de uma trinca de fadiga. Dessa forma:

$$N_f = \frac{\eta W_{R0}^{n-1}}{\Delta t_c}\left(\frac{1}{\sigma}\right)^n$$

que é a conhecida lei de fadiga, observada em ensaios com tensão controlada.

Na lei de fadiga, expressa em termos da deformação específica de tração ▫ em um ensaio de flexão alternada,

$$N_f = K\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^n$$

tem-se que os parâmetros *K* e *n* não são independentes, mas sim fortemente correlacionados por: $n = -0,1093\log_e K + 1,4749$, de modo que:

$$N_f = K|E^*|^n\left(\frac{1}{\sigma}\right)^n = \frac{\eta W_{R0}^{n-1}}{\Delta t_c}\left(\frac{1}{\sigma}\right)^n$$

Em um ensaio de *creep* em compressão diametral até a ruptura em concreto asfáltico em termos da evolução do deslocamento vertical ao longo do tempo, nota-se a existência de três fases distintas e bem definidas (Figura 14) e que podem ser descritas da seguinte forma:

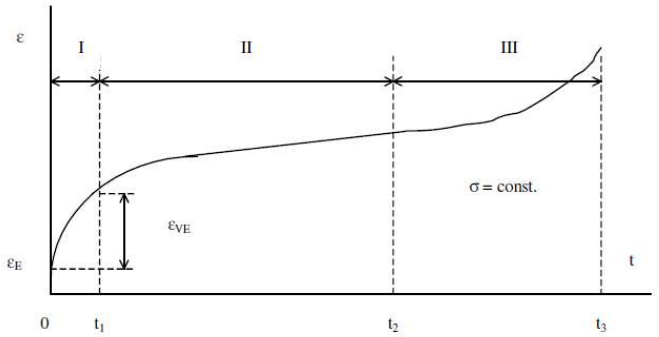


FIGURA 14. ENSAIO DE *CREEP* ATÉ A RUPTURA EM COMPRESSÃO DIAMETRAL.

Estágio I: caracterizado pela rápida geração de deslocamentos a uma velocidade decrescente com o tempo, partindo de uma velocidade inicial infinita (carga aplicada instantaneamente). Após a deformação puramente elástica, instantânea e simultânea à aplicação da carga, ocorrem as deformações viscoelásticas e as deformações viscoplásticas. Neste estágio, a maior parcela das deformações é das deformações viscoelásticas, que tendem a ocorrer sob uma velocidade decrescente com o tempo até que se estabilizam.

Estágio II: caracterizado por uma velocidade de deformação aproximadamente constante. A parcela dominante nas deformações é a viscoplástica, cujo acúmulo levará o material à ruptura por cisalhamento ou à abertura de uma trinca.

Estágio III: onde a progressão da ruptura implica em redução progressiva da rigidez do corpo de prova. As deflexões são geradas a uma velocidade crescente com o tempo. É também denominado de *creep* terciário e corresponde ao crescimento da trinca formada no Estágio II em um ensaio em concreto asfáltico.

Qualquer que seja o processo de aplicação de tensões – ensaio dinâmico, cargas repetidas, carga estática ou carga crescente sob velocidade de

deformação constante –, a equação cinética pode ser integrada para fornecer a expressão da lei de fadiga correspondente.

Resultados e Conclusões

Os resultados obtidos mostraram haver grandes diferenças de resistência à fadiga entre as misturas analisadas, indicando que mesmo pequenas variações na formulação do material podem ter um impacto significativo em sua durabilidade sob a ação das cargas repetidas do tráfego. Também ficou evidente que não há um tipo específico de ligante betuminoso, modificado ou não, que seja claramente superior aos demais, visto que foi possível a obtenção de elevadas resistências à fadiga com todos os ligantes considerados. Um aspecto que deve ter tido influência neste resultado foi o uso de 1,5% de cal CH-1 em todas as misturas, com seu efeito de melhorar a adesividade asfalto-agregado e a própria resistência do *mastique* betuminoso.

Predominaram misturas com resistências à fadiga moderadas ou baixas sob o uso de CAP 20 ou com asfalto aditivado com SBS, enquanto que o uso de ligantes como CAP modificado por SBS ou CAP 40 levou a misturas de elevada resistência à fadiga, adequadas ao tráfego pesado da Rodovia Presidente Dutra, sob granulometrias bem graduadas na Faixa "C" DNIT, com diâmetro máximo de agregados igual a 12,5 mm e volume de vazios de ar da ordem de 4%.

6.14. Avaliação do Desempenho de Camadas de Mistura Asfáltica Reforçada com Geogrelha Flexível em Relação à Trincamento por Fadiga e à Reflexão de Trincas de Camadas Inferiores do Pavimento

A ação combinada do tráfego e do clima acarreta no trincamento dos revestimentos. Ao longo do tempo, uma trinca aberta aumenta em extensão, severidade e intensidade, levando, eventualmente, à desagregação do revestimento. Por meio desses efeitos, a velocidade de deterioração do pavimento é usualmente acelerada após o início do trincamento, com efeitos particularmente importantes na progressão dos afundamentos em trilha de roda e da irregularidade.

O problema mais comum, quando um recapeamento simples de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) é construído sobre um pavimento asfáltico trincado, é a reflexão das trincas ou propagação das trincas das camadas antigas para as novas, que se apresenta após ciclos de carregamento, onde pequenas espessuras de concreto asfáltico não resistem à rápida propagação das trincas. Além disso, o aumento da espessura para retardar a ascensão da trinca pode tornar economicamente ineficaz, principalmente quando o potencial para ocorrência da reflexão de trincas em camadas asfálticas de recapeamento for elevado.

A reflexão tende a controlar o desempenho do pavimento restaurado, comprometendo a sua vida de serviço e levando a vidas úteis extremamente curtas, no caso de restaurações executadas por meio de recapeamento simples. Para evitar esse problema, um sistema anti-reflexão de trincas deve ser concebido, definindo-se a natureza dos materiais e as espessuras das camadas constituintes. Estas técnicas

costumam envolver o uso de camadas intermediárias especiais, colocadas entre a camada de recapeamento e o pavimento trincado.

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a aplicação de uma camada de concreto betuminoso usinado à quente, reforçada com geogrelha flexível, em relação ao trincamento por fadiga e reflexão de trincas, comparando-o com o de camadas executadas com a mesma mistura betuminosa sem reforço, em segmentos com mesmas características estruturais e condições de deflexões. Para isso, foi realizada a construção de um trecho teste executado com o concreto reforçado em um segmento de 300 m em terceira faixa nas proximidades do km 211 PS - SP, situado em trecho de restauração programado para os anos de 2004 e 2005, entre os km 211 e 217 PS - SP. A execução da pista teste em trecho de restauração com concreto betuminoso normal configurará a outra pista de comparação.

APLICAÇÃO

A restauração de um pavimento através do sistema de reforço com Hatelit C 40/17 segue, basicamente, os procedimentos normais de uma restauração convencional. A facilidade de instalação garante a minimização de riscos de mau funcionamento por problemas construtivos. As etapas da aplicação serão descritas a seguir:

Primeiro Passo - Fresagem do revestimento antigo: inicialmente, foi realizada uma fresagem do revestimento existente, que compreendeu um corte de 5 cm de espessura, com objetivo de reduzir o potencial para a reflexão das trincas, eliminar a erosão dos bordos entre as paredes das trincas e reduzir o comprimento das mesmas.

Segundo Passo - Limpeza da pista: para a limpeza de material solto, foram utilizados varreduras mecânicas e ar comprimido, com o objetivo de garantir perfeita aderência do Hatelit na superfície, proporcionando uma interface ativa e eficaz.

Terceiro Passo - Aplicação da pintura de ligação: realizada com caneta espargidora. A taxa usual recomendada pelo fabricante da geogrelha é 0,5 l/m^2 de resíduo asfáltico após ruptura e cura da emulsão. Esta película de material asfáltico deve ser suficiente para fazer a ligação entre o Hatelit e o pavimento existente.

Quarto Passo - Colocação do Hatelit: executado imediatamente após a ruptura e cura da emulsão, sendo efetuada de forma manual por se tratar de um trecho de pequena extensão (Figuras 15 e 16).



FIGURA 15. COLOCAÇÃO DO HATELIT, IMEDIATAMENTE APÓS A RUPTURA E CURA DA EMULSÃO.



FIGURA 16. VISTA PARCIAL DA GEOGRELHA HATELIT C 40/17 INSTALADA.

Quinto Passo: aplicação da camada de concreto asfáltico correspondente

ao reforço projetado sobre o Hatelit, na espessura de 5 cm. A temperatura da mistura foi de 145ºC (Figuras 17 e 18).

Sexto Passo: compactação da camada de concreto asfáltico correspondente ao reforço, segundo procedimento convencional.



FIGURA 17. TEMPERATURA DE LANÇAMENTO DA MASSA ASFÁLTICA.



FIGURA 18. APLICAÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO SOBRE HATELIT C 40/17.

6.15. Estudo de Desempenho de Pavimento com Distintos Ligantes Asfálticos

Entre outubro de 2005 e março de 2006, o CPR realizou um estudo para avaliar o comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos sob a ação de um simulador de tráfego. Neste estudo, a pesquisa procurou determinar o comportamento das distintas misturas de CBUQ confeccionadas com base em métodos de dosagem diferenciados e empregando-se quatro tipos de ligantes. Como o intuito era promover um estudo comparativo entre o comportamento de distintos ligantes asfálticos e métodos de dosagem, optou-se pela utilização de agregados de fonte única e faixa granulométrica idêntica em todas as misturas.

O objetivo da pesquisa foi a avaliação do comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos projetados pelos métodos Marshall e Superpave sob ação de Simulador de Tráfego Linear Móvel.

Na primeira fase da pesquisa foram feitas as dosagens de misturas com diferentes ligantes (CAP20, CAP40, CAP com polímero SBS e CAP com borracha) pelo método Marshall, com diferentes energias de compactação (75 e 90 golpes) e pelo método Superpave. Para a fase seguinte da pesquisa, que consistiu no trecho experimental para avaliação com o HVS (Heavy Vehicle Simulator), foram selecionadas cinco misturas. Para estas misturas, foram realizados os ensaios de deformação permanente com um simulador de tráfego tipo LCPC francês, com duas placas de cada material coletado da pista, já compactadas e frias, conforme especificação francesa. Estes ensaios de deformação permanente em trilhas de roda foram conduzidos a 60ºC até 30.000 ciclos, como especificados nesta norma.

Também foi determinada, em laboratório, a curva de fadiga para as cinco

misturas asfálticas, considerando-se as amostras moldadas em laboratório, coletadas na usina e retiradas da pista, totalizando quinze ensaios de cada tipo.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração indicam valores maiores para a mistura confeccionada com CAP40 , tanto para as amostras de laboratório quanto para as coletadas na usina e as retiradas da pista, como pode ser observado na Figura 10. Para a mistura confeccionada com CAP20 e dosada pelo método Marshall, constatou-se uma menor perda de resistência entre o laboratório e a pista. Já os resultados em laboratório da mistura realizada com este ligante, mas dosada pelo método Superpave, em termos de resistência à tração, são semelhantes aos da dosada pelo método Marshall na amostra de laboratório, mas bem inferiores nas amostras de pista. Por fim, a maior perda de resistência entre as misturas confeccionadas em laboratório para as coletadas em pista ocorreu com a mistura com CAP polímero SBS, seguida pela mistura com CAP borracha, demonstrando problemas de usinagem e de execução.

No que se refere ao módulo de resiliência, pode-se observar a tendência de redução nos valores obtidos em amostras moldadas em laboratório, tanto em relação às coletadas em usina quanto em relação às amostras retiradas da pista, indicando variações entre as distintas etapas do processo, desde o estudo em laboratório (condições controladas) até a aplicação em pista. Os resultados finais indicam valores em pista da ordem de 3.500 a 4.500 MPa para as amostras de CBUQ com CAP borracha, CAP polímero e CAP20 dosado pelo Superpave; e valores superiores a 4.000 MPa para o CBUQ com CAP20 e o CBUQ com CAP40 dosados pelo método Marshall.

CONSTRUÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

A segunda fase da pesquisa refere-se aos estudos do desempenho *in situ* das camadas asfálticas dosadas e estudadas em laboratório, empregando-se o Simulador de Tráfego Linear Móvel ou Heavy Vehicucle Simulator (HVS) e monitorando-se o desempenho da rodovia. Para a realização dos ensaios acelerados, optou-se pela execução de trechos experimentais consecutivos na alça de acesso da via Dutra (BR-116/SP) com a rodovia D. Pedro (SP-65), nas proximidades do km 169 da BR-116. O local e a posição das seções-teste é ilustrado na Figura 19.

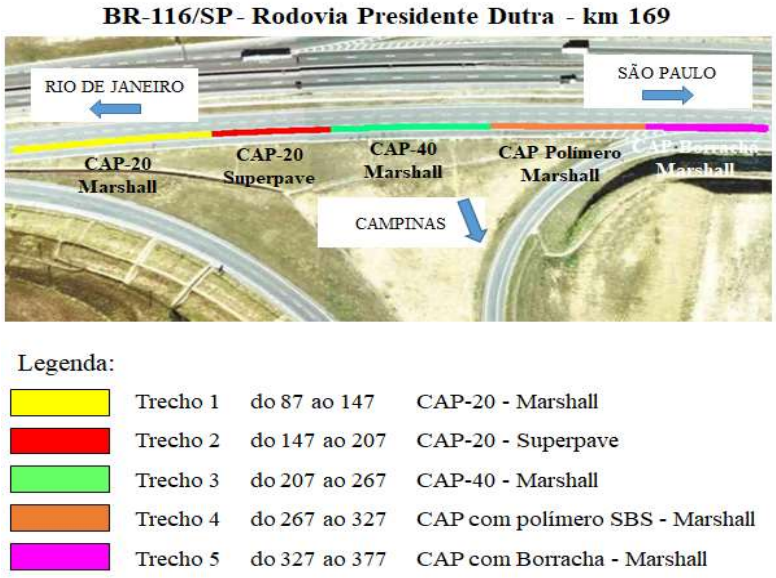


FIGURA 19. ILUSTRAÇÃO DO TRECHO BR-116/SP COM AS SEÇÕES-TESTE.

Foram realizados levantamentos deflectométricos empregando-se o FWD no pavimento e retroanálises dos resultados das bacias de deflexão medidas com o FWD, de forma a determinar os módulos de resiliência *in situ* das camadas do pavimento de cada um dos trechos.

A execução do trecho consistiu na fresagem de 40 mm do revestimento asfáltico existente na faixa externa de tráfego, seguida da limpeza com jato de ar comprimido, pintura de ligação e recomposição com a mistura asfáltica, atendendo-se à dosagem de cada seção-teste. Foram realizados

ensaios de controle tecnológico das obras em termos de grau de compactação e espessura.

Após construção dos trechos experimentais, foram realizados os levantamentos deflectométricos com a viga Benkelman eletrônica, onde pode-se constatar o incremento dos níveis deflectométricos praticamente em todo o trecho, havendo maior discrepância entre os valores entre as seções-teste do CAP20 Superpave e do CAP40. Todavia, os valores encontrados são baixos, especialmente junto às seções-teste.

CONCLUSÕES

O estudo de laboratório da fase inicial da pesquisa indicou que teores ótimos de ligantes determinados para o concreto asfáltico faixa C, pelo método Superpave, são praticamente iguais aos obtidos pelo método Marshall com aplicação de 90 golpes. Assim, em ambos os casos, o teor ótimo é da ordem de 0,3% inferior ao teor ótimo obtido pelo método Marshall com 75 golpes num dado ligante. Há que se atentar que esta tendência não foi observada na dosagem do CBUQ com asfalto borracha.

Observa-se também que, para o CAP40, o teor ótimo de ligante foi 0,3% superior ao obtido com o CAP20. Já o ligante com polímero apresenta esta tendência somente nas dosagens do Superpave e do Marshall 90 golpes, ao passo que no Marshall 75 golpes o teor ótimo foi ligeiramente menor do que o do CAP20. Além disso, o CAP borracha exigiu teores adicionais de ligante de 0,8%, 0,5% e 1,1% em relação ao CAP20 nas dosagens Marshall com 75 e 90 golpes e na dosagem Superpave, respectivamente. Observa-se que o CAP borracha foi o que exigiu maior teor de ligante nos três métodos de dosagem estudados, fato associado a sua maior viscosidade.

Nos ensaios de desempenho em laboratório (em amostras coletadas em pista) para a verificação da deformação permanente da mistura com o simulador LCPC, observou-se que a mistura confeccionada com CAP com polímero foi a que apresentou menores deformações ao final de 30.000 ciclos a 60°C, sendo um resultado próximo ao obtido com a mistura empregando CAP borracha. Deve-se destacar que não há influência da estrutura do pavimento e das condições de contorno nos resultados, visto que o ensaio é laboratorial num substrato rígido. Neste simulador de laboratório, os resultados finais das misturas confeccionadas com CAP20 e CAP40 dosados pelo método Marshall com 75 golpes foram muito similares, embora se observe que a tendência das curvas indica que os resultados se devem em grande parte à maior deformação da mistura com CAP40 logo no início dos ciclos de carga.

Os resultados do simulador LCPC também indicam melhores resultados (menores deformações permanentes ao final de 30.000 ciclos a 60°C) para a mistura de CBUQ com CAP20 dosada pelo método Superpave em relação à mistura dosada pelo método Marshall com 75 golpes – ou seja, menores teores de ligante levam a menor tendência à deformação permanente numa dada mistura.

No que se refere ao módulo de resiliência, observa-se a tendência de redução nos valores obtidos em amostras moldadas em laboratório para as coletadas em usina e outra redução para as amostras retiradas da pista, indicando perdas em todas as etapas do processo, desde o estudo em laboratório (condições controladas) até a aplicação em pista. Os resultados finais indicam valores em pista da ordem de 3.500 a 4.500 MPa para as amostras de CBUQ com CAP borracha, com CAP polímero e com CAP20 – este último dosado pelo Superpave – e valores superiores a 4.000 MPa para misturas com CAP20 e com CAP40, dosadas pelo método Marshall.

Com relação à vida de fadiga, constatou-se que para as amostras moldadas em laboratório observam-se melhores resultados, permitindo a seguinte

hierarquização: (1) CAP20 Marshall; (2) CAP40 Marshall; (3) CAP Borracha; (4) CAP polímero SBS e (5) CAP20 Superpave.

Destaca-se a grande diferença entre os resultados das diferentes misturas confeccionadas com CAP20 , indicando a perda de vida de fadiga quando se reduz o teor de ligante da mistura. Já nas amostras retiradas da pista, observou-se um ganho em termos de vida de fadiga para o CBUQ com CAP40, ao passo que os resultados com CAP20 se mantiveram praticamente constantes. Observou-se também uma melhora menos significativa nos resultados do CAP polímero e do CAP20 dosado pelo Superpave, bem como uma piora nos resultados para o CAP borracha.

Os ensaios da segunda fase da pesquisa permitem comparar o desempenho das misturas asfálticas na estrutura do pavimento em questão. Todavia, nesta comparação devem ser consideradas as diferenças no total de ciclos e de operações equivalentes de cargas aplicadas nas distintas seções-teste. Como a variação do número "N" (número de operações equivalentes de carga) entre as quatro primeiras seções-teste e a quita (asfalto borracha) é significativa, a comparação dos resultados deve ser realizada a partir das curvas de desempenho obtidas por tipo de mistura nas seções em questão.

Para efeito comparativo de desempenho das misturas no simulador móvel de tráfego, arbitrou-se no presente estudo a extrapolação dos resultados para $1,5 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário, o que reduz a necessidade de extrapolação de valores. Os ensaios permitiram comparar o desempenho das misturas asfálticas na estrutura de pavimento, devendo ser consideradas as diferenças no total de ciclos e de operações equivalentes de cargas aplicadas nas distintas seções-teste, bem como a restrição de sua aplicabilidade fora do âmbito da pesquisa. Em síntese, observou-se que:

Somente na seção de CAP com polímero houve evolução significativa no valor de flecha em trilha de roda, sendo constatada flecha superior a 6 mm ao número "N" de $1,5 \times 10^7$, ao passo que nas demais seções os valores finais foram da ordem de 1 a 2 mm.

Apesar das dispersões e dos baixos valores de R2, todos os valores de macrotextura e microtextura se mantiveram dentro de parâmetros de excelência exigidos nas rodovias federais concessionadas, ou seja, HS entre 0,6 e 1,2 mm e VRD entre 47 e 75.

Em termos estruturais, constata-se que somente a seção de CAP polímero SBS apresentou uma evolução inicial significativa nos valores de deflexão com posterior estabilização nas leituras. Contata-se também uma tendência de evolução dos valores deflectométricos no trecho do CAP20 Superpave após $1,5 \times 10^7$ operação do eixo padrão rodoviário.

6.16. Estudo com Relação à Deformação Permanente das Misturas Asfálticas

Esta pesquisa foi realizada no período de 2006 a 2010, com o objetivo de analisar o comportamento em relação à deformação permanente de vários tipos de misturas asfálticas e respectiva variação, em decorrência do teor e do tipo de ligante asfáltico. Foram realizados ensaios de deformação permanente, determinação do volume de vazios antes e após o afundamento em trilha de roda, permeabilidade e Cantabro de diversas misturas asfálticas preparadas com diferentes ligantes, teores de asfalto, graduações, tamanhos nominais máximos e energias de compactação. Os agregados pétreos e os ligantes asfálticos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa são amostras dos materiais empregados nas obras de restauração da Rodovia Presidente Dutra.

Esta pesquisa foi realizada conjuntamente pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e pela Concessionária CCR NovaDutra, graças aos Recursos para Desenvolvimento Tecnológicos (RDT) da ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres). Outras propriedades, como o módulo de resiliência, fadiga e resistência à tração, foram estudadas conjuntamente pela COPPE/UFRJ e pela Concessionária CCR NovaDutra, completando a avaliação de comportamento mecânico.

Neste estudo foram avaliados diversos tipos de misturas asfálticas, a partir da combinação dos seguintes fatores:

- **Quatro ligantes asfálticos:**
  - CAP 30-45;
  - CAP 50-70;
  - Asfalto modificado por polímero (AMP);
  - Asfalto modificado por borracha (AMB).
- **Cinco teores de ligante:**
  - Teor de Projeto (TP);
  - TP ± 0,5%;
  - TP± 0,25%.
- **Cinco granulometrias:**
  - 9,5mm (Superpave);
  - 12,5mm (Faixa C DNIT);
  - 19,0mm (Superpave);
  - *Gap-graded* (Especificação Caltrans);
  - CPA (Faixa Arizona).

Foram realizadas as usinagens das misturas asfálticas no LTP seguindo o projeto concebido na NovaDutra - CPR. Após a usinagem das misturas asfálticas, estas foram levadas à mesa compactadora francesa LCP (idealizada no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, na França) para a moldagem das placas – os corpos de prova utilizados no ensaio de deformação permanente. A mesa compactadora LCPC compacta a mistura asfáltica por rolagem (Figura 20) através de uma sequência de passagens de um pneu padronizado, com pressão variando entre 0,3 e 0,6 MPa (3 e 6 bar), segundo a especificação europeia EN 12697-33 (2003a).

Para cada tipo de mistura asfáltica estudada, foi compactado um par de placas iguais para serem submetidos ao ensaio de deformação permanente. Além disso, também foi moldada uma placa extra de cada concreto asfáltico para servir de referencial inicial (placa virgem). Os corpos de prova para os ensaios de deformação permanente consistiam em placas com 50 mm de espessura por 180 mm de largura e 500 mm de comprimento (Figura 21).

Após a moldagem e esfriamento das placas, estas eram submetidas ao simulador de tráfego tipo LCPC (também do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) para a determinação do afundamento em trilha de roda, ou deformação permanente, segundo a Norma Europeia EN 12697-22 (2003). Este equipamento é composto de um eixo com dois pneus (um para cada placa), com pressão regulável normalizada em 6bar para este ensaio, e carga regulável normalizada em 5.000 N. Estes pneus passam em contato direto sobre as placas em ciclos (cada um correspondente a uma ida e uma volta), a uma frequência de 1 Hz, gerando afundamentos progressivos. Este teste é levado até 30.000 ciclos e, a fim de impor a condição mais desfavorável e acelerar a obtenção dos resultados, o mesmo é realizado a 60°C.



FIGURA 20. MESA COMPACTADORA LCPC



FIGURA 21. EXEMPLO DE PLACA MOLDADA

Antes de ser iniciada a simulação de tráfego é lida a condição inicial (ciclo zero) e, posteriormente ao longo do ensaio vão sendo medidos os afundamentos após 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos (Figura 29). Segundo as recomendações europeias, a porcentagem máxima de afundamento em trilha de roda em revestimentos asfálticos sujeitos a tráfego pesado deve ser de 5% após 30.000 ciclos no simulador de tráfego francês. No Brasil, tem-se procurado estabelecer o limite de 5% aos 30.000 ciclos para concretos asfálticos submetidos a tráfego pesado para as condições prevalecentes no país, devido ao clima desfavorável quanto à deformação permanente. Este limite vem sendo utilizado desde 1994 no LTP-EPUSP, ano em que os primeiros testes foram feitos com o simulador, sendo os pioneiros no Brasil.

Na determinação da variação do volume de vazios, foram empregados corpos de prova *extraídos* de uma placa virgem (condição inicial de vazios) e de uma placa já submetida aos 30.000 ciclos do simulador de tráfego (condição após deformação permanente).

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos nesta extensa pesquisa laboratorial, tem-se as seguintes considerações a serem feitas:

I. **Caráter Geral:** o estudo corrobora a teoria, mostrando pelos seus resultados que:

- O aumento de teor de ligante provoca uma redução de volume de vazios;
- O aumento de teor de ligante provoca um aumento da deformação permanente;
- Após ensaio de simulador, o volume de vazios fica reduzido por consolidação da mistura, mas também pela fluência.

II. **Concreto Asfáltico:** as misturas densas e bem-graduadas do tipo concreto asfáltico apresentam:

- Com maior diâmetro nominal máximo, o teor de ligante é menor devido à redução de superfície específica, como esperado;
- Não foi observada uma tendência clara de aumento de resistência

à deformação permanente pelo aumento do diâmetro nominal máximo, pois as curvas granulométricas seguem diferentes padrões de arranjo no esqueleto mineral;

- Embora as graduações sigam diferentes padrões de arranjo, todas se apresentam com graduação mais grosseira em relação à linha de densificação máxima, o que é recomendável para não causar problemas de segregação e de superfície com macrotextura muito fechada;
- As misturas com asfalto convencional CAP 50-70 resistiram, em geral, menos do que todas as demais misturas asfálticas;
- As misturas com asfalto convencional CAP 30-45 mostram maior resistência, em geral, do que as com CAP 50-70, embora as características destes ligantes estivessem lamentavelmente muito próximas. Este aspecto foi observado após a realização de grande parte dos ensaios em concretos asfálticos. Os ligantes foram reavaliados pela Dutra, e foram encontrados dados que aproximavam as características de um e de outro;
- Os asfaltos convencionais não deram resultados de deformação permanente inferiores a 5%, limite europeu para tráfego pesado aos 30.000 ciclos de ensaio no simulador de tráfego LCPC em condições padronizadas, tornando-os produtos que podem apresentar problemas de deformação em trilha de roda. O uso de CAP 30-45 mais consistente que o aqui testado pode auxiliar a na redução dos valores encontrados nesta pesquisa;
- Os concretos asfálticos usinados com asfalto convencional são muito sensíveis à variação positiva no teor de ligante (excesso, em relação ao de projeto); valores de +0,25% (em excesso) podem ocasionar aumentos expressivos de deformação. O aumento de +0,5% é em geral proibitivo pelas más características de resistência à deformação permanente;
- Os asfaltos modificados oferecem às misturas de concreto asfáltico maior resistência à deformação permanente;
- Os asfaltos modificados, de maneira geral, são menos sensíveis às variações dos teores de ligante quanto à deformação permanente, embora a deformação aumente em geral com o aumento do teor;
- A maior parte das misturas asfálticas, do tipo concreto asfáltico com asfalto modificado (por polímero e por borracha), apresentam deformação inferior ao limite de 5% no simulador de tráfego LCPC.

III. ***Gap-graded*****:** as misturas do tipo *gap-graded* apresentam:

- Observa-se, de maneira geral, que as misturas com asfalto modificado por polímero e modificado com borracha mostram-se resistentes à deformação permanente;
- No que tange ao limite máximo de afundamento em trilha de roda para vias de tráfego pesado (5%), nota-se que todas as misturas asfálticas com AMP apresentaram valores bastante satisfatórios;
- Considerando a variação de teor de ligante aceitável em usina (±0,3%), observa-se que isto não comprometeria o comportamento quanto à deformação permanente das misturas asfálticas estudadas, nas configurações de materiais empregados, no caso de asfalto polímero;
- Os *gap-graded* com AMB também atenderam a este requisito, exceto na mistura com teores muito elevados;
- O uso das misturas *gap-graded* estudadas nesta pesquisa seria

recomendável no caso da Via Dutra;

- Uma vez que as misturas tiveram graduação pré-determinada, o estudo se ateve principalmente às características do ligante.

