



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

PROJETO DE PESQUISA LTP-PTR-EPUSP/CONCESSIONÁRIA NOVA DUTRA

INTERESSADO: CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA PRESIDENTE DUTRA S.A., COM RECURSOS PARA DESENVOLVIMENTO TECNÓLOGICOS (RDT) DA AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT)

EXECUTOR: LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DE PAVIMENTAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (LTP-PTR-EPUSP), POR MEIO DA FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (FUSP)

RT-360/10.12.2010 (rev10012011)

**MISTURAS ASFÁLTICAS PARA REVESTIMENTOS DE
PAVIMENTOS PRODUZIDAS COM BAIXA ENERGIA E REDUÇÃO
DE TEMPERATURA, PARA DIMINUIÇÃO DE CONSUMO
ENERGÉTICO E DE EMISSÃO DE POLUENTES**

(Referente à Proposta USP/Nova Dutra de 12.12.2008)

Relatório Técnico Final

Dezembro 2010



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

Executado pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP-PTR-EPUSP) para a Concessionária Nova Dutra através da Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP)

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

(Referente à Proposta USP/Nova Dutra de 12.12.2008)

Relatório Técnico Final - Dezembro 2010

RT-360/10.12.2010 (rev. 10012011)

RESUMO

O presente Relatório Técnico Final apresenta os resultados de todas as atividades desenvolvidas pela equipe técnica do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-PTR-EPUSP) ao longo da pesquisa intitulada “*Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes*”.

Palavras-chave: Rodovia Presidente Dutra; misturas asfálticas; misturas asfálticas de baixa energia, misturas asfálticas mornas.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 Tipos de misturas de baixa energia	10
1.2 Objetivo da pesquisa	14
2. ESTUDO LABORATORIAL	16
2.1 Materiais.....	16
<i>2.1.1 Mistura asfáltica com CAP 50-70 e agregados Pedreira Santa Isabel.....</i>	<i>17</i>
<i>2.1.2 Mistura asfáltica com CAP 30-45 e agregados Pedreira Serveng Barueri</i>	<i>19</i>
2.2 Métodos	22
<i>2.2.1 Volume de vazios (habilidade de compactação)</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2 Deformação permanente em trilha de roda</i>	<i>23</i>
<i>2.2.3 Resistência à tração por compressão diametral.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.4 Dano por umidade induzida</i>	<i>26</i>
2.3 Resumo dos experimentos laboratoriais.....	27
2.4 Resultados	29
<i>2.4.1 Volume de vazios (habilidade de compactação)</i>	<i>29</i>
<i>2.4.2 Deformação permanente</i>	<i>30</i>
<i>2.4.3 Resistência à tração por compressão diametral.....</i>	<i>31</i>
<i>2.4.4 Dano por umidade induzida</i>	<i>32</i>
3. TRECHO EXPERIMENTAL	34
3.1 Levantamento das condições iniciais do pavimento	34
<i>3.1.1 Deflexões</i>	<i>34</i>
<i>3.1.2 QI e IRI</i>	<i>35</i>
<i>3.1.3 Defeitos</i>	<i>37</i>
3.2 Dosagem da mistura morna.....	38
3.3 Produção da mistura morna em usina e aplicação em campo	39
3.4 Estimativa de economia de energia e de custos	41
3.5 Ensaios laboratoriais com a massa asfáltica coletada em usina	44
<i>3.5.1 Granulometria.....</i>	<i>44</i>
<i>3.5.2 Teor de ligante.....</i>	<i>45</i>



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

3.5.3 Ponto de amolecimento	45
3.5.4 Penetração	46
3.5.5 Viscosidade	47
3.5.6 Volume de vazios (<i>habilidade de compactação</i>)	48
3.5.7 Deformação permanente em trilha de roda	49
3.5.8 Dano por umidade induzida	50
3.6 Controle tecnológico	51
3.6.1 Volume de vazios e espessura da camada logo após a obra	51
3.6.2 Volume de vazios e espessura da camada após um mês	52
3.6.3 Resistência à tração por compressão diametral após um mês	53
3.6.4 Verificação dos vazios, das deflexões e das condições superficiais do pavimento após três meses.....	54
3.6.5 Verificação das deflexões após oito meses	57
4. CONCLUSÕES.....	59
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
6. EQUIPE TÉCNICA DO LTP-PTR-EPUSP	65



