

PLANO DE TRABALHO

Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT

Capítulo XX do Edital 01, Lote 06, item 10 do PER

Rodovia BR 116 – Trecho São Paulo - Curitiba

PROJETO 01 - SGP/ARB_01 REV.02

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE RECICLAGEM A FRIO DE CAPA

COM EMULSÃO POLIMERIZADA



Autopista Régis Bittencourt

Grupo OHL

RELATÓRIO FINAL

ABRIL 2011



Ministério dos Transportes

Agência Nacional de Transportes Terrestres

SUMÁRIO

1	CONCESSIONÁRIA.....	3
2	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	3
2.1	OBJETIVO GERAL.....	3
3	JUSTIFICATIVA	3
3.1	DESENVOLVIMENTO DOS PROJETOS	4
3.2	ETAPAS.....	4
4	CARACTERÍSTICAS E LOCALIZAÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL.	5
5	ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA	6
6	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	7
6.1	PRIMEIRA ETAPA (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO II – MARÇO/2009)	7
6.2	SEGUNDA ETAPA (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO III – JUNHO/2009)	7
6.3	TERCEIRA ETAPA (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO IV – SETEMBRO/2009).....	7
6.4	QUARTA ETAPA (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO V – DEZEMBRO/2009).....	8
6.5	QUINTA ETAPA (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO VI – MARÇO/2010).....	8
6.6	SEXTA ETAPA (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO VII – JUNHO/2010)	8
6.7	SETIMA ETAPA (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO VIII – SETEMBRO/2010).....	9
6.8	OITAVA ETAPA (RELATÓRIO FINAL – ABRIL/2011)	9
6.8.1	APRESENTAÇÃO DO RELATÓRIO FINAL	9
6.8.2	CARACTERÍSTICAS DO TRECHO EXPERIMENTAL	10
6.8.3	AVALIAÇÃO LABORATORIAL	13
6.8.4	MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO	22
6.8.5	MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES ESTRUTURAIS DO PAVIMENTO.....	26
6.8.6	ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO	31
6.8.7	CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	36
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 CONCESSIONÁRIA

AUTOPISTA RÉGIS BITENCOURT

2 DESCRIÇÃO DO PROJETO

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE RECICLAGEM A FRIO DE CAPA COM EMULSÃO POLIMERIZADA

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem por objetivo central estudar a aplicabilidade da técnica de reciclagem de revestimentos a frio, com emulsão modificada por polímero, para a reabilitação dos pavimentos asfálticos deteriorados na Rodovia Régis Bittencourt. Para tanto, foi construído um trecho experimental dividido em dez segmentos nesta Rodovia empregando-se a técnica da reciclagem do revestimento e execução de nova capa sobre a camada reciclada, submetendo alguns segmentos à simulação de tráfego acelerada por meio de equipamento HVS, para a compreensão do desempenho e previsão de durabilidade desta técnica. Paralelamente, diversos testes laboratoriais foram realizados para melhor compreender as propriedades deste novo material e suas variabilidades.

3 JUSTIFICATIVA

Novas técnicas de reabilitação de pavimentos precisam ser testadas para obter uma gama de novas ações que podem ser feitas para resolver os problemas de restauração dos pavimentos. Dentre as técnicas hoje disponíveis no Brasil, a reciclagem a frio representa uma solução com importante apelo ambiental, devido ao reaproveitamento do material que deteriorado existente e que se encontra no fim de sua vida útil. Além de reduzir o descarte de material, o processo de reciclagem reincorpora valor a estes materiais, que no estado atual, não demonstram capacidade de uso, mas que ao sofrerem um beneficiamento, atuam substituindo agregados virgens.

Esta solução de reciclagem representa também uma redução do custo uma vez que o transporte de materiais, seja de bota-fora, como de novas explorações, é reduzido. Mesmo com acréscimos de materiais virgens à camada, estas porcentagens são pouco significativas no montante geral.

A solução mostra-se interessante do ponto de vista ambiental e economicamente viável, desta forma, este trabalho avalia a aplicação da técnica de reciclagem para restauração de pavimentos deteriorados, na Rodovia Régis Bittencourt, procurando compreender as propriedades da mistura reciclada.

Para atender os objetivos desta pesquisa, foram consideradas variações que estendessem os resultados para diferentes soluções. A avaliação contemplou variações de (i) espessura na camada reciclada: 8 cm, 11

cm e 15 cm, de (ii) fíler ativo adicionado à mistura reciclada: 1% de cal e 1% de cimento e (iii) do tipo da camada de revestimento: concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e microrrevestimento a frio. Com esta matriz experimental, objetiva-se definir a melhor combinação para a rodovia em questão, além de avaliar os impactos associados a cada variável.

3.1 DESENVOLVIMENTO DOS PROJETOS

Foi selecionado um trecho da Rodovia Régis Bittencourt, que mostra necessidade de recuperação total da camada de concreto asfáltico existente devido ao seu alto nível de trincamento. O trecho foi considerado representativo, em termos de condições funcionais e estruturais, em relação a grande parte da rodovia, permitindo após a pesquisa, que os resultados sejam extrapolados sem alterações consideráveis no projeto. O trecho da pesquisa foi subdividido em segmentos com extensão de 250 m cada.

Os projetos de mistura foram realizados no CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico OHL, em Atibaia, e os controles dos serviços de pista foram executados em um laboratório instalado próximo do local da pesquisa. Ensaio complementares foram realizados no CDT e no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP.

Os métodos de ensaios de laboratório para a dosagem do reciclado estão baseados no manual da ARRA – Association of Reclaiming and Recycling Asphalt. Algumas adaptações e ensaios complementares foram utilizados, por estarem disponíveis no Brasil.

3.2 ETAPAS

As etapas da pesquisa foram divididas em:

- Avaliação inicial para a escolha dos segmentos para a realização da pesquisa.
- Levantamentos detalhados dos locais para servir de referência.
- Execução dos projetos de mistura da reciclagem de capa, considerando se há ou não necessidade de se acrescentar material virgem (Definiu-se pela não adição de material virgem à mistura).
- Reciclagem da camada de revestimento deteriorada.
- Execução de camada de revestimento sobre o material reciclado.
- Levantamentos periódicos de condição de superfície e condição estrutural
- Instalação de veículo simulador de tráfego em segmento previamente escolhido.
- Análise de resultados

Considerou-se que, após dois períodos de chuva, aproximadamente dois anos, com a solicitação de tráfego elevada que se tem, pode-se fazer uma avaliação final de desempenho.

4 CARACTERÍSTICAS E LOCALIZAÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

O local selecionado para alocar a pesquisa foi o trecho da Rodovia BR 116, entre os km 435,500 e 433,000 - Pista Norte – SP e sua adoção baseou-se nas seguintes premissas:

- Trecho homogêneo, sem ter sofrido nenhum tipo de intervenção significativa ou recente;
- Extensão suficiente com características estruturais, funcionais e de tráfego, similares e em sequência.

Este trecho apresentava resultados de deflexão média de 60,0 (0,01 mm), com coeficiente de variação de 10% e deflexão característica de 66,0 (0,01) mm, medidos em março/08. Estes resultados indicam um trecho bastante homogêneo em toda a sua extensão.

O trecho foi dividido em 10 segmentos, representados de forma esquemática na Tabela 1 e na Tabela 2. Essa combinação foi gerada a partir de variações que foram objeto de estudo da pesquisa, comparando espessuras de reciclagem, adição de cimento ou cal como filer ativo na mistura reciclada, e ainda tipo e espessura da camada de revestimento (Microrrevestimento e CBUQ).

O trecho experimental avaliou de modo comparativo, a restauração por meio de fresagem e recomposição em 5 cm; este segmento representa um processo de restauração usual no país, e foi considerado trecho referência. Por questões operacionais, a faixa I, não recebeu variação no tipo de filer ativo, sendo utilizado apenas 1% de cimento em todos os segmentos, conforme se verifica na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição dos segmentos executados na Faixa I - BR-116/SP

	433+250	433+500	433+750	434+000	434+250	434+500	434+750	435+000	435+250	435+500
	MICRO REVESTIMENTO			MICRO REVESTIMENTO			CBUQ			CBUQ
Espessura da Camada Reciclada	8 cm	11 cm	15 cm	8 cm	11 cm	15 cm	15 cm	11 cm	8 cm	Fresagem 5 cm
										Trecho Referência
										250 m extensão
	Aditivo Cimento			Aditivo Cimento			Aditivo Cimento			

Tabela 2 – Distribuição dos segmentos executados na Faixa II - BR-116/SP

	433+250	433+500	433+750	434+000	434+250	434+500	434+750	435+000	435+250	435+500
	MICRO REVESTIMENTO			MICRO REVESTIMENTO			CBUQ			CBUQ
Espessura da Camada Reciclada	8 cm	11 cm	15 cm	8 cm	11 cm	15 cm	15 cm	11 cm	8 cm	Fresagem 5 cm
										Trecho Referência
										250 m extensão
	Aditivo Cal			Aditivo Cimento			Aditivo Cimento			

Os segmentos de 250 m, distribuídos sequencialmente na faixa II, são caracterizados a seguir; A faixa I, conforme mencionado, não segue exatamente a mesma variação, pois não houve alteração no tipo de fíler ativo, sendo utilizado apenas cimento Portland.

- 1 – Reciclagem a frio em 8 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% cal hidratada CH-I + camada de revestimento em microrrevestimento de 12 mm;
- 2 – Reciclagem a frio em 11 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% cal hidratada CH-I + camada de revestimento em microrrevestimento de 12 mm;
- 3 – Reciclagem a frio em 15 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% cal hidratada CH-I + camada de revestimento em microrrevestimento de 12 mm;
- 4 – Reciclagem a frio em 8 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% de cimento Portland + camada de revestimento em microrrevestimento de 12 mm;
- 5 – Reciclagem a frio em 11 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% de cimento Portland + camada de revestimento em microrrevestimento de 12 mm;
- 6 – Reciclagem a frio em 15 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% de cimento Portland + camada de revestimento em microrrevestimento de 12 mm;
- 7 – Reciclagem a frio em 15 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% de cimento Portland + camada de revestimento em CBUQ de 30 mm;
- 8 – Reciclagem a frio em 11 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% de cimento Portland + camada de revestimento em CBUQ de 30 mm;
- 9 – Reciclagem a frio em 8 cm de espessura, com emulsão polimerizada e 1% de cimento Portland + camada de revestimento em CBUQ de 30 mm;
- 10 – Trecho de referência com fresagem de 4 cm e recomposição com concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

5 ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

- **IDENTIFICAÇÃO DAS EMPRESAS PARTICIPANTES**

A empresa coordenadora é a PAULISTA INFRA-ESTRUTURA LTDA associada com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com as empresas DYNATEST Engenharia Ltda e JMCHAVES Consultoria Ltda.

- IDENTIFICAÇÃO DOS PARTICIPANTES
 - Coordenador Geral: José Mário Chaves – JMChaves.
 - Assessoramento Técnico:
 - o Liedi Légi Bariani Bernucci – USP
 - o Ernesto Simões Preussler – Dynatest
 - o André Vale - Dynatest
 - Coordenador Técnico: Amanda Helena Marcandali da Silva - USP.
 - Coordenador Laboratório da Paulista Infra-estrutura: Vagner Alba - CDT.

6 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

6.1 PRIMEIRA ETAPA (relatório de acompanhamento II – Março/2009)

Após a restauração por meio de reciclagem, foram executadas as camadas de revestimento (CBUQ e microrrevestimento). Os dados de monitoramento coletados nesta etapa foram comparados com os dados coletados antes da restauração. Observou-se no pavimento restaurado, uma redução na ordem de 20% nas medidas deflectométricas. As condições de superfície revelaram incremento expressivo nas condições de conforto ao rolamento.

6.2 SEGUNDA ETAPA (relatório de acompanhamento III – Junho/2009)

Nesta etapa se iniciaram os trabalhos em laboratório de caracterização dos agregados fresados. O fíler ativo incorporado foi considerado inerte, não havendo distinção entre misturas com cal o cimento; os demais estudos realizados em laboratório basearam-se nesta condição.

Foram definidos os procedimentos necessários para realização de ensaios acelerados com equipamento simulador de tráfego, tais como monitoramento das condições climáticas (temperatura e precipitação), monitoramento de evolução da macrotextura e da microtextura, de evolução do trincamento, de deflexões e afundamento na trilha de roda.

6.3 TERCEIRA ETAPA (relatório de acompanhamento IV – Setembro/2009)

Na terceira etapa da pesquisa, foram realizados levantamentos para identificação da condição de superfície do trecho, revelando que após seis meses do processo de restauração (reciclagem + camada de

revestimento) o pavimento apresenta boas condições de conforto ao rolamento, com pontos isolados de intervenção nos segmentos com cal. O trecho referência, com fresagem e recomposição em CBUQ mostrou reflexão do trincamento, evidenciando a necessidade de tratamento para a camada trincada.

6.4 QUARTA ETAPA (relatório de acompanhamento V – Dezembro/2009)

Na quarta etapa foram avaliados os resultados relativos à simulação de tráfego nos dois segmentos definidos na pesquisa: (i) reciclagem em 11 cm com cimento e camada de revestimento em CBUQ e, (ii) reciclagem em 11 cm com cimento e camada de revestimento em microrrevestimento.

Os dois segmentos foram monitorados em relação à temperatura e precipitação, contudo, os resultados foram afetados pela variação na saturação do subleito, não sendo possível identificar separadamente os efeitos de carga e clima. Observou-se que em futuros ensaios é necessário realizar medidas de deflexão na área simulada e na área anexa (fechada para o tráfego) que permitam identificar cada efeito.

6.5 QUINTA ETAPA (relatório de acompanhamento VI – Março/2010)

A quinta etapa apresenta os dados de monitoramento das condições de superfície e estruturais no trecho experimental após um ano da restauração. Os dados são utilizados como indicativo de desempenho por comparação com os dados de monitoramento obtidos imediatamente após os trabalhos de restauração (março/2009), completando um período seco e chuvoso. Os dados relativos ao tráfego atuante neste período serviram de parâmetro de deterioração na avaliação final da técnica de reciclagem.