IV. Camada Porosa de Atrito CPA: as misturas do tipo CPA apresentam:

- A especificação europeia de misturas drenantes (EN 13108-7, 2006) não exige ensaio de deformação permanente para este tipo de material;
- Considerando-se que a norma europeia EN 12697-19 (2004) menciona que a permeabilidade vertical de misturas asfálticas em geral deve situar-se entre 0,5 × 10-3 a 3,5× 10-3 m/s, nota-se que todos os CPAs estudados apresentaram resultados satisfatórios quanto a esta propriedade;
- Os corpos de prova extraídos de placas foram mais suscetíveis à perda de massa no Cantabro do que aqueles preparados diretamente no molde Marshall, além de apresentarem maior variabilidade de resultados com o acréscimo da quantidade de asfalto na mistura. O sistema de extração de corpos de prova das placas altera as ligações entre os agregados, rompendo as conexões entre eles, o que aumenta a perda por abrasão. Estes resultados não devem ser considerados em projeto; deve-se considerar aqueles obtidos por desgaste Cantabro com corpos de prova compactados no Marshall;
- Pode-se observar que o aumento do teor de ligante torna a mistura CPA menos vulnerável à perda de massa por desgaste, pois a coesão entre agregados é mais eficiente. Porém, o volume de vazios pode ser reduzido, modificando a permeabilidade.

6.17. Estudo com Relação à Deformação Permanente das Misturas Asfálticas

Essa pesquisa trata de uma ampla investigação do desempenho estrutural de pontes, considerando os critérios de projeto adotados em normas correntes de estruturas de concreto armado. O objetivo principal foi avaliar o desempenho estrutural de pontes de concreto armado por meio de acelerações induzidas por veículos nos tabuleiros dessas estruturas, para estabelecer critérios de projetos que levem em consideração essas acelerações.

Na primeira fase da pesquisa, foi realizada uma sistematização dos principais resultados medidos em ensaios dinâmicos de estrutura de pontes existentes, relacionando suas freqüências naturais a indicativos geométricos, como por exemplo, o vão da ponte. Também foi observada nessa fase a alteração das características de resistência e rigidez dos concretos em pontes de idade elevada, com mais de 40 anos, resultando em funções de distribuição para essas características. Devida a sua importância em projetos estruturais de pontes, ênfase especial foi dada aos coeficientes dinâmicos mais utilizados. Com o método de identificação adotado, foi possível medir os principais coeficientes dinâmicos durante os ensaios realizados nas pontes monitoradas. Em seguida, comparou-se os valores desses coeficientes e os coeficientes de impacto especificados pela normalização atual.

Na segunda fase da pesquisa foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais fatores que afetam a durabilidade de pontes, reduzindo, portanto, a vida útil das estruturas. Nas pontes investigadas no presente trabalho, a ação externa mais significativa para a fadiga das armaduras é a ação do tráfego de veículos. Dessa forma, investigou-se o tráfego atualmente existente nas rodovias nacionais, utilizando-se dados das monitorações realizadas e dados de tráfego levantados em rodovias brasileiras. Para a análise de fadiga, apresentou-se as curvas SN associadas a hipótese de Palmgren-Miner, que será o método de análise utilizado no presente trabalho.

Considerando-se que tanto as ações do tráfego quanto as curvas de fadiga, respectivamente solicitação e resposta envolvidas na análise estrutural, não podem ser exatamente conhecidas devido a incertezas inerentes a esses fenômenos, o presente estudo apresentou uma abordagem estatística dos mesmos. Para cálculo do índice de confiabilidade à fadiga, foi desenvolvido programa em MATHCAD para simulação do dano acumulado nas armaduras, que considera um tráfego efetivo medido em rodovias nacionais, além de curva SN de Wohler (fadiga) e respectiva aleatoriedade. Esse programa foi utilizado inicialmente para um estudo paramétrico das pontes sobre duas vigas, com geometrias comumente empregadas desde a década de 60, conforme DNIT (2004). Depois foi empregado para análise de fadiga das pontes investigadas no presente trabalho.

Na terceira fase, apresentou-se os trabalhos que visam controlar os danos nas estruturas de concreto em função de suas mobilidades, objeto principal da pesquisa. Esses conceitos foram então aplicados às pontes investigadas e foram obtidas as relações entre acelerações medidas nos tabuleiros das pontes e o dano existente na estrutura. Dessa forma, chegou-se a valores de acelerações que são indicativos da existência do dano na estrutura das pontes.

Além disso, para efeitos de projeto, a confiabilidade à fadiga calculada para as pontes investigadas e relacionada às acelerações induzidas nos tabuleiros, utilizando-se a base de dados levantada nos ensaios dinâmicos. Para isso, foram realizadas simulações numéricas, utilizando-se os valores das pontes investigadas, das quais se dispõe de informações coletadas em

ensaios dinâmicos, de suas geometrias e materiais. Nesse caso, os diagramas obtidos permitem controlar a vida útil à fadiga dessas estruturas a partir das acelerações induzidas nos tabuleiros das pontes, atingindo-se, portanto, o objetivo principal dessa pesquisa.

Os resultados da primeira fase da presente investigação realizada foram apresentados por RODRIGUES et al (2010) na Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management do IABMAS – International Association for Bridge Maintenance and Safety. A conferência foi realizada na Filadélfia, Pensilvânia, USA, no período entre 10 e 15 de julho de 2010.

Um resumo dos principais resultados da presente pesquisa está relacionado a seguir:

- Verificou-se que as freqüências naturais de pontes com idades em torno de 40 anos, determinadas por meio de ensaios dinâmicos de identificação, são próximas às das pontes com mesma idade investigadas em estruturas da Europa, corroborando, portanto, o método de identificação estrutural adotado no presente trabalho;
- Os coeficientes de amplificação dinâmica obtidos a partir de dados medidos em pontes de rodovias nacionais foram significativamente superiores aqueles especificados pela NBR-7187 (2003) para projetos;
- Os coeficientes de amplificação dinâmicas medidos tiveram melhor correlação com três variáveis, vão da ponte, velocidade de passagem do veículo e freqüência natural, ao invés de somente com o vão da ponte, como sugerido atualmente pela NBR-7187 (2003) para projetos.

As vibrações induzidas nas pontes investigadas foram então correlacionadas, primeiro com o dano estimado nas estruturas existentes, e segundo com o índice de confiabilidade à fadiga calculado para as pontes existentes. Nesse caso as vibrações medidas nas pontes durante os ensaios dinâmicos foram expressas em amplitude máxima pico-a-pico de acelerações e em unidades vibrars, atualmente especificadas pela NBR-15307 (2005). Os resultados indicaram que as amplitudes pico a pico de acelerações apresentam melhor correlação e, portanto, são melhores indicativos tanto do dano existente como do índice de confiabilidade das estruturas existentes. Além disso, a grandeza intensidade de vibração (medida em vibrars) não apresentou correlação satisfatória com os fenômenos estudados e, portanto, não devem ser utilizadas na avaliação desses fenômenos, como atualmente recomenda a NBR-15307 (2005). Dessas correlações, também pode-se sugerir um limite de aceleração pico-a-pico no tabuleiro de pontes de 0,15 g, a ser para avaliar a existência de danos significativos nessas estruturas, e de 0,17 g a ser empregado para verificar a durabilidade em projetos de pontes.

6.18. Estudo Comparativo do Comportamento de Fadiga de Misturas Betuminosas com Diferentes Teores de Asfalto

No Brasil, os principais problemas que ocorrem nos pavimentos asfálticos estão relacionados com a resistência à fadiga e ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas das rodas. Algumas rodovias apresentam, precocemente, problemas de afundamento nas trilhas das rodas provenientes exclusivamente do revestimento, mesmo em locais nos quais as misturas asfálticas são usinadas atendendo o intervalo de teor de ligante aceitável pelas especificações vigentes. Outro problema comum está relacionado com a resistência à fadiga, que representa uma das mais importantes características de perda de desempenho das camadas asfálticas nas rodovias brasileiras. Com o objetivo de evitar o surgimento desses defeitos, são empregados os resultados da análise em laboratório do ensaio de vida de fadiga, que têm sido usados como critério de dimensionamento de pavimentos (Pinto, 1991). As cargas usadas nesse ensaio, por sua vez, são determinadas em função de outro ensaio limite – o de resistência à tração –, comumente obtidas de forma indireta, devido à maior simplicidade.

Uma das causas desse tipo de problema pode ser o teor inadequado de asfalto, que nem sempre atende ao teor determinado em projeto, podendo ocorrer uma redução ou até um aumento no teor de ligante, em função de alguns problemas ocasionados durante a usinagem da mistura asfáltica. Um aspecto que tem sido objeto de várias análises é a definição do teor de projeto ou "teor ótimo" de ligante obtido na dosagem da mistura asfáltica, o qual varia em função dos critérios adotados em sua seleção e também em função de parâmetros, como energia e tipo de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros.

No Brasil, o método de dosagem de misturas asfálticas mais usado é o método Marshall, desenvolvido na década de 1940, e que faz uso da compactação por impacto. Na década de 1980, várias rodovias de tráfego pesado nos EUA passaram a apresentar problemas de deformações prematuros, em função do excesso de ligante nas misturas. A causa do problema foi atribuída à compactação por impacto das misturas que, durante a dosagem, produzia corpos de prova, CPs, com densidades que não condiziam com os valores encontrados no pavimento em campo. Em função dessa incerteza, foi realizada nos EUA uma grande pesquisa, o Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), que acabou resultando em um novo procedimento de dosagem por amassamento, denominado Superpave (Bernucci et al., 2007).

O método Superpave propõe uma forma diferente de preparação do corpo de prova (CP), empregando o compactador giratório. Trata-se de um equipamento prático, com boa repetibilidade e reprodutibilidade, que apresenta as seguintes características básicas: ângulo de rotação de 1,25±0,02°; taxa de 30 rpm; tensão de compressão vertical de 600 kPa; capacidade de produzir corpos de prova com diâmetros de 150,0 mm e 100,0 mm. Para a produção de um CP, devem ser definidos os esforços que serão utilizados para a determinação do volume de vazios da mistura, ou seja, deve ser definido o número de giros ($N_{projeto}$) que serão aplicados para moldar o CP. Esse número de giros é usado para selecionar o teor de ligante de projeto e varia em função do tráfego (AASTHO, 2001).

Com a finalidade de simular em laboratório o desempenho de misturas asfálticas que serão aplicadas em campo, o objetivo principal foi verificar a influência da variação dos teores de ligante na resistência à fadiga em diferentes tipos de misturas asfálticas. Para isso, nesta pesquisa foram

analisadas quatro tipos de misturas asfálticas (CA, SMA, GG e CPA) de diferentes faixas granulométricas (Figura 22), preparadas através de dois métodos de compactação (Marshall e Superpave) e sete ligantes asfálticos (CAP 30-45; CAP 50-70; três asfaltos modificados por polímero e dois asfaltos modificados por borracha. O número de giros para a moldagem dos corpos de prova com o compactador giratório foi determinado para cada tipo de mistura de acordo com a sua respectiva especificação.

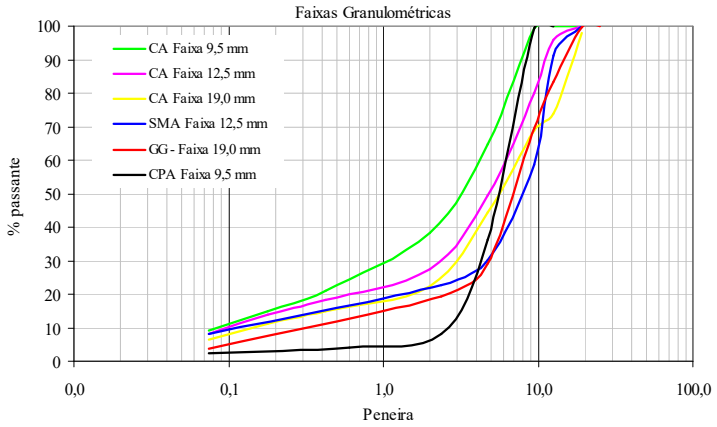


FIGURA 22. FAIXAS GRANULOMÉTRICAS AVALIADAS NESTA PESQUISA.

A pesquisa apresenta um resumo das atividades desenvolvidas no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, onde foram realizadas dosagens Superpave de 44 misturas asfálticas empregando diferentes tipos e teores de ligantes para determinação do teor de projeto (teor ótimo), com moldagem de 688 corpos de prova (CPs) – com compactador giratório, para realizar as dosagens e ensaios mecânicos dinâmicos (fadiga, módulo de resiliência, MR, resistência à tração, RT) e estático (creep). No total, foram utilizadas cerca de 1.200 kg de massa para moldar os CPs e determinar a densidade máxima da mistura não compactada.

Paralelamente às dosagens Superpave realizadas no Laboratório da COPPE/ UFRJ, foram moldados 2.030 CPs no CPR, com compactador Marshall, para dosagem Marshall e ensaios mecânicos, sendo que além dos CPs no teor de projeto, foram moldados CPs ±0,25% e ±0,50% do teor de projeto, totalizando o uso de cerca de 2.500 kg de massa. Como parte da avaliação das misturas asfálticas, CPs no teor de projeto (±0,25% e ±0,50%), moldados no CPR com compactador Marshall, foram enviados à COPPE/UFRJ para serem submetidos aos ensaios mecânicos dinâmicos (fadiga, MR e RT) e estático (*creep*).

Foram realizados os seguintes ensaios no Laboratório da COPPE/UFRJ:
- Granulometria = 36 ensaios
- Análise granulométrica pelo método Bailey = 2 ensaios
- Massa específica de agregados miúdos = 18 ensaios
- Densidade de agregados graúdos = 27 ensaios
- Abrasão Los Angeles = 12 ensaios
- Densidade máxima da mistura pelo método Rice = 288 ensaios
- Massa específica aparente dos CPs compactados = 2.718 ensaios
- Módulo de Resiliência (MR) = 918 ensaios
- Resistência à Tração (RT) = 1.836 ensaios
- Fadiga = 1.152 ensaios
- *Creep* estático = 288 ensaios
- Cantabro = 24 ensaios
- Ensaio de escorrimento de ligante = 12 ensaios

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, pôde-se verificar que todos os tipos de misturas analisadas sofrem influência da variação do teor de ligante na vida de fadiga.

No caso de misturas densas do tipo CA, pôde-se verificar que, na maioria dos casos, um menor teor de ligante em relação ao de projeto é pior, do

ponto de vista da fadiga. No entanto, em alguns casos, um pequeno aumento do teor de ligante proporcionou aumento da vida de fadiga. No caso de misturas densas de granulometria 9,5 mm e 12,5 mm, a influência é maior para misturas com asfaltos modificados, em que um aumento de ligante implica quase sempre em um aumento de vida de fadiga. No caso de misturas de granulometria 19,0 mm, ocorreu o inverso, onde a maioria das misturas apresentou uma redução da vida de fadiga com aumento do teor de ligante. Cabe lembrar que, apesar de pequeno aumento do teor de ligante proporcionar, em alguns casos, um aumento de vida de fadiga, é importante analisar também o comportamento de resistência à deformação permanente e exsudação, uma vez que o excesso de ligante pode originar eventualmente esses tipos de defeitos no pavimento.

A misturas descontínuas do tipo SMA não atenderam às especificações, pois o teor de ligante mínimo não foi alcançado e os agregados graúdos apresentaram desgaste elevado, apesar da adequada composição granulométrica. Sendo assim, a recomendação é que, caso opte-se por aplicar uma mistura do tipo SMA, deve ser realizada a troca da origem de agregados e uma nova dosagem. Também poderá ser testado o uso de ligantes modificados.

Quando analisadas as misturas descontínuas do tipo *gap graded*, pôde-se verificar que a variação do teor de ligante, para cima ou para baixo, implica na redução da vida de fadiga, independente do tipo de ligante, o que implica em dizer que, nesse tipo de mistura, o teor de projeto deve ser sempre atendido. De forma geral, pode-se verificar que as misturas *gap graded* com asfalto modificado por polímero STYLINK apresentaram desempenho inferior quando comparadas com as misturas com asfalto modificado por borracha ECOFLEX Pave B, sendo que as misturas com STYLINK não atenderam ao valor mínimo de VAM (de 17,0%) e que a maioria não atende a RBV (de 65,0% a 75,0%). Quanto à vida de fadiga, pôde-se verificar que as misturas com STYLINK moldadas no teor de projeto, tanto com o compactador Marshall, quanto com o giratório, apresentaram as maiores vidas de fadiga. No caso das misturas moldadas com o ECOFLEX Pave B, a maior vida de fadiga foi obtida pela mistura moldada no teor de projeto com compactador Marshall, sendo a menor vida obtida pela mistura moldada com o compactador giratório.

Quanto às misturas abertas, do tipo CPA, pôde-se verificar que esse tipo de mistura sofre grande influência da forma de compactação empregada na moldagem dos CPs, uma vez que a curva granulométrica é uniforme, formada por agregados quase exclusivamente de mesmo tamanho, com muitos vazios interconectados e quantidade reduzida de material fino. Outro fator importante identificado a partir dos teores de projeto, obtidos na dosagem Superpave, refere-se ao número de giros para moldar os CPs, o qual não corresponde ao mesmo número de golpes utilizado na compactação de misturas densas, no caso de misturas descontínuas e de misturas abertas.

De forma geral, alguns resultados mostraram que a variação do teor de ligante influencia o desempenho das misturas asfálticas em laboratório. Além disso, algumas misturas com o mesmo tipo de ligante apresentaram grande variação na vida de fadiga, o que pode ter acontecido em função do tipo e da forma de compactação das misturas. No entanto, esse comportamento não foi uniforme – em algumas misturas ocorreu aumento da vida de fadiga, com o aumento de +0,25% do teor de ligante, e, em outros, redução, com um aumento de +0,50% do teor de ligante. Outro fator observado é quanto à influência do tipo de compactação, que ainda precisa ser mais explorada, pois o comportamento não é o mesmo para os diferentes tipos de misturas.

6.19. Ensaios para Avaliação dos Concretos Moldados em Ambientes com Vibrações Mecânicas Induzidas por Tráfegos De Veículos

A durabilidade das construções de concreto está relacionada com as vibrações mecânicas atuantes, principalmente, nos primeiros anos de vida do concreto, quando este está em fase de endurecimento. Nesta fase, as vibrações mecânicas podem introduzir danos permanentes na microestrutura, levando a uma redução das propriedades estruturais do concreto, tais como a resistência à tração e resistência à ancoragem. Uma das principais consequências desse fenômeno é uma imediata fissuração das peças, seguida pela perda de rigidez global, decorrente da microfissuração da peça pelas vibrações mecânicas, durante a fase de moldagem.

Quando se trata da ampliação ou reparo de obras de arte, do tipo pontes e viadutos, que são normalmente submetidas a ações dinâmicas, a moldagem das peças passa a ser de importância vital para a durabilidade da estrutura, pois normalmente essas obras são realizadas durante vibrações induzidas por tráfego de veículos das pistas vizinhas. Fissurações prematuras vêm sendo observadas nestas peças.

Para ampliar o entendimento desse fenômeno e propor um método de moldagem de peças para ambientes com vibrações controladas, foi proposto uma avaliação do desempenho da resistência do concreto sujeito às vibrações ambientes, isto é, devido ao tráfego, durante a cura. Para isso, foi realizada uma parceira com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico com o LSE – Laboratório de Sistemas Estruturais.

Na primeira etapa, foram realizados ensaios em laboratório simulando as vibrações ambientes registradas em campo. Na segunda etapa da pesquisa, as peças foram moldadas em campo onde havia vibrações ambientes inerentes à passagem de veículos. Esses ensaios foram realizados durante a moldagem do pavimento da ponte de Lavrinhas, da Rodovia Presidente Dutra, no Estado de São Paulo. Em ambos os experimentos, foram empregados diferentes níveis de vibração, com natureza e intensidade distintas, visando a identificação da mudança das propriedades estruturais de controle tecnológico do concreto. Com os resultados desses ensaios, foram realizadas comparações da resistência e da rigidez medidas em laboratório com as medidas diretamente em ambiente de campo (ponte de Lavrinhas), nas situações de repouso e de vibração.

Para a execução dos ensaios em laboratório, foram moldados corpos de prova com concreto de resistência média de *fck=40 MPa*, utilizando traços fornecidos pela CCR NovaDutra para cimentos CP-III e CP-V.

Nos ensaios de campo, foi utilizado o mesmo concreto utilizado na obra de alargamento de pista da Ponte sobre o Rio Paraíba, km 21,73 da pista São Paulo – Rio de Janeiro, na concretagem do dia 05/10/2006, às 7h00. Os corpos de prova têm formatos cilíndricos e prismáticos. Os cilíndricos foram utilizados para determinação da resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. Os prismáticos foram utilizados para determinação da resistência à tração por flexão e também para ensaio de arrancamento, para avaliação da aderência da barra de aço no concreto.

Para simular em laboratório as condições de vibração em campo, os concretos foram moldados em plataforma vibratória e em plataforma em repouso. Para os ensaios em plataforma vibratória, foram utilizados como referência os registros medidos no Viaduto de acesso à Penedo.

Para esta pesquisa, foram moldados 6 lotes de corpos de prova – dois deles utilizaram o traço com o cimento CP III, três utilizaram o traço com

cimento CP V e um utilizou o mesmo concreto utilizado na obra da ponte sobre o Rio Paraíba em 05/10/2006.

PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Em cada uma das etapas da investigação, foram moldados dois lotes de corpos de prova – um dos lotes foi moldado sobre plataforma vibratória e o outro em plataforma em repouso. A vibração aplicada durante o processo de moldagem e cura foi realizada com um sinal registrado em campo, normalizado, que se repetia a cada intervalo de tempo, tal como ocorre na ponte normalmente. Esse sinal de referência foi registrado no viaduto de Penedo, o qual foi reproduzido na plataforma vibratória com níveis de acelerações cinco vezes maior do que o orignalmente medido no viaduto, durante 4 horas.

Nos ensaios de campo, foram moldados dois lotes de corpos de prova. Um deles foi moldado sobre o vão central da ponte sobre o Rio Paraíba e o outro foi moldado fora da ponte, em uma região em repouso (Figura 23).

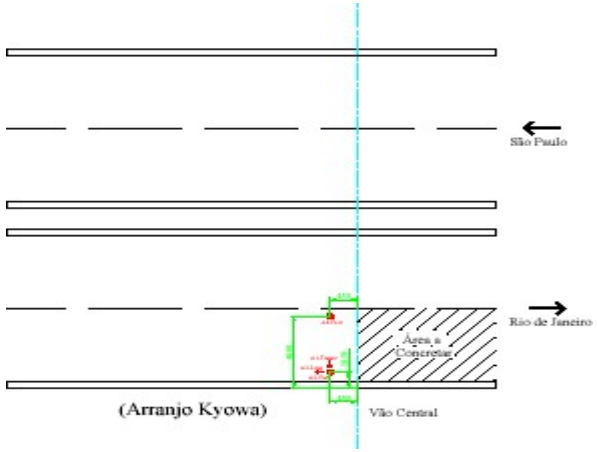


FIGURA 23. ARRANJO DA INSTRUMENTAÇÃO DO TABULEIRO DA PONTE SOBRE O RIO PARAÍBA.

CONCLUSÕES

As conclusões da investigação realizada para avaliar os efeitos da vibração ambiente durante a cura do concreto, tanto em laboratório quanto em campo, estão apresentadas a seguir:

- Nos resultados das 4 amostras ensaiadas no laboratório com amplitude de acelerações em valor rms de 35 mg (acelerações 5 vezes maior que as medidas originalmente em campo no viaduto de Penedo, valor rms 7 mg), verifica-se que a resistência a compressão dos concretos não é uma boa propriedade para indicar o efeito deletério da vibração; o mesmo não acontece na resistência ao arrancamento, onde se verificou que 70% dos ensaios foram sensíveis ao efeito deletério da vibração, ou seja, houve uma redução da resistência em decorrência da vibração;
- O efeito deletério da vibração na resistência e na rigidez do concreto fica mais evidente quando se aumenta a intensidade da vibração; situação que ocorreu nos ensaios de campo, onde se observa que todas as variáveis indicaram uma redução da resistência, onde se praticou vibrações verticais da ordem de 10 mg e na direção transversal ao tabuleiro de 103 mg, com resultante de 110 mg (ambos valores em rms);
- O aumento da intensidade das vibrações levou à redução da resistência ao arrancamento da ordem de 50%;
- Em relação aos resultados da análise das vibrações no tabuleiro da ponte, observa-se que a direção da vibração não é importante na variação da resistência, pois, no caso da ponte de Lavrinhas, as vibrações transversais foram da ordem de dez (10) vezes maiores do que as vibrações verticais;

Finalmente, conclui-se que a investigação alcançou seus objetivos, identificando uma variável que se modifica sensivelmente com a presença da vibração na cura dos concretos. Ademais, a investigação também possibilita a implantação de um procedimento de concretagem para

controlar as vibrações deletérias à resistência do concreto, com medidas localizadas de acelerações, correspondentes às velocidades dos veículos na pista.

6.20. Misturas Asfálticas para Revestimentos de Pavimentos Produzidas com Baixa Energia e Redução de Temperatura, para Diminuição de Consumo Energético e de Emissão de Poluentes

Desenvolvido durante o período de 2009 a 2011, este projeto teve como objetivo introduzir a tecnologia de redução de temperatura na produção e aplicação de misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos, chamada de mistura morna ou de baixa energia, que permite diminuir as temperaturas de mistura e de compactação em cerca de 30°C, em comparação com as misturas asfálticas a quente convencionais, reduzindo-se assim a energia utilizada no processo e, consequentemente, diminuindo a emissão de poluentes, tanto em usina quanto em campo. Estas emissões podem ser reduzidas de 30% a 40% em CO_2 (relacionado aos GEE) e SO_2 (ligado às chuvas ácidas), 50% em compostos orgânicos voláteis (precursores do ozônio e associados aos HPAs), 10% a 30% em CO (indicadores de eficiência de queima), 60% a 70% em NOx (precursor de ozônio) e 20% a 25% em particulados. Dentro deste contexto, é possível que o emprego de misturas de baixa energia possa ser inserido em um projeto para a obtenção de créditos de carbono, sendo este mais um atrativo para as misturas mornas. Outra vantagem atribuída ao uso de misturas de baixa energia é a redução dos gastos com combustíveis devido às menores temperaturas, com uma economia que pode variar entre 11% e 35%, dependendo da técnica empregada.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento de um tipo de mistura asfáltica de baixa energia em laboratório, comparando-a com uma mistura a quente produzida com os mesmos materiais, composição e

métodos, exceto no que se refere à incorporação de aditivo surfactante e às temperaturas de usinagem e compactação. Cabe mencionar que, na tecnologia escolhida, a temperatura dos agregados é reduzida, enquanto a do ligante asfáltico é mantida a usual do tipo de asfalto utilizado. Além disso, esta pesquisa também objetiva acompanhar a execução de um trecho teste com mistura morna na Rodovia Presidente Dutra, complementando esta etapa com análises periódicas de seu desempenho com o tempo.

METODOLOGIA

A mistura morna foi produzida com a mesma granulometria e teor de ligante de uma mistura a quente convencional. Também foram testadas algumas misturas com teores de asfalto ligeiramente acima ao de projeto, como forma de verificar o comportamento nesta condição, já que a redução de temperatura nas misturas mornas poderia dificultar a compactação e, deste modo, um pequeno acréscimo de asfalto auxiliaria na lubrificação dos materiais.

O Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra executou as dosagens das misturas asfálticas a quente pelo método Marshall, em que o LTP-EPUSP se baseou para estudar as misturas mornas deste estudo.

A fase laboratorial de caracterização mecânica das misturas asfálticas analisadas engloba ensaios para a determinação dos vazios com a compactação, deformação permanente em simulador de tráfego, módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e dano por umidade induzida.

Já a etapa de campo inclui a execução de um trecho experimental na Rodovia Presidente Dutra e o acompanhamento de seu comportamento com o tempo, a partir da retirada de corpos de prova para verificação de espessura e vazios. Além disso, têm-se levantamentos de deflexões antes e após a construção desta pista teste com viga Benkelman (Figura 24), de irregularidade com o equipamento Merlin (Figura 25) e da condição superficial de textura após três meses da obra com mancha de areia (Figura 26) e pêndulo britânico (Figura 27). Complementarmente, tem-se ensaios laboratoriais com a mistura morna preparada em usina, a fim de verificar possíveis alterações do teor e da consistência do ligante empregado, granulometria, volume de vazios, deformação permanente e dano por umidade induzida.