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de classificação das misturas asfálticas com a temperatura de usinagem	11
Figura 2. Distribuição granulométrica – Agregados Sta. Isabel	18
Figura 3. Distribuição granulométrica – Agregados Serveng Barueri	21
Figura 4. Pesagem hidrostática para determinação da habilidade de compactação	23
Figura 5. Compactação na mesa compactadora francesa do LTP-EPUSP	24
Figura 6. Simulador de tráfego francês do LTP-EPUSP.....	25
Figura 7. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	26
Figura 8. Condicionamento no ensaio de dano por umidade induzida	27
Figura 9. Esquema-resumo da primeira etapa laboratorial,	28
Figura 10. Esquema-resumo da segunda etapa laboratorial,.....	28
Figura 11. Volume de vazios (habilidade de compactação).....	29
Figura 12. Deformação permanente em trilha de roda.....	30
Figura 13. Resistência à tração por compressão diametral	32
Figura 14. Resistência Retida à Tração após dano por umidade induzida	33
Figura 15. Valores iniciais de deflexão (por FWD) no km do trecho experimental	35
Figura 16. Valores iniciais de QI e IRI no km do trecho experimental	36
Figura 17. Croqui da localização da intervenção, no quilômetro de localização do trecho experimental	37
Figura 18. Caminhão ao bascular na vibroacabadora	39
Figura 19. Detalhe da massa asfáltica dentro do silo da vibroacabadora.....	39
Figura 20. Espalhamento da massa asfáltica morna em pista	40
Figura 21. Compactação por pneus seguindo logo atrás da vibroacabadora	40
Figura 22. Detalhe da compactação com rolo de pneus próxima à vibroacabadora	40
Figura 23. Detalhe da compactação com rolo de chapa.....	40
Figura 24. Detalhe da segregação da massa asfáltica.....	41
Figura 25. Amostra vinda da usina submetida à estufa em laboratório	44
Figura 26. Quarteamento da massa asfáltica morna da usina, em laboratório	44
Figura 27. Curva granulométrica após a extração por Abson da mistura morna de usina.....	45
Figura 28. Ponto amolecimento médio do ligante após a extração por Abson da mistura morna de usina	46



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

Figura 29. Penetração média do ligante após a extração por Abson da mistura morna de usina..	47
Figura 30. Viscosidade média do ligante após a extração por Abson da mistura morna de usina	48
Figura 31. Volume de vazios Marshall com a mistura morna de usina	49
Figura 32. Deformação permanente em trilha de roda da mistura morna de usina.....	49
Figura 33. Resistência Retida à Tração no ensaio de dano por umidade induzida da mistura morna de usina	50
Figura 34. Croqui da localização de extração de corpos-de-prova	51
Figura 35. Corpos-de-prova da pista rompidos por compressão diametral.....	54
Figura 36. Levantamento de deflexões com viga Benkelman após três meses.....	55
Figura 37. Levantamento de deflexões com viga Benkelman após oito meses	57
Figura 38. Levantamento de deflexões com FWD, em três intensidades de carga, antes e após oito meses da obra.....	58



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Algumas tecnologias de misturas asfálticas de baixa energia existentes atualmente....	13
Tabela 2. Caracterização do CAP 50-70	17
Tabela 3. Parâmetros na dosagem Marshall.....	18
Tabela 4. Temperaturas das misturas asfálticas	19
Tabela 5. Caracterização do CAP 30-45 da REDUC e da REPLAN.....	20
Tabela 6. Parâmetros na dosagem Marshall.....	21
Tabela 7. Temperatura das misturas asfálticas.....	22
Tabela 8. Classificação das condições de superfície no Manual de Restauração do DNIT (2006)	36
Tabela 9. Levantamento de defeitos do km 225 a 226, pista expressa sul, faixa 1, da Rodovia Presidente Dutra.....	37
Tabela 10. Parâmetros para produção de mistura morna em usina para o trecho experimental ...	38
Tabela 11. Hipóteses adotadas no cálculo de economia de energia na usinagem.....	42
Tabela 12. Estimativa do gasto energético em usina para secagem e aquecimento dos agregados na produção de 160 t de mistura morna do trecho experimental	43
Tabela 13. Controle de compactação e espessura da camada de revestimento da obra.....	52
Tabela 14. Controle de compactação e espessura um mês após a obra	53
Tabela 15. Controle de compactação após três meses de obra.....	55
Tabela 16. Levantamento das condições de aderência da superfície do pavimento, segundo Pêndulo Britânico (PB) e Mancha de Areia (MA).....	56
Tabela 17. Resultados do levantamento com o Merlin - Valores de IRI e de QI obtidos.....	57



1. INTRODUÇÃO

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

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC), uma das grandes preocupações com tais impactos se deve ao aumento da temperatura média global do planeta, que deve ser ainda maior no futuro (em torno de 2 a 4,5°C até o final do século, segundo o CGEE, 2008), sendo este aquecimento geralmente associado às emissões acumuladas de gases de efeito estufa (GEE).