6.6 SEXTA ETAPA (relatório de acompanhamento VII – Junho/2010)

O monitoramento das condições de superfície mostrou bom desempenho no trecho experimental, inclusive no que se refere à textura dos pavimentos. Contudo os segmentos reciclados com adição de cal apresentaram defeitos mais evidentes, coincidindo com o início do período chuvoso. Foram identificados problemas de drenagem nestes segmentos tendo intervenção nos drenos. Os segmentos foram excluídos da pesquisa por conta das intervenções, contudo o monitoramento foi continuado nestes segmentos até o fim da pesquisa.

6.7 SETIMA ETAPA (relatório de acompanhamento VIII – Setembro/2010)

Na sétima etapa são apresentados os dados relativos ao desenvolvimento laboratorial da reciclagem que procurou avaliar por meio de ensaios de comportamento mecânico, misturas recicladas com emulsão modificada por polímero (dosagem do trecho experimental) e misturas recicladas com emulsão convencional. As misturas que utilizaram emulsão polímero apresentaram resultados superiores em relação às misturas com emulsão convencional.

Observou-se em laboratório que o processo de dosagem não contempla a variabilidade dos agregados fresados, o que resulta em adaptações necessárias durante a aplicação em campo.

6.8 OITAVA ETAPA (relatório final – Abril/2011)

Os resultados relativos a esta etapa, apresentados no presente relatório são:

- Ensaios em laboratório sobre amostras moldadas em laboratório e amostras extraídas de pista;
- Monitoramento de deflexões por equipamento FWD;
- Monitoramento das condições de superfície;
- Estimativa de vida de fadiga;
- Conclusões finais e recomendações.

6.8.1 APRESENTAÇÃO DO RELATÓRIO FINAL

A Paulista Infraestrutura Ltda apresenta neste relatório a avaliação final da pesquisa com mistura reciclada aplicada no trecho experimental entre os quilômetros 435+000 e 432+500 - PISTA NORTE da Rodovia Régis Bittencourt. São apresentados os dados relativos às etapas do experimento, compilando a análise laboratorial, e o monitoramento de condições estruturais e de superfície. São apresentadas também as conclusões finais e recomendações da pesquisa. No mapa da malha viária, destaca-se a Rodovia Régis Bittencourt (Figura 1), via concessionada pela Autopista Régis Bittencourt, Grupo OHL, correspondendo ao trecho de São Paulo a Curitiba.

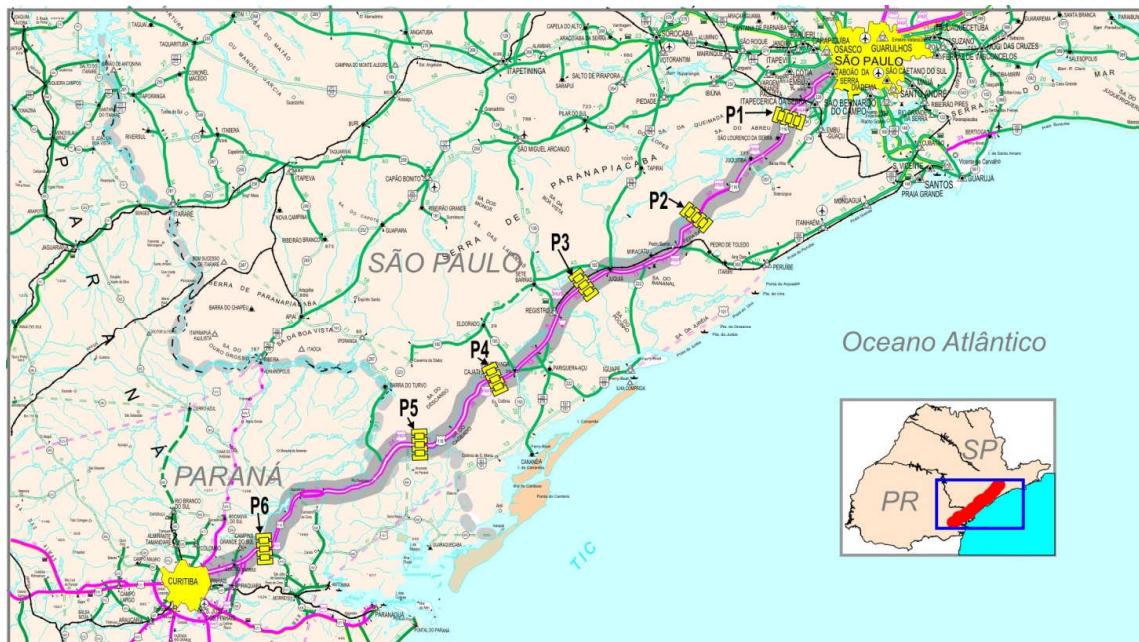


Figura 1 – Mapa da malha viária sob concessão da Autopista Régis Bittencourt - BR-116/SP

6.8.2 CARACTERÍSTICAS DO TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental integra a duplicação da Rodovia Régis Bittencourt, executado em 1998, então sob administração do extinto DNER (atual DNIT), portanto, denominada como a pista nova da Rodovia. O trecho definido como segmento homogêneo encontrava-se entre os Km 431+250 e Km 439+500, baseado na avaliação deflectométrica, em acordo com a normatização da DNER-273/1996-PRO. A estrutura original, conforme representada esquematicamente na Figura 2, é composta por camada de rolamento de concreto asfáltico, camada intermediária (binder), base de brita graduada simples e subleito.

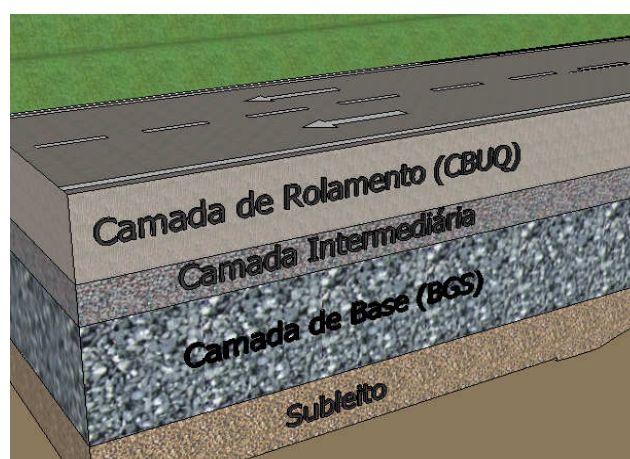


Figura 2 – Estrutura de pavimento existente no trecho experimental, antes da restauração

O trecho não sofreu intervenções significativas com finalidade de manutenção ou restauração antes de sua concessão ao Grupo OHL Brasil, em 2008. Os principais defeitos encontrados neste segmento eram trincamento classe FC3 com erosão de borda e deformação permanente em trilha de roda. Foram encontrados também, indicativos de drenagem deficiente, potencializando as dificuldades de dirigibilidade, afetando questões relativas à segurança do usuário e ao conforto ao rolamento.

A camada de revestimento demonstra trincamento excessivo (Figura 3a) e a mistura asfáltica existente não tinha problemas críticos de segregação. A investigação das condições do trecho experimental contemplou a abertura de valas que indicou a presença de trincamento por fadiga, restrito à camada de rolamento, sem comprometer camadas subjacentes.

A deformação permanente em trilha de roda é um problema que afeta grande parte dos pavimentos asfálticos, sendo mais intensa em regiões de temperatura elevada e tráfego de veículos pesados e lentos, condição operante desta rodovia, conforme se verifica (Figura 3b). Destaca-se o acúmulo de água na trilha de roda, agravando os problemas de drenagem. O trecho em rampa descendente, com inclinação de 2%, não indicava eficiência na condução de águas de chuvas, sendo necessários novos drenos incorporados ao projeto de restauração.

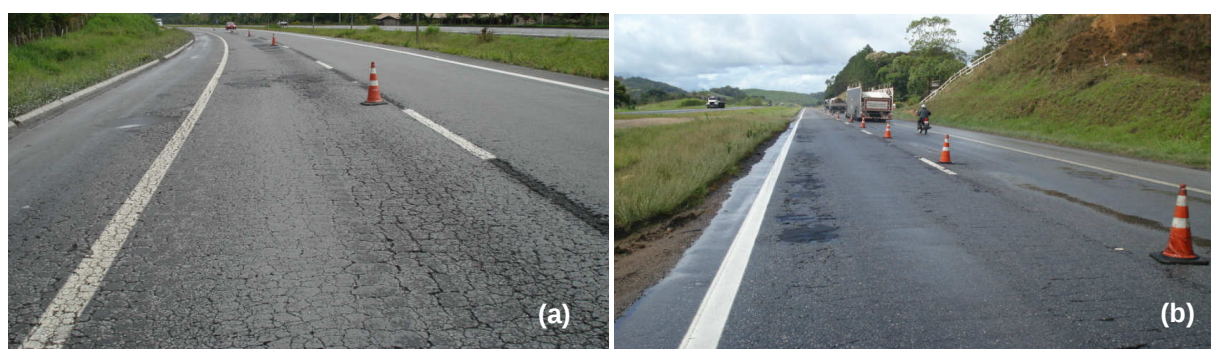


Figura 3 – Trincamento (a) e deformação permanente (b) existente no trecho experimental antes da restauração

Dados de composição e fluxo de tráfego foram utilizados para determinação do número de repetições de carga do eixo padrão N atuante para o período de um ano. Os veículos categorizados em acordo com a ANTT (Tabela 3) são contabilizados diariamente, nas praças de pedágio. Os dados utilizados nesta pesquisa referem-se ao pedágio da Cidade de Registro, no quilômetro 426+600, sendo distante do trecho experimental em apenas sete quilômetros, sem acessos que possam diferenciar substancialmente o tráfego atuante no trecho experimental e no pedágio.

Tabela 3 – Porcentagem das categorias de veículos utilizadas na definição do volume de tráfego

Porcentagem de Veículos Comerciais por Categoria

Categoria 2	2c	Caminhão leve, ônibus, caminhão-trator e furgão	10,81 (%)
Categoria 3	3c	Automóvel e caminhonete com semi-reboque	0,21 (%)
Categoria 4	3c	Caminhão, caminhão-trator, caminhão-trator com semi-reboque e ônibus	33,85 (%)
Categoria 5	2s2	Automóvel e caminhonete com reboque	0,02 (%)
Categoria 6	2s2	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	6,31 (%)
Categoria 7	2s3	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	27,47 (%)
Categoria 8	3s3	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	21,34 (%)
Eixos Adicionais	-	Cargas Especiais	-
			$\Sigma = 100\%$

A partir da definição do número de veículos em cada categoria, e ainda combinação de carregamento (sem considerar veículos com sobrecarga), definiu-se para o período entre março/2009 e março/2010, um número N anual atuante de $1,6 \times 10^7$, revelando tráfego elevado (Tabela 4) segundo cálculo com fatores de carga da USACE, método considerado nos projetos de dimensionamento.

Tabela 4 – Fatores considerados e cálculo do Número N

Número N atuante - período 03/2009 a 03/2010					
VDM,com,bid	dias/ano	Fcresc	FV	Fator Pista	Número N
10823	365	1,0005	8,093845	0,5	1,60E+07

Fator de crescimento	
taxa de crescimento =	0,10%
período de projeto =	1 anos
fator de crescimento para 1 ano =	1,0005

Os valores foram calculados sobre as seguintes premissas: 70% de veículos comerciais com carregamento máximo legal, 20% de veículos sem carga (vazio) e 10% dos veículos com excesso de carga, com base em contagens realizadas no ano de 2007, nos pontos definidos como futuras praças de pedágio.

Tabela 5 – Número N de projeto

ANO	N - AASHTO		N - USACE	
	No Ano	Acumulado	No Ano	Acumulado
2008	9,54E+06		2,40E+07	
2009	9,82E+06	9,82E+06	2,47E+07	2,47E+07
2010	1,01E+07	1,99E+07	2,55E+07	5,02E+07
2011	1,04E+07	3,04E+07	2,62E+07	7,64E+07
2012	1,07E+07	4,11E+07	2,70E+07	1,03E+08
2013	1,11E+07	5,21E+07	2,78E+07	1,31E+08
2014	1,14E+07	6,35E+07	2,87E+07	1,60E+08
2015	1,17E+07	7,53E+07	2,95E+07	1,89E+08
2016	1,21E+07	8,73E+07	3,04E+07	2,20E+08
Número N de Projeto	AASHTO	8,73E+07	USACE	2,20E+08

O volume de tráfego é uma condição determinante no desempenho dos pavimentos. O número de solicitações a que o pavimento deve estar sujeito define o desenho da estrutura, pois a repetição de cargas é responsável pela maior parte dos defeitos que conduzem à ruína dos pavimentos.

6.8.3 AVALIAÇÃO LABORATORIAL

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, foram avaliadas em laboratório, as características da mistura reciclada a frio com emulsão modificada por polímero executada no trecho experimental na Rodovia Régis Bittencourt, utilizando agregados provenientes da pista, extraídos por meio de fresagem, na data da execução da restauração, representando fielmente a curva granulométrica aplicada. A curva granulométrica (Figura 4) adotada atende às especificações da ARRA (2001).