FIGURA 24. VIGA BENKELMAN



FIGURA 25. IRREGULARIDADE PELO MERLIN



FIGURA 26. MANCHA DE AREIA



FIGURA 27. PÊNDULO BRITÂNICO

Neste estudo foi empregado o CAP 30-45 e agregados provenientes da pedreira Serveng Barueri (localizada na Grande São Paulo), se enquadrando na Faixa C do DNIT e com diâmetro nominal máximo de 12,5 mm. A composição granulométrica consistia em 14% de brita 1", 45% de pedrisco, 39,5% de pó-de-pedra e 1,5% de cal. A dosagem da mistura a quente de referência indicou um teor de ligante de 5,0% para um volume de vazios de 4,2%. O aditivo utilizado para produzir as misturas mornas foi o Gemul XT14 da empresa Quimigel, sendo incorporado ao ligante em laboratório antes da usinagem, em uma taxa de 0,3% em massa de asfalto. As temperaturas de usinagem e compactação da mistura morna ficaram entre 135ºC e 125°C, já que o ensaio de viscosidade com a mistura de referência indicou 160°C e 150°C de temperatura. A Tabela 5 apresenta os resultados gerais obtidos, considerando a mistura a quente de

referência e a mistura morna, todas no teor de projeto (5,0%) e com acréscimo de 0,2% e 0,4% de asfalto.

Tabela 5. Resultados obtidos em laboratório

Ensaio	A quente teor 5,0% (projeto)	Morna teor 5,0%	A quente teor 5,2%	Morna teor 5,2%	A quente teor 5,4%	Morna teor 5,4%
Volume de vazios, %	5,7	6,2	5,4	5,8	4,7	5,4
Deformação permanente, %	4,6	5,6	4,8	6,1	5,1	6,4
Resistência retida à tração*,%	---	---	---	---	90	87

*após ensaio de dano por umidade induzida

Os resultados mostram que, de modo geral, a mistura morna teve comportamento um pouco inferior ao da mistura a quente. Ao se observar o volume de vazios, nota-se que o acréscimo de 0,2% e 0,4% de ligante na mistura morna melhorou a compactação, entretanto, o potencial para deformação permanente ficou ligeiramente mais elevado. Dentro deste contexto, pressupôs-se que esta mistura de baixa energia poderia ser aplicada no trecho experimental, mas de forma cautelosa, com indicação de preparo com acréscimo de 0,4% de ligante, para que a compactação ocorresse de maneira mais eficiente sob menor temperatura em campo.

Assim, o ensaio de dano por umidade induzida foi realizado com as misturas com adição de 5,4% de asfalto, onde se observou que o comportamento da mistura morna foi muito semelhante ao da mistura a quente, atingindo valor bastante satisfatório, ao se considerar que o mínimo exigido pela especificação do DNIT para misturas a quente é de 70%.

Pesquisa de Campo: Trecho Experimental

O trecho experimental de mistura morna foi programado para ser executado com aproximadamente 600 m, na faixa 1 da pista expressa sul do km 225 da Via Dutra, na altura da cidade de Guarulhos (localizada na Grande São Paulo).

Para a construção do trecho experimental, foi indicado que a mistura de baixa energia deveria ser usinada com um acréscimo de 0,4% de ligante, em relação ao teor de projeto da mistura a quente, e com os mesmos materiais. As temperaturas apontadas para usinagem e compactação foram as mesmas utilizadas no estudo laboratorial (em média, cerca de 135°C e 125°C, respectivamente). Recomendou-se ainda para a usina que o aditivo fosse introduzido no tanque de ligante, sendo mantido sob agitação até momento do uso.

A execução do trecho experimental se deu em novembro de 2009, durante a madrugada. Antes de aplicar a mistura morna, foi realizada uma fresagem de 6 cm do revestimento. Em seguida, a mistura morna foi aplicada, sendo compactada em temperatura de aproximadamente 120°C. Após a execução de cerca de 70 m, a vibroacabadora apresentou problemas, por isso, considera-se somente o trecho de 70 m como trecho experimental, do km 225+250 ao 225+320.

Um mês após a execução da obra, foram retiradas amostras (oito corpos de prova) no local, para verificação dos vazios. Além disso, foram extraídos dois corpos de prova em pontos anteriores ao trecho experimental (na parte mais antiga), para fins de comparação. Também foram identificadas deflexões em seis pontos do trecho de mistura morna. Dois pontos ficaram acima do limite máximo aceitável considerado, de $42{,}3\times10^{-2}$mm, em decorrência de um dreno transversal posicionado nesta altura, e as demais deflexões se mostraram aceitáveis, variando entre aproximadamente 25 e 40×10^{-2}mm.

Conclusões

Levando-se em conta os resultados obtidos pode-se concluir dentro da etapa laboratorial que:

- Com um certo incremento do teor de ligante (em relação ao teor de projeto), a mistura de baixa energia pôde ser compactada mais facilmente, porém, a mistura ficou mais sensível à formação de trilha de roda (como já era esperado); os valores de afundamento em trilha de roda ainda permanecem muito próximos ao da mistura original de projeto a quente;
- Do mesmo modo, os resultados de dano por umidade se mostraram bastante satisfatórios.

Já dentro da etapa de campo, tem-se como conclusões que:

- A mistura asfáltica morna pôde ser preparada e aplicada em campo com sucesso, segundo métodos usualmente empregados com misturas a quente. Assim, embora tenha ocorrido um problema com o equipamento de obra, o pequeno segmento inicial de 70 m foi executado satisfatoriamente e pôde ser considerado para efeito desta pesquisa;
- Após três meses da obra, o levantamento de deflexões apontou valores aceitáveis, exceto em dois pontos (mas isto se deve ao fato de estes estarem posicionados próximo a um dreno transversal da rodovia); o levantamento de irregularidade apontou valores aceitáveis de IRI (2,48 m/km) e QI (32,2 cont/km). Além disso, a textura superficial do pavimento com mistura morna se mostrou relativamente "fechada", em termos de macrotextura, mas ainda assim ligeiramente melhor do que no trecho antigo, construído com uma mistura asfáltica a quente. Devido ao tráfego extremamente intenso e pesado da Rodovia Presidente Dutra, é provável que haja um polimento acelerado dos agregados da superfície da camada, culminando no "fechamento" da textura.

Com relação aos ensaios realizados com a mistura morna coletada em usina verificou-se que:

- O teor de ligante empregado (5,1%) ficou ligeiramente abaixo do valor indicado pelo projeto (5,4%), mas dentro do usualmente aceitável como erro de usina (-0,3%);
- Os testes de volume de vazios (entre 4,1% e 6,4%), deformação permanente e dano por umidade induzida (RRT=92%) apresentaram valores aceitáveis para o tráfego pesado da Rodovia Presidente Dutra, no trecho considerado.

6.21. Proposição de um método de dimensionamento de camadas de reforço de pavimento de alto desempenho a partir de estudos de misturas asfáltica de elevado módulo

Os concretos asfálticos produzidos com asfaltos duros recebem o nome de misturas asfálticas de módulo elevado (*Enrobé à Module Élevé* - EME) por apresentarem módulo complexo elevado e também elevada resistência à deformação permanente. Possuem curvas granulométricas contínuas, próximas à de máxima densidade, maximizando a resistência ao cisalhamento e minimizando os vazios. O baixo volume de vazios e alta dosagem de ligante (em torno de 6%) proporcionam à camada de EME uma superfície muito lisa, não sendo apropriada sua utilização como camada de rolamento, em decorrência de problemas relativos à baixa aderência pneu-pavimento em dias de chuva. A camada de EME, portanto, é empregada como camada de ligação de pavimentos asfálticos espessos do tipo *deep-strenght*, e sobre ela são empregados em geral revestimentos delgados que, além de proporcionar maior segurança quanto à aderência em pavimentos molhados, também tem o objetivo de reduzir os riscos de deformação permanente na camada asfáltica – por ser delgada e suportar esforços desta natureza.

Dimensionamento de Estruturas de Restauração de Pavimentos

Para o dimensionamento de uma estrutura de pavimento asfáltico, de modo geral, deve-se compreender como ela atinge sua condição de ruína. Tal análise tem como princípio a adoção de cálculos das tensões e deformações, por meio da teoria da elasticidade, usando programas computacionais para facilitar e acelerar os cálculos, a partir da representação numérica de um sistema de camadas elásticas com seus respectivos valores de módulo de resiliência (MR) e coeficiente de Poisson (μ).

Quanto às respostas de solicitações mecânicas envolvidas nas estruturas, cada tipo de material se comporta de maneira diferenciada em função de seus materiais constituintes (Huang, 2004):

- para subleito ou camada granular são calculadas as deformações verticais (εv) no topo da camada;
- para camada asfáltica são avaliadas as deformações de tração na sua fibra inferior (εt) e os deslocamentos plásticos que levam a deformações permanentes;
- para camada estabilizada quimicamente com aglomerante hidráulico, limitam-se as tensões de tração na sua fibra inferior (σt).

Análise Estrutural

A análise e verificação dos comportamentos estrutural e deflectométrico do pavimento partiu do estudo paramétrico, envolvendo simulações de estruturas e assentes a um substrato remanescente (que, portanto, sofreu ações do tráfego ao longo de sua vida de serviço), compostas de camada de base em mistura asfáltica de módulo elevado (EME) e um revestimento constituído por uma mistura asfáltica delgada. Para a análise do comportamento estrutural do pavimento frente às diversas simulações de carregamento, foi utilizado o programa computacional de camadas elásticas ELSYM-5, que permite determinar as deflexões, tensões e deformações, em qualquer ponto da estrutura, sob ação de várias cargas.

Neste estudo, as simulações de carregamento foram baseadas em dois equipamentos utilizados para finalidade de avaliação estrutural: "*Falling Weight Deflectometer*" (FWD) e viga Benkelman (VBK). Para a VBK, adotaram-se dois carregamentos distintos no eixo simples de roda dupla (ESRD): 82kN e 130kN. No ESRD simulado, foram utilizadas duas cargas por roda dupla, espaçadas de 340 mm, sendo o número de cargas aplicadas caracterizada por quatro esforços verticais de 20,5kN (ou de 32,5kN, conforme o caso) dispostos geometricamente a partir das coordenadas, em milímetros: (0; 0), (340; 0), (1810;0) e (2.150;0). O planejamento fatorial resultou em 3.456 interações das variáveis independentes.

Neste trabalho, foram consideradas como variáveis, as respostas apenas dos valores máximos dos indicadores estruturais a seguir relacionados, nos respectivos pontos críticos de interesse:

- Deflexão máxima (D_0) na superfície do pavimento;
- Deformação específica máxima de tração (εt) na fibra inferior da camada de EME para avaliação da fadiga;
- Tensão específica máxima de tração (σt) na fibra inferior da camada de EME;
- Deformação vertical máxima de compressão (εv) no topo da camada remanescente.

Considerando-se que o valor da deflexão máxima D_0, quando analisado isoladamente, pode não ser suficiente para a avaliação estrutural do pavimento, procurou-se também utilizar outros métodos complementares, baseados nas características da linha de deformação elástica da estrutura, quando submetida à ação de um carregamento. Assim sendo, considerou-se, além da magnitude das deflexões, os seguintes parâmetros de análise como variáveis dependentes no estudo: área "S" (AASHTO, 1993); raio de curvatura "R" (DNER,1994); produto entre o raio e a deflexão máxima "R x D_0" e índice de curvatura da superfície "SCI" (Wsdot, 1995; Kim et al., 2000).

As Figuras 28 e 29 apresentam algumas fotos da mistura asfáltica do tipo EME executada no trecho experimental da Rodovia Presidente Dutra.



FIGURA 28. CARACTERÍSTICA DA MISTURA DE EME



FIGURA 29. TRECHO EXPERIMENTAL COM EME.

ESTUDO ESTATÍSTICO

Para obtenção de uma maior confiabilidade nos estudos realizados, os resultados das variáveis foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA). Seu objetivo é identificar se os valores das variáveis dependentes diferem significativamente entre si, do ponto de vista estatístico. A partir desta análise, foi possível estabelecer a significância das variáveis independentes e das interações sobre a variável dependente, determinada por meio da análise de variância dos termos dos modelos obtidos. Por meio da análise de variância (ANOVA), utilizada para avaliar quais variáveis independentes influenciam na variável dependente, conclui-se que todos os modelos estudados apresentaram fortes correlações apresentando coeficientes de determinação que se ajustaram 88,8% a 99,9% às variáveis dependentes.

CONCLUSÕES

A partir dos modelos apresentados neste trabalho, é possível determinar

as condições estruturais do pavimento existente e do tráfego futuro, e definir rapidamente as características geométricas e mecânicas das misturas asfálticas de módulo elevado (EME) a serem empregadas nas camadas sobrejacentes para restauração. Cabe salientar que os modelos obtidos da análise dos dados paramétricos são teóricos, ou seja, revelam o comportamento estrutural considerando o procedimento de cálculo adotado pelo programa computacional ELSYM-5, que admite o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas e semi-infinito, sendo que seus materiais assumem comportamentos isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico-linear, obedecendo à lei de Hooke generalizada, de acordo com o princípio da Teoria da Elasticidade. Portanto, faz-se necessária a validação destes modelos em campo; ou seja, em trechos, com estrutura constituída de camada de base com EME estabelecida neste trabalho, submetidos a tráfego real e constantemente monitorados.

6.22. Avaliação da Pesagem de Veículos em Movimento com Cargas Líquidas

O uso do sistema rodoviário no transporte de cargas líquidas é fundamental para a economia nacional, principalmente no transporte de derivados de petróleo e álcool. O controle do peso dos veículos tanque em transporte de cargas líquidas apresenta-se como uma preocupação evidente das concessionárias de rodovias, considerando-se o desgaste prematuro do pavimento e a prevenção de acidentes ocasionados por veículos com excesso de carga. A movimentação da carga dentro dos tanques apresenta-se como o elemento principal no estudo do controle de pesagem na rodovia, com a finalidade de se estabelecer parâmetros de exatidão para a medição do peso do veículo em movimento com cargas líquidas.

A utilização de instrumentos de pesagem de veículos em movimento tem sido vedada para a pesagem de cargas líquidas a granel, considerando o ofício INMETRO/DIMEL Nº 018/2008, que determina que estes instrumentos não são aprovados para esta finalidade e devem portar a inscrição “Instrumento não apropriado para a pesagem de carga líquida a granel”.

O objetivo deste estudo é a utilização destes instrumentos através de adaptações, seja na legislação ou no ajuste de funcionamento, tendo em vista a dificuldade de se verificar o peso dos veículos, por falta de instrumentos de pesagem estática, instalados nas rodovias. O projeto aprofundou-se em determinar a confiabilidade destes instrumentos, além de contribuir para a regulamentação de instrumentos de pesagem e na fiscalização de veículos no transporte de líquidos perigosos, produtos líquidos utilizados em processos industriais e combustíveis.

A análise em questão colabora para avanços tecnológicos na utilização de balanças dinâmicas nas rodovias e para o aprimoramento de políticas de controle de excesso peso nas estradas. Desta forma, colabora para a adoção de medidas preventivas para a redução de acidentes de trânsito e desgastes prematuros nas rodovias.

MÉTODO

Basicamente, consiste em estudar a pesagem dos veículos, analisando o resultado da medição em diferentes composições de caminhões e tipos de cargas. O processo de análise feito levou em consideração o peso de referência de cada veículo, determinado por pesagem estática em uma balança de controle, e o valor medido na balança dinâmica. Para a validação da metodologia, foram utilizados, em São Paulo, dois diferentes tipos de instrumentos de pesagem dinâmica – um fixo e o outro portátil – e sete tipos de veículos de carga diferentes, contendo carga líquida e carga sólida. Foram avaliados os erros da medição, considerando o projeto da nova regulamentação de pesagem de veículos em movimento desenvolvido no Inmetro, os principais fatores de influência na pesagem (Faruolo et al,. 2006), e o modelo de análise de confiabilidade desenvolvido por Faruolo et al., de 2007.

Para a análise, foi desenvolvida uma estrutura operacional em Queluz (SP), na Rodovia Presidente Dutra, para a medição específica dos veículos. Os veículos passaram em uma sequência de pesagem – primeiro, por uma balança fixa, e, em seguida, em uma balança móvel, instaladas na mesma trajetória –, formando a disposição de duas praças de pesagens. Este artifício propiciou a comparação direta entre os dois instrumentos de pesagens.

Adicionalmente, foi realizada uma inspeção a fim de registrar as condições de segurança dos veículos. A utilização de veículos em condições de conservação conhecidas proporcionou a verificação da sensibilidade dos sistemas de pesagens face às condições dos pneus e estabilidade do chassi.

RESULTADOS

Na análise, foram consideradas as classes mais adequadas para a avaliação, correspondendo às classes 5 para o peso bruto total, denominada massa do veículo, e "E" para conjunto de eixos, sendo os limites descritos nas respectivas classes.

Uma observação importante foi a identificação de variação dos valores de erro onde são apresentados os valores de erros máximos para cada veículo, relacionados aos valores de PBT (peso bruto total), e por eixo ou conjunto de eixos, inferiores ao limite de 5% para o PBT e, na maioria dos casos, inferiores ao limite de 7,5% para valores por eixos da legislação de trânsito vigente na época do estudo.

Pode-se verificar que os valores de erros por eixo são maiores, com tendência a erros superiores em veículos mais longos. No veículo de 6 eixos com propeno, foi identificado que as cargas por eixos isolados não estavam distribuídas de forma uniforme. Os resultados registrados para erros por eixo são superiores aos relacionados ao PBT.

No caso da balança móvel, os valores de erros são superiores aos valores da balança fixa. Nesta balança, não foram considerados os dois outros veículos com carregamento de brita – fato este, em decorrência da chuva que acarretou na interrupção das medições. Os valores dos erros registrados para veículos com carga seca são inferiores aos veículos com carga líquida.

A apresentação dos dados demonstra a variação em valores positivos e negativos. Os veículos mais longos apresentam erros maiores. Neste caso,

o tamanho do tanque é uma variável fundamental na possibilidade de deslocamento da carga, como é o caso dos veículos com seis eixos e com tanques de até 30.000 L.

A partir da constatação da fonte do erro que proporciona esta variação acentuada, estes valores podem ser reduzidos, melhorando a eficiência do sistema de pesagem. A identificação da variação da velocidade e da aceleração durante a pesagem é fundamental para a melhoria na qualidade das medições, reduzindo os valores de pico de erros durante a medição. A análise em função dos erros médios e a dispersão de cada veículo indicam valores reduzidos, e poucas medições equivalentes aos valores mais altos.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram desenvolvidos elementos capazes de demonstrar que, em condições ideais, é possível avaliar o peso dos veículos em movimento com cargas líquidas. O estudo proporcionou um elemento eficiente para o estabelecimento da legislação metrológica adequada para o desenvolvimento desta atividade.

Os aspectos metrológicos utilizados no estudo apresentam uma variável decisiva na fiscalização do peso, pois o controle da aceleração é fundamental para a análise dos resultados. A implementação deste controle mais rígido na legislação torna evidente a melhora na qualidade da medição e no respectivo controle de peso dos veículos na rodovia. Os resultados parciais apresentados serão complementados com uma nova coleta de dados em campo, a fim de consolidar estes resultados.

Os aspectos de metrologia legal, onde a aplicação da legislação e a defesa do cidadão são fundamentais, são determinantes na avaliação da eficiência do instrumento de pesagem. O desenvolvimento da pesquisa, relacionada a prática de políticas públicas de regulamentação metrológica, representa um avanço imediato da qualidade do tráfego nas rodovias.

6.23. Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária NovaDutra

As equações empíricas recomendadas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) para o dimensionamento da estrutura de pavimentos (AASHTO, 1993) são baseadas nos resultados das avaliações, realizadas em rodovias teste originais, pela AASHTO, de 1958 a 1961, em Ottawa, Illinois (EUA). O estudo avaliou o desempenho de pavimentos de concreto, compostos por cimento Portland, e de pavimentos de concreto asfáltico, sob tráfego de particular magnitude e frequência.

De acordo com a *Federal Highway Administration*, 80% dos estados americanos usam os guias da AASHTO, publicados respectivamente em 1972, 1986 e 1993. Muitos países pelo mundo também utilizam este método para dimensionamento de pavimentos. Estes procedimentos empíricos são baseados nas equações de desempenho desenvolvidas através dos dados do pavimento experimental da AASHTO, de 1950.

Apesar destes métodos empíricos serem usados há muitos anos, eles apresentam um número de limitações que restringem sua eficiência como base para dimensionamento. Algumas dessas limitações incluem:

- Deficiências no carregamento do tráfego: o carregamento de caminhões pesados aumentou de forma considerável desde a década de 1960. Atualmente, pavimentos necessitam de dimensionamento para carregamento que possa atingir 200 milhões de passagem de eixo ou mais, porém as equações de dimensionamento básicas foram obtidas para carregamento de tráfego de menos de 2 milhões ESAL's. Isto significa que a aplicação deste método para o tráfego atual necessita de uma extrapolação da metodologia de dimensionamento, distante dos dados utilizados para derivar as equações.
- Deficiências para reabilitação: procedimentos para reabilitação de pavimentos não foram considerados nos pavimentos testados na AASHTO.

OBJETIVOS

Esse trabalho de pesquisa firmado entre ASU (Arizona State University) e a Concessionária CCR NovaDutra teve como primeiro objetivo o desenvolvimento de um guia para implementação do novo método MEPDG no processo de dimensionamento de pavimentos novos, além da reabilitação, para as condições da Rodovia Presidente Dutra. O objetivo principal tem como premissa melhorar e/ou validar dimensionamentos e modelos de previsão previamente existentes.

DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

A completa implementação do MEPDG não consiste apenas no uso direto do software, mas requer uma série de atividades e esforços que incluem – mas não são limitados a – a caracterização laboratorial dos materiais, seleção e avaliação de seções teste para o processo de calibração e calibração do MEPDG para condições locais que incluem materiais, tráfego e variáveis climáticas e ambientais.

Para este estudo, definiram-se sete seções homogêneas de tráfego para a Rodovia Presidente Dutra. Dois tipos diferentes de camadas de mistura asfáltica foram empregadas na análise: a primeira foi referida como "Concreto Asfáltico" (CA) e a segunda como "*Binder*" ou camada de ligação.

PREVISÕES DE DEFEITO NO MEPDG

Após serem compiladas todas as informações, foi executado o método de dimensionamento para os sete cenários. Os dados de saída do MEPDG contêm previsões de defeitos individuais mensais para o período de projeto.

Os defeitos abrangidos são: deformação permanente da mistura asfáltica, trincamento por fadiga, trincamento longitudinal, trincamento por reflexão, trincamento térmico. Já que trincamento térmico é causado por mudanças extremas de temperatura negativa, o que não é o caso da Rodovia Presidente Dutra, este defeito não foi previsto. Além disso, não foi previsto trincamento por fadiga (base-topo) para aquelas seções.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um guia para implementação do novo MEPDG no processo de dimensionamento de pavimentos novos e de restaurações para as condições da CCR NovaDutra; o objetivo final é o de melhorar e/ou validar dimensionamentos e modelos de previsão previamente existentes.

O principal ponto deste guia foi identificar os dados de entrada que a Concessionária NovaDutra precisa para uma futura implementação do MEPDG. Como mencionado no relatório, a completa implementação do Guia a longo prazo se inicia pela identificação de quais informações serão requeridas para uma transição com sucesso para esta nova ferramenta de análise de projeto e de dimensionamento de estruturas de pavimentos.

As primeiras seções deste relatório fornecem uma experiência sobre o MEPDG que ajuda a identificar as principais diferenças com relação ao método de dimensionamento tradicional. O relatório também inclui uma visão geral do guia para o reconhecimento das etapas no método de dimensionamento, bem como dos dados de entrada que são requeridos em cada campo (tráfego, clima, materiais). Para ter uma avaliação inicial das necessidades de uma calibração do MEPDG para as condições da CCR NovaDutra, diferentes casos foram avaliados. Esta análise representa um ponto inicial para futuras implementações do guia. Não existem previsões de desempenho disponíveis para comparar com os resultados, mas, no geral, o MEPDG levou a medidas mais elevadas de defeitos quanto à deformação permanente e trincamento por reflexão. Este estudo preliminar mostra o quão vital é a calibração e a validação do guia para as condições da CCR NovaDutra antes de sua implementação.

O uso efetivo dos procedimentos do novo MEPDG requer bancos de dados de materiais e de tráfego para se ir além do Nível 3 e das informações *defaults* do MEPDG. Os dados climáticos completos também são necessários para se criar o banco de dados de clima requerido.

Ademais, o MEPDG necessita também de calibração local para a previsão de defeito de cada pavimento. Para novas estruturas de pavimentos flexíveis, isto inclui: deformação permanente (camadas de concreto asfáltico, base granular, sub-base e subleito, e a profundidade total de afundamento), trincamento por fadiga (trincamento longitudinal topo-base e trincamento tipo couro-de-jacaré base-topo) e IRI. O processo de calibração envolve o ajuste das equações de previsão de defeitos de forma a minimizar as diferenças entre o comportamento previsto e o observado. O processo de modelagem de validação envolve a coleta de dados suficientes para confirmar a validade dos modelos de previsão calibrados.

6.24. Elaboração do Projeto Funcional da Nova Pista de Subida da Serra das Araras e Adequação do Projeto Funcional da Pista Ascendente Existente em Pista Descendente

O trabalho em pauta apresenta o estudo das alternativas de traçado da nova pista ascendente, elaboradas para vencer o desnível de 380 m de serra entre as cidades de Piraí e Paracambi, no estado do Rio de Janeiro, conhecida como a Serra das Araras, na Rodovia Presidente Dutra (BR-116/RJ), entre o km 219 e o km 229. Nesses projetos, foi considerado que:

- Contemple novo projeto com velocidade diretriz de 80 km/h e projeções de crescimento de tráfego que considerem os eventos da Copa do Mundo de 2014 e das Olimpíadas de 2016 no estudo de capacidade viária, de forma a proporcionar um nível de serviço operacional adequado;
- Evite a redução de capacidade de tráfego durante a execução da obra, em função da necessidade de: interrupções nas pistas; desvios do eixo; confinamento das pistas; operação de segmentos em mão dupla; redução de velocidade, devido a curiosidade dos usuários; e que garanta a segurança e a integridade dos usuários e dos trabalhadores;
- Utilize a pista atual de subida invertida para descer a serra, com adequações necessárias, para ter ganhos operacionais e de segurança para os usuários.

O documento subsidiou a concessionária para discutir e decidir, em conjunto com a ANTT, a solução de traçado que melhor atende às necessidades atuais de demanda de tráfego, com segurança, fluidez e conforto, necessários para um atendimento satisfatório aos usuários e um acompanhamento operacional seguro.

OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo foi o desenvolvimento de projetos funcionais para a nova pista de subida da Serra das Araras e adequação da pista ascendente existente em pista descendente. Para atingir esse objetivo principal foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Análise de diversas variáveis geométricas e geotécnicas possíveis,
- Estudo de cenários económicos;
- Estudos de tráfego;
- Análise dos benefícios esperados;
- Estimativa dos valores dos investimentos e análise econômica pelo método HDM-4.

TRAÇADOS PRELIMINARES

Inicialmente estudaram-se diversos traçados alternativos para a nova subida da Serra das Araras, conforme ilustra-se na Figura 30. Esses traçados iniciais foram estudados considerando a constituição geológica da região, tráfego e sua velocidade, a necessidade e extensão de túneis e viadutos, e benefícios.

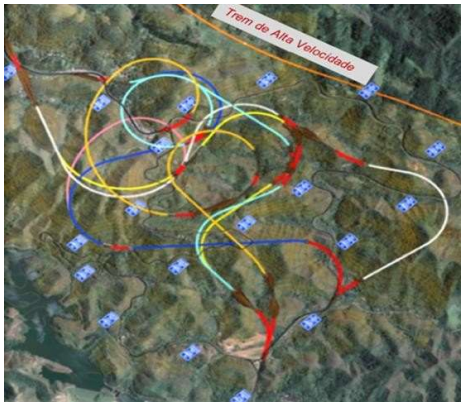


FIGURA 30. ALTERNATIVAS PARA A NOVA SUBIDA DA SERRA DAS ARARAS.

ANÁLISE PELO MÉTODO HDM4

Os estudos coletaram toda a informação necessária para alimentar o HDM-4 e analisar as três alternativas inicialmente selecionadas. Após análise desses diversos fatores, para os três traçados preliminares, obteve-se a consolidação dos parâmetros econômicos para cada uma das alternativas, com e sem aplicação de fatores de redução econômico/financeiro (custo sombra).

PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Com base nos dados e análises realizadas neste estudo, obtiveram-se as seguintes conclusões:

Quanto ao nível de serviço das soluções estudadas:

- De acordo com o cenário de tráfego adotado, o projeto de duplicação é a solução que apresenta a menor vida útil econômica, a qual requer investimentos adicionais para adequação do nível de serviço a partir de 2029, ou seja, 10 anos antes do que as demais alternativas. Salienta-se que esses investimentos adicionais foram desconsiderados neste estudo.

Quanto aos benefícios analisados:

- Dos benefícios específicos analisados, a redução dos custos operacionais dos veículos é o mais representativo (72%), seguido pela redução do número de acidentes (20%) e a redução do tempo das viagens (8%).

Quanto aos indicadores econômico-financeiros:

- Apenas o projeto de duplicação e as alternativas 5C e 7 mostraram-se viáveis quando comparadas à taxa mínima de desconto econômico (ou social), admitindo a redução pelo fator econômico/financeiro (custo sombra);
- Em função do elevado valor estimado de investimento, a alternativa 5B se mostra economicamente inviável em qualquer situação: com ou sem a aplicação do fator de redução econômico/financeira;
- Sem a aplicação do redutor (custo sombra), a relação benefício/custo da Alternativa 7 é 45% superior à do projeto de duplicação e da alternativa 5C;
- Com a aplicação do redutor (custo sombra), a relação benefício/custo da alternativa 7 é 50% superior à do projeto de duplicação e da alternativa 5C;
- Desconsiderando-se o efeito redutor (custo sombra), apenas a alternativa 7 apresenta viabilidade adequada, ou seja, relação benefício/custo superior a 1 e taxa interna de retorno (TIR) superior (6,9%) à taxa de desconto social (5,1%).