No Brasil a vulnerabilidade climática pode se manifestar em forma de aumento da frequência e intensidade de enchentes e secas; perdas na agricultura e ameaças à biodiversidade; mudança do regime hidrológico, com impactos sobre a capacidade de geração hidrelétrica; expansão de vetores de doenças endêmicas e elevação do nível do mar que podem afetar regiões da costa brasileira, em especial as metrópoles litorâneas (CGEE, 2008). Sendo assim, é importante que as emissões de GEE sejam reduzidas.

Dentro deste contexto, diversos países se comprometeram em reduzir as emissões de GEE em 5,2% entre os anos de 2008 e 2012 (considerando-se os níveis de 1990) com o advento do Protocolo de Quioto (UNFCCC, 2005). Entretanto, como muitos países industrializados teriam dificuldades em cumprir estas metas estabelecidas naquele documento foram propostos mecanismos de flexibilização, dentre os quais os mercados de carbono. Neste sistema, a redução das emissões de GEE pode ser comercializada por meio dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER) dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, sendo que cada CER representa uma tonelada de dióxido de carbono equivalente. Resumidamente, as cotas de carbono não emitidas ou retiradas da atmosfera por determinada empresa de um país em desenvolvimento podem ser vendidas, como créditos de carbono, às empresas de países que tenham metas de diminuição (CONEJERO, 2006).

Neste sentido, no âmbito rodoviário tem sido colocado um novo desafio para os órgãos gestores e responsáveis por obras: redução de problemas ambientais causados pelas obras de



pavimentação asfáltica de modo a assegurar um desenvolvimento sustentável. Uma das formas de reduzir os impactos indesejáveis é a diminuição do consumo energético e de emissão de poluentes na atmosfera, seja durante a produção das misturas ou no momento da execução de camadas de revestimentos asfálticos. Estas iniciativas, além de reduzirem os impactos ambientais, podem possivelmente ser convertidas em créditos de carbono.

No final da década de 90, quando a União Européia procurava integrar a pavimentação aos seus projetos de cumprimento às metas do Protocolo de Quioto, deu-se início na Alemanha ao programa *Low Temperature Asphalt*. Surgiram assim as misturas asfálticas de baixa energia, também chamadas de misturas mornas ou meiomornas (em inglês, *warm mixes asphalt* e *half-warm mixes*, respectivamente). Este nome deve-se ao fato destas misturas serem fabricadas e compactadas em temperaturas inferiores às das tradicionais misturas à quente, com reduções que podem ser de cerca de 20°C a 50°C, dependendo do tipo de tecnologia utilizada. Desde então, diversos produtos e processos para a redução da temperatura de misturas a quente vem sendo desenvolvidos, tanto na Europa quanto nos Estados Unidos (NEWCOMB, 2007).

As misturas de baixa energia são produzidas e aplicadas em temperaturas inferiores às das tradicionais misturas asfálticas a quente, reduzindo-se assim a energia utilizada no processo e, consequentemente, diminuindo a emissão de poluentes tanto em usina quanto em campo. Esta redução pode ser da ordem de 30 a 40% de CO₂ e SO₂ (ligado aos GEE e às chuvas ácidas), 50% de compostos orgânicos voláteis (precursores do ozônio e associados aos HPAs), 10 a 30% de CO (indicadores de eficiência de queima), 60 a 70% de NO_x (precursor de ozônio) e 20 a 25% de particulados (FHWA, 2008). Desta forma, é possível que o emprego de misturas de baixa energia possa ser inserido em um projeto para a obtenção de créditos de carbono, o que segundo Olard (2008) poderia ser mais um fator competitivo para estes materiais.

Ademais, outra vantagem igualmente importante atribuída ao uso de misturas de baixa energia é a redução dos gastos com combustíveis devido ao menor uso de energia, com economia que pode variar entre 11 e 35%, dependendo da técnica empregada (FHWA, 2008).