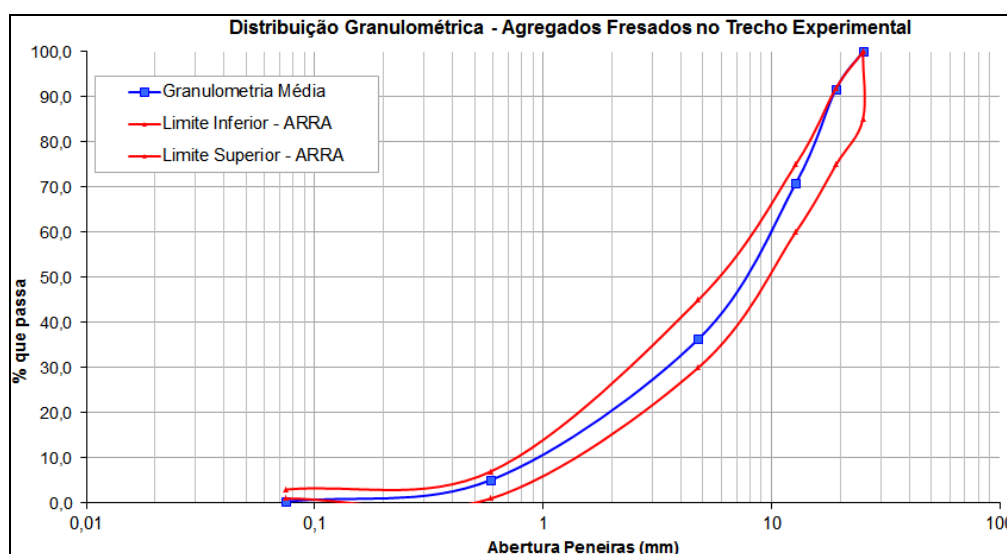


Figura 4 – Composição granulométrica da mistura reciclada ensaiada

Foram confeccionados corpos-de-prova de acordo com a norma DNER-ME-107/94 para misturas betuminosas a frio com emulsão asfáltica, para determinação do teor ótimo. Foram moldados corpos de prova com o objetivo de definir a dosagem para cada tipo de emulsão, avaliando o comportamento mecânico das misturas em diferentes teores. Foram verificados também, os efeitos atribuídos à incorporação de polímero SBS na emulsão, por meio da comparação dos resultados da dosagem Marshall e de ensaios de comportamento mecânico, em amostras moldadas com emulsão modificada por polímero SBS e amostras moldadas com emulsão convencional, nos mesmos teores.

Os resultados apresentados na Figura 5 revelam tendência de comportamento e valores absolutos muito parecidos entre as misturas recicladas com emulsão modificada por polímero e com emulsão convencional, o que era de se esperar, pois a quantidade de fluido nas misturas é similar e é o que comanda o processo de densificação das mesmas. Apesar de valores similares, o volume de vazios é levemente inferior nas misturas com polímero. Ainda durante os processos de misturação, compactação e extração de corpos de prova, foi percebida em laboratório maior trabalhabilidade nas misturas recicladas com emulsão modificada por polímero, resultando em corpos de prova com aspecto visualmente mais homogêneo.

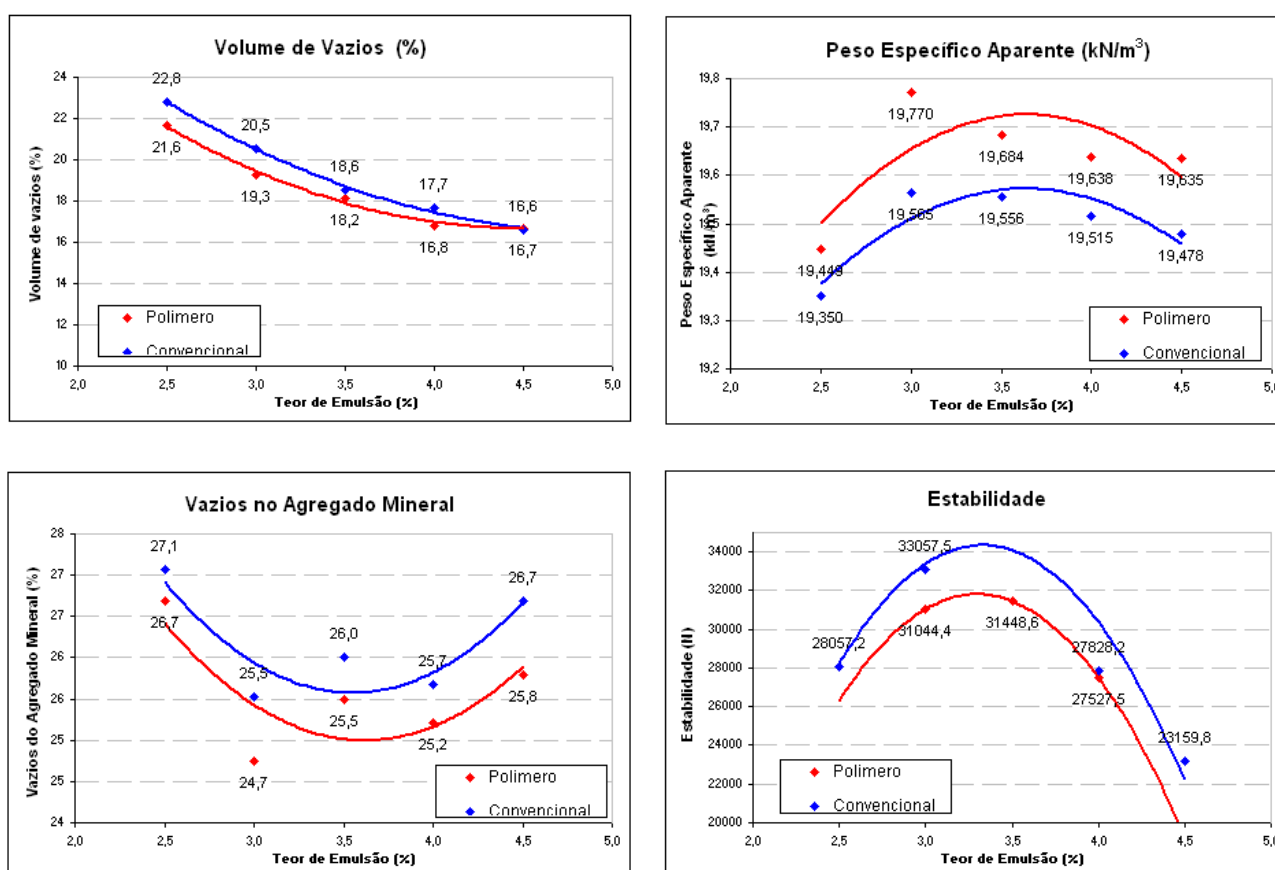


Figura 5 – Volume de vazios, Peso Específico Aparente, Vazio no Agregado Mineral e Estabilidade

Os agregados fresados apresentam uma grande variabilidade, evidenciada nas pequenas variações entre os diferentes teores avaliados. Por este estudo, confirmou-se que o teor próximo a 3% de emulsão mostrou-se

o mais adequado do ponto de vista de peso específico aparente e estabilidade. No entanto, outras características e propriedades são importantes para uma melhor análise e definição do teor “ótimo”. Os parâmetros volumétricos associados à dosagem Marshall revelaram diferença pouco expressiva atribuída às emulsões. As pequenas variações encontradas podem estar mais relacionadas à variabilidade dos agregados fresados, do que às emulsões avaliadas.

Também foram realizados ensaios de comportamento mecânico para as misturas recicladas com emulsão convencional e com emulsão modificada por polímero SBS, permitindo estender a comparação entre as duas misturas. Estes ensaios foram realizados apenas com variação de três teores de emulsão (2,5%, 3,0% e 3,5%), em função do teor ótimo obtido na dosagem, uma vez que o teor ótimo está em torno de 3,0%.

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em duas condições: sem condicionamento e com condicionamento, de forma a se obter os valores de perda por umidade induzida. Os corpos-de-prova sem condicionamento, após moldagem, passaram por processo de cura regulamentado (24 horas a temperatura de 40°C e permaneceram por 14 dias em temperatura controlada de 25°C até a realização do ensaio). Os corpos de prova com condicionamento passaram pelo mesmo período de cura que àqueles sem condicionamento, após o qual foram mantidos em banho a 60°C por 24 horas, seguido de banho a 25°C por 2 horas, sendo ensaiado em seguida. Os resultados de resistência à tração e resistência à tração retida encontram-se na Figura 6a. Os resultados são apresentados também na forma de Perda por Umidade Induzida na figura 6b, contudo não existem especificações de limites de perda para misturas recicladas a frio, contudo as misturas que utilizam emulsão modificada por polímero devem apresentar resultados mais elevados em virtude da alta adesividade e coesão inicial propiciada pelo ligante.

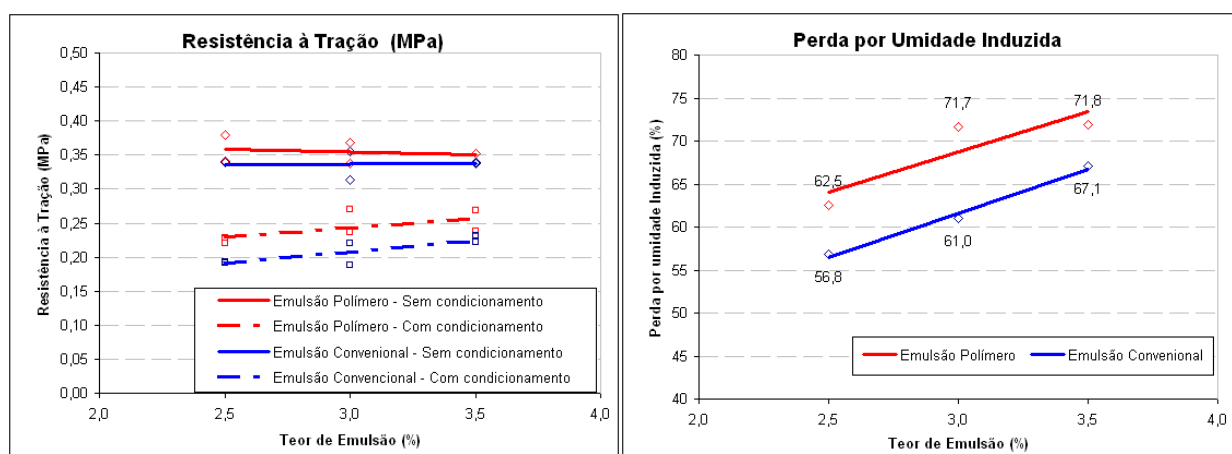


Figura 6 – Resistência à tração com e sem condicionamento (a) e Comparativo de perda por umidade induzida (b)

Os valores de resistência à tração em misturas recicladas com emulsão modificada por polímero são relativamente mais altos do que as misturas com emulsão convencional, tanto os corpos-de-prova não condicionados, quanto os condicionados. A superioridade dos resultados para misturas com polímero é

esperada, uma vez que a incorporação de polímero incrementa a resistência à ação deletéria da água; o resultado pode estar diretamente relacionado à rede ou malha formada sobre o filme de emulsão asfáltica, que amortece as tensões efetivas sobre o ligante asfáltico.

De acordo com ensaios realizados por Loizos (2008), a resistência à tração deste tipo de mistura pode, em curtos períodos, elevar-se muito, influenciada pelas condições ambientais e do tempo de cura. Foram realizados ensaios de resistência à tração em amostras com período adicional de cura ao ar por 14 dias e estes mostraram valores mais elevados que aqueles testados logo após a cura em estufa a 60°C, revelando a importância do tempo de cura para este tipo de material.

Para esta avaliação, foi feito então, uma análise comparativa entre os resultados obtidos com amostras submetidas à cura de 24 horas em estufa a 60°C, com aqueles que além desta etapa de cura em estufa, passaram também pela cura ao ar por 14 dias. As porcentagens de ganho de resistência com o tempo de cura foram calculados para os teores de 2,5% e 3,5%, para os quais estavam disponíveis ambos resultados. Os ganhos de resistência constam na Tabela 6. Observa-se que os aumentos de resistência à tração encontrados estão entre 27% e 42%, mostrando a importância do efeito da cura deste material. Ou seja, a exposição ao ar da camada compactada de mistura asfáltica reciclada é uma das fases de grande importância para a técnica. Por vezes, não é possível a exposição por demasiado período de tempo devido a problemas de tráfego elevado e possível início de desagregação superficial da camada reciclada, no entanto, períodos de uma semana ou superiores são recomendados, antes de execução da camada de revestimento asfáltico.

Tabela 6 – Ganhos de Resistência à tração *sem condicionamento* e *com condicionamento* devido ao aumento de período de cura ao ar em 14 dias

Ganho de resistência com cura	Teores	Emulsão Polímero		Emulsão Convencional	
		Ganho RT (%)	Ganho RT (%)	Ganho RT (%)	Ganho RT (%)
		S/ condicionamento	C/ condicionamento	S/ condicionamento	C/ condicionamento
	2,5	31,7	27,7	37,2	20,5
	3,5	39,3	41,9	34,0	28,3

Para análise de ganho de rigidez e redução de deformabilidade com o tempo de cura, foram realizados ensaio de módulo de resiliência em corpos-de-prova de 100mm de diâmetro com 200mm de altura. Foram moldados corpos de prova para realização de ensaio triaxial de módulo de resiliência, de acordo com a norma AASHTO T 292-91, para base e sub-base de material granular, na energia intermediária de compactação. O ensaio foi realizado a temperatura de 25°C, para tempo de cura ao ar de 7 dias e de 28 dias (Figura 5). Os resultados mostram mais uma vez a importância do tempo de cura nas propriedades mecânicas destes materiais. Neste caso, reduções de cerca de 15 a 20% na deformabilidade do material foram encontradas.

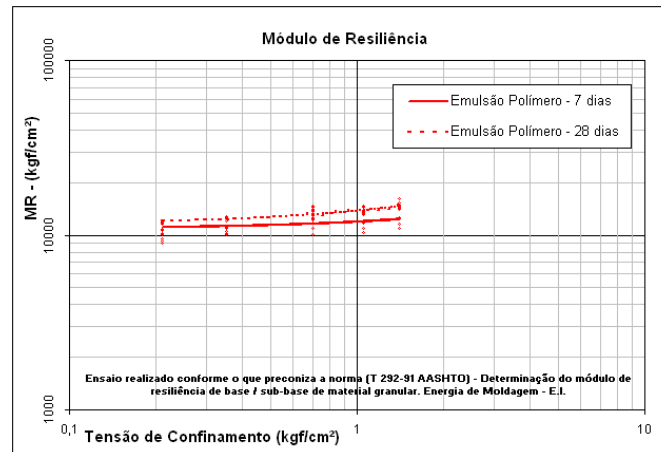


Figura 7 – Módulo de resiliência – emulsão modificada por polímero

A introdução de emulsão para unir os agregados obtidos por fresagem, com pequena adição de cimento, promove uma redução importante da deformabilidade, passando do comportamento de material granular (que teria módulo de resiliência na faixa de 150 a 400MPa) para 1000 a 1500 MPa (10.000 a 15.000 kgf/cm²). A introdução de uma camada de mistura reciclada a frio na estrutura do pavimento pode reduzir as deflexões, dependendo da espessura empregada, e comportar-se como uma camada que exibe ainda uma flexibilidade, sem trincas por retração.