Quanto aos aspectos ambientais:

- Numa avaliação preliminar, a alternativa 7 apresenta volume de escavação inferior às demais alternativas, incluindo o projeto de duplicação, demandando menor área para depósito de material excedente e menor necessidade de caminhos de serviço, pois o emboque do túnel proposto está próximo à passagem inferior que será implantada e o local para depósito de material excedente indicado está na mesma posição do emboque, do outro lado da BR-116.
- A alternativa 7 e o projeto de duplicação apresentam emissão de dióxido de carbono similares durante o período de vida útil, considerando-se o modelo de cálculo recomendado pelo GHG Protocol (*Green House Gas Protocol*), estima-se que, mantendo-se a situação atual, será lançado cerca de 1.425 TCO_2e (toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente), porém com a implantação de um novo traçado (alternativa 7 ou projeto de duplicação) ocorrerá uma redução de 4% de emissão deste poluente.

6.25. Capacitação da Equipe Técnica do CPR para Uso dos Novos Equipamentos Adquiridos

Em 2010, o Centro de Pesquisas Rodoviárias, da CCR NovaDutra, iniciou a aquisição de equipamentos sofisticados para avaliação de diversos materiais empregados na construção e restauração de pavimentos rodoviários. Assim, para capacitar a equipe técnica, foi realizada a contratação de uma empresa parceira para o desenvolvimento e realização de aulas aplicadas aos conceitos básicos de pavimentação.

O conteúdo dessas aulas tem como base os materiais empregados na constituição de misturas asfálticas, e foram agrupados da seguinte maneira:

MATERIAIS:

- Tipos: ligantes asfálticos, agregados, solos e aditivos;
- Classificação: tradicional e Superpave;
- Caracterização: granulometria, densidades, Bailey, abrasão Los Angeles etc.

MISTURAS ASFÁLTICAS:

- Tipos de misturas asfálticas: concreto asfáltico (CA), *stone matrix asphalt* (SMA), camada porosa de atrito (CPA) e *gap-graded* (GG);
- Métodos de dosagem convencional e Superpave;
- Avaliação das misturas asfálticas: ensaios volumétricos (massa específica máxima, massa específica aparente, volume de vazios e vazios do agregado mineral) e mecânicos (módulo de resiliência,

módulo dinâmico, *flow number* e fadiga).

Programa de Treinamento

Organizado em aulas presenciais, as aulas do programa de treinamento foram apresentadas da seguinte forma:

- **Aula 1:** Introdução e breve histórico da pavimentação no Brasil
- **Aula 2:** Terminologia e noções gerais sobre pavimentação
- **Aulas 3 e 4:** Agregados - tipos e ensaios
- **Aula 5:** Agregados - Superpave
- **Aulas 6, 7, 8 e 9:** Método Bailey - teoria e prática
- **Aula 10:** Ligantes asfálticos convencionais - tipos e ensaios
- **Aula 11:** Ligantes modificados - tipos e ensaios
- **Aula 12:** Ligantes asfálticos - Superpave - ok!
- **Aulas 13 e 14:** Misturas Asfálticas - tipos: concreto asfáltico; *stone matrix asphalt*; *gap graded*; camada porosa de atrito
- **Aulas 15 e 16:** Dosagem de misturas asfálticas - método Marshall
- **Aula 17, 18, 19 e 20:** Dosagem de Misturas Asfálticas - Método Superpave - teoria e prática
- **Aulas 21, 22, 23 e 24:** Ensaios - teoria e prática

Considerações Finais

Durante o período de treinamento, foi feito o acompanhamento das atividades realizadas no laboratório, onde os técnicos aplicavam os conhecimentos adquiridos nas aulas teóricas e práticas. Dessa forma, foi possível observar a realização dos procedimentos de ensaios, assim como dos métodos de dosagens de misturas asfálticas. Outro aspecto importante abordado foi a dosagem empregando o método Superpave e a moldagem dos corpos de prova com o compactador giratório, que representa um grande avanço, uma vez que a moldagem por amassamento, empregando o compactador giratório, simula melhor a passagem do rolo compactador em campo.

6.26. Capacitação da Equipe Técnica do CPR para Uso dos Novos Equipamentos Adquiridos

Com a construção do novo centro de pesquisa, a CCR NovaDutra passou a desenvolver diversas pesquisas e aplicar novas tecnologias nos pavimentos sob sua responsabilidade, empregando equipamentos importados da mais alta tecnologia, para atender as especificações Superpave e, dessa forma, poder simular o comportamento de materiais e misturas asfálticas em laboratório antes de aplicá-los em campo.

Um dos maiores problemas encontrados entre profissionais que atuam na área de pavimentação asfáltica é o desconhecimento e emprego errado de termos técnicos. Por exemplo, um equívoco é "traduzir" os termos técnicos aproveitando as siglas internacionais sem considerar a sua definição, por exemplo, Gsa = Apparent Specific Gravity = densidade real do agregado e não densidade aparente do agregado, que é Gsb = Bulk Specific Gravity.

Portanto, o objetivo desse projeto foi realizar a capacitação técnica da equipe do CPR, principalmente em relação a metodologia SUPERPAVE.

As aulas teóricas da capacitação da equipe técnica foram ministradas na sala de reuniões e as aulas práticas foram realizadas no laboratório do novo centro de pesquisas da CCR, localizado na sede da Nova Dutra - Rodovia Presidente Dutra BR-116, em Santa Isabel, SP. O objetivo desse trabalho era treinar e capacitar a equipe técnica para realizar avaliação e caracterização dos diversos materiais e misturas asfálticas, empregando os ensaios convencionais e Superpave. Para isso foi feito o acompanhamento das atividades realizadas pela equipe técnica, assim como dos procedimentos atualmente adotados na avaliação, caracterização e dosagem dos materiais empregados na pavimentação asfáltica.

Após essa etapa de acompanhamento foi feita uma análise das técnicas empregadas, onde foi verificada a necessidade de alterações, atualizações e desenvolvimento de novos procedimentos. O treinamento foi composto por aulas teóricas e práticas.

O conteúdo das aulas tem como base os conceitos básicos sobre pavimentação asfáltica, incluindo materiais e misturas asfálticas, aplicando a metodologia Superpave.

MATERIAIS:

- Tipos: ligantes asfálticos, agregados, solos e aditivos;
- Classificação: tradicional e Superpave;
- Caracterização: granulometria, densidades, Bailey, abrasão Los Angeles etc.

MISTURAS ASFÁLTICAS:

- Tipos de misturas asfálticas: concreto asfáltico (CA), stone matrix asphalt (SMA), camada porosa de atrito (CPA), gap-graded (GG);
- Métodos de dosagem convencional e Superpave.
- Avaliação das misturas asfálticas: ensaios volumétricos (massa específica máxima, massa específica aparente, volume de vazios, vazios do agregado mineral) e mecânicos (módulo de resiliência, módulo dinâmico, flow number e fadiga).

6.27. *Free Flow* - Implantação De Pontos Com Novo Sistema Automático De Arrecadação Para Testes (1ª Etapa)

Um sistema de teste de arrecadação foi instalado numa sequência de sítios ao longo da rodovia Presidente Dutra para a determinação do nível de acerto de inspeção automática via OCR para todos os períodos ao longo de um conjunto de dias de operação. A taxa efetiva de acerto (considerada correção de perda de tráfego e apoio de BackOffice, ou seja, é a soma %fCE+%fCH) para os melhores pontos flutua dentro do intervalo de 70% a 80%. Esse índice de validação de leituras foi obtido em apenas dois sítios, o de Guarulhos (GRU) (km 227) e o de São José dos Campos (SJC) 'sul' (km 140). O primeiro sítio adquiriu imagens da fronteira de veículos, enquanto que o segundo capturou imagens traseiras. Vale ressaltar que o ponto GRU é responsável por 44% do fluxo de veículos no trecho de rodovia estudado pelo projeto, enquanto que o ponto SJS é responsável apenas por 12% do fluxo total. Para atingir o nível de certeza nos resultados, o projeto desenvolveu um processo de auditoria interna que levou em consideração a contagem de tráfego por meio de sistema independente (conhecidos como ATs). Considerando os dias 'oficiais' de aquisição, as taxas máximas de acerto corrigido para cada sítio se distribuem conforme segue:

- GRU: 71,5% (17/9/2012) e 72,7% (18/9/2012);
- SJS: 69,4% (17/9/2012) e 77,4% (18/9/2012);
- BMA: 22,0% (17/9/2012) e 23,0% (18/9/2012);
- SJM: 42,5% (17/9/2012) e 42,7% (18/9/2012);
- SJC: 26,4% (17/9/2012) e 24,7% (18/9/2012);

O projeto envolveu a integração de dados em diversos segmentos ou estratos tais como: sítio de aquisição, período do dia, tipo de dados, dentre outros. Um processo especial de inspeção precedido por auditoria na estrutura de dados foi estabelecido. Notas preliminares (sem envolver estatística de tráfego) são descritas no relatório para conjunto de dias restritos (antes de 5/9 e conjunto 6/9, 7/9 e 8/9). Durante o conjunto de dados considerados 'oficiais', todos os fornecedores conseguiram operar seus sistemas de forma simultânea para possibilitar integralização de dados. O processo de inspeção final envolveu a utilização de 10 a 20 pessoas formando um comitê de inspetores (BackOffice) para agrupamento dos dados da leitura e detecção em várias classes: grupo de acerto do sistema automático, grupo de acerto exclusivo dos humanos, grupo de dados contendo placas ilegíveis, grupo de dados com placas inválidas e grupo de motocicletas. Cada um desses grupos foi usado para compilar índices ou frações de acerto específicas para cada estrato junto com seus desvios-padrão. O projeto demonstrou que existem variações no tempo de inspeção médio entre inspetores e que os pontos que apresentam melhor desempenho (essencialmente medido pela fração de imagens validadas do total de registros) também coincidem com os pontos de maior velocidade de análise em BackOffice. Assim, quanto melhor for o desempenho do ponto de aquisição tanto menor é o esforço humano dispendido na análise das imagens. Isso acontece porque sistemas com índices de acerto automático piores requerem mais tempo de digitação de código correto e não apenas a mera checagem visual de imagens. Tempos típicos de análise em regime de alta eficiência estão no intervalo 2-4 segundos enquanto pontos que exigem digitação das placas fazem 8-12 segundos. O tempo médio de inspeção inferido a partir do 'estado da arte' instalado durante o projeto é da ordem de 4 segundos.

No que tange apenas às taxas de acerto automático, sem considerar as perdas envolvidas, para os melhores níveis alcançados (melhores sítios)

não se observam variações grandes entre dia e noite, nem aparentemente com o tipo de placa (cor, reflexividade). Em relação a análise de tráfego, foram observadas perdas consideráveis de registro nos dias 17/9 e 18/9 para os sítios BMA e SJC (índices de relação registro-tráfego superiores a 60%). Para esses pontos, as notas de inspeção automática foram corrigidas para o fluxo registrado e resultaram em valores típicos entre 20% e 30%, bem inferiores aos registros de GRU e SJS. O sítio de SJM, embora tenha apresentado o menor índice de perda de veículos, apresentou o menor nível de acerto de todos os sítios. De forma geral, as perdas por ilegibilidade de placa ou imagens não conforme somam aproximadamente entre 10% e 20% do fluxo efetivamente registrado para os sítios com as melhores notas de inspeção, enquanto que o resíduo das diferenças para o total deve necessariamente ser inspecionado por operadores humanos. O esforço de BackOffice (percentagem de imagens do total que deve necessariamente ser inspecionado por humanos) envolve considerações financeiras e pode ser estimado parcialmente pela análise dos índices. Porém, com base nos tempo médio determinado para inspeção de um registro pelo BackOffice usado no projeto, foi estimado o número de pessoas necessárias para inspecionar todos os registros gerados por todos os pontos, assumindo que não há perdas de tráfego (registro). Para o tempo médio de inspeção (4s), 48 pessoas são necessárias trabalhando em um turno de 8h, enquanto que se o tempo de 10s de digitação média for usado (o operador não faz a checagem do código gerado, mas digita diretamente a placa) esse mesmo número é da ordem de 120 pessoas. Variações de duração de turno podem ser importantes para garantir boa eficiência de inspeção pelos os humanos. Os erros de leitura automática observados (ou, equivalentemente, frações de imagens exclusivamente lidas por humanos) estão muito relacionados à presença de caracteres específicos que causam maior erro. Tais caracteres podem ser usados para segregar placas em BackOffice, aumentando a eficiência final de inspeção. Ainda na questão 'detecção de veículos', ficou claro que o uso de laços virtuais – em que pese a vantagem expressiva de não se ter que instalar nenhum dispositivo na pista – sofre de algumas desvantagens, como a necessidade de regime de iluminação constante.

Com relação à incidência de chuvas, boa parte do projeto transcorreu durante o período de estiagem. Por causa disso, uma análise sistemática da influência de chuvas não foi realizada, o que exigiria, rigorosamente, o uso de ferramentas de medição pluviométricas em cada sítio. Entretanto, no dia 21/9/2012 foi possível extrair as frações de desempenho para um período de chuva relativamente moderada para GRU, o que foi observado por meio da impressão da imagem (perda de contraste). Os resultados não permitem inferir que houve perda de qualidade no processo de inspeção, utilizando dados de um dos melhores pontos de aquisição, embora tenha ocorrido um aumento pequeno da taxa de imagens ilegíveis. Com relação à eficiência de inspeção de motocicletas, um dos sítios (SJS) capturou imagens traseiras, e valores típicos da ordem de 25% foram encontrados. A maior parte dos registros de motos (aproximadamente 50%) somente pode ser inspecionada por operadores humanos.

No que se refere à possibilidade de se usar o sistema para rastreamento sucessivo de veículos, ou, de forma equivalente, as taxas de leitura automática sucessivas, a utilização das melhores frações de validação de código e sob a assunção de perda nula de tráfego levam a valores teóricos da ordem de 81,9%±9,0% para 2 pórticos, 72,9%±12,1% para 3 pórticos e 65,6%±14,5% para uma sequência de 4 pórticos. Durante o projeto não foi possível executar um teste de rastreabilidade, o que não impediu a determinação dos coeficientes de rastreamento, que podem ser facilmente obtidos a partir dessas taxas de leitura individuais.

6.28. Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada

O objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo laboratorial da estabilização de solos de granulometria fina com cal hidratada, para avaliar o efeito da incorporação deste aditivo nos parâmetros mecânicos usualmente empregados em projetos de dimensionamento empírico de pavimentos.

METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo traçado nesta pesquisa, foram estudados dois solos argilosos de granulometria fina estabilizados com diversos teores de cal hidratada. Foi empregada a cal hidratada do tipo CH-1, cujas misturas resultantes foram avaliadas por meio de ensaios tradicionalmente empregados no setor de construção de pavimentos e dos resultados obtidos em ensaios mecânicos, como compressão simples estática, compressão diametral estática e compressão triaxial cíclica.

Inicialmente, foram realizados os ensaios de compactação Proctor na energia intermediária nos solos sem cal e com adição de 3%, 5% e 7%. Em seguida, na umidade ótima e massa específica seca máxima determinadas nesse ensaio, foi realizado o ensaio de CBR e expansão, onde observa-se o incremento da capacidade de suporte e a redução da expansão ao adicionar cal aos solos avaliados.

Nesta pesquisa, também foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RT), usualmente empregados como parâmetros de avaliação na estabilização de solos. Estes ensaios foram realizados em corpos de provas curados durante 3, 7 e 28 dias. Os resultados mostram que houve um ganho significativo de resistência conforme se incrementa o tempo de cura e o teor de cal nas misturas.

O módulo de resiliência também foi determinado nas misturas de solo cal por meio do ensaio de compressão triaxial cíclica em corpos de prova curados durante 3, 7 e 28 dias. Os resultados mínimos e máximos obtidos em cada idade mostram que há uma tendência de incremento de rigidez conforme se aumenta o tempo de cura, o que pode ser estabilizado, aparentemente, no caso dos solos estudados, com a adição de 3% de cal.

Usualmente, os solos estabilizados com cal podem estar sujeitos à oscilação de umidade na estrutura do pavimento. Assim, é importante avaliar em laboratório os efeitos deletérios da água nos corpos de prova de solo cal. Neste estudo, empregou-se um método recomendado pela *National Lime Association* (NLA), dos Estados Unidos. Esse procedimento está detalhado em seguida:

- Após o tempo de cura especificado, o corpo de prova foi ensaiado normalmente no ensaio de compressão triaxial cíclica. O módulo de resiliência assim obtido foi denominado de MR-seco.
- Concluído o ensaio, a face plana “B” do corpo de prova foi colocado na pedra porosa, embebida em água, para saturar por 24 horas por capilaridade;
- Após as 24 horas de capilaridade, o corpo de prova foi virado e apoiado em uma bancada na sua face plana “A” durante 30 minutos. Logo após esse período, o ensaio de compressão triaxial cíclica foi executado; vale notar que o CP foi disposto no equipamento de modo que a face que foi saturada “B” fique na parte inferior. O módulo de resiliência assim obtido foi chamado de MR-24h.
- Depois de realizado o ensaio, o corpo de prova foi submetido novamente à saturação por capilaridade durante 24 horas, apoiando a

face “A” na pedra porosa. Após esse tempo, a face “B” do corpo de prova foi apoiada em uma bancada durante 30 minutos. Após esse período, foi executado novamente o ensaio de compressão triaxial cíclica; vale notar que o CP foi disposto no equipamento de modo que a face “A”, saturada por último, fique na parte inferior. O módulo de resiliência assim obtido foi chamado de MR-48h.

Os resultados de MR após saturação por capilaridade dos corpos de prova dos solos mostram que a adição de cal nos solos incrementa consideravelmente a resistência à ação deletéria da água, e que o efeito é mais benéfico conforme aumenta-se o tempo de cura dos corpos de prova submetidos ao processo de saturação por capilaridade.

CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, estudou-se a estabilização de solos expansivos e com baixa capacidade de suporte com a incorporação de cal do tipo CH-1. Foram estudados dois solos argilosos (A-6 e A-7-5), característicos na faixa de domínio da Rodovia Presidente Dutra, identificados como S-1 e S-2, respectivamente. Fixaram-se os teores de cal hidratada CH- 1 de 3%, 5% e 7%, em peso, para serem adicionados aos solos selecionados.

No ensaio de compactação Proctor na energia intermediária, verificou-se que o incremento de cal hidratada aumenta o teor ótimo de umidade e reduz a massa específica seca máxima dos solos. O resultado do ensaio de CBR mostrou que a adição de apenas 3% de cal hidratada incrementou consideravelmente esse índice e reduziu expressivamente a expansão dos solos estudados. Contudo, vale salientar que, nas camadas de solo cal componentes de estruturas de pavimentos, não devem ser considerados valores de CBR superiores a 15% no dimensionamento.

O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foi executado apenas na condição seca. Os resultados de RCS mostraram que os maiores ganhos de resistência foram obtidos nas misturas com 7% de cal hidratada. Contudo, a incorporação de 3% parece ser suficiente para obter resistência adequada para o emprego do solo cal como reforço de subleito, principalmente no solo A-7-5.

No ensaio de resistência à tração, foi observado um comportamento similar ao notado no ensaio de compressão simples. A adição de 3% de cal hidratada nos solos produziu os maiores ganhos proporcionais de resistência à tração (RT) com relação à resistência do solo natural.

Os ensaios de compressão triaxial cíclica mostraram que o modelo composto se ajustou melhor aos dados experimentais obtidos. De modo geral, a adição de 3% de cal hidratada nos solos incrementou aproximadamente em 100% o módulo de resiliência (MR), alcançando valores próximos a 150MPa.

A saturação dos corpos de prova por capilaridade previamente à execução do ensaio de compressão triaxial cíclico, executado de forma complementar neste estudo, mostrou que os solos estabilizados com cal hidratada do tipo CH-1 apresentam boa resistência à ação deletéria da água, quando comparados com os resultados obtidos no solo puro.

Com relação ao tempo de cura, notou-se nos três parâmetros estudados (RCS, RT, MR) que, conforme se incrementa a cura do solo cal, a resistência e a rigidez tendem a aumentar. Vale salientar que, neste estudo, o tempo máximo de cura foi equivalente a 28 dias, porém outros estudos mostram que o ganho de resistência do solo cal pode continuar por anos.

O solo cal curado durante 28 dias e saturado por capilaridade foi o que apresentou menores perdas de rigidez, quando comparado com os outros tempos de cura, de 3 e 7 dias. Esse comportamento indica a importância de conservar o solo cal bem drenado na sua cura inicial.

Finalmente, conclui-se que a estabilização de solos problemáticos com cal é uma técnica que incrementou a rigidez e a resistência dos solos estudados e, ao mesmo tempo, melhorou a suscetibilidade à ação deletéria da água.

6.29. Revestimentos Asfálticos Sustentáveis: Estudo do Comportamento Mecânico e de Redução de Emissões de Misturas Asfálticas Mornas

Na última década um novo desafio que tem sido colocado para os órgãos gestores rodoviários e para os responsáveis por obras é a sustentabilidade no setor rodoviário, uma questão complexa e imperativa nos dias atuais. Neste sentido, houve um crescente interesse por novas tecnologias direcionadas a este tema em pavimentação, com a introdução de várias inovações em materiais e produtos.

As misturas asfálticas mornas se referem a uma tecnologia relativamente recente, em que as temperaturas de usinagem e compactação são reduzidas em cerca de 30ºC ou mais, em relação as misturas asfálticas quentes convencionais, com o intuito de reduzir as emissões asfálticas e de consumo energético. Dessa forma, são misturas mais sustentáveis que poderiam reduzir os problemas ambientais e melhorar as condições de trabalho dos operadores envolvidos na cadeia produtiva de misturas asfálticas.

Para possibilitar a redução nas temperaturas de produção, são utilizados aditivos mornos que possibilitem obter misturas asfálticas com características similares às misturas asfálticas quentes convencionais. Nos dias de hoje, existem diversas tecnologias que garantem a redução das temperaturas de usinagem e compactação, tais como: as ceras orgânicas, os químicos surfactantes, o espumejamento do ligante asfáltico, entre outros.

OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um estudo laboratorial com diferentes tipos de técnicas de misturas mornas, em comparação com uma mistura a quente convencional, para avaliação do comportamento mecânico e do potencial de emissões. A pesquisa foi desenvolvida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária NovaDutra, do Grupo CCR, em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP.

A pesquisa compreendeu a realização de ensaios laboratoriais de comportamento mecânico em misturas asfálticas produzidas em laboratório e em usina asfáltica. Também foi realizada a medida de emissões poluentes, principalmente no que diz respeito aos Hidrocarbonetos Cíclicos Aromáticos (HPAs). Essa medida e coleta de emissões foi realizada em laboratório e, complementarmente, em usina de asfalto e em pista.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios mecânicos permitem realizar as seguintes conclusões com relação às misturas asfálticas mornas:

- Com relação ao ensaio de resistência à tração, notou-se que as misturas asfálticas mornas coletadas em usina apresentaram resistência similar à mistura asfáltica quente de referência. As misturas mornas com Evotherm 3G e Gemul XT-15, produzidas em laboratório, apresentaram RT inferior à mistura de referência; contudo, todos os valores de resistência foram superiores a 0,65Mpa – valor mínimo recomendado para misturas asfálticas. Vale salientar que a mistura morna com CCBit 113AD preparada com CAP 30/45 apresentou valores de RT similares à mistura asfáltica quente com ligante asfáltico modificado por borracha;
- No ensaio de módulo de resiliência verificou-se que, para o caso das massas coletadas em usina, as misturas asfálticas mornas apresentaram comportamento similar ao observado na mistura asfáltica quente. No caso dos corpos de prova produzidos com massa asfáltica de laboratório, as misturas asfálticas mornas apresentaram rigidez levemente inferior à mistura asfáltica quente;
- As curvas-mestres das misturas asfálticas mornas mostraram também uma tendência de redução de rigidez das misturas asfálticas mornas, de forma mais notória, no caso em que os corpos de prova foram produzidos em laboratório. De modo geral, as misturas produzidas em laboratório apresentaram valores de módulo dinâmico inferiores aos obtidos nas misturas coletadas em usina. A maior rigidez das misturas asfálticas coletadas em usina pode ser atribuída ao reaquecimento que essas misturas sofreram em laboratório para possibilitar a moldagem dos corpos de prova do ensaio de módulo dinâmico. Sabe-se que o reaquecimento do ligante asfáltico representa o enrijecimento dele, impactando também na rigidez da mistura asfáltica, a qual reflete no valor do módulo dinâmico;
- Embora as misturas asfálticas mornas tenham apresentado rigidez levemente inferior à mistura asfáltica quente de referência, constatou-se no ensaio de deformação permanente por trilha de roda que as misturas asfálticas mornas não possuem potencial para apresentar esse tipo de defeito. Os ensaios realizados no simulador de tráfego francês tipo LCPC mostraram que as misturas asfálticas mornas com Evotherm 3G, Gemul XT-15 e CCBit 113AD apresentam valores de afundamento de trilha de roda muito similares à mistura asfáltica quente de referência, em todos os casos inferior a limite máximo aceitável;

- Com relação à vida de fadiga obtido no ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos, notou-se que as misturas asfálticas mornas coletadas em usina tenderiam a apresentar uma menor vida de fadiga, quando comparadas com a mistura asfáltica quente de referência. Contudo, os ensaios realizados em corpos de prova produzidos com massa asfáltica preparada em laboratório mostraram que as misturas asfálticas mornas com Gemul XT-14 e Evotherm 3G têm expectativa de vida de fadiga muito superior à mistura asfáltica quente.

No que se refere às emissões asfálticas, verificou-se que:

- A redução de temperatura de usinagem nas misturas mornas levou a diminuições bastante expressivas das emissões de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) prioritários, tanto na fase particulada quanto na fase gasosa, em comparação com a mistura asfáltica quente de referência, em todos os ambientes observados (laboratório, usina de asfalto e aplicação em pista);
- Os HPAs estão presentes não só na fase particulada, mas também na gasosa, sendo, neste caso, parte dos compostos orgânicos voláteis (COVs). Especificamente, constatou-se que a fase particulada foi mais preponderante em todos os casos analisados;
- As emissões produzidas pelas misturas asfálticas em pista são reduzidas em relação às emissões asfálticas de usina, de forma mais pronunciada na mistura asfáltica quente de referência, por esta perder mais energia térmica durante o transporte do que a mistura asfáltica morna. As emissões de HPAs nas misturas asfálticas mornas em pista e em usina são mais próximas entre si, mostrando que as misturas mornas tendem a perder menos temperatura durante o transporte, o que é um benefício. Comparativamente, as misturas asfálticas mornas sempre apresentam redução de HPAs em relação as quentes em torno de 20%, seja em usina, seja na pista;
- De maneira geral, as misturas asfálticas mornas não apresentaram dificuldades para atender os critérios volumétricos de dosagem, já que o volume de vazios na compactação das misturas foi atingido mesmo reduzindo as temperaturas de usinagem e compactação.

Conclui-se que as misturas asfálticas mornas estudadas, com Evotherm 3G, Gemul XT-15 e CCBit 113AD, apresentam um comportamento mecânico bastante similar à mistura asfáltica quente de referência. As misturas apresentam boa resistência à ação deletéria da água e, apesar de exibirem rigidez levemente inferior do que a mistura asfáltica quente, não apresentam riscos de desenvolver deformação permanente, conforme avaliação dos resultados obtidos no ensaio de trilha de roda executado em laboratório.

Os resultados da coleta de emissões asfálticas em laboratório, usina e pista mostraram que as misturas asfálticas mornas apresentam menor potencial de poluição do meio ambiente e representam um melhor ambiente de trabalho para os técnicos, tanto na etapa produtiva na usina de asfalto, como na etapa construtiva em pista.

6.30. Estudos para Incorporação de conceitos de Sustentabilidade em Passarelas ao Longo da Rodovia Presidente Dutra

A necessidade atual de economia de recursos naturais, visando melhorar as condições ambientais, demonstra ser uma necessidade eminente, em especial em temas relacionados à construção de habitações, residências, edifícios e até mesmo obras de arte, como passarelas, pontes e viadutos.

Estudos que busquem, além de reduzir uso de recursos monetários, também economia de recursos naturais e incorporem conceitos de sustentabilidade, visando reduzir o impacto ambiental das obras e intervenções, são demandas atuais.

A presente proposta de desenvolvimento visa apresentar alternativas mais sustentáveis para as passarelas para pedestres, com alternativas que possam ser incorporadas nas passarelas existentes e nas novas a serem construídas, economizando assim recursos (financeiros e naturais), através de um projeto, processo de construção e manutenção adequados.