O ensaio Cântabro, que avalia o desgaste do corpo de prova Marshall no tambor Los Angeles, é um ensaio bastante severo que foi realizado com as misturas recicladas em seus teores ótimos de emulsão e umidade (Figura 8). Para cada mistura foram moldados 10 corpos de prova, sendo que cada um é submetido a 200 rotações do tambor, com as pesagens do corpo de prova realizadas antes e depois do ensaio. A diferença calculada, em porcentagem, não deve ser superior a 20% para misturas abertas, a quente (DNER-ME-383/99, 1999). Não há valor normatizado para o ensaio Cântabro pra misturas a frio.

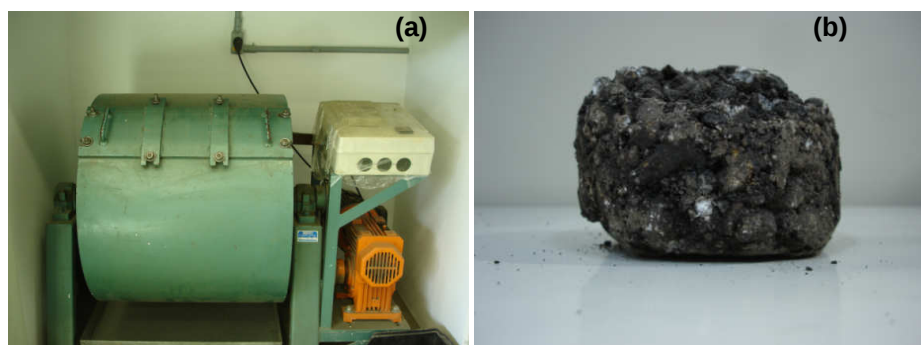


Figura 8 – Tambor Los Angeles (a) e aspecto do corpo-de-prova após ter sido submetido a 200 rotações (b)

O resultado médio da perda por desgaste nas misturas com emulsão modificada por polímero é de 17,8%, enquanto o resultado de perda para misturas com emulsão convencional é de 20,2%; em simplificada análise estatística, observou-se diferença entre as duas emulsões, entretanto a ordem de grandeza da

porcentagem de perda do ensaio indica comportamento similar entre as misturas apesar de relativo destaque da mistura reciclada com emulsão modificada por polímero. Os resultados mais favoráveis das misturas com polímero podem estar associados à maior coesão inicial prevista como benefício pela incorporação de polímero.

Deve-se ressaltar que este ensaio é bastante severo para misturas a frio, e que a coesão da mistura compactada por impacto é muito menor do que misturas compactadas por amassamento (similar à compactação de campo). Moreira (2005) realizou ensaio Cântabro em misturas recicladas a frio compactadas por impacto e por amassamento, e encontrou resultados mais coerentes para aquelas compactadas por amassamento, revelando justamente que a coesão propiciada pelo método de compactação associado ao uso do polímero pode ser determinante para a obtenção de resultados mais coerentes com desempenhos verificados em campo.

Amostras de pista foram submetidas a ensaios em laboratório, para caracterização de comportamento mecânico. Foram extraídos posteriormente à execução das camadas de rolamento, corpos-de-prova em todos os segmentos, para verificação das espessuras, condição das camadas e eventual densificação. Em cada segmento foram extraídos dois corpos-de-prova no eixo da faixa e dois corpos-de-prova na trilha externa (Figura 10). Devido a dificuldades operacionais, poucos corpos-de-prova resistiram ao processo e permaneceram íntegros. A Figura 9 mostra também três pontos de abertura de janelas, das quais foram extraídos materiais das camadas subjacentes, além de placa para ensaio de deformação permanente em laboratório.

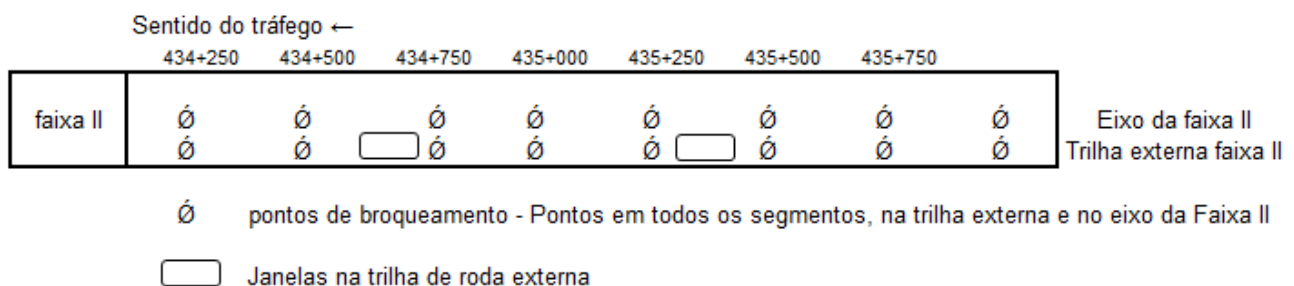


Figura 9 – Representação dos pontos de extração de corpos-de-prova no trecho experimental

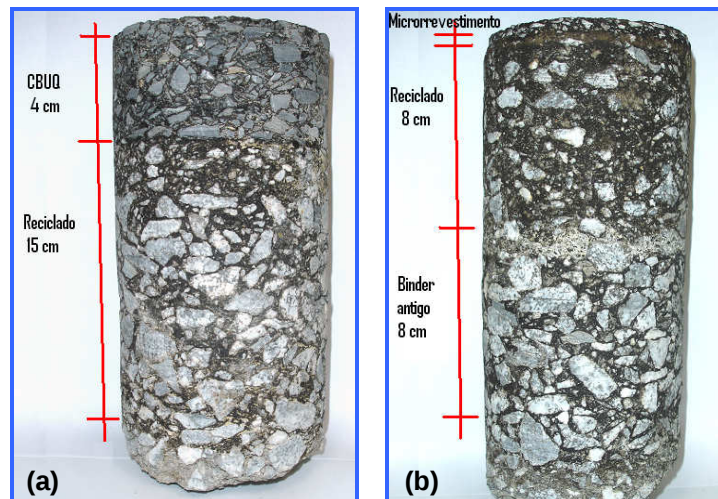


Figura 10 – Corpos-de-prova extraídos por sonda rotativa do trecho experimental, indicando as características das estruturas executadas; revestimento em CBUQ (a) e revestimento em microrrevestimento (b)

Os corpos-de-prova extraídos (Figura 11a) foram faceados nas extremidades, preservando a mistura reciclada nas dimensões Marshall (63,5 mm X 101,6 mm), conforme Figura 11b.

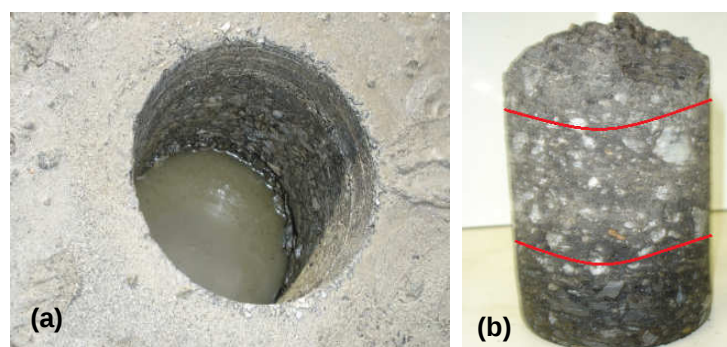


Figura 11 - Material extraído do trecho experimental por sonda rotativa (a) e, faceado para ensaio (b)

O processo de extração fissura as laterais do material (Figura 12) gerando fragilidade no corpo-de-prova que foram submetidos a medidas de densidade, ensaio de abrasão Cântabro, Módulo de Resiliência e Deformação Permanente.

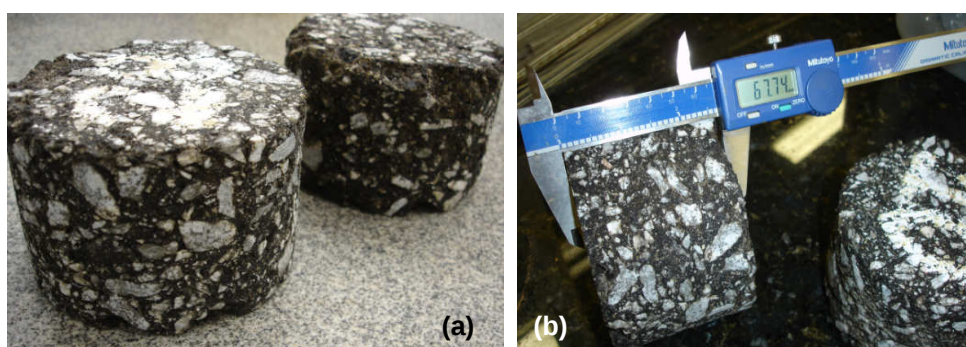


Figura 12 – Material extraído e posteriormente faceado nas dimensões Marshall

As medidas de massa específica aparente pelo método do paquímetro indicaram valor médio de 21,3 kN/m³, mostrando desta forma maior densificação em relação aos corpos-de-prova moldados em laboratório.

O ensaio Cântabro foi realizado com apenas dois corpos-de-prova por conta dos resultados obtidos, com perda média de 79% (Figura 13). Tendo em vista a quantidade limitada de corpos-de-prova, não foi conveniente prosseguir com o ensaio. Esse resultado reflete duas condições: o ensaio é consideravelmente severo para misturas asfálticas a frio e também que corpos-de-prova extraídos de campo são muito sensíveis, pois além das fissuras laterais da extração, as ligações internas são forçadas durante o processo, alterando as características de resistência, não sendo, portanto um ensaio conveniente a estes corpos-de-prova.

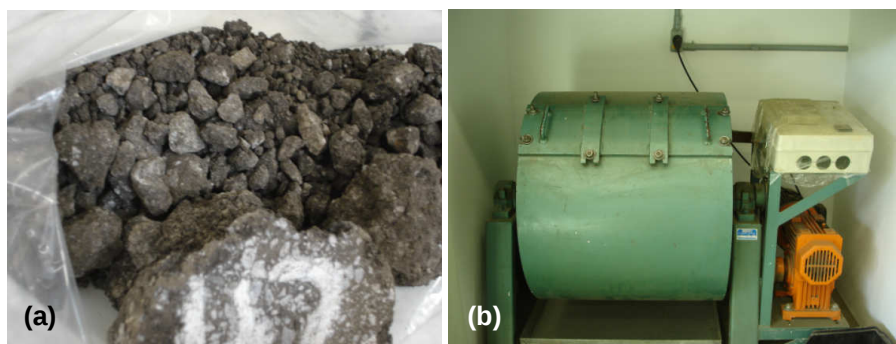


Figura 13 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio Cântabro

A realização do ensaio de Módulo de Resiliência (Figura 14), com cinco corpos-de-prova se deu atendendo a norma DNER-ME 133/94 para misturas betuminosas, esta definição deve-se ao tamanho dos corpos-de-prova, cortados nas dimensões padrões do ensaio Marshall.

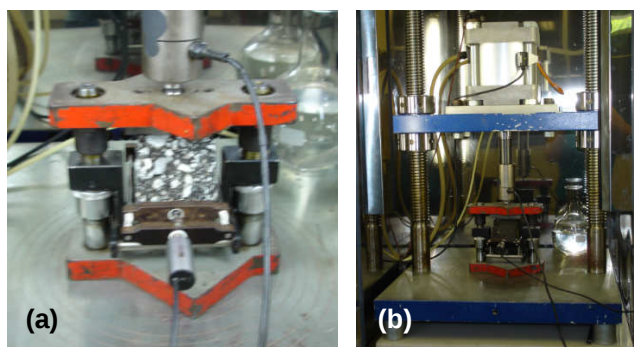


Figura 14 – Instrumentação do ensaio (a) e ensaio de módulo de resiliência em amostras de pista (b)

Estas amostras representam a condição mais representativa permitindo maior correlação com o material existente em campo, contudo deve-se notar que durante sua extração e preparo para o ensaio, as ligações

entre as partículas podem ser perturbadas, alterando a estrutura interna do corpo de prova e sensibilizando sua resistência.

Tabela 7 – Módulo de Resiliência de amostras do trecho experimental

CP nº	1	2	3	4	5
MR (MPa)	1.107	1.536	1.154	1.258	1.232

Ainda como avaliação de comportamento mecânico, foram realizados ensaios de Deformação permanente nas placas extraídas do trecho experimental (Figura 15).

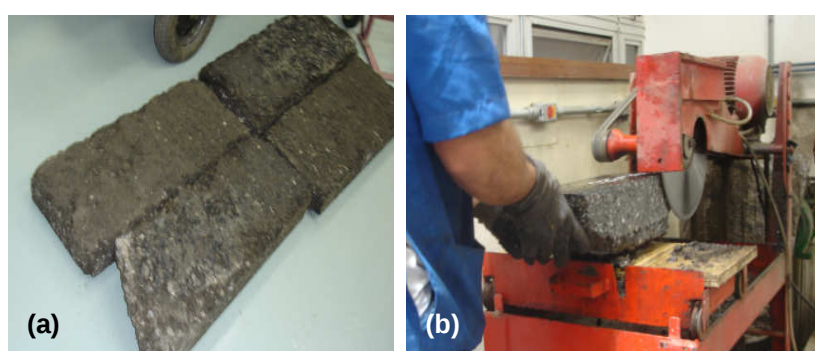


Figura 15 – Placas extraídas de pista e adequação de dimensões em laboratório

Da mesma maneira que os corpos-de-prova extraídos por sonda rotativa, as placas foram faceadas nas medidas próprias para serem ensaiadas nos Simulador de Tráfego de laboratório (Figura 16). Os resultados indicaram deformação permanente máxima de 1,08%, após 30.000 ciclos mostrando que a mistura não apresenta tendência à deformação permanente, mesmo protegida apenas por camada selante em microrrevestimento.