Dentro do Grupo de Estudo sobre Infraestrutura Verde, no Programa/Projeto Estrada Sustentável, foram levantadas e ranqueadas diversas necessidades. A demanda mais citada e esperada pelo grupo diz respeito à incorporação de conceitos de sustentabilidade na infraestrutura das rodovias participantes do programa. A questão de infraestrutura verde se faz premente, uma vez que a própria rodovia impacta o meio ambiente de muitas formas, desde a construção até seu uso.

Outro aspecto levantado, e que pretende ser abordado, é a questão da Segurança Viária, especialmente na questão relativa ao uso das passarelas pelos pedestres; conferindo características que permitam ao usuário sentirem-se seguros e, consequentemente, passem a utilizar as passarelas. Esse aspecto foi levantado por outro grupo de estudo do programa, que trata das questões de Segurança Viária. Os atropelamentos, decorrentes do cruzamento das rodovias, é a principal causa de morte decorrente de acidentes rodoviários.

A Rodovia Presidente Dutra, alvo do estudo em questão, apresenta, hoje, um número bastante significativo de passarelas para pedestres – as mais de cem passarelas já construídas apresentam tipologias bastante diferenciadas. Intervenções buscando economia de recursos devem ser incorporadas a cada uma delas, visando assim que tenhamos, por exemplo, economia de energia elétrica e menor número de manutenções com o uso de materiais adequados a cada microambiente onde estão inseridas. Nos próximos anos, um número alto de passarelas serão construídas, as quais deverão atender a requisitos de projeto, como incorporar sustentabilidade, através de questões de durabilidade, aumentando assim sua vida útil e reduzindo manutenções periódicas e preventivas, e também incorporar conceitos de industrialização com uso de materiais alternativos, como, por exemplo, o uso de materiais reciclados de outras indústrias e da própria indústria da construção civil em processos industrializados devido a repetitividade das tipologias a serem propostas.

Objetivo Geral

A presente pesquisa teve como principal objetivo desenvolver/apresentar alternativas de construção, estudo de materiais e alternativas tecnológicas para projeto, construção e adaptação de passarelas incorporando conceitos de sustentabilidade, economia de recursos naturais e vida útil/ciclo de vida ao longo da Rodovia Presidente Dutra.

DESCRIÇÃO SUCINTA DO PROJETO E APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE TRABALHO

Este projeto foi desenvolvido através de uma estrutura matricial, com 2 eixos centrais sendo desenvolvidos através de outros 5 eixos (A a E), que buscaram desenvolver os temas que foram incorporados aos Eixos centrais (1 e 2), dentro do que cabe à cada um deles.

Eixo 1: passarelas existentes, ou seja, foram realizados estudos visando desenvolver opções para incorporação de conceitos de sustentabilidade, economia de energia e economia de recursos naturais nas passarelas já existentes ao longo da rodovia; também foram contemplados estudos para alternativas adequadas, incorporando os conceitos citados, para monitoração, manutenção e recuperação das passarelas existentes.

Eixo 2: passarelas a serem construídas, ou seja, estudo de alternativas de processos construtivos, materiais alternativos e/ou recicláveis, adequados ao meio onde as passarelas estarão inseridas, além de alternativas de projeto e desenho mais adequados às condições de exposição e de inserção no ambiente onde será construída; os conceitos de sustentabilidade, economia de energia e economia de recursos naturais deverão ser contemplados prioritariamente. O estudo foi conduzido tendo como premissa que o custo de construção da passarela deveria ser semelhante ou menor do que o atual, para construção das atuais passarelas implantadas.

Esses dois Eixos se desenvolveram frente a outros 5 eixos:

Eixo A – Arquitetura – Desenho para sustentabilidade: nesse eixo, foram estudadas as alternativas de projeto, visando um levantamento de estado da arte no tema, levando em consideração alternativas nacionais e internacionais atuais para o tema, questões como segurança viária e estrutural, opções em uso hoje para desenho e projeto de passarelas.

Eixo B – Materiais – Durabilidade para sustentabilidade: nesse eixo foram levantadas as condições de exposição e agressividade do ambiente aos materiais e processos de construção, permitindo a incorporação ao estudo de conceitos como vida útil, vida de serviço, ciclo de vida e outros. Visa a realização de um levantamento das condições de exposição das distintas regiões da rodovia. O produto deste eixo permitiu a geração de parâmetros diretos de escolha de materiais e processos adequados às condições de exposição, visando maximizar a vida útil e reduzir manutenções e reparos.

Eixo C – Materiais – Alternativas para sustentabilidade: nesse eixo, foram estudadas as alternativas de materiais, processos construtivos e de construção adequados às premissas da proposta. Foi incorporado o conceito de regionalização. Inicialmente, foram listadas as alternativas de materiais convencionais, materiais alternativos, reciclados, materiais de alta tecnologia, processos construtivos com valor agregado de sustentabilidade, tendo em vistas sempre as questões relativas à regionalização, maximização dos conceitos de vida útil e minimização de manutenções.

Eixo D – Tecnologias – Soluções para a sustentabilidade: nesse eixo, foram estudadas as alternativas de soluções existentes para melhor adequação às premissas da presente proposta. Entre elas se destacam alternativas para autonomia de energia elétrica para iluminação, por exemplo.

Eixo E - Economia ambiental - Ganhos ambientais com uso de alternativas de sustentabilidade: com ferramentas adequadas, pode-se quantificar, em recursos financeiros, os ganhos com o uso de alternativas que incorporem conceitos de sustentabilidade. Tais ferramentas permitem que as escolhas tenham parâmetros quantitativos para escolha. Assim, pode-se, além de entender a importância de uma determinada escolha, quantificar o ganho com a economia de recursos naturais por meio da economia no uso deste tipo de recurso.

6.31. Estudo da Influência do Teor de Cimento Portland, da Energia de Compactação e da Umidade no Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para Duas Gêneses de Agregados

As bases ou sub-bases cimentadas têm sido frequentemente utilizadas na construção de pavimentos para atender ao crescimento do tráfego, das cargas por eixo e da pressão de enchimento de pneus. A adição de cimento em base granular induz a um ganho estrutural, já que o pavimento é alterado de flexível para semirrígido. A experiência tem mostrado que a resistência maior dos materiais cimentados propicia espessuras de bases mais delgadas ao pavimento semirrígido e uma melhor distribuição de tensões ao subleito (Balbo, 2007). Além disso, a presença da camada cimentada reduz as tensões de tração da camada asfáltica, permitindo a redução da espessura de material asfáltico, em comparação à espessura requerida para um pavimento flexível convencional equivalente (Suzuki, 1992).

OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência do teor de cimento Portland, teor de umidade, tempo de cura, energia de compactação e a fonte do agregado mineral nos parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento.

Foi desenvolvido um programa laboratorial para avaliar a influência desses fatores nos parâmetros mecânicos de:

- Resistência à compressão simples (RCS);
- Resistência à tração (RT);
- Módulo de Resiliência (MR);
- Módulo Dinâmico (MD).

Foi elaborado um programa laboratorial utilizando-se a técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais. Dessa forma, foi possível realizar variações nos fatores de entrada e avaliar os efeitos dessas variações por meio dos ensaios laboratoriais em corpos de prova de BGTC. A combinação de seus níveis originou um total de 72 experimentos.

RESULTADOS

Após a realização dos ensaios laboratoriais, os resultados foram avaliados estatisticamente para verificar o comportamento e a tendência dos parâmetros mecânicos em função dos diversos fatores definidos para esta pesquisa. De maneira geral observam-se as seguintes tendências:

- A BGTC produzida com agregados basálticos apresentou maiores resistências;
- Conforme era esperado, o maior tempo de cura e o emprego de maiores teores de cimento Portland incrementa a resistência da BGTC;
- Com relação ao teor de umidade, o emprego de teores, um pouco acima da ótima, tendem a decrescer a resistência da BGTC;
- O emprego de energia de compactação maior conduz a maiores resistências, tanto à compressão simples como à tração por compressão diametral.

A partir dos resultados obtidos no programa laboratorial de BGTC, foram modeladas algumas equações para poder estimar certos parâmetros em função dos fatores delineados no experimento. No modelo para estimar a resistência à tração em função da resistência à compressão simples, nota-se que a RT é aproximadamente 11% da RCS, valor muito próximo ao sugerido usualmente nas referências bibliográficas que indicam a relação de 10%. O módulo dinâmico da BGTC também foi modelado em função das propriedades dos materiais e das características da mistura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta estatística análise de variância (ANOVA) foi utilizada para auxiliar na análise da influência dos fatores e suas interações na avaliação dos parâmetros mecânicos. Dessa análise, foram realizadas as seguintes conclusões:

TEOR DE CIMENTO PORTLAND

De modo geral, verificou-se que o incremento do teor de cimento promoveu o aumento da resistência à compressão simples, da resistência à tração, do módulo de resiliência e do módulo dinâmico. Assim, este fator foi estatisticamente significativo para todos os parâmetros avaliados. Neste estudo, optou-se por avaliar os teores de 2% a 4%. O intuito foi verificar se, com 2% de cimento Portland, seria possível atender aos valores mínimos de resistência à compressão simples (>3,50MPa) na energia modificada de compactação. Essa hipótese foi constatada na BGTC com agregados basálticos, mas não para a BGTC com agregados graníticos. Já no parâmetro resistência à tração, as combinações de BGTC com 2% apresentaram valores médios que oscilaram de 0,20 a 0,30MPa e nas combinações de BGTC com 4% de cimento a RT média oscilou de 0,60 a 0,70MPa. Com relação aos parâmetros de rigidez determinados por esforços de tração diametral e de compressão axial, observaram-se

valores elevados de módulo de resiliência e módulo dinâmico, até alcançar valores superiores a 18.000MPa e 12.000MPa, respectivamente, nas combinações com 4% de cimento Portland.

TEOR DE UMIDADE

As misturas de BGTC foram compactadas na umidade ótima e também 1% abaixo e acima desse valor, determinado no ensaio de compactação Proctor. Observou-se que essa variação no fator é significativamente influente para todos os parâmetros mecânicos estudados. De modo geral, o emprego de até 1% abaixo da umidade ótima promoveu o incremento dos parâmetros mecânicos, quando comparados com os resultados obtidos na BGTC compactada na umidade ótima e 1% acima da umidade ótima.

TEMPO DE CURA

Os ensaios realizados neste estudo foram executados após 7 dias e 28 dias de cura da BGTC em câmara úmida. Verificou-se que, conforme o tempo de cura aumenta, a resistência e a rigidez da BGTC tende a se incrementar, para todas as condições e combinações testadas.

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

De modo geral, os resultados do programa laboratorial comprovaram que o incremento da energia de compactação aumenta as características de resistência e rigidez da BGTC, de forma mais notória nos casos em que é utilizado o agregado basáltico.

FONTE DE AGREGADOS

O tipo de agregado também foi significativamente influente no comportamento mecânico da BGTC. A BGTC com agregados basálticos apresentou valores de resistência e rigidez superiores aos observados na BGTC com agregados graníticos.

Neste estudo, comprovou-se que o comportamento mecânico da BGTC é influenciado pelas variáveis analisadas e suas interações. O teor de cimento, como era de se esperar, é o fator mais influente quando comparado com os outros fatores estudados. Finalmente, conclui-se que o comportamento mecânico da BGTC é uma mistura muito sensível aos materiais utilizados e ao processo de sua produção, durante a usinagem e em sua compactação. Essa sensibilidade evidencia a importância do controle de qualidade na execução das obras que empregam a BGTC para, assim, atender satisfatoriamente aos critérios especificados em projetos estruturais de pavimentos.

6.32. Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas a Partir de Dois Métodos de Ensaio com Diferentes Tipos de Asfalto

O trincamento por fadiga é considerado como um dos principais mecanismos de deterioração dos revestimentos asfálticos. Basicamente, são trincas longitudinais que podem ser interconectadas, causando a degradação da mistura asfáltica, sob a ação de carregamentos do tráfego. O trincamento por fadiga, na perspectiva de pavimentos asfálticos, é definida como o dano acumulado devido à ação de carregamentos repetidos com níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura. A aplicação sucessiva de tensões gera um processo de microfissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, consequentemente, na ruptura do material.

Sabe-se que a vida de fadiga das misturas asfálticas é influenciada por diversas variáveis, tais como as propriedades dos materiais, os parâmetros volumétricos da mistura, as técnicas construtivas, a solicitação e composição do tráfego, as condições climatológicas, entre outras. O estudo do mecanismo do dano por fadiga nos revestimentos asfálticos pode ajudar no desenvolvimento de modelos de previsão de vida de fadiga para diversas misturas asfálticas.

No laboratório, usualmente, a vida de fadiga das misturas asfálticas é avaliada a partir de ensaios em condições de carregamento e temperatura bem controlados.

Para isso, foi desenvolvido um programa laboratorial com o objetivo de avaliar a influência do tipo de ligante asfáltico, da faixa granulométrica e da fonte de agregados na vida de fadiga de misturas asfálticas, empregando dois métodos de ensaio:

- Ensaio de fadiga por ruptura diametral com velocidade controlada em corpos de prova cilíndricos, obtidos no compactador Marshall;
- Ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos.

A combinação dos fatores analisados deu origem a quarenta misturas asfálticas, nas quais foram determinados os parâmetros das leis de fadiga para os dois ensaios avaliados. Além disso, no ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos, foi possível analisar a rigidez na flexão das misturas asfálticas.

Além de avaliar o tipo de ligante asfáltico, investigou-se quatro faixas granulométricas e duas fontes de agregados graníticos, disponíveis no Estado de São Paulo e no Estado do Rio de Janeiro, e próximas à Rodovia Presidente Dutra. Essa combinação de fatores e níveis resultou em um planejamento fatorial com 40 experimentos para realizar os dois tipos de ensaios de fadiga.

RESULTADOS

Após conclusão do programa laboratorial, os resultados dos ensaios foram processados para poder modelar as leis de fadiga nas duas configurações de ensaios avaliadas. Os resultados dessas análises são apresentados nos itens seguintes:

FADIGA POR VELOCIDADE CONTROLADA

Este ensaios foi realizado em corpos de prova cilíndricos moldados no compactador Marshall, nos quais foi aplicado um carregamento diametral com diversas velocidades. Esse tipo de ensaio é compatível com a caracterização de materiais de revestimentos asfálticos mais espessos, em decorrência da predominância de absorção das tensões pelo revestimento

com relação às camadas subjacentes (Pinto, 1991; Huang, 1993).

ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO CÍCLICA DE VIGA APOIADA EM QUATRO PONTOS

Os ensaios de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos foram realizados na temperatura de 20°C, com frequência de 10Hz. Neste ensaio, obtêm-se a cada ciclo a rigidez na flexão das misturas asfálticas; esse é o critério monitorado no decorrer do ensaio para determinar o início de fadiga. Dependendo da norma seguida, emprega-se entre 40% e 50% da rigidez inicial da mistura asfáltica.

CONCLUSÕES

O ensaio de fadiga por compressão diametral com velocidade controlada apresenta algumas limitações, já que utiliza equações preditivas determinadas pelo Asphalt Institute, no ano 1982, determinadas para materiais diferentes aos testados neste estudo. Além disso, este ensaio utiliza a teoria da elasticidade para formular o modelo de fadiga, mas sabe-se que os materiais asfálticos apresentam um comportamento viscoelástico, que depende da temperatura e da frequência de aplicação de carregamentos. Notou-se neste estudo que o ensaio não identificou claramente misturas com ligantes asfálticos modificados.

O ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos é um ensaio bastante sofisticado, já que permite obter vários parâmetros da mistura asfáltica além das leis de fadiga, como, por exemplo, a rigidez na flexão, o ângulo de fase e a energia de trabalho durante o ensaio.

Contudo, vale notar que o ensaio por flexão cíclica de viga demanda bastante tempo, tanto na preparação dos corpos de prova (vigotas), como na própria execução do ensaio. Para poder avaliar uma única mistura asfáltica, pode-se demorar de duas semanas até seis semanas, já que são necessários vários corpos de prova testados em diversos níveis de deformação. As misturas asfálticas com baixa rigidez na flexão, como as produzidas com CAP-Borracha, por exemplo, demandaram até dez dias para testar uma única vigota no nível de deformação de 300 microstrain.

Ressalta-se ainda que os ensaios executados neste estudo atenderam às normas AASHTO T321 e ASTM D7460-10, as quais recomendam a realização do ensaio na temperatura de 20ºC, com frequência de carregamento de 10 Hz. Contudo, essas condições do ensaio deveriam ser revistas para a realidade brasileira e, inclusive, adotar períodos de descanso durante o ensaio para considerar o resselagem (*healing*) da mistura asfáltica.

A previsão de vida de fadiga das misturas asfálticas no ensaio de fadiga por ruptura diametral com velocidade controlada é levemente superior quando comparados com os resultados de previsão de vida de fadiga, obtidos no ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos. Apesar de ficar difícil realizar comparações entre os dois ensaios utilizados nesta pesquisa, vale notar que, no ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos, as condições de campo são simuladas de melhor maneira do que no ensaio de ruptura diametral por velocidade controlada.

Finalmente, conclui-se que o tipo de ligante asfáltico é influente na vida de fadiga das misturas asfálticas, para as faixas granulométricas testadas neste estudo. Destacam-se as misturas asfálticas com CAP Borracha para a faixa EGL 9,5 mm, o CAP HiMA para a faixa EGL 12,5 mm e o CAP Alto-Módulo para a Faixa III-DERSA.

6.33. Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland - Desenvolvimento de Método de Dimensionamento e Avaliação de Processos Construtivos

A técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland é uma alternativa para a restauração dos pavimentos asfálticos. Assim, nesta pesquisa objetivou-se estudar a técnica, tanto pela execução de um trecho experimental, como pela aplicação de um possível método de dimensionamento de pavimentos que incluem a reciclagem com cimento Portland.

EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

A execução do trecho experimental deste estudo foi realizado entre os km 53+000 e 53+900 da Rodovia SC-303, no lado direito da pista original da via. Os serviços foram iniciados a partir do km 53+900 (Segmento 5), acompanhados pela equipe de pesquisadores do LAPAV/UFRGS, e descritos nesta seção.

Foram realizadas sondagens com auxílio de retroescavadeira para possibilitar a coleta de materiais da sub-base e subleito, bem como verificar o estado dos materiais e a espessura das camadas da estrutura do pavimento. Também foram coletados os materiais de revestimento asfáltico (no km 53+900) e base (no km 53+040).

Iniciou-se o processo de execução do trecho com a distribuição de agregados adicionais por meio de caminhão basculante equipado com distribuidor de agregados. Em seguida, procedeu-se com a distribuição do cimento Portland, utilizando-se um distribuidor automatizado, que efetua controle da taxa distribuída através do peso do caminhão e da velocidade de avanço, com controle computadorizado. Em seguida, a recicladora passou a operar com velocidade igual a 6 m/min e velocidade de rotação do cilindro de corte igual a 2150 rpm. A água era fornecida para a recicladora por meio de um caminhão cisterna com capacidade de 10 mil litros.

Após a passagem da recicladora, era coletada quantidade de amostra da mistura reciclada de cada um dos segmentos para moldagem de 3 corpos de prova (CP), visando a realização de ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura.

No primeiro segmento realizado, também coletou-se material para execução de um ensaio de compactação, utilizando-se a umidade do projeto de dosagem da mistura da SC-453, visando a determinação do peso específico aparente seco utilizado no controle de compactação da camada reciclada do trecho experimental.

A compactação da camada reciclada era iniciada logo após a passagem da recicladora, realizada inicialmente com emprego de quatro rolos pé-de-carneiro vibratórios, visando o confinamento e compactação dos 2/3 inferiores da camada.

Posteriormente, a conformação geométrica da via era realizada com uso de marcos topográficos e de uma motoniveladora operando apenas em corte, visando não comprometer o grau de compactação da camada reciclada. Era então realizada a compactação final da camada reciclada, empregando-se um rolo vibratório e um rolo pneumático, de forma a efetuar a compactação do terço superior da camada e seu acabamento superficial.

Após estas etapas, realizavam-se diversos ensaios para controle tecnológico da camada reciclada com cimento. Verificava-se o peso

específico aparente seco *in situ* para cada um dos segmentos do trecho experimental através do método do frasco de areia, e verificava-se o teor de umidade por meio do método da frigideira. Estes dados foram utilizados para calcular o grau de compactação de cada segmento. Também foram realizados levantamentos deflectométricos utilizando-se viga Benkelman.

Para posterior liberação ao tráfego, executava-se tratamento superficial simples (TSS) sobre a camada reciclada empregando-se emulsão RR2C polimérica e agregados (pó de pedra + pedrisco).

Após 7 dias da reciclagem, foram realizadas novas leituras deflectométricas a cada 20 m, no bordo externo da faixa direita.

Por fim, realizou-se a execução do revestimento em concreto asfáltico contendo asfalto modificado por borracha de pneus. Foi aplicada emulsão polimérica para realização da pintura de ligação. Durante a execução do revestimento, foram coletadas amostras da mistura asfáltica, visando à determinação do teor de ligante e da granulometria da mesma em laboratório. No dia 30 de novembro, foram realizadas novas leituras deflectométricas a cada 20 m, no bordo externo da faixa direita. Também foram extraídos 3 testemunhos por segmento do trecho experimental para determinação da resistência à tração e do módulo de resiliência da camada asfáltica, ambos ensaios realizados por compressão diametral.

PROPOSTA DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

A sequência do método proposto segue os procedimentos normalmente empregados em métodos mecanístico-empíricos para dimensionamento de pavimentos.

O processo de caracterização dos materiais inclui a determinação de suas propriedades elásticas e da espessura da camada. Os parâmetros mínimos necessários, geralmente, são a rigidez, o coeficiente de Poisson e o peso específico de cada material.

Para solos e materiais granulares deve-se determinar o módulo de resiliência por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Misturas asfálticas também devem ser caracterizadas através da determinação de seu módulo de resiliência, o que geralmente acontece através do ensaio de compressão diametral. Contudo, sempre que possível, sugere-se identificar o efeito da temperatura e da frequência na rigidez dos materiais asfálticos, através da determinação do módulo dinâmico.

No que diz respeito à camada reciclada com cimento, sugere-se que a sua caracterização seja realizada através de ensaios de resistência à tração na flexão (RTF) aos 28 dias de cura, já que as condições impostas neste ensaio se assemelham às observadas em campo para materiais cimentados. Neste ensaio, devem ser registrados os deslocamentos causados pelo carregamento aplicado, de modo que seja possível determinar a deformação de tração na ruptura (ε_b) e o módulo de elasticidade flexural (MEF) da mistura, parâmetros essenciais para um adequado dimensionamento.

Quanto ao coeficiente de Poisson, sugere-se que sejam utilizados os valores obtidos por Kleinert (2016) para misturas recicladas com solo-cimento e brita graduada tratada com cimento (BGTC) como materiais de base, iguais a 0,17 e 0,26, respectivamente.

Embora se saiba que não sejam procedimentos triviais, sempre que possível, aconselha-se também a execução de ensaios flexurais com carregamento cíclico aos 28 dias de cura, para determinação do módulo de resiliência flexural (MRF) e da vida de fadiga das misturas recicladas com cimento.

A espessura inicial a ser utilizada para cada camada do pavimento poderá ser a determinada através de um método empírico de dimensionamento, como, por exemplo, o atual método empregado pelo DNIT. A espessura da

camada reciclada com cimento será influenciada por características do pavimento original, da dosagem da mistura reciclada com cimento e dos procedimentos construtivos a serem empregados. Destaca-se que a espessura final será função do processo iterativo do método mecanístico-empírico.

TRÁFEGO

O tráfego deverá ser caracterizado através da determinação do número de repetições admissíveis do eixo padrão considerado no país para o período de projeto (N). Assim, deve-se considerar o eixo simples de rodas duplas que transmite uma carga total de 8,2 toneladas ao pavimento, calculado com base nos fatores de equivalência de carga desenvolvidos pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*).

CLIMA

As temperaturas previstas para determinada região podem ajudar na escolha de materiais utilizados na mistura (como o ligante asfáltico) e na previsão de seu comportamento em serviço. Assim, novamente, destaca-se a importância de se determinar o módulo dinâmico das misturas asfálticas para diferentes frequências de carregamento e temperaturas. Outro fator a ser considerado é a umidade das camadas granulares e de solos, incluindo-se o subleito.

ANÁLISE ESTRUTURAL DO PAVIMENTO E RESPOSTAS DAS CAMADAS

A partir das características dos materiais empregados, da definição das espessuras iniciais para cada camada, bem como da caracterização do tráfego e do clima, realiza-se a análise estrutural do pavimento. Para tal, deve-se empregar um *software* específico para análise de pavimentos, geralmente fundamentado na teoria de multicamadas elásticas.

MODELOS DE PREVISÃO

Através das respostas do pavimento, e utilizando-se modelos de previsão específicos para cada material, será possível determinar a vida útil de cada camada do pavimento.

PARÂMETROS DE REGRESSÃO

Os parâmetros de regressão devem, preferencialmente, ser determinados de forma experimental. Deste modo, ensaios de fadiga, aos 28 dias de cura, devem ser realizados para a mistura reciclada com cimento a ser empregada.

FATOR LABORATÓRIO-CAMPO

Para que seja possível definir um fator laboratório-campo que reduza os efeitos de escala, deve-se realizar uma análise conjunta de uma quantidade representativa de dados de ensaios laboratoriais e de monitoramento de pavimentos com camadas recicladas com cimento em serviço, visando identificar adequadamente seus mecanismos de degradação.

VIDA ÚTIL PREVISTA

O processo de dimensionamento mecanístico-empírico é iterativo. Ao final de cada iteração, a vida útil prevista para cada camada do pavimento deve ser comparada com o número de repetições admissíveis do eixo padrão para o período de projeto definido para o pavimento (N). Caso a

vida útil prevista para determinada camada não seja adequada (inferior a N), deve-se reiniciar o processo, modificando-se parâmetros de entrada, como, por exemplo, a espessura desta camada. Deste modo, para que o processo iterativo de dimensionamento seja encerrado, a vida útil de todas as camadas deve ser superior a N. No caso da camada reciclada com adição de cimento, deve-se comparar a vida de fadiga (Nf), determinada através do modelo apresentado na Equação 1, com o número de repetições admissíveis do eixo padrão (N).

6.34. Caracterização Reológica de Ligantes Asfálticos com Vistas à Seleção de Materiais e ao Controle de Qualidade

Dentre os fatores que contribuem para o projeto adequado de um pavimento asfáltico e sua manutenção eficiente está a seleção dos materiais de construção. No caso dos pavimentos asfálticos, o ligante asfáltico, que atua como agente cimentante, aglutinando as partículas de agregado mineral, tem grande relevância sobre o comportamento estrutural do pavimento. A mistura de componentes, se adequadamente compactada e construída em espessura compatível com a estrutura em questão, tem como propósito combater os esforços de tração, compressão e cisalhamento que solicitam o pavimento. Tais esforços repetitivos culminam na formação dos três principais mecanismos que levam o pavimento asfáltico à falência estrutural: deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento de origem térmica. Por isso, a seleção racional do tipo de ligante asfáltico mais adequado para uma obra é um fator muito importante.

OBJETIVOS

Os principais objetivos da pesquisa foram:

- Determinar os graus de desempenho para a Rodovia Presidente Dutra, tendo por base dados de temperaturas máximas e mínimas obtidas de estações meteorológicas instaladas nas proximidades da rodovia;
- Realizar ensaios reológicos para a classificação de ligantes asfálticos puros e modificados comerciais, visando a definição de um panorama nacional do mercado de ligantes asfálticos;

- Conceber uma especificação interna de materiais asfálticos, que sistematize e oriente a seleção de ligantes asfálticos, sejam puros ou modificados, destinados às obras da CCR NovaDutra.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionados dois CAPs convencionais e oito ligantes asfálticos modificados:

- **A:** CAP 30/45;
- **B:** CAP 50/70;
- **C:** Asfalto borracha, fornecido pela empresa 1;
- **D:** Asfalto modificado com polímero elastomérico, fornecido pela empresa 2;
- **E:** Asfalto modificado com polímero elastomérico, fornecido pela empresa 2;
- **F:** Asfalto borracha, fornecido pela empresa 2;
- **G:** asfalto de alto módulo, fornecido pela empresa 3;
- **H:** asfalto de alto módulo, fornecido pela empresa 4;
- **I:** asfalto modificado com polímero elastomérico, fornecido pela empresa 4; e
- **J:** asfalto modificado com asfalto natural e polímero elastomérico, fornecido pela empresa 4.

Todas as amostras de ligantes asfálticos puros e modificados foram avaliadas através de ensaios de laboratório realizados nas três condições de envelhecimento praticadas: (1) condição virgem, (2) condição envelhecida a curto prazo na estufa de filme fino rotativo (RTFO) e (3) condição envelhecida a longo prazo (resíduo do RTFO envelhecido no vaso pressurizado - PAV).