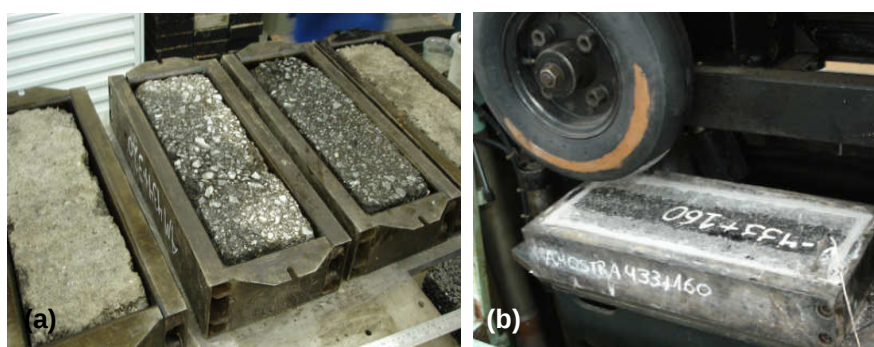


Figura 16 – Placas extraídas do trecho experimental, ensaiadas no simulador de tráfego (c)

A camada reciclada protegida por concreto asfáltico não foi ensaiada no simulador de tráfego devido à espessura máxima de 10 cm aplicável no simulador. Entretanto o resultado da simulação em amostras com camada de revestimento em microrrevestimento é suficiente para confirmar os resultados obtidos com uso

do simulador de tráfego em escala real, e os resultados do monitoramento das condições de superfície no trecho experimental.

6.8.4 MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO

O trecho experimental também foi monitorado em suas condições de superfície por meio de levantamento de irregularidade longitudinal, em quatro campanhas, sendo realizadas nas seguintes épocas: (i) em outubro/2008, antes da restauração por meio de reciclagem, (ii) em março/2009, após a conclusão dos trabalhos de restauração, incluindo execução das camadas de revestimento, (iii) em março/2010, após um da conclusão dos trabalhos de restauração e, (iv) em fevereiro/2011, após dois anos da conclusão dos trabalhos de restauração, completando dois períodos seco e chuvoso. Os resultados mostrados na Figura 17 (faixa I) e Figura 18 (faixa II), encontram-se separados entre faixa I e faixa II de rolamento, sendo esta segunda a faixa de veículos mais lentos e comerciais. Os resultados são apresentados para os segmentos reciclados com cimento e com camada de revestimento em microrrevestimento e em CBUQ; os segmentos com cal foram excluídos da análise de desempenho por parâmetros funcionais e estruturais, pois os resultados para estes segmentos tem influência significativa de variáveis como intervenções e drenos.

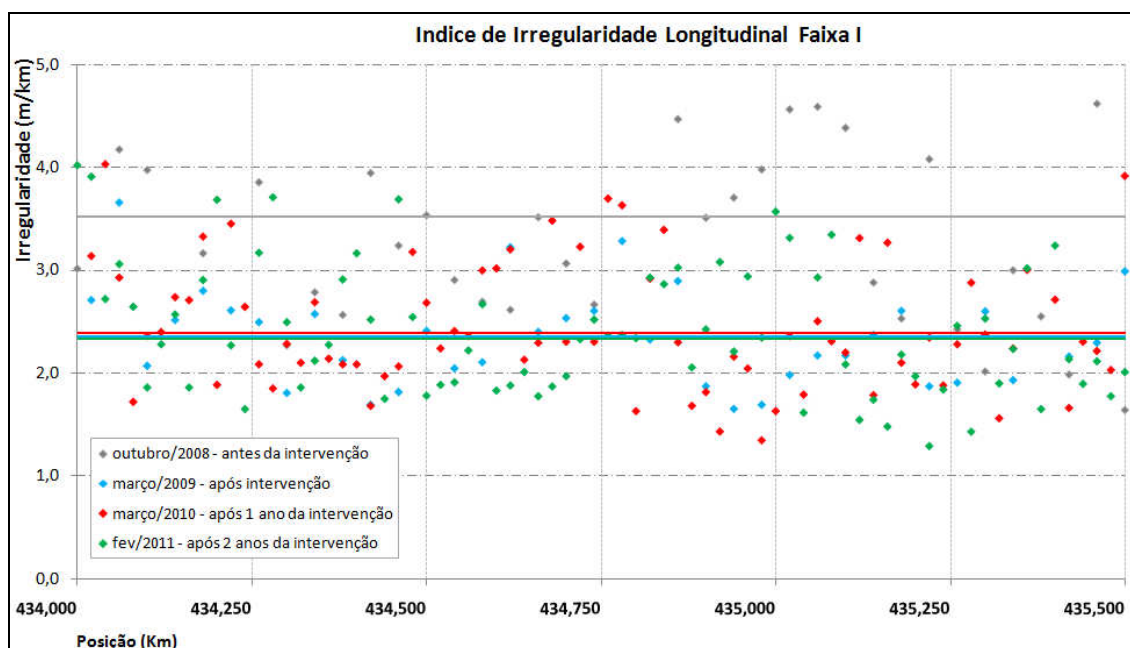


Figura 17 – Irregularidade Longitudinal – Faixa I

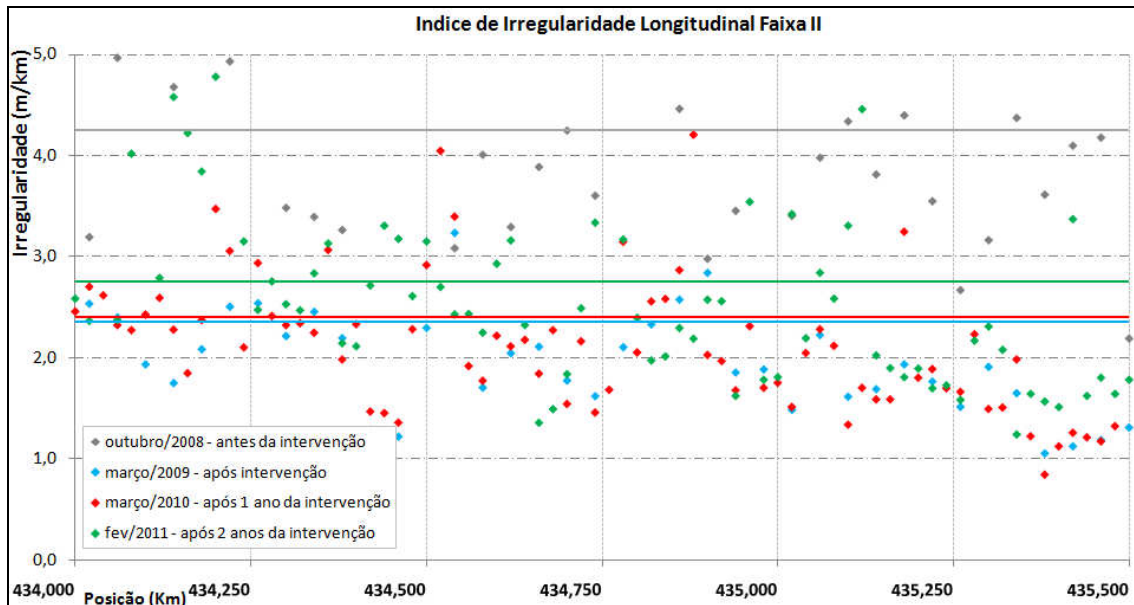


Figura 18 – Irregularidade Longitudinal – Faixa II

Os resultados médios dos levantamentos de irregularidade longitudinal são descritos na Figura 19 para cada faixa, em cada campanha realizada. Observa-se que houve considerável melhoria das condições de trafegabilidade do pavimento após a restauração por meio de reciclagem. Essa melhoria resistiu muito bem durante o primeiro ano; no segundo ano as condições tiveram uma piora, em especial na faixa de veículos pesados (Faixa II), estando no limite de aceitação estabelecido em norma.

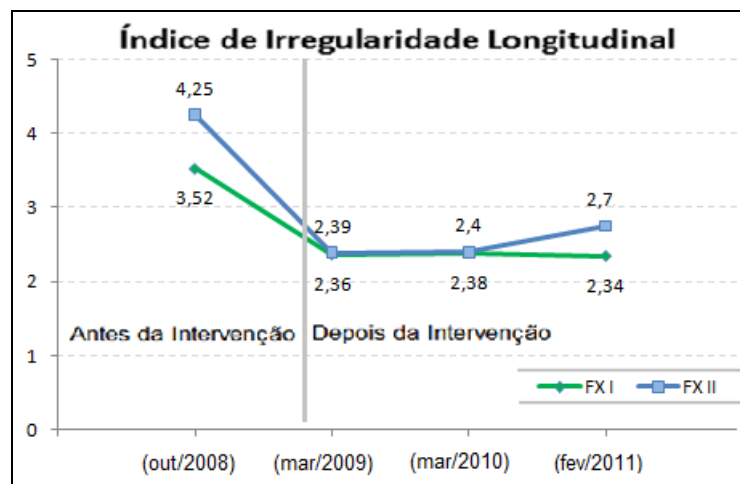


Figura 19 – Irregularidade longitudinal do trecho experimental nas faixas I e II

O Levantamento Visual Detalhado, referente a fevereiro/2011, revelou uma maior deterioração do trecho experimental, especialmente nos segmentos com camada de rolamento em microrrevestimento. Os defeitos observados se concentram em geral, na faixa II próximo ao acostamento, conforme se verifica na Figura 20, que também denotam a presença de trincamento na faixa II, evidencia de fadiga causada pelo carregamento de veículos comerciais.

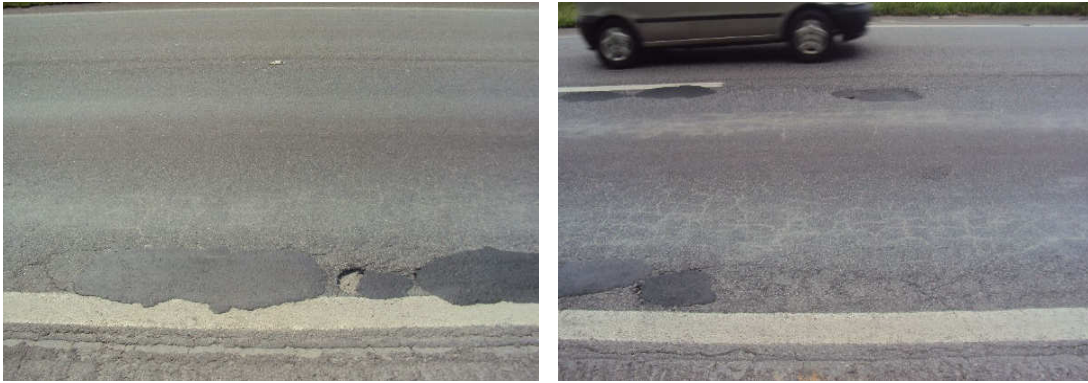


Figura 20 - Condições de Superfície nos Segmentos com Microrrevestimento

Deve-se ressaltar que o acostamento não recebeu tratamento em relação ao trincamento, funcionando neste caso como linha de fluxo de água que permeiam pela estrutura do pavimento; além disso, os defeitos mais extensos e significativos (Figura 21) se iniciaram nas áreas mais próximas dos segmentos com mistura reciclada com cal, que desde o principio da pesquisa já apresentou problemas devido á má drenagem dos segmentos em curva.



Figura 21 – Deterioração dos segmentos com cimento, mais próximos dos segmentos com cal

O segmento reciclado em 15 cm e com camada de revestimento em CBUQ também tem apresentado defeitos, apesar da execução de dreno transversal entre 2009 e 2010, fator que conduziu à obtenção de deflexões mais baixas em medidas no ano de 2010. Contudo, as deflexões medidas em 2011 mostraram aumento considerável das deflexões neste segmento, em relação aos segmentos adjacentes e também em relação às medidas realizadas em 2010, de tal forma que os defeitos observados na Figura 22, podem novamente revelar problemas de drenagem deficiente.



Figura 22 – Segmento com camada de rolamento em CBUQ

O uso de equipamento simulador de tráfego em escala real acelera a obtenção dos resultados, uma vez que o equipamento impinge à estrutura os esforços de um semi-eixo de rodas duplas simulando um veículo comercial em sucessivas passagens definidas como ciclos. O processo ininterrupto abrevia o período necessário para avaliação de desempenho deste pavimento. Entretanto, o equipamento apresenta uma série de variáveis que o distingue do tráfego real, implicando, conseqüentemente, em resultados que devem ser empregados para inferência do comportamento real.

O Simulador de Tráfego *HVS – Heavy Vehicle Simulator* (Figura 23) consiste de um semi-eixo rodoviário com rodas duplas e cargas de até 8 tf, o qual corresponde a um eixo simples de rodas duplas com carga total de até 16 tf, que se movimenta no sentido longitudinal com deslocamentos de até 9 m e, transversalmente, até 1 m de largura, com capacidade de executar 1000 passagens ou aplicações de carga em uma determinada área da seção de ensaio por dia. Dessa forma, a combinação da velocidade de deslocamento longitudinal do semi-eixo com os demais recursos do equipamento, ou seja, deslocamento transversal e carga aplicada permitem reproduzir em curtos períodos de tempo e com bastante aproximação da realidade as conseqüências da ação das cargas do tráfego nas estruturas de pavimento.

Segundo Pinto (1989), em função do grande número de variáveis que afeta a vida de fadiga, os resultados obtidos devem ser colocados de forma estatística, advertindo que os danos causados pelo equipamento simulador de tráfego são indicativos de comportamento, mas não conclusivos. Além disso, a compreensão dos dados depende da ponderação entre os dados de tráfego e do simulador, sem que haja necessariamente uma relação de equivalência entre ambos.

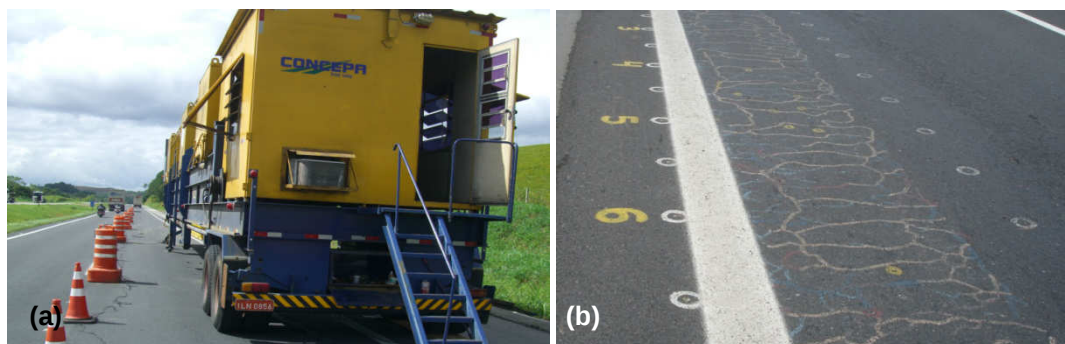


Figura 23 – Simulador de Tráfego instalado no Trecho Experimental (a); segmento submetido ao ensaio (b)

Os resultados obtidos a partir do uso do simulador de tráfego não foram considerados conclusivos para a definição da vida de fadiga do material, no entanto apontou alguns aspectos que devem ser controlados para correta interpretação de resultados, tais como carga aplicada e registros de condições climáticas, que alterou o comportamento. O uso do simulador de tráfego móvel ratificou a informação obtida por meio do simulador de tráfego de laboratório, de que a mistura reciclada não apresenta tendência substancial à deformação permanente. Deformação permanente é um defeito importante no desempenho do pavimento, o qual todas as camadas estão sujeitas, independente de ter deformação camada de revestimento.

Durante a realização da simulação de tráfego, o equipamento esteve instalado na faixa de veículos pesados (Faixa II), durante nove meses do primeiro ano (entre abril e dezembro de 2009), fator que implicou no desvio total do tráfego para a faixa I.

Ponderações foram feitas no cálculo no número de repetições de carga N atuante, em relação ao período de desvio, nove meses, sendo o tráfego canalizado na faixa I. As avaliações que serão descritas nos itens seguintes, consideram a deterioração na faixa I, para a qual o tráfego foi desviado. Contudo, os resultados de monitoramento são apresentados para ambas as faixas de rolamento.

6.8.5 MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES ESTRUTURAIS DO PAVIMENTO

O monitoramento das condições do pavimento foi analisado para determinação dos padrões de deterioração do pavimento, ponderando uma série de variáveis. Como fator preponderante nesta análise, esta o desvio total do tráfego para a faixa I, que ocorreu durante a realização da simulação de tráfego, em que o equipamento esteve instalado na faixa de veículos pesados (Faixa II), pelo período de nove meses do primeiro ano (entre abril e dezembro de 2009). As avaliações que serão descritas nos itens seguintes, consideram a deterioração na faixa I, para a qual o tráfego foi desviado; os resultados são apresentados para os segmentos reciclados com cimento, excluindo os segmentos reciclados com cal, em virtude das diversas intervenções sofridas desde o início da pesquisa.



O monitoramento das condições estruturais ocorreu por meio de medidas deflectométricas periódicas realizadas com equipamento FWD. As campanhas foram realizadas nas seguintes épocas e condições: (i) outubro/2008, antes da restauração por meio de reciclagem, (ii) março/2009, imediatamente após conclusão dos trabalhos de restauração, em período chuvoso, (iii) junho/2009, em período seco, com baixas temperaturas, (iv) março/2010, medida correlata com março/2009, período chuvoso, (v) junho/2010, medida correlata com junho/2010, período seco e com baixas temperaturas, (vi) setembro/2010 e, (vii) fevereiro/2011, período chuvoso. As medições foram realizadas pela empresa Dynatest, com equipamentos calibrados; os valores foram corrigidos pela temperatura e pela carga e apresentados na Figura 24 (faixa I) e Figura 25 (faixa II).

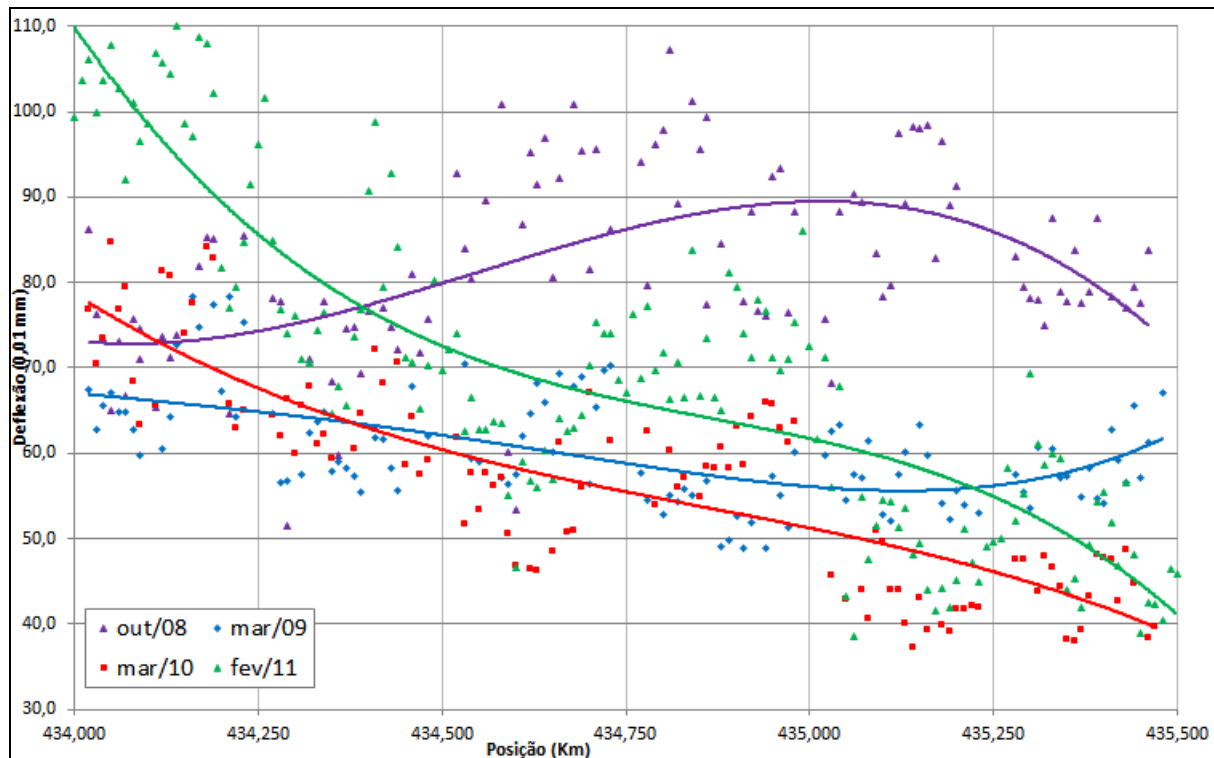


Figura 24 – Condições deflectométricas em seis campanhas – faixa I

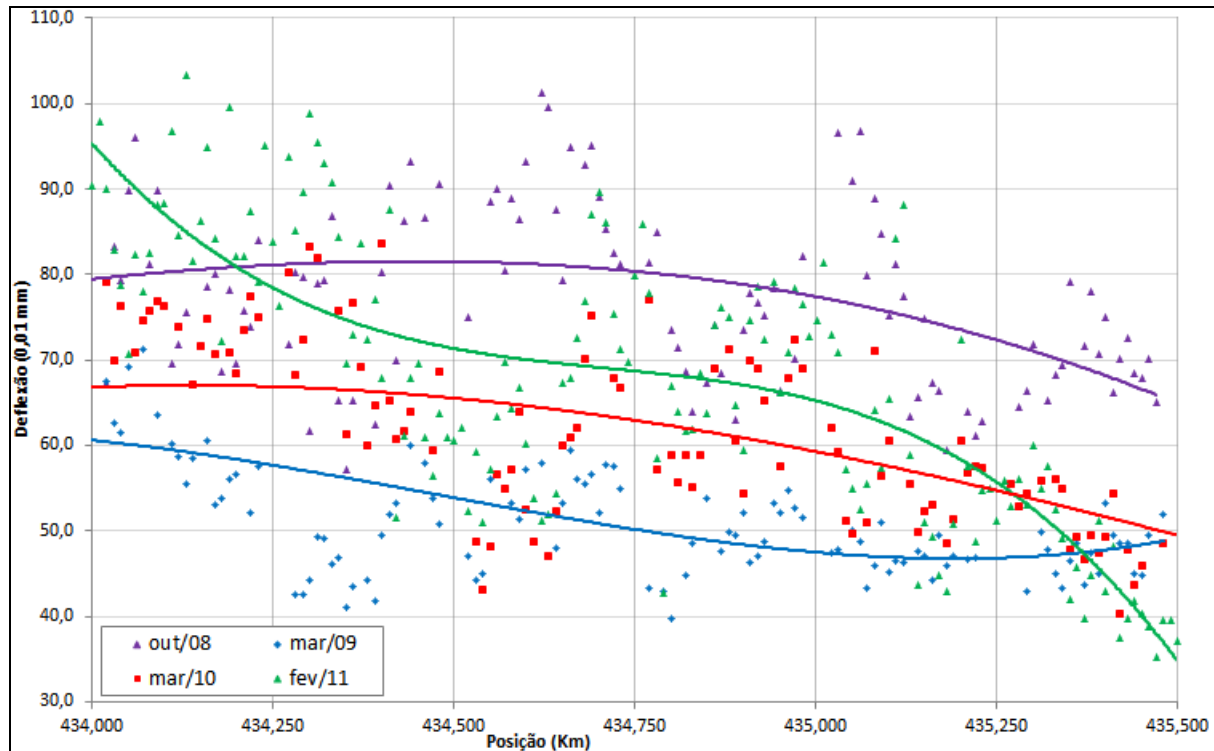


Figura 25 – Condições defletoométricas em seis campanhas na faixa II

Para avaliação do desempenho por meio das deflexões medidas, foram destacados os resultados obtidos sob condições similares de temperatura e precipitação; além disso para determinar as características de desempenho diretamente associadas à camada reciclada, as análises apresentadas a seguir referem-se aos segmentos com camada de revestimento em microrrevestimento, que não representa efeito estrutural, permitindo verificar o incremento atribuído exclusivamente à camada reciclada. Assim, a Figura 26 apresenta a proporção de faixas de deflexão medidas no trecho experimental em quatro campanhas para a faixa I relativas a outubro/2008 – antes da intervenção. As medidas revelam deflexões elevadas, a maior parte entre 70 (0,01 mm) e 90 (0,01 mm), valores que indicam deficiência estrutural.

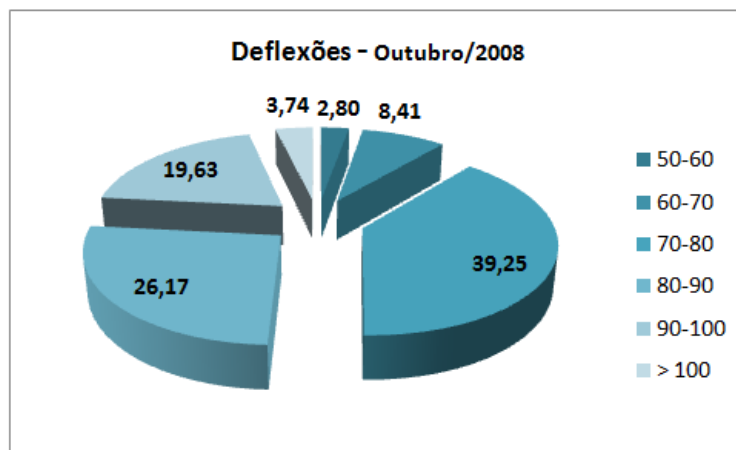


Figura 26 – Porcentagem de deflexões medidas em outubro/2008 – antes da intervenção

As medidas relativas a março/2009 (Figura 27) indicam redução considerável das deflexões, com maior parte das medidas entre 50 e 70 (0,01 mm), tendo poucas medidas chegando a 80 (0,01 mm); estes resultados mostram que a mistura reciclada atua incrementando a resistência estrutural do pavimento. O benefício da substituição de uma camada trinca por uma camada íntegra, não é apenas funcional, mas também estrutural.

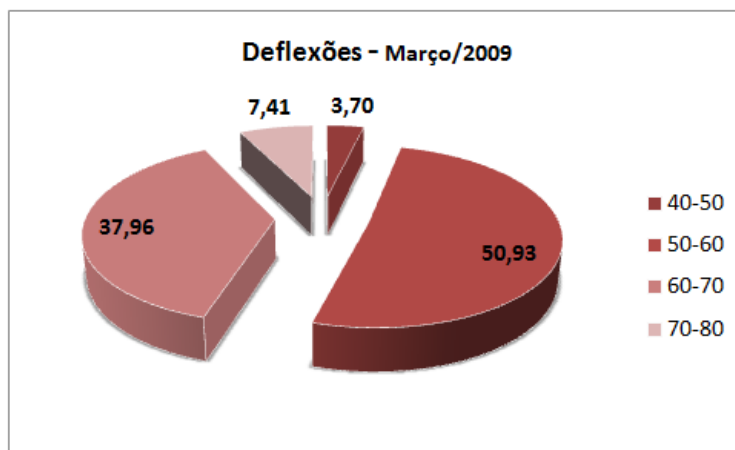


Figura 27 - Porcentagem de deflexões medidas em março/2009 – imediatamente após a intervenção

As medidas de março/2010 (Figura 28) revelam aumento das deflexões máximas, tendo poucas medidas alcançando 90 (0,01 mm). Em contrapartida às deflexões máximas, foram registradas deflexões mais baixas, entre 30 e 40, que não haviam sido registradas imediatamente após a restauração (março/2009). As deflexões mais altas estão associadas à deterioração da camada reciclada, após um ano de tráfego atuante elevado. As deflexões mais baixas podem estar relacionadas a dois fatores: (i) maior dispersão de resultados, pela menor homogeneidade do material e, (ii) por influência de um período chuvoso com menor índice pluviométrico.