Os ligantes asfálticos foram submetidos a ensaios para medidas de propriedades reológicas em dois laboratórios (Laboratório do CPR da CCR Nova Dutra e Laboratório de Estradas da EESC/USP), incluindo: (1) os ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), para a determinação do grau de desempenho (PG) sob temperaturas altas, para a determinação da temperaturas críticas de fadiga e para a avaliação da estabilidade à estocagem, (2) o ensaio de varredura linear de amplitude (LAS), para obtenção das características de fadiga dos materiais, (3) o ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR), para obtenção das características relacionadas à resistência à deformação permanente dos materiais, (4) o ensaio de fluência na flexão no reômetro de flexão em viga (BBR), para obtenção das propriedades a baixas temperaturas, também utilizadas para determinar o PG a baixas temperaturas, (5) viscosidade rotacional, (6) penetração, (7) ponto de amolecimento, (8) ductilidade, (9) recuperação elástica no ductilômetro; (10) retorno elástico e (11) densidade.

Foram determinados os graus de desempenho (PG) da Rodovia Presidente Dutra, a partir da análise das séries históricas de temperaturas do ar, obtidas de estações meteorológicas nas cercanias da rodovia. Foi feita uma proposta de especificação interna para seleção e controle de qualidade de ligantes asfálticos no âmbito da Concessionária CCR NovaDutra.

GRAUS DE DESEMPENHO

Pode-se verificar que os graus de desempenho a altas temperaturas para os asfaltos convencionais foram PG 70 (CAP 30-45) e PG 64 (CAP 50/70). No caso dos asfaltos modificados, foi possível observar PGs entre 70 e 82, sendo que a amostra G alcançou PG 88, e a amostra R alcançou PG 94. Em

relação aos graus de desempenho a baixas temperaturas, foi observado que os asfaltos B, F e H apresentaram PGs distintos nas análises realizadas nos dois laboratórios. Dentre os asfaltos analisados, observaram-se PGs entre -10 e -28, os quais são compatíveis com o PG a baixas temperaturas, recomendado para os trechos da rodovia.

Determinação do PG do Pavimento da Rodovia Presidente Dutra

A determinação do grau de desempenho (PG) do pavimento se baseia nas medidas das temperaturas extremas (máxima e mínima) do ar, que são convertidas em temperaturas do pavimento por meio de equações de transferência. A temperatura máxima do pavimento é obtida com base na temperatura média do ar dos 7 dias consecutivos mais quentes de cada ano. Por sua vez, a temperatura mínima do pavimento é obtida com base na temperatura mínima do ar para cada ano.

As medidas de temperatura do ar foram obtidas de quatro estações meteorológicas localizadas nas cercanias da Rodovia Presidente Dutra: Guarulhos (SP), Taubaté (SP), Resende (RJ) e Seropédica (RJ). Para estimar as temperaturas do pavimento, em graus Celsius, considerando as temperaturas máximas e mínimas do ar, foram empregadas as funções de transferência dos programas SHRP (McGennis et al., 1994) e do Long-Term Pavement Performance (Mohseni & Carpenter, 2004; LTPP, 1998; Bosscher, 2000). Como conclusão deste estudo, tem-se que o PG do pavimento, na região das estações meteorológicas de Guarulhos, Taubaté e Resende, é o PG 64-10 e, na região próxima à estação meteorológica de Seropédica, o PG é 70-10. No entanto, considerando os níveis de tráfego da rodovia (VDM altíssimo), a classe final do pavimento da Rodovia Presidente Dutra será PG64E-10 para o trecho coberto pelas estações meteorológicas de Guarulhos, Taubaté e Resende, e PG70E-10, para o trecho na proximidade da estação meteorológica de Seropédica.

Proposta de Especificação Interna para Ligantes Asfálticos

O nível de complexidade de uma especificação para materiais asfálticos depende de diversos fatores, dentre os quais podem ser destacados: o nível de severidade do clima (o efeito das variações de temperatura e do nível de envelhecimento sofrido pelo ligante asfáltico) e do tráfego (efeito dos níveis de carga e dos tempos de aplicação de carga), e o número de ligantes asfálticos comerciais disponíveis.

A especificação interna proposta é composta dos seguintes itens:

- **viscosidade rotacional,** medida no viscosímetro Brookfield;
- **grau de desempenho em temperaturas altas**;
- **temperatura crítica de fadiga**;
- **classes de tráfego**;
- **simulação do envelhecimento a curto prazo** na estufa de filme fino rotativo (RTFOT); e
- **simulação do envelhecimento a longo prazo** na estufa de vaso pressurizado (PAV).

6.35. Materiais de Sinalização Horizontal: Avaliação do Desempenho para Elevados Volumes de Tráfego

A pesquisa envolveu experimento de sinalização viária na pista da rodovia, em trecho situado no estado de São Paulo.

O objetivo geral da pesquisa foi o de estudar diferentes tipos de materiais para sinalização horizontal, a fim de verificar o desempenho para as mesmas condições de implantação e solicitação, na Rodovia Presidente Dutra.

Para alcançar o objetivo proposto, as seguintes atividades foram realizadas:

- Elaboração de revisão da literatura para aferição do atual estado da arte do tema objeto da pesquisa;
- Execução do experimento com a seleção de três produtos disponíveis no mercado nacional para aplicação em segmento teste da Rodovia Presidente Dutra;
- Realização de monitoramento para medição da retrorrefletividade dos materiais adotados para a sinalização horizontal, de acordo com o experimento executado, a cada quinze dias, durante o período da pesquisa;
- Verificação visual das condições dos materiais testados durante o experimento;
- Identificação de possíveis associações entre as diferentes medidas de monitoração.

Execução do Experimento

O local selecionado para o experimento foi uma faixa de tráfego, especificamente a de cobrança automática da praça de pedágio Arujá, da Rodovia Presidente Dutra, devido a características que facilitam o controle do experimento e a coleta de dados, como a disponibilidade de registros da quantidade de veículos e sua classificação por tipo ou por eixos, e uma menor interferência no fluxo local no momento das medidas. O experimento foi realizado na cabine 12, na faixa mais à direita, com velocidade máxima de passagem de veículos prevista de 40 km/h.

Definição da configuração do experimento

Com intuito de acelerar os efeitos do tráfego na sinalização, os elementos escolhidos para o experimento foram linhas transversais à faixa de rolamento, que, nessa direção, acabam sendo mais solicitadas pela passagem de pneus dos veículos em relação às longitudinais. Em virtude do sentido único do tráfego, presumiu-se que a solicitação dos pneus sobre cada linha seria diferente, conforme a posição da linha, sendo que a primeira receberia constantemente o maior impacto do tráfego. Para tanto, foram aplicadas várias linhas transversais com cada material, em sequências variadas dentro do mesmo conjunto de materiais A, B, C, de modo a evitar a repetição da mesma sequência. Os arranjos dos materiais foram de três em três, resultando em seis conjuntos.

Cada um dos seis conjuntos é composto por um trio de linhas, sendo que cada linha foi demarcada com um tipo de material A, B ou C. No total, foram aplicadas 18 linhas transversais. Em cada linha transversal, foram definidas 5 posições de leitura da retrorrefletividade, considerando a heterogeneidade dos esforços solicitantes (pneus) ao longo da mesma linha. As posições 2 (dois) e 4 (quatro) são intermediárias e

aproximadamente coincidentes com as trilhas de roda dos veículos. A configuração com os seis conjuntos dispostos sequencialmente, cada um com um trio de linhas aplicadas com os materiais A, B e C, também permitiu representar, numa pequena área, todos os arranjos possíveis entre três materiais diferentes: ABC, BCA, CAB, BAC, ACB e CBA. Desse modo, não foi necessário utilizar longos trechos da rodovia para a realização do experimento, possibilitando a concentração em trecho de pequena área, o que facilitou sua monitoração.

Aplicação da sinalização na pista

Inicialmente, foram feitas as pré-demarcações no pavimento, manualmente, e, em seguida, as tintas foram aplicadas pelos equipamentos e veículos adequados. Para evitar heterogeneidades na aplicação dos materiais, decidiu-se aplicar a sinalização a partir da faixa de tráfego contígua (cabine 11), de modo que, quando o equipamento chegasse à faixa da cabine 12 (do experimento), já estivesse em condições estabilizadas de aplicação. Dessa forma, cada linha foi demarcada sobre duas faixas de tráfego contíguas, facilitando ao operador do equipamento manter velocidade constante de aplicação do material (tinta + microesferas) sobre a faixa nº 12, sendo que a passagem pela faixa nº 11 serviu como uma "calibração". Após a conclusão das aplicações, a equipe de campo realizou o primeiro levantamento da retrorrefletividade, utilizando equipamento retrorrefletômetro horizontal Easylux (nacional), seguindo a norma ABNT correspondente. Estas primeiras leituras foram realizadas apenas para controle da execução, assim, os valores lidos não foram utilizados na análise estatística.

Monitoração da Retrorrefletividade da Sinalização

Foram realizadas 32 avaliações, entre os dias 13/07/2016 e 03/05/2017. O levantamento da retrorrefletividade foi realizado por meio de retrorrefletômetro portátil. Ao redor de cada posição de 1 a 5 de cada linha transversal pintada, foram feitas 5 leituras, movimentando-se o equipamento ao redor de cada posição, sempre nos mesmos pontos e na mesma sequência.

Monitoração do Tráfego

O efeito do tráfego foi considerado de 3 formas diferentes: volumes de veículos; número N e número de eixos de veículos. Os dados volumétricos de tráfego foram obtidos pelos equipamentos instalados na praça de pedágio, na faixa da cabine 12. Os dados de carga foram obtidos na balança situada próximo à praça de pedágio (Guararema/SP).

Verificação Visual das Condições dos Materiais Testados Durante o Experimento

A análise visual mostrou um desgaste muito maior do material nas posições 2 (dois) e 4 (quatro), por conta da passagem dos eixos dos veículos (trilha de roda). A posição 5 (extrema direita) apresentou o menor desgaste, dado que os condutores dos veículos evitam essa posição (paralaxe).

Análise do Comportamento da Sinalização

Os resultados mostraram que a retrorrefletividade diminuiu com o tempo para todos os materiais testados, observando seu desgaste físico (não houve reaplicação da sinalização ao longo do experimento). A

retrorrefletividade parece ter estabilizado-se ao longo do tempo, porém, próximo ao fim do experimento, houve dificuldade nas leituras devido à menor quantidade de material de sinalização no pavimento.

Conclusões

O experimento realizado permitiu avaliar o desempenho de três materiais de sinalização horizontal rodoviária quanto ao comportamento de sua retrorrefletividade ao longo do período de 11 (onze) meses contínuos, sob o efeito do tráfego de veículos, em condições reais de operação da rodovia.

Os valores de retorrrefletividade mostraram que houve interação entre a posição e o tempo, sendo mais notável a diferença observada na retrorrefletividade das posições da seção transversal da faixa de rolamento ao longo do tempo. O material B apresentou maior estabilidade, ou menores variações, da retrorrefletividade, durante o tempo deste experimento. Embora sua retrorrefletividade inicial fosse menor do que a dos materiais A e C, conservou-se melhor ao longo do tempo em uso.

6.36. Determinação do Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico e Flow Number de Misturas Asfálticas com Diversos Ligantes Asfálticos e Faixas Granulométricas.

O aumento do volume de tráfego, das cargas por eixo e da pressão de enchimento dos pneus dos veículos comerciais nas rodovias no Brasil exige cada vez mais o emprego de materiais com maior resistência e durabilidade na construção dos revestimentos de pavimentos rodoviários.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades fundamentais e de principal interesse para o dimensionamento mecanicista de estruturas de pavimentos, de diversas misturas asfálticas e a influência da fonte dos agregados, da faixa granulométrica e do tipo de ligante asfáltico. Os parâmetros mecânicos foram avaliados por meio de um programa laboratorial que incluiu os seguintes ensaios:

- Caracterização dos materiais e dosagem de misturas asfálticas;
- Módulo de resiliência (MR) por compressão diametral em três temperaturas;
- Resistência à tração (RT);
- Módulo dinâmico (E*);
- Compressão uniaxial de carga repetida (*flow number*, *FN*).

Seleção e Caracterização dos Materiais

Para composição das diversas misturas asfálticas deste estudo, foram coletados três tipos de agregados minerais (brita 1”, pedrisco e pó de pedra) de diferentes pedreiras (agregados graníticos e basálticos),

provenientes de São Paulo e do Rio de Janeiro. Também foram selecionados 12 ligantes asfálticos disponíveis no mercado nacional, que foram caracterizados através do conjunto de ensaios exigidos nas suas respectivas especificações técnicas.

Dosagem das Misturas Asfálticas

Foram elaborados os projetos de dosagem das misturas asfálticas para os três tipos de agregados, as quatro granulometrias (Faixa III DERSA, EGL 19,0 mm, EGL 9,5 mm e GAP) e os doze ligantes asfálticos selecionados, totalizando 144 dosagens.

Determinação dos Parâmetros Mecânicos e Análise dos Resultados

Módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT): o ensaio de MR foi executado na temperatura convencionalmente utilizada no Brasil de 25°C e, de forma complementar, o ensaio foi realizado também nas temperaturas de 21,1°C e 37,8°C, que são as temperaturas intermediárias utilizadas no ensaio de módulo dinâmico. Após execução do ensaio de módulo de resiliência, também foi executado o ensaio de resistência à tração (RT) na temperatura de 25°C.

Flow Number

Os ensaios de *flow number* foram executados na temperatura de 54,4°C com tensão desvio de 600kPa e sem confinamento. Estes ensaios foram realizados logo após conclusão do ensaio de módulo dinâmico. Nos itens seguintes são apresentados os resultados para cada faixa granulométrica e cada fonte de agregados.

Considerações Finais

Excetuando o fator fonte de agregados no módulo dinâmico, observa-se que todos os parâmetros avaliados neste estudo foram significativos. Assim, conclui-se que é muito importante estudar as propriedades das misturas asfálticas para sua adequada seleção e emprego em projetos de pavimentos rodoviários.

Com relação à fonte de agregados, observou-se que, de forma genérica, os agregados graníticos do Estado de São Paulo apresentaram os maiores valores de rigidez, resistência à tração e resistência à deformação permanente. Quanto à faixa granulométrica, os resultados mais elevados na RT, E* e FN foram obtidos na EGL 19 mm, e, para o MR, foram obtidos na Faixa III DERSA.

Nos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico observou-se que, em temperaturas intermediárias, o ligante asfáltico de alto módulo (AM) produz misturas asfálticas com maior rigidez seguido pelo CAP 30/45, e asfaltos modificados por polímero (AMP), por borracha (AB) e o CAP 50/70 apresentam rigidez muito próxima. No entanto, nas temperaturas elevadas de ensaio, os ligantes asfálticos modificados AM, AMP e AB apresentaram rigidez superior aos ligantes asfálticos convencionais CAP 30/45 e CAP 50/70. Esse comportamento variável em função da temperatura de execução dos ensaios é um indicativo de que os ligantes asfálticos modificados têm menor susceptibilidade térmica e resistiriam melhor às deformações em pavimentos sujeitos a elevadas temperaturas.

Finalmente, pode-se afirmar que os resultados obtidos nesta pesquisa consistem em uma base de dados das propriedades fundamentais das misturas asfálticas para sua futura seleção e emprego em atividades de conservação da Rodovia Presidente Dutra e também para projetos de construção de novas estruturas relacionadas a faixas adicionais e marginais da rodovia. A seleção de materiais adequados ao tráfego e ao

clima representa maior durabilidade dos pavimentos, com menores intervenções, gerando economia e trazendo conforto e segurança aos usuários da rodovia.

6.37. Avaliação do Tipo de Cimento e de Compactação nos Parâmetros Mecânicos da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)

As bases e sub-bases cimentadas são utilizadas no Brasil principalmente na construção de pavimentos submetidos a tráfegos elevados. A brita graduada tratada com cimento (BGTC) é utilizada para atender essa necessidade. A BGTC é definida como o produto resultante da mistura em usina de pedra britada, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos, em proporção determinadas experimentalmente. Existem poucas especificações que indiquem o tipo de cimento mais adequado que deve ser utilizado na composição da BGTC, e poucos estudos que tenham investigado as propriedades mecânicas desta mistura com distintos ligantes hidráulicos. Tampouco há estudos no Brasil que tenham abordado os efeitos da demora entre a mistura dos componentes em usina e a compactação em pista, nas propriedades mecânicas da BGTC.

OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas da brita graduada tratada com cimento e o efeito do tempo transcorrido entre a mistura dos componentes da BGTC e a compactação em campo.

SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

- **Agregados:** neste estudo, foram selecionados dois agregados com origem mineralógica distinta, o granito e o basalto. Os agregados foram

coletados nas suas granulometrias comerciais: Brita 2", Brita 1", Pedrisco e Pó de Pedra.

- **Cimento Portland:** foram selecionados dois tipos de cimentos Portland comumente encontrados na região da Rodovia Presidente Dutra: CP II E 32 e o outro é o CP III 32.

Dosagem da Brita Graduada Tratada com Cimento

Os parâmetros determinados na dosagem da BGTC são massa específica seca máxima (MES_{max}) e umidade ótima (W_{ot}), de forma que o valor da resistência à compressão simples (RCS) se situe no intervalo de 3,5MPa a 6,2MPa, aos 28 dias de cura. Neste estudo, foi empregada a energia modificada e a compactação foi realizada com o emprego de um compactador vibratório, seguindo as recomendações da Asphalt Academy (2009). Para compactar um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, simulando a energia modificada gerada por um soquete Proctor grande convencional, foi necessário aplicar a compactação vibratória durante 20 segundos em cada uma das quatro camadas de compactação.

Determinação dos Parâmetros Mecânicos

Para alcançar o objetivo, foi desenvolvido um planejamento de experimentos (72 experimentos), que foi empregado para elaborar um programa laboratorial que possibilite avaliar a influência dos fatores nos parâmetros mecânicos da BGTC.

Resistência à Compressão Simples

As misturas com agregados graníticos mostraram que há tendência geral da BGTC apresentar maior resistência quando é utilizado o CP III, independentemente do tempo de cura, da demora entre a mistura e a compactação ou o teor de cimento. Os resultados de RCS das misturas de BGTC produzidas com agregados basálticos mostraram a tendência à redução de resistência em função do tempo da demora entre a mistura e a compactação para as misturas com 2% de cimento, aos 7 e 28 dias de cura. No entanto, para os teores de 3% e 4%, observa-se também redução de resistência aos 7 dias de cura, mas aos 28 dias de cura observa-se uma tendência inversa. Quanto aos efeitos comparativos do efeito do tipo de cimento empregado na BGTC na RCS após 0 horas, 2 horas e 4 horas de demora entre a mistura e a compactação, pode-se observar de modo geral que o emprego do CP III produziu misturas de BGTC com valores de RCS superiores aos valores obtidos na BGTC com CP II, quando foram utilizados agregados basálticos.

Resistência à Tração por Compressão Diametral

As misturas com agregados graníticos mostraram uma tendência de redução de resistência após demora entre a mistura e a compactação, o que ficou mais evidente após 4 horas, na BGTC com CP II, aos 28 dias. No caso da BGTC com CP III, não houve um comportamento muito bem definido. Além disso, os resultados de RT, após 0, 2 e 4 horas de demora, mostram que em todos os casos a BGTC com cimento CP III apresentou maior resistência à tração por compressão diametral. Em relação às misturas com agregados basálticos, pode-se observar que não houve um comportamento bem definido quanto ao incremento da demora entre a mistura e a compactação dos corpos de prova e, neste caso, tampouco há uma tendência muito clara quanto à influência do tipo de cimento.

Módulo de Resiliência

Pode-se observar que, em todas as misturas com agregados graníticos, a rigidez foi sempre superior nas misturas com o cimento CP III, independente do teor de cimento, do tempo de cura ou da demora. No caso das misturas com agregados basálticos, pode-se observar que não há um comportamento bem definido com relação à demora entre a mistura e a compactação da BGTC e também não há um comportamento muito claro do parâmetro de MR quanto ao tipo de cimento empregado na BGTC. No entanto, pode-se comprovar que o incremento de cimento na BGTC e o tempo de cura aumentam a rigidez deste material.

Módulo Dinâmico

As misturas com agregados graníticos mostraram que há uma tendência de redução de rigidez conforme se incrementa o tempo de demora para todos os teores de cimento utilizados. Em relação ao tempo de demora de 0, 2 e 4 horas, nota-se que a BGTC produzida com CP III apresentou maior rigidez, quando comparada com cimento CP II. Apenas aos 7 dias, com 4% de cimento a BGTC com CP II, apresentou maiores valores de MD. Em relação às misturas produzidas com agregados basálticos, pode-se notar que, para o teor de cimento de 2%, houve um decréscimo de rigidez para 2 e 4 horas de demora entre a mistura e a compactação da BGTC. Já nos teores de 3% e 4% de cimento, não houve um comportamento bem definido. Comparando os resultados referentes a demora, observa-se que o cimento CP III produziu BGTC com rigidez superior à BGTC com cimento CP II.

Resistência à tração na flexão

Não houve um comportamento muito bem definido quanto à demora entre a mistura e a compactação dos CPs e que o cimento tipo CP III produziu BGTC com resistência superior à BGTC com cimento tipo CP II. De forma geral, pode-se observar que o incremento do teor de cimento aumenta a resistência à tração na flexão, os quais são mais consideráveis após 28 dias de cura. Com relação à demora entre a mistura e a compactação, nota-se que esse parâmetro é mais crítico no tempo de cura de 7 dias quando comparado com os efeitos observados nos resultados aos 28 dias de cura.

Módulo flexural

As misturas com agregados graníticos e CP III apresentaram resistência superior à BGTC com CP II. O mesmo comportamento também foi observado para as misturas com agregados basálticos. No módulo flexural também foi comprovado o efeito do incremento do teor de cimento na BGTC, o qual, conforme aumenta, há incremento da rigidez. De igual maneira, o tempo de cura de 28 dias mostrou maiores valores de rigidez quando comparados com o módulo flexural aos 7 dias de cura. Com relação à demora entre a mistura e a compactação, não é notado um comportamento bem definido para BGTC.

Ensaio de Expansão / Retração

Pode-se verificar que todas as misturas apresentaram retração. Observa-se, para a BGTC com agregados basálticos, que o incremento de 2% para 3% de cimento provocou um leve incremento da retração, sendo mais evidente quando o incremento do cimento é de 3% a 4%. Para a BGTC com agregados graníticos, o incremento do teor de cimento produziu um menor aumento da retração. Quando analisados os resultados em função do tempo de cura, observa-se que o incremento do tempo de cura incrementa a retração, mas o período mais crítico acontece dos 0 aos 7 dias,

principalmente para a BGTC com agregados basálticos e 4% de cimento CPII e CPIII.

CONCLUSÕES

A partir da observação dos resultados e sua análise por meio da ferramenta ANOVA, pode-se realizar as seguintes conclusões:

- **Tipo de cimento**: observou-se que o cimento CP-III-40 produziu BGTC com maior RCS, RT_{CD} e RT_f, assim como maior rigidez, quando analisados por meio de ensaios de MR, MD e módulo flexural, em comparação com o CP-II-E-32. Esse comportamento é mais notório para os teores de 4% de cimento aos 28 dias de cura. Vale notar que a retração também foi maior nos casos em que foi utilizado o CP-III-40;
- **Tipo de agregado**: os agregados basálticos produziram, de forma geral, misturas de BGTC com maiores valores de resistência e rigidez, quando comparadas com as misturas produzidas com agregados graníticos. Também se observou que a retração é levemente superior ao se empregar agregados de origem basáltica na BGTC;
- **Demora entre a mistura e a compactação da BGTC**: não foi notado um comportamento muito bem definido. Em alguns parâmetros, a ANOVA indicou que é um fator significativo, enquanto em outros não. Sabe-se que a demora excessiva entre a mistura e a compactação é prejudicial para a resistência e rigidez do concreto. Porém, é possível que esse fator não tenha sido tão significativo neste estudo quanto se esperava, em função da forma em que se conservou a mistura da BGTC até a sua compactação. Mesmo assim, é um fator que deve ser considerado e limitado na execução da BGTC para garantir o desempenho adequado deste material;
- **Teor de cimento**: o incremento produziu aumento na resistência e na rigidez da BGTC, assim como na sua retração. Os incrementos foram mais expressivos quando a transição foi de 3% para 4% de cimento, quando comparada com a transição de 2% para 3% de cimento;
- **Tempo de cura**: observou-se também um comportamento já bem definido para materiais cimentados, conforme se incrementou este tempo os diversos parâmetros mecânicos avaliados neste estudo tenderam a aumentar, assim como a retração.

Finalmente, conclui-se que todos os fatores avaliados neste estudo influenciam de uma maneira ou de outra o comportamento da BGTC. Assim, é necessário continuar estudando este material para poder utilizá-lo de forma mais racional e obter os melhores benefícios da sua aplicação em pavimentos semirrígidos.

6.38. Asfalto Borracha: Revisão Bibliográfica, Avaliação reológica do Ligante Asfáltico e Determinação dos Parâmetros Mecânicos das Misturas Asfálticas

O asfalto borracha é utilizado em atividades de pavimentação asfáltica há aproximadamente 50 anos nos Estados Unidos. No Brasil, sua primeira aplicação foi há mais de 15 anos. Desde o início, seu emprego vem sendo aperfeiçoado para potencializar os seus benefícios mecânicos nos revestimentos asfálticos. A experiência de diversos projetos ao redor do mundo indica que o concreto asfáltico produzido com asfalto borracha apresenta maior durabilidade, devido à sua maior resistência ao desenvolvimento de trincas por fadiga, trincas por reflexão e menor susceptibilidade térmica, resistindo melhor à deformação permanente.

Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi realizar uma extensa revisão bibliográfica do emprego do ligante asfáltico modificado por borracha e desenvolver um programa laboratorial para avaliar suas principais propriedades reológicas e as características mecânicas de misturas asfálticas que fazem uso deste tipo de asfalto.

Resumo Histórico do Emprego do Asfalto Borracha em Pavimentos

As primeiras aplicações de materiais asfálticos com borracha, em atividades de pavimentação, datam da década de 1930, quando eram utilizados principalmente como selantes, para execução de reparos de conservação, e como membranas. Nos Estados Unidos, Charles McDonald é considerado o inventor da técnica moderna de asfalto borracha pela via úmida. Esse engenheiro do Bureau of Public Roads, durante sua aposentadoria, na década de 1960, trabalhou no estado do Arizona pesquisando materiais para revestimentos asfálticos que tivessem boa flexibilidade a temperatura ambiente (Way, 2011). Nessa época, McDonald concluiu que adicionar borracha líquida ao asfalto seria relativamente fácil, mas com custos proibitivos, e adicionar borracha sólida vulcanizada demandaria elevadas temperaturas do asfalto (superiores a 260°C) para fundi-la. No entanto, o pesquisador notou que quando aquecia o asfalto junto com a borracha, em temperaturas mais baixas, algum tipo de reação acontecia. Durante seus estudos, descobriu que a borracha moída de pneus inservíveis era um material de boas características elásticas e baixo custo. McDonald realizou incontáveis ensaios avaliando os efeitos da porcentagem e o tipo de borracha, o tempo e a temperatura de mistura e observou misturas asfálticas com excelentes características, quando submetidas a elevadas temperaturas (Way, 2012).

O Brasil já utiliza em grandes proporções o asfalto borracha desde o início do milênio. Após quase quinze anos dessa aplicação, muitos trechos foram construídos, recuperados ou restaurados utilizando o asfalto borracha – muitos deles com sucesso; outros, com dificuldades. Desde então, foram realizadas muitas pesquisas pelos centros de pesquisas nas universidades brasileiras (Oda, 2000; Bertollo, 2002; Specht, 2004; Morilha, 2004; Patriota, 2004; Dias, 2005; Faxina, 2006; Balaguer, 2012; Camargo, 2016) e também pelo setor industrial de asfaltos.

Reaproveitamento da Borracha de Pneus em Pavimentação Asfáltica

A borracha recuperada dos pneus inservíveis pode ser aproveitada na produção de misturas asfálticas. A incorporação da borracha pode ser realizada por meio de dois processos: via seca e via úmida.

- **Via seca:** nesse processo, as partículas de borracha substituem parte dos agregados pétreos que, com a adição do ligante asfáltico, formam um produto denominado "concreto asfáltico modificado com adição de borracha" (Bertollo, 2002);
- **Via úmida:** nesse processo, partículas finas de borracha são misturadas ao ligante asfáltico aquecido, produzindo um novo tipo de ligante, denominado "asfalto-borracha". Essa metodologia pode ser atribuída a Charles McDonald, que observou os benefícios de incremento de elasticidade e viscosidade do ligante asfáltico a elevadas temperaturas, o que leva à formação de uma película mais espessa nos agregados sem riscos de escorrimento do ligante asfáltico nem de exsudação no revestimento asfáltico (Lopresti, 2013).

Análise das Propriedades Reológicas

Neste estudo, foi realizada uma análise laboratorial dos produtos disponíveis no mercado nacional, por meio da caracterização tradicional recomendada pelo DNIT 111/2009 e pela metodologia Superpave, para avaliar o comportamento reológico dos materiais. Foram selecionados quatro ligantes asfálticos modificados por pó de borracha moída de quatro fornecedores nacionais distintos (CAP-Borr-1, CAP-Borr-2, CAP-Borr-3 e CAP-Borr-4) e, para serem utilizados como base comparativa, foram selecionados um CAP 30/45 e um CAP 50/70.

Ensaios de Caracterização Convencional

Inicialmente, os ligantes asfálticos selecionados foram caracterizados de acordo com as especificações tradicionalmente empregadas no Brasil.