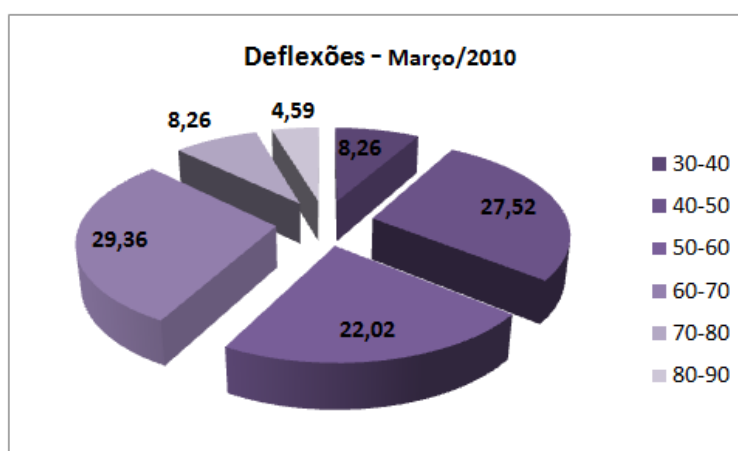


Figura 28 - Porcentagem de deflexões medidas em março/2010

As medidas realizadas em fevereiro/2011 (Figura 29) mostram maior dispersão de resultados, além de maiores deflexões máximas, dois fatores que indicam a maior deterioração da camada reciclada, tendo sua resistência estrutural reduzida. Os dados apresentados no item 6.8.3, não mostraram condição superficial consideravelmente prejudicada na faixa I, contudo, os dados de deflexão indicam que a deterioração estrutural tem avançado de forma mais evidente.

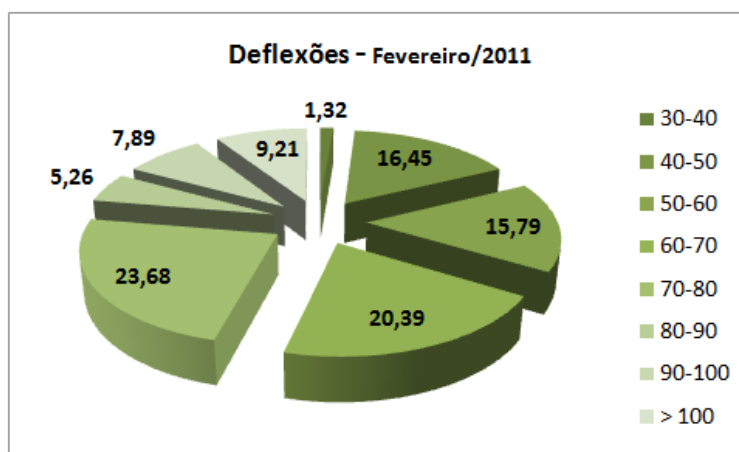


Figura 29 - Porcentagem de deflexões medidas em fevereiro/2011

A Tabela 8 apresenta os valores de deflexão média, desvio padrão e coeficiente de variação das medidas deflectométricas de cada segmento, apresentadas na figura 69. Os valores apresentados são indicativos do desempenho de cada segmento, diferentemente dos resultados apresentados nas figuras 11 a 14, em que os dados se referem a todo o trecho experimental sem segmentação.

Tabela 8 – Resumo de médias e desvio padrão das medidas de deflexão

			AC+8	AC+11	AC+15	MS+15	MS+11	MS+8
			435+500	435+250	435+000	434+750	434+500	434+250
Antes da Intervenção	out/08	Média	80,1	87,9	89,0	86,9	72,0	74,9
		Desv. Padrão	3,7	8,8	9,6	12,7	7,4	7,3
		coef. Variação	0,046	0,100	0,108	0,147	0,103	0,097
Após Intervenção	mar/09	Média	47,1	47,4	50,6	59,1	53,0	66,4
		Desv. Padrão	3,0	3,9	4,2	4,4	3,4	2,8
		coef. Variação	0,064	0,082	0,083	0,074	0,064	0,043
	mar/10	Média	46,3	44,9	58,4	57,0	61,9	69,3
		Desv. Padrão	3,5	3,5	4,9	4,0	4,2	5,0
		coef. Variação	0,075	0,079	0,085	0,070	0,068	0,072
	fev/11	Média	51,0	50,5	73,2	64,1	77,1	98,6
		Desv. Padrão	7,7	7,8	5,6	7,0	10,1	9,4
		coef. Variação	0,151	0,155	0,077	0,109	0,131	0,095

Os segmentos que receberam camada de revestimento em concreto asfáltico têm apresentado aumento contido das deflexões, em relação aos segmentos que receberam microrrevestimento como camada

selante. A utilização de camada delgada em material mais resistente indica melhor desempenho da estrutura, protegendo a camada reciclada.

O desempenho na extremidade próxima aos segmentos com cal (434+000) que foram excluídos por defeitos precoces atribuídos à deficiência de drenagem, também apresentaram elevação mais acentuada de deflexões que podem estar também associadas à mesma deficiência de drenagem. Como o segmento final ainda não apresentou problemas evidentes como o segmento com cal, em análise inicial os resultados podem ser atribuídos ao conjunto de deficiência de drenagem, estrutura com camada selante (sem benefício estrutural) e menor espessura reciclada (que implica na maior espessura de material trincado remanescente).

6.8.6 ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO

As avaliações para estimativa da vida útil da mistura reciclada foram feitas a partir dos dados obtidos nos segmentos com camada selante em microrrevestimento, considerando que este não represente incremento estrutural, não interferindo, portanto nos resultados específicos da mistura reciclada.

O método DNER PRO 11/79 define espessuras de reforço a partir das deflexões máximas medida no pavimento, da característica do material e do número N de solicitações a que o pavimento deve resistir.

Para tanto foi calculado o valor característico do fator de redução de deflexão K da mistura reciclada, conforme equação 1, que pôde ser calibrado em função das três espessuras aplicadas em campo. A deflexão máxima no topo da camada fresada (D antes), para cada espessura, foi obtida por meio de retroanálise.

$$h = K * \log\left(\frac{D_{antes}}{D_{adm}}\right) \quad h = K * \log\left(\frac{D_{antes}}{D_{adm}}\right) \quad (1)$$

Com a finalidade de ampliação do universo de resultados, os cálculos contemplaram o uso da deflexão média e do desvio padrão, permitindo estabelecer valores mais amplos, dadas as devidas variáveis aplicadas no trecho experimental. As deflexões de campo obtidas por meio do equipamento FWD, foram admitidas como deflexão admissível. Estes dados de deflexão devem ser ponderados, pois existem variáveis que interferem diretamente nos resultados.

Observa-se, por exemplo, que os valores médios de deflexão para o segmento com camada reciclada em 11 cm, são mais baixos do que os demais. Isso pode ser devido à influência do módulo da estrutura remanescente, que em maior proporção na estrutura de 8 cm de camada reciclada, reduz consideravelmente o módulo do conjunto, e que na estrutura com 11 cm de camada reciclada, não é o bastante para reduzir da mesma forma. A diferença em relação ao segmento com camada reciclada em 15

cm pode estar justamente na ausência de camada remanescente, sendo o módulo integral da mistura reciclada.

Os valores finais de K (Tabela 9) também devem ser ponderados em função da deflexão antes, obtida por retroanálise, sendo estes resultados considerados estimativas.

Tabela 9 – Valores para o coeficiente K da mistura reciclada

Espessura de reforço (h)	Deflexão admissível aplicada		K
8 cm MS+8	$D_0 - \sigma$	60,8	29,0
	D_0	69,3	36,4
	$D_0 + \sigma$	77,7	47,0
11 cm MS+11	$D_0 - \sigma$	56,0	29,1
	D_0	61,2	32,3
	$D_0 + \sigma$	66,4	36,1
15 cm MS+15	$D_0 - \sigma$	57,9	35,6
	D_0	63,8	39,6
	$D_0 + \sigma$	69,7	44,0

Como resultado final, encontra-se valores entre 29 e 47, ambos os extremos presentes no segmento com camada reciclada em 8 cm, denotando a possível influência da variabilidade do módulo de camada remanescente (maior desvio padrão). Além disso, é possível que este segmento tenha apresentado maiores deflexões desde a restauração, por deficiência de drenagem percebida nos segmentos reciclados com cal, anteriormente mencionados.

O coeficiente K para concreto asfáltico, regularmente adotado como 40, seria próximo dos resultados de K para a mistura reciclada a frio, contudo estima-se que o comportamento das misturas recicladas seja intermediário entre concreto asfáltico e camada granular, conforme citado anteriormente. Desta forma, os resultados para o coeficiente K obtidos pela equação, não é indicativo do desempenho da mistura reciclada.

O raio de curvatura da bacia de deflexão é um parâmetro muito difundido no Brasil, como indicativo de desempenho do pavimento em função das medidas de deflexão. A fórmula utilizada para cálculo constante na norma DNER ME 024/94 considera a deflexão máxima e a deflexão a 25 cm do ponto de aplicação da carga. As medidas de deflexão do trecho experimental foram realizadas com equipamento FWD, cujos geofones de obtenção da bacia de deflexão estão distribuídos nas seguintes distâncias do ponto de

aplicação da carga: 0, 20, 30, 45, 65, 90 e 120 cm; assim, o valor para a distância de 25 cm, requerida na Eq. (3), é obtido por interpolação linear das medidas nas distâncias de 20 e 30 cm.

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} \quad (2)$$

Onde:

R = Raio de curvatura (metros)

D₀ = Deflexão medida no ponto de aplicação da carga (0,01 mm)

D₂₅ = Deflexão medida a 25 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm)

A PMSP também utiliza este parâmetro na análise e dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis (SIURB – IP 09). A Figura 30 mostra os resultados médios do raio de curvatura em quatro campanhas de deflexão, nos segmentos com camada de microrrevestimento (avaliação da camada reciclada, sem o efeito de camada de revestimento com incremento estrutural).

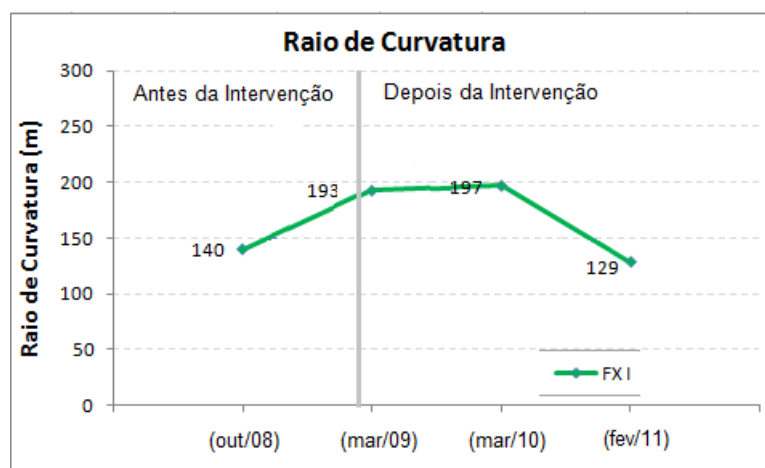


Figura 30 – Raio de curvatura médio nos segmentos com microrrevestimento em função de quatro campanhas de medidas de deflexão

Quanto maior o raio de curvatura, melhor é considerada a distribuição de cargas na estrutura. O método DNER PRO 11/79 define limite mínimo para este parâmetro em 100. Como tendência observada nas medidas de deflexão, o raio de curvatura tem um aumento significativo após a restauração, e durante a vida em serviço, os valores diminuem.

Observa-se que após um ano de vida em serviço, o raio de curvatura diminuiu, mas não se compara ainda à condição deteriorada observada antes da intervenção, apontando mais uma vez a possibilidade de colocação de camada de revestimento de maior espessura após um ano de tráfego atuante.

Em análise a partir das medidas de deflexão, foi utilizado para o cálculo do número N, o modelo de fadiga constante no método Pró 11/79, conforme equação 3.

$$N = 1,263 * 10^{17} * D^{-5,628} \quad (3)$$

Sendo:

N – número N equivalente de operações do eixo padrão;

D – a deflexão admissível, que no caso, foi substituída pela deflexão obtida imediatamente após a restauração e pela deflexão depois de um ano de tráfego atuante.

Tendo em vista que para os segmentos com camada reciclada em 15 cm, houve uma inversão nas medidas de deflexão média (março/2009 $63,8 \times 10^{-2}$ mm – e março/2010 – $54,5 \times 10^{-2}$ mm), o segmento não foi considerado no cálculo no número N (Tabela 10). Importante ressaltar que essa inversão não foi associada à deterioração do pavimento, mas ao fato de que foi instalado um dreno transversal no período entre as duas medidas, e que pode ter contribuído para melhor drenagem, reduzindo as deflexões, que poderiam ser menores quando da execução em março/2009, mas que foram afetadas novamente pela drenagem ineficiente.

Tabela 10 – Comparação entre número N atuante e número N admissível – Método Pro 11/79

Espessura Reciclada	Deflexão 0,01 mm	N adm Calculado	Deflexão 0,01 mm	N' adm após 1 ano	ΔN Calculado	N atuante Real (1 ano)
8 cm	68,2	$4,8 \times 10^6$	74,1	$3,0 \times 10^6$	$1,8 \times 10^6$	$1,6 \times 10^7$
11 cm	60,1	$9,9 \times 10^6$	63,6	$6,9 \times 10^6$	$3,0 \times 10^6$	$1,6 \times 10^7$

Sendo:

N *admissível* – o resultado obtido através da equação de fadiga com deflexão medida imediatamente após a conclusão dos trabalhos de restauração;

N' *admissível calculado* – o resultado obtido através da equação de fadiga com deflexão medida após um ano de tráfego atuante sobre a estrutura restaurada;

ΔN *calculado* – a diferença entre N e N' , que seria assim, o N admissível residual do pavimento, após um ano de tráfego atuante;

N atuante real – número N equivalente de operações do eixo padrão, calculado a partir da contagem do tráfego, durante o período de um ano a partir da restauração.

Os valores para cada parâmetro expõem inaplicabilidade de modelos de fadiga existentes e usuais de misturas convencionais. O modelo utilizado, já consagrado para misturas asfálticas convencionais, mais uma vez não traduz o desempenho da mistura reciclada a frio. O número N admissível para o pavimento novo foi superado pelo número N atuante, sem a deterioração funcional e estrutural prevista pelo modelo. O resultado contribui para a afirmação de que o comportamento da mistura reciclada estimada no coeficiente K e no número N, não pode ser correlacionado com materiais convencionais.

Também em análise a partir das medidas de deflexão, foi utilizado para o cálculo do número N, o modelo de fadiga constante no método Pró 269/94. O critério de fadiga constante no método definido pela Eq. (4) – espessuras menores do que 10 cm, e Eq. (5) – espessuras maiores do que 10 cm, foi utilizado para definição do número N admissível em função das deflexões medidas imediatamente após a intervenção, e após um ano da intervenção.

$$N = 5,548 \times 10^{16} \times D_0^{-5,219} \quad (esp < 10 \text{ cm}) \quad (4)$$

$$N = 3,036 \times 10^{13} \times D_0^{-2,922} \quad (esp > 10 \text{ cm}) \quad (5)$$

Sendo:

D = Deflexão medida no pavimento reciclado

N = Número de solicitações admissíveis para a deflexão medida

Utilizando os mesmos dados de deflexão que foram aplicados no item 5.4.1.1 para estimativa de vida remanescente por meio do método DNER PRO 11/79, obtiveram-se os resultados constantes na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação de vida útil baseada nas deflexões e do N atuante real no ano de 2009 – Método PRO 269/94

Espessura Reciclada	Deflexão 0,01 mm	N adm Calculado	Deflexão 0,01 mm	N' adm após 1 ano	Δ N Calculado	N atuante Real (1 ano)
8 cm	68,2	$9,7 \times 10^6$	74,1	$6,3 \times 10^6$	$3,4 \times 10^6$	$1,6 \times 10^7$
11 cm	60,1	$3,2 \times 10^6$	63,6	$2,6 \times 10^6$	$0,6 \times 10^6$	$1,6 \times 10^7$

Sendo:

N admissível – o resultado obtido através da equação de fadiga com deflexão medida imediatamente após a conclusão dos trabalhos de restauração;

N' admissível calculado – o resultado obtido através da equação de fadiga com deflexão medida após um ano de tráfego atuante sobre a estrutura restaurada;

ΔN calculado – a diferença entre N e N', que seria assim, o N atuante no pavimento, após um ano de tráfego atuante;

Embora o método de dimensionamento para restauração de estruturas PRO 269/94 contemple a possibilidade de reciclagem como solução de restauração, o método foi concebido para estrutura padrão de pavimento flexível (camada asfáltica + camada granular + subleito), com ponderação sobre a espessura reciclada (maior ou menor do que 10 cm). Os resultados relativos ao dano sofrido no primeiro ano se revelaram muito diferentes dos dados reais de tráfego atuante, revelando que o critério de fadiga do método, é inadequado para estas misturas recicladas.

A estimativa de vida de fadiga do material foi diretamente afetada pelos problemas já citados que ocorreram durante o desenvolvimento desta pesquisa, sendo impossível separar os efeitos. Em condições adequadas, sem ocorrências de anormalidades, a vida útil da mistura reciclada pode ser estimada em 8 anos, com camada selante de revestimento.

6.8.7 CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A técnica de reciclagem a frio in situ com uso de emulsão polimerizada que foi alvo desta pesquisa, apresentou uma série de vantagens e ainda indicou pontos que devem ser controlados para o sucesso da restauração de pavimentos asfálticos por meio deste processo. A aplicação da reciclagem e rodovias com elevado volume de tráfego, como a Rodovia Régis Bittencourt, deve ser precedida de avaliações de condições estruturais e funcionais. Serão descritos a seguir, as principais vantagens e desvantagens observadas, bem como os principais indicativos de desempenho.

- A utilização dos materiais agregados deteriorados da pista, em uma mistura reciclada contribui em termos operacionais, agilizando os processos de restauração, com menores interferências nas áreas lindeiras e no elevado tráfego da Rodovia Régis Bittencourt. Adicionalmente, a mistura a frio, reduz o período de interrupção do tráfego.
- Os benefícios ambientais como a redução na exploração de jazidas para obtenção de agregados virgens, a redução na emissão de gases poluentes por uso de emulsão asfáltica e a destinação de materiais agregados deteriorados, no meio ambiente, foram de fato constatadas durante a prática da técnica de reciclagem.



- Os agregados fresados utilizados no processo de reciclagem apresentaram desempenho satisfatório, sem exigir adição de agregados virgens, e revelando uma faixa granulométrica bem graduada. Os grumos de asfalto envelhecido, aderidos aos agregados não tiveram suas propriedades rejuvenescidas, nem devem ser consideradas como contribuição ao teor ótimo de emulsão definido em projeto. Os grumos aderidos podem interagir com aditivos da mistura reciclada, e ainda afetar a adesividade entre os agregados e o ligante asfáltico, contudo novas pesquisas devem ser realizadas para a verificação do comportamento de misturas com diferentes aditivos.
- O uso de emulsão asfáltica modificada por polímero se mostrou em laboratório de modo qualitativamente superior a misturas que utilizaram emulsão convencional. Em campo, a emulsão proporcionou uma mistura facilitada e coesão inicial adequada da mistura reciclada. Futuras comparações em campo entre emulsões com e sem polímero, podem ajudar a mensurar o efeito da adição de polímero na vida de fadiga das misturas recicladas.
- A dosagem de misturas recicladas não possui regulamentação brasileira, e ainda enfrenta muitas divergências em muitos países, entretanto a aplicação de normas para misturas a frio nacionais se mostrou suficientemente adequada para a mistura reciclada a frio. Considerações a cerca da influência dos aditivos, dos grumos de asfalto e da variabilidade do material deverão ser adotadas em processos de dosagem específicos para misturas recicladas a frio.
- As misturas recicladas a frio apresentam um padrão de desempenho diferente de misturas convencionais, não sendo possível prever sua vida de fadiga através dos mesmos parâmetros utilizados na determinação de misturas convencionais. Por esta razão, a alocação da mistura reciclada na estrutura necessita de estudos mais extensos que contemplem parâmetros de dimensionamento de projeto, que deverão ser estudados na fase II desta pesquisa.
- As deflexões obtidas durante o período de avaliação do trecho experimental se mostram como parâmetro mais significativo na determinação do desempenho do pavimento. As características dos pavimentos candidatos à restauração por meio de reciclagem devem preponderar sobre a avaliação estrutural por meio de deflexões. Os segmentos que receberam reciclagem com adição de cal apresentaram defeitos principalmente atribuídos ao conjunto de drenagem deficiente e de altas deflexões antes da intervenção, revelando condição estrutura previamente comprometida. Os projetos de dimensionamento devem considerar a deflexão como fator determinante; deflexões que quando muito elevadas devem exigir reparos em outras camadas, além do revestimento.
- A variação no aditivo da mistura reciclada entre cal e cimento, não pode ser conclusiva, devido aos defeitos apresentados nos segmentos com cal, já mencionados. O cimento contribuiu para a



resistência inicial da mistura, e em conjunto com o fator da cura, contribuiu para o aumento da rigidez da camada reciclada com o tempo. Observou-se que a distribuição de cimento deve ser cuidadosa em relação à espessura da camada reciclada, preservando o teor adotado em projeto.

- A variação na espessura da camada reciclada mostrou que é possível reciclar espessuras menores do que a espessura total do revestimento, no entanto devem ser feitas avaliações das condições da estrutura remanescente, e ainda das espessuras de ambas as camadas, a fim de evitar a manutenção de camadas muito deterioradas que podem diminuir a vida útil do processo de reciclagem.
- A espessura de camada reciclada em 8 cm revelou eficiência no que concerne a conter a reflexão de trincas, por comparação ao segmento referência, fresado em 5 cm, que se mostrou incapaz de conter o trincamento. No caso de camadas remanescentes mais integras e com maior resistência estrutural, pode-se optar por fresar espessuras menores do que 70% da camada, à título de verificação de desempenho, não sendo este o caso do trecho experimental.
- A espessura de camada reciclada em 11 cm apresentou deflexões coerentes, com bom desempenho e significativa redução nas deflexões. As camadas recicladas em 15 cm, entretanto, apresentaram alguns defeitos que podem ser atribuídos à dificuldade de compactação, não sendo indicado o uso de camadas mais robustas, sob a possibilidade da mistura não atingir a coesão indicada. Para todas as espessuras é necessário garantir a aderência entre as camadas recicladas e adjacentes por meio de pintura de ligação.
- O uso de camada selante em microrrevestimento mostrou-se bastante adequado à finalidade de proteger a camada reciclada. Apesar de não representar incremento estrutural a camada de microrrevestimento protege a camada reciclada, permitindo programas de manutenção em etapas, de modo que camadas de material mais nobre possam ser aplicadas posteriormente.
- Os segmentos que receberam camada de revestimento em concreto asfáltico delgado revelaram maiores reduções nas deflexões sendo, portanto mais indicado para rodovias com elevados volumes de tráfego. Entretanto o uso de camada em concreto asfáltico não garante que a estrutura seja menos sensível presença da água, no caso de drenagem deficiente.
- Os sistemas de drenagem tiveram influência significativa no desempenho da técnica de reciclagem e afetaram toda a análise dos resultados. A presença de água não drenada é danosa aos pavimentos asfálticos, independente do tipo da mistura asfáltica; contudo a mistura reciclada a frio apresenta maior sensibilidade do que misturas asfálticas convencionais, por apresentar menor coesão e adesividade, justamente por ser produzida a frio. A drenagem foi observada como

principal fator de interferência no processo, revelando que a mistura é sensível à presença de água e que o sucesso da técnica depende diretamente do controle deste fator.

- Observou-se também que as condições do acostamento são importantes, pois colaboram com o sistema de drenagem das águas que saturam a estrutura do pavimento. Acostamentos com elevado trincamento devem ser tratados, de modo a impedir o acesso da água à estrutura toda do pavimento.

A técnica de reciclagem a frio in situ com uso de emulsão modificada por polímero mostrou que é eficiente para a restauração de pavimentos asfálticos deteriorados. Os problemas encontrados durante o desenvolvimento da pesquisa e os fatores que afetaram o desempenho do pavimento são fundamentais para a compreensão dos processos envolvidos na aplicação da reciclagem. Outros estudos devem ser conduzidos seguindo os critérios apontados nesta pesquisa, para que se obtenha informações mais conclusivas a cerca do dimensionamento de estruturas com camadas recicladas, da interação de camadas recicladas com diferentes estruturas e da vida de fadiga da mistura reciclada.

Os problemas encontrados durante a realização da pesquisa interferiram integralmente nos resultados de previsão de vida de fadiga, no entanto são uteis para apontar pontos de controle fundamentais para o sucesso da técnica:

- Sistema de drenagem deve ser executado previamente à restauração
- Deflexões muito altas devem ser investigadas, e podem ser indicativos de drenagem deficiente ou capacidade de suporte comprometida das camadas subjacentes, o que contra indica a aplicação da reciclagem;
- Adição de cimento contribui para o aumento de resistência inicial e deve ser aplicado com controle eficiente de distribuição, considerando a espessura da camada;
- O acostamento trincado deve receber tratamento que impeça o acesso da água por meio desses trincamentos existentes;
- A camada remanescente precisa ser investigada quando forem fresadas espessuras menores do que a maior espessura da camada, pois quando há trincamento, este pode refletir na camada reciclada, reduzindo a vida útil.

A previsão de vida útil através de formulações existentes não pode ser aplicada para misturas recicladas. A vida útil da mistura deve ser avaliada em função da fadiga do material, sendo impossível fazer a previsão quando outros fatores geram defeitos significativos como ocorreu nesta pesquisa. Entretanto, os dados

gerados são importantes para o desenvolvimento de novas pesquisas, para que o sucesso da aplicação permita verificar o desempenho da mistura até a fadiga do material reciclado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 292-91. American Association of State Highway and Transportation Officials - Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils and Untreated Base/Subbase Materials.

ARRA – Asphalt Recycling and Reclaiming Association. Basic Asphalt Recycling Manual. p. 269, 2001.

DNER-ME-107/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Mistura Betuminosa a frio com emulsão asfáltica - Ensaio Marshall., 1994.

DNER-ME-133/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Determinação do módulo de resiliência - misturas betuminosas., 1994.

DNER-ME-383/99. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cantabro. 1999.

DNER-PRO 011/79. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis - Procedimento B. 1979.

DNER-PRO 269/94. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV. 1994.

LOIZOS, A. Aspects Concerning Field Curing Criteria for Cold-In Place Asphalt Pavement Recycling. Transportation Record Board, 2008.

MOREIRA, H. S. Comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio com diferentes teores de agregado fresado incorporado e diferentes modos de compactação. 2005. (Dissertação de mestrado). Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza.

PINTO, S. Tópicos especiais em mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro, RJ: COPPE/ UFRJ, 1989.

SILVA, A. H.M. Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero. 2011. (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.