Ensaios de Caracterização Reológica

Para caracterização reológica dos materiais selecionados, foram executados ensaios de acordo com a metodologia Superpave. As normas ASTM e AASHTO foram empregadas para execução desses ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) marca *TA Instruments* Modelo DHR-1, do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.

- Determinação do Grau de Desempenho (PG);
- Ensaio MSCR, *Multiple Stress Creep Recovery*;
- Fadiga pelo parâmetro G*sen(δ).

Determinação dos Parâmetros Mecânicos

Após determinação dos parâmetros de projeto das misturas asfálticas, foram moldados os corpos de prova nas dimensões adequadas para determinação dos parâmetros mecânicos no teor de projeto nos seguintes ensaios:

- resistência à tração (DNIT ME 134/2010);
- dano por umidade induzida (AASHTO T 283-14);
- módulo de resiliência (DNIT ME 135/2010);
- módulo dinâmico (AASHTO T 342/11);
- *flow number* (AASHTO T 342/11);
- fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos (AASHTO T 310-10).

Conclusões

O asfalto modificado por borracha moída de pneus é utilizado há décadas em diferentes partes do mundo para produzir misturas asfálticas com

características mecânicas superiores às das misturas asfálticas convencionais.

No programa laboratorial, foram avaliados quatro asfaltos borrachas disponíveis no mercado nacional, por meio de ensaios empíricos tradicionais e ensaios reológicos. De forma geral, observa-se que o asfalto borracha apresenta melhores características que os asfaltos convencionais, indicando um melhor desempenho quando utilizado na produção de misturas asfálticas para pavimentos. Em relação às misturas asfálticas, pode-se verificar que as misturas asfálticas produzidas com asfalto borracha apresentam comportamento mecânico e de desempenho superior quando comparadas com as misturas asfálticas com CAP 30/45.

Tanto a revisão bibliográfica como os programas laboratoriais executados neste estudo comprovaram os benefícios mecânicos de empregar o asfalto modificado por borracha na pavimentação asfáltica. Nas misturas asfálticas com asfalto borracha, destacaram-se as características de resistência ao trincamento por fadiga e à deformação permanente quando comparadas com as misturas asfálticas convencionais.

6.39. Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto. Etapa 1: Estudo Laboratorial

A técnica de fresagem de pavimentos é muito utilizada na Rodovia Presidente Dutra nas atividades de manutenção e restauração de pavimentos. O resíduo gerado dessas atividades é o comumente chamado "material fresado" ou simplesmente "fresado". Na atualidade, existem várias alternativas para reaproveitar o material fresado. Uma alternativa é na produção de novos concretos asfálticos a quente para sua aplicação em revestimentos asfálticos. Nesse caso, as porcentagens de fresado reciclado variam de 10% a 30% e podem alcançar até 50% ou mais com o emprego de aditivos rejuvenescedores. Outra possibilidade é reaproveitar o material fresado a frio para restaurar as bases e sub-bases dos pavimentos. Nesses casos, 100% do material fresado pode ser reaproveitado por meio de sua estabilização com agentes cimentantes (cimento Portland, cal hidratada), materiais asfálticos (emulsão asfáltica e espuma de asfalto) ou pela combinação destes.

OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi estudar a reciclagem de pavimentos a frio, a partir da avaliação em laboratório da técnica de estabilização do fresado com incorporação de espuma de asfalto, agregados novos e cal hidratada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram seguidos os procedimentos de dosagem estabelecidos pela Wirtgen (2012) e pela Asphalt Academy (2009) para a estabilização de material fresado com espuma de asfalto.

Material fresado: inicialmente foi realizada a coleta de 500 kg do material fresado em áreas da Concessionária CCR NovaDutra, destinadas para seu armazenamento. Este material foi analisado por meio de ensaios de granulometria e índices de consistência para verificação da necessidade de incorporação de agregados novos e fíler ativo.

Ligante asfáltico: para desenvolvimento deste estudo, foi selecionado o CAP 50/70 para a produção da espuma de asfalto. O laboratório móvel da Wirtgen, modelo WLB 10S, foi utilizado para avaliar a espuma de asfalto quanto a sua meia vida e expansibilidade. O teor de 2% de água adicionado ao CAP 50/70 na temperatura de 170°C foi suficiente para produzir espuma de asfalto com expansão superior a 8 vezes e meia vida mínima de 6 segundos.

DOSAGEM DAS MISTURAS DE FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

Neste estudo, foi avaliado o uso de cal hidratada e cimento Portland como material de fíler. O material estabilizado granulometricamente foi compactado no Proctor modificado para determinação do teor de umidade ótima (W_{ot}) e massa específica seca máxima ($MES_{máx}$) e, posteriormente, para determinar o teor de espuma mais adequado para as diferentes amostras. Inicialmente, foi realizada a compactação do fresado com agregados novos, fíler e água para determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima. Com esses dados, procedeu-se à compactação de CPs com cinco teores de espuma de asfalto. Os 6 CPs compactados para cada teor foram mantidos em estufa ventilada na temperatura de 40°C durante 72h. Após o período de cura, 3 CPs foram imersos em água durante 24h na temperatura de 25°C e os outros 3CPs foram conservados em incubadora também a 25°C durante 24h. Após esse período, os CPs foram submetidos ao ensaio de compressão diametral.

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS

O ensaio de módulo de resiliência diametral, na condição seca e na condição saturada, foi executado nas amostras de fresado, estabilizado com espuma de asfalto (tanto com cal hidratada como com cimento Portland), para os materiais coletados no Estado de São Paulo, como para os do Estado do Rio de Janeiro.

Materiais Coletados no Estado de São Paulo

Módulo de resiliência: tendência de obter maiores valores de rigidez para as misturas com cimento Portland, do que com cal hidratada. Observa-se também que para a condição saturada, o cimento Portland produziu um ganho de rigidez, o que poderia ser atribuído à cura do cimento durante a imersão dos corpos de prova.

Resistência à tração por compressão diametral: observa-se a mesma tendência de o cimento Portland produzir misturas estabilizadas com maior resistência à tração do que a cal hidratada.

Ensaios de compressão triaxial: os resultados de coesão variaram de 50 até 87kPa, valores considerados um pouco baixos, caracterizando o material como um BSM3, de acordo com a Asphalt Academy (2009). Já os resultados de ângulo de atrito foram em torno de 40°C, caracterizando os materiais, de acordo a esse parâmetro, como BSM1.

Materiais Coletados no Estado do Rio de Janeiro

Módulo de resiliência: constata-se que o cimento produz misturas com maior rigidez também nas misturas com materiais coletados no Estado do Rio de Janeiro.

Resistência à tração por compressão diametral: observa-se a mesma tendência citada anteriormente, o cimento tende a produzir misturas estabilizadas de resistência à tração similar à obtida nas misturas que empregaram cal hidratada, para os materiais coletados no Estado do Rio de Janeiro.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização laboratorial do material fresado indicou necessidade de correção granulométrica para atender as faixas recomendadas pela Wirtgen (2012) e adotadas para este estudo. Para realizar essa correção granulométrica adicionou-se pó de pedra, nas proporções de 7,5% até 25%, de acordo à fonte do fresado asfáltico, e 1,0% de cal hidratada ou 1,0% de cimento Portland. Para a dosagem desses materiais, foi realizada a moldagem de CPs cilíndricos com o soquete Proctor grande e obtiveram-se teores ótimos de umidade de 4,9 a 6,2% de acordo à fonte de origem do fresado asfáltico.

Na determinação do teor de espuma asfáltica ideal, os CPs foram moldados com distintos teores com o auxílio de um compactador vibratório. Os teores de espuma asfáltica de projeto foram de 1,8% a 2,0% para os distintos fresados asfálticos coletados neste estudo, a fim de atender aos critérios de RTseca e RTsaturada, recomendadas pela Asphalt Academy (2009).

Os resultados dos ensaios de compressão cíclica diametral e compressão estática diametral indicaram que o emprego de cimento incrementa a rigidez e a resistência à tração do material fresado estabilizado com espuma asfáltica. Também foi observado que o emprego desse fíler reduz a perda de resistência e rigidez após saturação, o que indica uma boa resistência à ação deletéria da água. No entanto, os resultados com cal hidratada também foram satisfatórios e atenderam aos parâmetros mecânicos recomendados na bibliografia estudada.

Os resultados dos ensaios mostraram, de forma geral, que o material fresado coletado ao longo da Rodovia Presidente Dutra apresenta excelentes características para ser aproveitado na constituição de novas camadas estruturais de pavimentos. A reutilização desse material para novas obras e para atividades de manutenção se traduziria em diversas vantagens para o meio ambiente, já que estar-se-ia reduzindo a necessidade de explorar novos recursos naturais e também dispor-se-ia o fresado asfáltico de forma correta.

6.40. Modelo de Serviço de Telemedicina para Atendimento Emergencial em Rodovia Baseada em Centro de Apoio Referenciada para Encaminhamentos

A CCR NovaDutra foi a primeira concessionária a receber um projeto piloto de telemedicina em uma de suas onze bases operacionais. Mais precisamente na Base Operacional Número 01 (um), situada no km 229 da Rodovia Presidente Dutra, sentido São Paulo, na Vila Maria, na cidade de São Paulo. O Projeto Telemedicina da CCR NovaDutra é um programa experimental para determinação da viabilidade da implantação da telemedicina no atendimento pré-hospitalar em rodovias.

OBJETIVOS

O objetivo deste projeto de pesquisa é utilizar o serviço de atendimento pré-hospitalar da concessionária para implantar a telemedicina como suporte para casos médicos de urgência. A interação realizada com médicos especialistas da Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein, parceiro no projeto, fará com que o médico em campo, em tempo real, tenha um suporte extra, em sua atividade, proporcionando um aumento na qualidade do atendimento à vítima.

O sistema de telemonitoramento instalado na ambulância permite uma leitura, também em tempo real, dos sinais vitais (pressão arterial, frequência cardíaca, frequência respiratória, saturação sanguínea de oxigênio) por parte da equipe na Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein. A conectividade do sistema se dá através da emissão de dados por sistema semelhante à telefonia móvel. Após passar pelas fases de testes e avaliações de viabilidade, o projeto será expandido para as demais Bases Operacionais da Rodovia Presidente Dutra e, na sequência, para outras rodovias.

INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Foi realizada a instalação dos equipamentos de telemedicina em uma ambulância Tipo D (UTI), utilizada regularmente em operações de atendimento pré-hospitalar pela CCR NovaDutra, pela empresa GetConnect, assim como os testes de conectividade com a central de telemedicina do Hospital Albert Einstein e funcionamento do referido equipamento.

Ambulância: a ambulância empregada é do Tipo D (UTI), opera na Base Operacional Número 01 (Um) da CCR NovaDutra, na qual foram instalados os equipamentos de Telemedicina pela empresa GetConnect.

Equipamentos de telemedicina: os equipamentos utilizados no Projeto Telemedicina da CCR NovaDutra foram testados quanto ao funcionamento no local e conectividade com a Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein, apresentando bom funcionamento em todos os aspectos.

Os equipamentos de telemedicina instalados no interior de uma ambulância foram:

- Monitor multiparâmetro: registra os sinais vitais do paciente que são transmitidos online para a Central de Telemedicina do Hospital Albert Einstein;
- Desktop com software embarcado para aquisição de dados (*HealthBox*): computador do sistema de telemedicina instalado na ambulância;

- Módulo de transmissão *Wifi*: faz a ligação, sem fio, entre o tablet e o desktop.
- Tablet com grau de proteção IP67 e videoconferência embarcada: promove a interface entre o operador em campo, o sistema e o operador na Central de Telemedicina;
- Módulo de transmissão: trabalha com dois SIM Cards (chips de telefonia móvel). Estabelece a ligação entre o equipamento na ambulância e a Central de Telemedicina no hospital;
- SIM Card (Chips de telefonia móvel): inseridos no módulo de transmissão, funcionam de forma redundante.

Os equipamentos foram instalados na parede lateral esquerda do salão da ambulância no interior da ambulância.

Capacitação Técnica

A equipe de médicos e resgatistas – estes últimos denominados Agentes de Atendimento APH, pois todos têm formação também como técnicos de enfermagem –, foi treinada para o uso do equipamento de telemedicina e conhecimento dos protocolos relacionados ao tema nas dependências da Base Operacional da Vila Maria. Foi elaborada um guia de operações do sistema de telemedicina com a sequência de etapas usada no treinamento para operação do equipamento de telemedicina instalado na ambulância, que incluiu, por exemplo, como realizar uma videoconferência, estabelecendo contato com o Centro de Telemedicina do Hospital Albert Einstein. Através da elaboração de uma diretriz de operação para a conferência e operação dos equipamentos de telemedicina, as equipes de plantão realizaram testes de comunicação entre a unidade móvel, composta por uma ambulância e as centrais de operação da empresa GetConnect e de telemedicina do Hospital Israelita Albert Einstein. As conferências diárias foram registradas em checklist de operações da equipe de Atendimento Pré-Hospitalar da CCR NovaDutra.

Análise dos Resultados

No segmento avaliado, empregou-se a plataforma WebEx para a conectividade entre a equipe da CCR NovaDutra e o Hospital Albert Einstein. Em um dos primeiros contatos, realizou-se a transmissão com a ambulância sem se movimentar, conseguindo uma excelente transferência de dados relacionados aos parâmetros de sinais vitais, tais como pressão arterial saturação e pulso. Os dados transmitidos pela CCR NovaDutra eram recebidos no Hospital Albert Einstein com uma atualização de valores inferior a 10 segundos, o que é considerado excelente pela equipe do hospital, conforme a experiência já adquirida por eles.

Também foram constatados os registros dos chamados simulados no servidor instalado na ambulância (Health Box), com transmissão dos dados armazenados imediatamente após o estabelecimento da conectividade, durante o percurso da ambulância.

Número de Pacientes Atendidos

No período de fevereiro a julho de 2017, foram atendidos 620 pacientes no segmento rodoviário correspondente ao km 217 ao km 231 da Rodovia Presidente Dutra, na região metropolitana de São Paulo. Desse total, 38 foram atendidos com o apoio do sistema de telemedicina.

Conclusões

Com base nos dados e observações coletados durante os primeiros 12 meses do Projeto Telemedicina, foi observado que o modelo de assistência

com telemedicina é viável e traz vantagens, tanto para o paciente, por receber no atendimento pré-hospitalar cuidados da equipe especializada em emergência com apoio de especialistas que só poderiam avalia-lo após a chegada ao hospital, como para a equipe de APH, por poder iniciar em campo, de forma segura e orientada, procedimentos que, por vezes, só seriam sugeridos e iniciados também após a chegada ao hospital.

Essas vantagens se mostrariam ainda mais expressivas em locais remotos, onde a carência de médicos, principalmente especialistas, e a grande distância até um hospital adequado, se mostram hoje como grandes desafios para o atendimento pré-hospitalar.

6.41. Treinamento e Capacitação Técnica em Pavimentação

Esta pesquisa teve como objetivo treinar e capacitar equipes técnicas da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra no dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos. O método de capacitação é o de treinamento presencial da equipe técnica em aulas preparadas por professores especializados nos assuntos abordados. O treinamento foi dividido em quatro etapas para abordar os principais assuntos relacionados ao dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos.

Etapas Executadas

O programa de capacitação técnica foi dividido em quatro etapas, conforme descrição a seguir:

Etapa 1: Materiais de Pavimentação

Etapa 2: Dimensionamento de pavimentos Flexíveis e Semirrígidos

Etapa 3: Avaliação de Pavimentos Rodoviários

Etapa 4: Palestra sobre o Estado da Arte da Pavimentação

Etapa 1: Materiais de Pavimentação

Esta Etapa foi executada na sede da ANTT, em Brasília (DF), entre os dias 14 e 17 de fevereiro de 2017, com uma duração de 24 horas, e participação da Equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra, como mostra a Figura 31.



FIGURA 31. FINALIZAÇÃO DO MÓDULO 1 NA ANTT

Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Agregados;
- Solos;
- Asfaltos;
- Misturas asfálticas;
- Materiais tratados com cimento e cal hidratada;
- Materiais reciclados na pavimentação.

ETAPA 2: DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E SEMIRRÍGIDOS

Esta etapa foi executada na sede da ANTT em Brasília (DF), entre os dias 15 e 18 de maio de 2017, com uma duração de 24 horas, e participação da equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra.

Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Terminologias, funcionamento estrutural do pavimento, distribuição de tensões, mecanismos estruturais das camadas, vida útil, vida de projeto, mecânica de pavimentos. Principais elementos e variáveis para o dimensionamento;
- Princípios do dimensionamento de pavimentos rodoviários;
- Tráfego rodoviário;
- Dimensionamento pelo método do antigo DNER;
- Dimensionamento pelo método da AASHTO, de 1993;
- Análise mecanicista por meio de software baseado na teoria de sistema de camadas elásticas (TSCE);
- Noções sobre o método de dimensionamento norte americano MEPDG – Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide;
- Estágio atual de desenvolvimento do novo método de dimensionamento que vêm sendo proposto dentro da "Rede Temática de Asfalto".

ETAPA 3: AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Esta Etapa foi executada na sede da ANTT, em Brasília (DF), entre os dias 19 e 22 de setembro de 2017, com uma duração de 24 horas, e participação da equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra. Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Avaliação de defeitos;
- Análise estrutural de pavimentos: viga Benkelman; *Falling Weight Deflectometer* (FWD);
- Retroanálise;
- Avaliação da aderência pneu-pavimento em pistas molhadas;
- Ruído;
- Indicadores progressivos;
- Segurança viária: sinalização horizontal; tipos de pinturas; medidas de retrorreflectividade.

ETAPA 4: PALESTRA SOBRE O ESTADO DA ARTE DA PAVIMENTAÇÃO

Esta etapa foi executada na sede da ANTT, em Brasília (DF), no dia 23 de novembro de 2017, e foi concluída com a visita ao Centro de Pesquisas

Rodoviárias (CPR), da CCR NovaDutra, em Santa Isabel (SP), no dia 24 de novembro de 2017. Nesses dias, houve a participação da equipe da SUINF da ANTT e da CCR NovaDutra, conforme ilustra a Figura 32. Os tópicos abordados, conforme planejado em plano de trabalho, foram:

- Novas tecnologias;
- Tendências para a pavimentação;
- Cenário nacional e internacional.



Figura 32. Visita ao Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra

Considerações Finais

Após a conclusão dos treinamentos, foi realizado um levantamento de satisfação com os participantes das equipes envolvidas. De forma geral, o resultado foi muito positivo. Os participantes ressaltaram a grande abrangência do curso e a excelente organização, além da disponibilidade dos professores responsáveis pelo treinamento para atender aos alunos.

6.42. Ecodriving BR – Reduzindo Custos e Ampliando Benefícios Socioambientais na Principal Rodovia Brasileira

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência do aprendizado motor como ferramenta para aprimorar a condução em geral e reduzir suas externalidades socioambientais. Para atender ao objetivo geral deste estudo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- realizar um levantamento de dados disponíveis relativos à utilização da frota da empresa, tais como consumo de combustível, acidentes e infrações;
- realizar um acompanhamento da operação da frota;
- ações de treinamento e conscientização, composta por duas atividades:
- condução avançada em um veículo real, praticados em pistas específicas para este fim;
- treinamento de percurso rodoviário com foco em redução de consumo de combustível, eco condução e busca de posturas seguras no trânsito como antecipação e distância e seguimento;
- realizar um levantamento de dados pós ações de treinamento e conscientização, considerando os mesmos parâmetros levantados na etapa inicial;
- realizar uma análise estatística para comparar os resultados da frota da CCR NovaDutra antes e após treinamento.

Dados da Frota da CCR NovaDutra nos Últimos Anos

Os dados fornecidos pela CCR NovaDutra referem-se à operação da frota nos últimos 5 anos ou mais, e são divididos em 3 tópicos: consumo de combustível; acidentes; e infrações de trânsito.

Métodos e Técnicas Utilizadas na Pesquisa

Para analisar o comportamento do condutor foram aplicados dois questionários e realizadas duas séries de exercícios práticos em condições de condução real, por sujeito. Para os exercícios de condução avançada, foi utilizado um veículo de marca Chevrolet, modelo Tracker 2.0, ano 2008, monitorado. Para os exercícios de percurso rodoviário, foi utilizado um veículo dotado de computador de bordo com Driving Eco[2] e equipado com *Mobileye*, que possibilita a medição da distância de seguimento. Os exercícios de condução avançada foram aplicados em uma pista plana com 200 m de comprimento e 25 m de largura, sem pavimentação, com o piso bem nivelado e cones.

Os exercícios de condução avançada são compostos por:

Slalom: exercício de curvas sucessivas de mesmo raio, porém em direções opostas, com cones representando obstáculos, com o objetivo de monitorar a coordenação de controles de visão, de aceleração e posição das mãos no volante.

Frenagem total: exercício de aceleração até a velocidade de 50 km/h em terceira marcha, mantendo a velocidade até receber comando para então frear o mais rápido e eficientemente possível, com o objetivo de monitorar tempo de reação, regime de giros do motor, posição ergonômica, pressão no pedal de freio, utilização da embreagem e espaço de frenagem;

Frenagem com desvio: exercício de aceleração até a velocidade de 50 km/h em terceira marcha, mantendo a velocidade até receber comando para então frear e promover a mudança de faixa de rolamento. Os condutores devem concluir a frenagem e o desvio no menor espaço possível.

- Análise dos Dados Obtidos nas Ações de Treinamento de Percurso Rodoviário;
- Análise dos Dados Obtidos nas Ações de Treinamento de Condução Avançada;
- Análise dos Dados Fornecidos pela CCR NovaDutra sobre Acidentes com a Frota Própria de 2010 a 2017;
- A Probabilidade de Acidente em Deslocamento;
- Análise de Emissões por Consumo de Combustíveis com Frota Própria da CCR NovaDutra de 2012 a 2017;
- Projeções de Redução de Consumo de Combustível e Emissões de GEE.

Considerações Finais

O método de usar as duas atividades de treinamento para medir padrões e desenvolver competência, buscando o distanciamento do risco e a capacidade de reação em emergências, se mostrou robusto para caracterizar o risco de acidente de cada postura de direção adotada pelos participantes. Posturas de direção adequadas que propiciam reduções de impactos socioambientais nos pós treinamento não acarretaram grande aumento no tempo do percurso e este, em média, foi inversamente proporcional à redução do consumo de combustível.

De forma geral, os resultados obtidos de incremento de distância de seguimento, melhores reações em situações de emergência, redução de consumos de combustível e emissões de GEEs, sinalizam que é possível

diminuir acidentes e minimizar impactos socioambientais a partir de posturas desejáveis de condução.

O presente trabalho sinaliza uma potencial economia anual, caso as posturas pós treinamento sejam incorporadas na operação, equivalente a cerca de R$ 921.761,00 em danos materiais oriundos de acidente com viaturas em deslocamento; R$ 733.128,20 em combustível; e também uma redução de 409 toneladas de CO^2 equivalente, em emissões de GEEs.

6.43. Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto e Cimento Portland, Construção e Monitoramento de um Trecho Experimental

A técnica de fresagem de pavimentos é muito utilizada na Rodovia Presidente Dutra nas atividades de manutenção e restauração de pavimentos. O resíduo gerado dessas atividades é o comumente chamado "material fresado" ou simplesmente "fresado". A reciclagem dos pavimentos asfálticos, por meio do reaproveitamento do fresado, vem se incrementando no mundo inteiro – e no Brasil –, como uma técnica atrativa para restaurar pavimentos existentes. A popularidade dessa técnica deve-se principalmente ao fato de atender aos objetivos atuais da sociedade em reduzir o consumo de recursos naturais, de energia e a emissão de poluentes ao meio ambiente.

Na atualidade, existem várias alternativas para reaproveitar o material fresado. Uma delas consiste na possibilidade de reaproveitar o material fresado a frio para restaurar as bases e sub-bases dos pavimentos. Nesses casos, até 100% do material fresado pode ser reaproveitado por meio de sua estabilização com agentes cimentantes (cimento Portland, cal hidratada), materiais asfálticos (emulsão asfáltica e espuma de asfalto) ou por meio de combinações destes.

OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a técnica de reciclagem de pavimentos com espuma de asfalto por meio da construção de um trecho experimental.

Para alcançar o objetivo principal, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Selecionar um segmento para a construção do trecho experimental com espuma de asfalto na Rodovia Presidente Dutra;
- Dimensionar a estrutura do pavimento para restauração do segmento considerando o uso de camadas de material fresado estabilizado com espuma de asfalto;
- Realizar ensaios de dosagem do material fresado estabilizado com espuma de asfalto e ensaios em laboratório para a caracterização mecânica;
- Realizar o acompanhamento da construção do trecho teste com espuma de asfalto, com os respectivos ensaios de controle tecnológico;
- Monitorar o trecho por meio de ensaios de campo para avaliar a evolução do comportamento frente aos esforços impostos pelo tráfego e pelo clima.

SELEÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

A Rodovia Presidente Dutra (BR-116) apresenta elevados volumes de tráfego ao longo de toda sua extensão. Portanto, a seleção do local para executar o trecho experimental foi um desafio, já que a concessionária tem a preocupação de manter o tráfego livre e em condições de máxima segurança para o usuário. O trecho selecionado foi a faixa de aproximação à cabine de pedágio de cobrança automática de número 12, no município de Jacareí (SP), no km 165, Pista Norte.

DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DO TRECHO EXPERIMENTAL

Para o dimensionamento da estrutura do trecho experimental, foi utilizada a metodologia usualmente aceita no Brasil para verificação de tensões e deformações admissíveis nos materiais componentes das diversas camadas. No segmento do trecho teste, o tráfego homogêneo é o seguinte:

- NUSACE = $2{,}4 \times 10^8$
- NAASHTO = $7{,}75 \times 10^7$

Esses níveis de tráfego foram utilizados para determinar a deflexão no topo do pavimento (D), a deformação de tração (ε_t) admissível na fibra inferior do revestimento asfáltico e a deformação vertical (ε_v) admissível no topo do subleito, a partir de modelos usualmente empregados para determinação desses parâmetros. Já que a mistura de material fresado com espuma asfáltica tem baixos teores de asfalto efetivo, nesta camada usualmente não é considerada a fadiga como um mecanismo de ruptura (Jenkins, 2012; Collings & Jenkins, 2011; Fu e Harvey, 2007).

DOSAGEM DO FRESADO ESTABILIZADO COM ESPUMA DE ASFALTO

Para realização da dosagem do material fresado estabilizado com espuma de asfalto, foi utilizado o Manual de Reciclagem a Frio Wirtgen (2012) e o TG2 da Asphalt Academy (2009). Para mais detalhes sobre este processo de dosagem também pode ser consultado Klinsky & Faria (2018).

ACOMPANHAMENTO DA CONSTRUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

Em seguida, são listadas as atividades executadas para a construção do trecho experimental com material fresado estabilizado com espuma de asfalto:

- britagem do material fresado;
- produção da mistura de fresado com espuma asfáltica;
- fresagem do pavimento do trecho experimental;
- aplicação da mistura estabilizada com espuma asfáltica;
- aplicação do revestimento asfáltico.

MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL

O monitoramento do trecho experimental para avaliar seu comportamento e desempenho no decorrer do tempo e da ação do tráfego foi realizado após 1 semana, 3 meses, 6 meses, 8 meses e 12 meses. Assim, iniciou-se o monitoramento por meio do levantamento deflectométrico já na fase construtiva, com o equipamento FWD (*Falling Weigth Deflectometer*) de acordo com o DNER PRO 273-96, pela empresa COPAVEL. As leituras foram executadas no mesmo dia de execução do trecho experimental, em duas condições: no fundo da caixa de fresagem, no centro da faixa; após fresagem de 34 cm, o equipamento realizou as leituras no topo da camada de brita graduada simples remanescente; e no topo da segunda camada de fresado estabilizado com espuma de asfalto, no centro da faixa, antes da aplicação do revestimento asfáltico tipo *gap graded*.

Na Figura 33, apresentam-se algumas imagens da superfície do trecho experimental após 1 ano de sua construção, na qual não foi notada nenhuma manifestação patológica à simples vista.



FIGURA 33. TRECHO EXPERIMENTAL APÓS 1 ANO DA SUA CONSTRUÇÃO.

Para a execução de ensaios laboratoriais e confirmação dos parâmetros mecânicos após este tempo de cura em pista, foi realizada a extração de corpos de prova do fresado, estabilizado com espuma de asfalto. Além disso, foram realizadas as seguintes avaliações:

- Levantamento da irregularidade longitudinal;
- Levantamento da macrotextura;
- Levantamento do afundamento em trilha de roda;
- Levantamento deflectométrico com viga Benkelman;
- Levantamento deflectométrico com FWD - Falling Weigth Deflectometer.

6.44. Dosagem de Misturas Asfálticas com Energias Distintas no Compactador Giratório Superpave

A metodologia de dosagem Superpave, implementada em conjunto com a adequada seleção dos materiais, auxilia na definição dos materiais mais duráveis, pois considera-se que o emprego da dosagem Superpave pode otimizar a técnica de seleção dos materiais utilizados nas atividades de conservação e manutenção do pavimento. Nesse sentido, é possível induzir que as atividades de manutenção podem ser menos frequentes, mantendo os parâmetros de qualidade, reduzindo a necessidade de intervenção na rodovia e diminuindo o risco de acidentes para os usuários. Os benefícios obtidos desse aperfeiçoamento poderão impactar diretamente no usuário, que transitará em revestimentos asfálticos cada vez mais resistentes à deformação permanente e com menos irregularidades.

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o emprego de energias distintas na dosagem de misturas asfálticas, no compactador giratório Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), seguindo as recomendações dessa metodologia. Nesse sentido, optou-se por avaliar as energias de 50, 75 e 100 giros, na dosagem de 32 misturas asfálticas.

Compactador Giratório Superpave (CGS)

Uma das principais preocupações do SHRP foi desenvolver um método de compactação em laboratório que pudesse produzir corpos de prova com densidades similares às obtidas em campo em pavimentos na escala real e sob condições de carregamento do tráfego. O SHRP identificou dois objetivos principais no desenvolvimento do equipamento de compactação:

- capacidade para medir a compactabilidade da mistura, com o propósito de identificar misturas mais susceptíveis à deformação permanente;
- portabilidade adequada do equipamento para poder ser empregado nas atividades de controle de qualidade.

Dosagem Superpave - Procedimento geral:

- Seleção dos materiais;
- Projeto da Estrutura dos Agregados;
- Seleção do teor de asfalto de projeto;
- Avaliação da susceptibilidade à umidade;
- Preparação das misturas experimentais de agregados;
- Determinação do teor de asfalto inicial para cada mistura de agregados;
- Compactação dos agregados para cada mistura experimental de agregados;
- Avaliação das misturas asfálticas compactadas;
- Seleção do teor de ligante asfáltico de projeto;
- Avaliação da sensibilidade à umidade;
- Ajuste da mistura para atender as propriedades volumétricas.

Dosagem das Misturas Asfálticas

Foram desenvolvidas as dosagens das misturas asfálticas com diferentes ligantes, faixas granulométricas, fontes de agregados e diversas energias de compactação, que originaram 96 experimentos no planejamento fatorial:

- Dosagens com o ligante asfáltico CAP 30-45;
- Dosagens com o ligante asfáltico modificado por polímero RET;

- Dosagens com o ligante asfáltico modificado por polímero SBS;
- Dosagens com o ligante asfáltico modificado por borracha moída de pneus.

A ferramenta estatística de ANOVA (Análise de Variância) foi utilizada para entender as tendências e comportamento em função dos fatores avaliados neste estudo.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dosagem das misturas asfálticas é uma das atividades que requer mais atenção na construção e manutenção de pavimentos asfálticos. Tradicionalmente, é empregada a dosagem Marshall, desenvolvida na primeira metade do século XX, nos Estados Unidos, e disseminada no mundo inteiro. No entanto, no final do século XX, os engenheiros de diversas agências rodoviárias norte-americanas observaram as limitações desta metodologia para prever com maior precisão o comportamento das misturas asfálticas durante a fase construtiva e em serviço durante a vida útil. Assim, foi desenvolvida uma nova metodologia conhecida atualmente como Superpave.

Neste estudo, foi utilizada a metodologia Superpave na dosagem de misturas asfálticas tradicionalmente empregadas nas atividades de manutenção de pavimentos asfálticos na Rodovia Presidente Dutra e também na implementação de novas faixas adicionais e marginais.

A dosagem Superpave recomenda diversos níveis de energia de compactação em função do nível do tráfego previsto para o pavimento. Assim, o objetivo deste estudo foi analisar o efeito da energia de compactação em diversas misturas asfálticas, com combinações variadas de granulometria, fontes de agregados e ligantes asfálticos.

Após a conclusão das dosagens deste estudo e análise dos resultados, foram observadas as seguintes tendências, conforme a energia de compactação é incrementada na dosagem das misturas asfálticas:

- incremento da massa específica aparente e, portanto, redução de vazios;
- redução do teor de ligante asfáltico de projeto;
- diminuição do volume de vazios de agregados mineral;
- pouca variação do volume de vazios cheios de asfalto;
- aumento da relação fíler asfalto;
- pouca influência no dano por umidade induzida (DUI), considerando que todas as misturas asfálticas empregaram 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1;
- incremento da resistência à tração (RT);
- incremento do módulo de resiliência (MR).

Com relação ao tipo de agregado utilizado, observou-se, de forma geral, que os agregados basálticos demandam maiores teores de ligante asfáltico para atender aos parâmetros de projeto, quando comparados com os agregados graníticos.

Foi constatado que o emprego do ligante asfáltico modificado por borracha moída de pneus demanda maiores teores de CAP para atender aos parâmetros volumétricos de dosagem, quando comparado com os demais ligantes asfálticos. Já os teores de projeto obtidos para o CAP 30-45 e para os ligantes asfálticos modificados por polímeros foi muito próximo entre si.

Com relação às faixas granulométricas selecionadas, foi verificado, na dosagem Superpave, que o emprego de agregados com maior tamanho máximo nominal produz misturas asfálticas com menores teores de ligante asfáltico e, portanto, misturas asfálticas mais finas demandam maiores teores de CAP para atender aos parâmetros volumétricos de dosagem.

Os resultados obtidos nas dosagens das 96 misturas asfálticas constituem um banco de dados para a Rodovia Presidente Dutra. Estes dados constituem, portanto, uma ferramenta para os engenheiros rodoviários otimizar a seleção de materiais e para adequar as dosagens, de acordo com os trechos homogêneos de tráfego da rodovia.

6.45. Avaliação da Aderência entre Camadas Asfálticas

A aderência entre as distintas camadas asfálticas de um pavimento é fundamental para seu bom comportamento. A pintura de ligação das camadas asfálticas é um fator que influencia diretamente no desempenho e durabilidade dos pavimentos. A falta de aderência entre as camadas asfálticas aumenta as tensões e deformações na fibra inferior da camada asfáltica mais superficial do revestimento, podendo originar defeitos como deslizamentos, corrugação, fissuras e deformação permanente no revestimento aplicado. Esse comportamento diminui a vida de serviço das estruturas dimensionadas e causa manifestações patológicas estruturais, que podem colocar em risco a segurança dos usuários de uma rodovia. Nas atividades de manutenção, uma baixa aderência pode levar a escorregamentos de novos revestimentos asfálticos.

OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a aderência entre camadas asfálticas, por meio do estudo de diversas emulsões asfálticas, com e sem a modificação de polímeros, mediante o emprego de ensaios laboratoriais.

Para atender ao objetivo geral deste estudo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- desenvolvimento de uma revisão bibliográficas obre a aderência entre camadas asfálticas, por meio de consultas às normativas vigentes e estudos nacionais e internacionais;
- execução de um programa laboratorial para avaliar características das emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional;

- execução de um programa laboratorial para avaliar o parâmetro de aderência entre camadas asfálticas com distintos ligantes asfálticos e para misturas asfálticas de diferente granulometria e em distinto estado de conservação;
- desenvolvimento de uma análise estatística dos resultados obtidos para avaliar os resultados do programa laboratorial.

MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Para a elaboração deste estudo, foram selecionadas cinco emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional para a aplicação em pintura de ligação, sendo que uma emulsão asfáltica é convencional do tipo RR-2C e as outras quatro são do tipo RR-2C-E, modificadas por polímeros.

As emulsões asfálticas foram submetidas aos ensaios convencionais. Os ensaios reológicos foram realizados no resíduo da emulsão asfáltica obtida por meio de dois procedimentos. O primeiro foi por meio da tradicional determinação do resíduo seco em estufa pela NBR 14896, na temperatura de 110°C. O segundo procedimento seguiu as recomendações da FHWA (2015), para obter o resíduo seco em estufa ventilada na temperatura de 60°C.

Para avaliação da aderência entre as camadas asfálticas, foram realizados os ensaios de cisalhamento *Leutner*, de acordo com o procedimento suíço da "*Swiss Federal Laboratories for MaterialsTesting and Research*", referenciado como *Swiss Standard SN 671 961*. Foi elaborada uma série de combinações de misturas asfálticas características das obras realizadas na Rodovia Presidente Dutra.

Para avaliação da aderência, os CPs para o cisalhamento direto são compostos de uma camada asfáltica inferior e de uma camada asfáltica superior. Finalizada a preparação dos CPs, estes foram submetidos ao ensaio de cisalhamento direto, com a aplicação de um carregamento monotônico constante na velocidade de 50 mm/min.

RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

De forma geral, pode-se observar que as combinações que têm o substrato produzido em laboratório apresentam menores valores de força de ruptura, portanto, menor aderência com o revestimento asfáltico aplicado. Os maiores valores são notados para as combinações que utilizaram o pavimento fresado no substrato, seguido pelo substrato de pavimento oxidado, da Rodovia Presidente Dutra.

Com relação ao tipo de revestimento asfáltico aplicado, observa-se que o emprego de revestimentos asfálticos do tipo *gap graded* conduz a menores valores de força de ruptura no cisalhamento, com exceção das combinações que têm por substrato a Faixa III DERSA. Vale notar que a norma Suíça utilizada neste estudo, como referência de ensaio, recomenda um valor mínimo de força de ruptura no cisalhamento de 15.000 N. Assim, observa-se que, neste estudo, todas as combinações quase que dobraram essa especificação. No entanto, a especificação refere-se a corpos de prova extraídos integralmente de pavimentos asfálticos nos quais foi executada a pintura de ligação e a posterior aplicação de um revestimento asfáltico.

CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

A aderência entre as camadas asfálticas é um parâmetro ainda pouco considerado em nível de projeto de pavimentos rodoviários. De forma geral, as normas nacionais recomendam utilizar emulsões asfálticas de cura rápida com taxas residuais em torno de 0,3 a 0,4 l/m^2. Em alguns

casos, recomenda-se utilizar a emulsão asfáltica modificada por polímeros.

Os ensaios realizados nas emulsões asfálticas neste estudo indicam que é possível realizar a caracterização reológica no resíduo obtido, tanto na temperatura de 110°C, como na temperatura de 60°C, em estufa ventilada. Os ensaios reológicos permitiram diferenciar adequadamente a emulsão asfáltica convencional das modificadas por polímero. No entanto, não foram observadas correlações com os resultados obtidos no ensaio de ruptura por cisalhamento.

Com relação ao ensaio de cisalhamento direto na configuração Leutner, observou-se simplicidade para sua execução, já que uma prensa usualmente utilizada no Marshall convencional é suficiente para possibilitar a execução desse ensaio. No entanto, a dificuldade principal seria obter os CPs na configuração do ensaio em laboratório, pois a norma suíça utilizada como referência, considera apenas CPs de 150 mm de diâmetro. Para CPs extraídos de pista, seria suficiente substituir a coroa da extratora para obter esse diâmetro.

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto indicam que:

- Há pouca influência do tipo de emulsão asfáltica na força de ruptura cisalhante, no caso em que o substrato e o revestimento são constituídos por misturas asfálticas novas;
- O emprego de misturas asfálticas do tipo *gap graded* tende a apresentar menores valores de força de ruptura cisalhante, possivelmente pela menor área de contato que essa mistura asfáltica de granulometria descontínua apresenta;
- O emprego de pintura de ligação parece ser mais importante nos casos em que o substrato é constituído por um pavimento oxidado;
- Para substratos com superfície fresada, não houve um comportamento muito bem definido, quanto ao emprego da pintura de ligação.

Na análise estatística foi comprovado que, tanto as condições do substrato e a granulometria do revestimento, como o tipo de emulsão asfáltica utilizada como pintura de ligação, são significativas na força de ruptura por cisalhamento direto, e, portanto, influenciam na aderência entre as camadas asfálticas. A principal conclusão dessa análise estatística indica que o emprego de alguma pintura de ligação incrementa a resistência ao cisalhamento, quando comparada com as condições em que não foi utilizado nenhuma emulsão asfáltica.

6.46. Avaliação do Emprego de Polímeros do tipo RET em Misturas Asfálticas

O tráfego crescente nas rodovias brasileiras e o incremento da tolerância de peso por eixo nos caminhões têm acelerado o processo de degradação dos pavimentos asfálticos. A evolução dos materiais rodoviários e o emprego de novos produtos mais sofisticados são uma alternativa interessante para aplicar em pavimentos extremamente solicitados, para, assim, resistir melhor a essas solicitações impostas pelo tráfego. No Brasil, é recente o uso de polímeros do tipo RET, que em português significa Terpolímero Elastomérico Reativo, produzido especificamente para a modificação de ligantes asfálticos. Atualmente, existem no mercado nacional dois tipos de polímeros do tipo RET disponíveis para a modificação de ligantes asfálticos.

OBJETIVOS

O objetivo principal foi desenvolver um programa laboratorial para avaliar as principais propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados por polímeros do tipo RET (Terpolímero Elastomérico Reativo) e as características mecânicas de misturas asfálticas que fazem uso deste tipo de asfalto.

Os parâmetros investigados foram:

- resistência à tração (RT);
- dano por umidade Induzida (DUI);
- módulo de resiliência (MR);
- módulo dinâmico (MD);
- *flow number* (FN);
- fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos.

MATERIAIS

Para desenvolvimento desse estudo, foram selecionados ligantes asfálticos disponíveis no mercado nacional: dois modificados por polímeros do tipo RET (Terpolímero Elastomérico Reativo), um ligante asfáltico modificado por SBS (estireno-butadieno-estireno) e dois ligantes asfálticos convencionais denominados CAP 30-45 e CAP 50-70.

Pode-se verificar que os ligantes asfálticos modificados por polímero tipo RET e por SBS, apresentam elevados valores de PA, em torno de 70°C, seguidos pelo CAP 30-45 com 53°C e pelo CAP 50-70 com 49°C. Os resultados de viscosidade Brookfield na temperatura de 135°C mostram que os ligantes asfálticos modificados pelo polímero tipo RET apresentam viscosidades em torno de 2.000 cP, enquanto o CAP com SBS apresentou valores em torno de 1.600 cP. Já os ligantes asfálticos CAP 30-45 e CAP 50-70 apresentaram menores valores de viscosidade, conforme era esperado em função das especificações desses materiais.

Os três ligantes asfálticos modificados por polímeros apresentaram valores muito similares próximos ao limite de 70% de recuperação elástica. Esses ligantes também foram submetidos ao ensaio de estabilidade à estocagem. Pode-se verificar que os três ligantes modificados por polímero apresentaram valores muito inferiores ao limite (inferior a 5ºC) estabelecido pela norma DNER-ME 384/99.

Os ligantes asfálticos selecionados foram submetidos a diferentes ensaios reológicos para determinação das suas propriedades e para determinação do grau de desempenho ou *performance grade* (PG). O grau de desempenho e grau de desempenho verdadeiro dos ligantes asfálticos modificados por RET-1 e RET-2 são PG 70 e PG 64, respectivamente, enquanto o CAP SBS alcançou um grau de desempenho superior, de PG 76.

Os ligantes asfálticos convencionais CAP 30-45 e CAP 50-70 foram classificados como PG 70 e PG 64, respectivamente.

MISTURAS ASFÁLTICAS

Após a caracterização dos ligantes asfálticos, foi realizada a dosagem das misturas asfálticas compostas pelos cinco ligantes asfálticos e quatro faixas granulométricas distintas. Na dosagem das misturas asfálticas, foi utilizado o compactador Marshall, com energia de 75 golpes por face.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em relação à caracterização convencional e reológica dos ligantes asfálticos modificados por polímeros, observou-se, tanto nos ensaios empíricos, como nos ensaios da metodologia Superpave, que estes materiais apresentam características superiores aos ligantes asfálticos convencionais CAP 30-45 e CAP 50-70, utilizados neste estudo para fins comparativos. As principais observações realizadas nos AMPs nesses ensaios concordam com os relatos encontrados na bibliografia, são as seguintes:

- maior ponto de amolecimento no ensaio de anel e bola;
- maior viscosidade em elevadas temperaturas;
- maior retorno elástico no ensaio de recuperação elástica torsional;
- módulo de rigidez (G*) superior em temperaturas elevadas;
- ângulo de fase (δ) inferior aos ligantes asfálticos convencionais;
- menores valores no parâmetro Jnr, obtido no ensaio de MSCR;
- valores elevados de recuperação elástica no ensaio de MSCR.

Quanto aos resultados das dosagens das misturas asfálticas, observou-se que o tipo de ligante asfáltico, seja AMP ou seja asfalto convencional, não tem influência significativa na definição do teor de ligante asfáltico de projeto. Esse parâmetro é mais influenciado pela granulometria selecionada para a mistura asfáltica. Já nos ensaios mecânicos e de desempenho realizados nas misturas asfálticas com granulometria distinta, observaram-se os seguintes comportamentos:

- o dano por umidade induzida foi satisfatório para todas as misturas asfálticas, independente da faixa granulométrica ou do tipo de ligante asfáltico;
- os valores de resistência à tração oscilaram de 1,5MPa até 2,5MPa, sendo que os menores valores foram observados nas misturas asfálticas que utilizaram o CAP 50-70 e a granulometria tipo binder EGL 19 mm;
- o módulo de resiliência foi muito parecido para as misturas asfálticas com os ligantes asfálticos modificados por polímeros e com os ligantes asfálticos convencionais;
- as misturas asfálticas com ligante asfáltico modificado por polímeros apresentaram melhor resistência à fadiga e à deformação permanente;
- o ensaio de *flow number* mostrou que o ligante asfáltico modificado por SBS apresenta valores muito superiores, quando comparado com os demais asfaltos avaliados neste estudo;
- no ensaio de fadiga observou-se também que as misturas asfálticas produzidas com ligante asfáltico modificado por polímero SBS apresentam maior resistência ao trincamento por fadiga, seguidas das misturas com RET-1 e RET-2, e finalmente pelo CAP 50-70 e pelo CAP 30-45.

Considerações Finais

O emprego de polímeros na modificação dos ligantes asfálticos têm sido uma alternativa viável para incrementar a qualidade e desempenho das misturas asfálticas nos pavimentos rodoviários. De forma geral, os ensaios convencionais e reológicos indicam que os ligantes asfálticos modificados por RET-1, RET-2 e por SBS apresentam melhores características quando comparados com os ligantes asfálticos convencionais 30-45 e 50-70. Na avaliação de parâmetros mecânicos e de desempenho das misturas asfálticas produzidas com estes ligantes asfálticos, observa-se que existe um comportamento superior daquelas misturas asfálticas produzidas com os ligantes asfálticos modificados por polímeros, principalmente no que diz respeito aos ensaios que estimam a resistência à fadiga e à deformação permanente.

6.47. Emprego de Perfis de Fibras de Carbono na Recuperação de Placas de Concreto Fissuradas

Esta pesquisa apresenta os resultados obtidos para um trecho experimental, com emprego de perfis de fibras de carbono na recuperação de placas de concreto fissuradas. Para avaliar o desempenho da técnica empregada, foram efetuados levantamentos deflectométricos antes e depois das intervenções.

Materiais e Técnica

Os materiais empregados consistem em laminados de fibra de carbono S&P 150/2000 e resina S&P 55. O sistema de reforço consiste na execução de ranhuras perpendiculares à fissura existente, preenchidas com resina epóxica e colocação dos perfis de fibra de carbono. Esta intervenção tem como objetivo recuperar a estrutura da placa de concreto, aumentando sua vida útil, e impedir a progressão das fissuras existentes e o aparecimento de novas fissuras.

Para a aplicação do sistema de reforço, foram seguidas as etapas descriminadas a seguir.

- **Preparação da superfície:** demarcação das linhas onde serão executadas as ranhuras;
- **Corte das ranhuras:** o corte deverá ser realizado com serra policorte com disco diamantado a seco com espessura e profundidade adequadas às dimensões do perfil de fibra de carbono a ser implantado;
- **Limpeza da ranhura:** parte fundamental para o sucesso da técnica, as ranhuras devem ser devidamente limpas com auxílio de soprador de ar;

- **Verificação da profundidade das ranhuras:** após a limpeza, procede-se a checagem da profundidade da ranhura, confirmando a profundidade mínima para aplicação do perfil;
- **Limpeza dos perfis:** para garantia da aderência dos perfis de fibras de carbono, estes devem ser limpos com álcool, eliminando sujeiras e gorduras;
- **Aplicação da resina e inserção dos perfis:** aplica-se diretamente na ranhura a resina epóxica e na sequência é inserido o perfil (Figura 34);



FIGURA 34. RESINA APLICADA NA RANHURA.

- **Acabamento e liberação ao uso:** após a inserção dos perfis, as fissuras devem ser novamente preenchidas com a mesma resina empregada para a colagem dos perfis e é realizado o desempeno da resina em toda a superfície. Após a cura da resina – cerca de 6 a 8 horas após a aplicação –, o pavimento pode ser liberado ao tráfego de veículos.

EXECUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL

A Rodovia Presidente Dutra (BR-116), possui 2 km de pavimento rígido na Pista Marginal, em Guarulhos (SP), do km 218,900 ao km 216,700, sentido São Paulo/Rio de Janeiro, próximo ao Aeroporto Internacional de Guarulhos – local crítico, com dificuldades de interdição de longo prazo. A definição do trecho experimental se deu após a identificação dos defeitos existentes no pavimento rígido, limitadas às fissuras transversais e longitudinais, com ausência de movimentação vertical sob ação do tráfego (placa bailarina).

Durante o mês de junho de 2019, foi executado o levantamento visual de defeitos existentes nas placas de concreto constituintes da pista marginal. A partir disso, como trecho experimental, definiram-se 7 placas a serem restauradas com a aplicação de perfis de fibras de carbono. Para cada placa, elaborou-se o mapeamento das fissuras existentes e programou-se a quantidade e dimensão das ranhuras a serem executadas.

As obras de recuperação das placas foram executadas entre os meses de julho e agosto de 2019. Todos os serviços foram realizados durante o período noturno, devido às restrições operacionais da rodovia, conforme plano de ocupação da concessionária em conjunto com Polícia Rodoviária Federal.

MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO

Para avaliar o desempenho da técnica, foram realizadas campanhas de levantamentos antes (junho/2019) e depois das obras (outubro/2019 e janeiro/2020). Para tal fim, foram utilizados os equipamentos FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e CAM (*Crack Activity Meter*). O FWD é um equipamento utilizado para simular a deflexão do pavimento causada por um veículo em movimento. Já o CAM é um equipamento que permite medir os movimentos diferenciais entre as paredes da trinca originada pela passagem de uma carga de roda através de dois medidores de

deslocamento resistivo do tipo LVDT's (*Linear Variable Differential Transformers*). Os levantamentos foram realizados nas juntas transversais de entrada e saída das placas (sentido do tráfego) e perpendicularmente às trincas/fissuras identificadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados decorrentes da aplicação da técnica de inserção de fibras de carbono nas fissuras das placas de concreto, podem ser estabelecidas as seguintes considerações:

- A execução de tal técnica confirmou-se operacionalmente vantajosa, permitindo a liberação ao tráfego poucas horas após a conclusão dos serviços;
- Verificou-se que para as placas, cujas patologias justificavam a reconstrução parcial ou total, a técnica apresentada mostrou-se eficiente, resultando num ganho expressivo de LTE e numa diminuição das deflexões;
- A selagem das trincas evita a deterioração do apoio das placas, posto que a infiltração de água é minimizada, e consequentemente o processo de bombeamento de finos é mitigado;
- Em tese, o processo de selagem das fissuras ocasionará um ganho no índice de condição do pavimento;
- A partir dos ganhos observados, há expectativas de que, com a adoção da técnica apresentada, a durabilidade das placas se estenda, postergando assim a necessidade de reconstrução parcial ou total da placa;
- Ressalta-se que as placas permanecerão sob monitoramento para melhor avaliação da técnica e desempenho ao longo do tempo.

6.48. Vídeo Registro dos Ensaios Realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias.

O Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra iniciou as primeiras pesquisas no ano 1999, com o objetivo de intensificar o processo de melhoria contínua das condições de segurança, conforto, economia e durabilidade. Desde seu primeiro ano, desenvolvem-se pesquisas que beneficiam todas as rodovias brasileiras, empregando os Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), disponibilizados pela ANTT.

No ano 2011, inaugurou-se um novo prédio para poder melhorar a instalação de equipamentos laboratoriais modernos, empregados no mundo inteiro para avaliação de materiais rodoviários, como mostra a Figura 35.



FIGURA 35. PRÉDIO DO CENTRO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS DA CCR NOVADUTRA

Com a aquisição desses novos equipamentos, novos ensaios foram incorporados às atividades de pesquisa e apoio ao controle tecnológico desenvolvidos pela Concessionária NovaDutra. Na atualidade, são 122 ensaios realizados em materiais rodoviários relacionados a solos, agregados, misturas asfálticas, entre outros.

Todos os ensaios executados no CPR seguem normativas nacionais, e, no caso da inexistência destas no âmbito nacional, recorre-se às normas norte-americanas, europeias, sul-africanas ou australianas, muitas vezes não comuns para agências rodoviárias nacionais.

OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa foi realizar um vídeo registro dos 122 ensaios desenvolvidos sobre materiais rodoviários no CPR na atualidade, com o propósito de divulgar estes ensaios no formato de vídeo-aulas e criar um banco de dados acessível ao público geral, mas, em específico, aos profissionais e técnicos dedicados à pesquisa e ao controle tecnológico no Brasil. O material gerado pode ser visualizado por meio da página web da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), disponível no *link: http://antt.gov.br/rodovias/Relatorios_de_Pesquisa__RDT.html*.

Para poder atender ao objetivo geral deste estudo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma organização geral dos ensaios, de acordo com o tipo de material analisado, materiais asfálticos, solos, materiais estabilizados e concreto;
- Desenvolver *scripts* ou roteiros para as diversas etapas que constituem a execução de cada um dos ensaios, para facilitar o entendimento por meio de vídeo-aulas;
- Realizar a filmagem dos *scripts* ou roteiros dos ensaios;
- Validar e editar as filmagens finais.

PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Todos os ensaios desenvolvidos pelo CPR foram organizados de acordo com o tipo de material analisado. Dessa forma, os vídeos poderão ser mais

facilmente consultados na edição final e disponibilizados no site da ANTT, se assim for definido.

Nesta etapa, foi fundamental a participação dos colaboradores do CPR, já que eles foram os responsáveis em preparar de forma antecipada os equipamentos laboratoriais e os materiais necessários para a execução de cada um dos ensaios, além de criarem ambientes necessários no CPR.

Uma empresa terceirizada realizou a filmagem destes procedimentos laboratoriais, que foram executados pelos colaboradores do CPR, demandando horas das suas atividades para elaboração dos procedimentos frente às câmeras da empresa terceirizada.

Filmagem dos ensaios

Nesta etapa, foram filmados, por uma empresa terceirizada, os 122 tipos de ensaios atualmente executados no CPR, organizados conforme a listagem apresentada na Tabela 6.

Tabela 6. Número de ensaios de cada tipo de mateial.

Material	Número de Ensaios
Agregados	23
Ligante asfáltico	16
Emulsões asfálticas	11
Cal	2
Concreto asfáltico	19
Solos	16
Concreto de cimento Portland	10
Brita graduada tratada com cimento	8
Solo cimento	6
Solo cal	4
Fresado asfáltico	7
TOTAL	**122**

Validação das filmagens

Nesta etapa, foi realizada a validação e edição final das filmagens realizadas nos ensaios, isto é, após filmagem e edição de todos os ensaios pela empresa terceirizada, este trabalho foi revisado novamente em conjunto com a experiente equipe do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.

6.49 Livro: Pesquisas desenvolvidas durante 20 anos do Centro de Pesquisas Rodoviárias

O objetivo desta pesquisa é resumir em uma única publicação, todas as pesquisas desenvolvidas no Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra com Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), durante mais de 20 anos.

CAPÍTULO 7

O Futuro

Chegamos ao final dos 25 anos!

A palavra que mais se conecta com este momento é Inovação. Porém inovação para nós nunca foi um destino, nunca foi um lugar de chegada e pronto, problema resolvido! Inovação bem como educação e desenvolvimento é um processo contínuo que para a CCR NovaDutra começou em 1996 e nunca parou.

Inovamos não porque necessariamente escolhemos este caminho, mas porque precisamos! Mudar o negócio, transformar processos, pensar em alternativas mais sustentáveis. Tudo isto foi necessário para dar conta do recado.

A CCR NovaDutra teve o privilégio de administrar o primeiro contrato de concessão da principal rodovia do país e nós colaboradores tivemos o privilégio de cuidar e transformar a Rodovia Presidente Dutra em uma rodovia segura e confortável para os milhares de usuários que nela trafegam diariamente.

Em breve um novo contrato de concessão nascerá e trará novos desafios e se tratando de uma rodovia, os desafios operacionais e financeiros são os primeiros que veem em nossa mente. Mas existe um desafio ainda maior, o de capacitar profissionais para contribuirem com o desenvolvimento da infraestrutura do nosso país.

As experiências do CPR registradas nas pesquisas disponíveis no site da ANTT, trazem uma pequena contribuição ao meio rodoviário. Deixo aqui um convite aos colegas que registrem e compartilhem suas experiências (algo sempre gratificante) impulsionando o desenvolvimento de futuros líderes para promoverem a transformação tão necessária nas rodovias brasileiras.

Valéria Cristina De Faria