Mas embora os maiores atrativos das misturas mornas sejam, a princípio, reduzir emissões e custos, outros benefícios também têm sido associados à redução de temperatura, como menor envelhecimento por oxidação sofrido pelo ligante asfáltico, redução do tempo de usinagem, possibilidade de se incorporar maior quantidade de material fresado em reciclagem de revestimentos asfálticos e redução do tempo para liberação ao tráfego.

Por outro lado, o decréscimo de temperatura traz também um benefício que é de difícil mensuração que é a melhoria do ambiente de trabalho dos operários de pavimentação, não só pela menor exposição aos fumos de asfalto, mas também pelo ambiente de trabalho com temperatura mais amena.

Mas pelo fato de se tratar de uma tecnologia relativamente recente, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com esta nova tecnologia, principalmente com a finalidade de estudar seu comportamento e desempenho em campo e comparar com as misturas a quente convencionais. A princípio, o objetivo a ser perseguido tem sido reduzir a temperatura de usinagem (e consequentemente a de compactação) sem perder a trabalhabilidade e a durabilidade.

Desta forma, esta pesquisa pode contribuir neste sentido, principalmente porque contempla uma aplicação real em campo, com a execução e monitoramento de um trecho experimental.

1.1 Tipos de misturas de baixa energia

Os diferentes tipos de misturas asfálticas vêm sendo classificados de acordo com a temperatura empregada em sua produção/aplicação, sendo variável a energia consumida no processo. A Figura 1 ilustra, de maneira esquemática, esta divisão por classes considerando as temperaturas de usinagem.

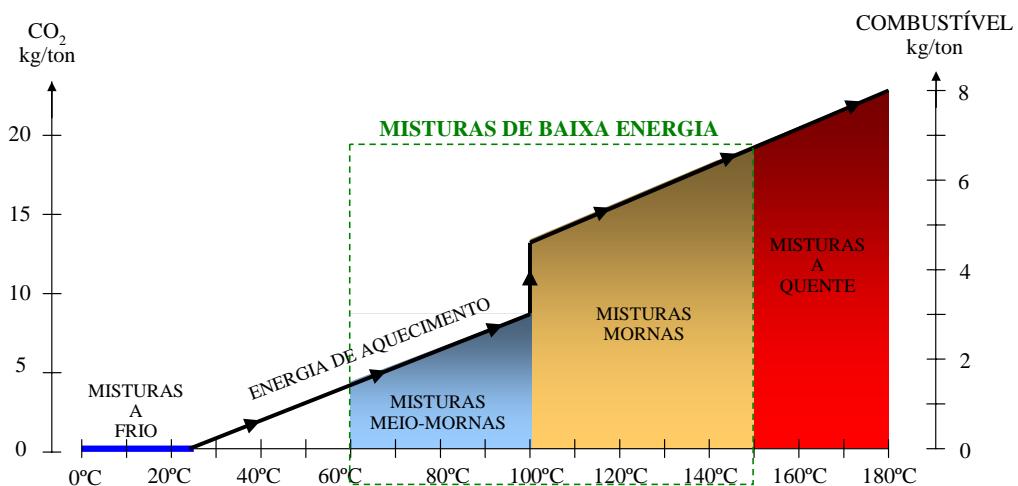


Figura 1. Esquema de classificação das misturas asfálticas com a temperatura de usinagem adaptado de (OLARD, 2008; FHWA, 2008)

Como representado na Figura 1, as misturas asfálticas podem ser divididas basicamente em quatro grupos: a frio, meiomornas, mornas e a quente, sendo consideradas de baixa energia as misturas meiomornas e mornas.

As misturas asfálticas a frio normalmente são produzidas e aplicadas à temperatura ambiente. Já as misturas meiomornas apresentam-se em temperaturas inferiores à vaporização da água, ou seja, entre 60 e 100°C, enquanto que nas mornas as temperaturas se situam entre 100 e 150°C. As misturas meiomornas diferenciam-se das mornas quanto à temperatura final de usinagem: acima de 100°C a mistura é considerada morna (FHWA, 2008). Por fim, as misturas asfálticas a quente usualmente são produzidas e aplicadas entre 150 e 180°C.

Normalmente, o emprego de elevadas temperaturas na usinagem e compactação de misturas asfálticas a quente tem dois objetivos: i) retirar a água contida nos agregados antes da usinagem, uma vez que a água remanescente nos agregados pode ficar “aprisionada” quando o ligante os recobre e, assim, criar uma área com potencial para haver descolamento entre o filme asfáltico e o material pétreo (efeito *stripping*), podendo causar desagregação do pavimento; ii) reduzir a viscosidade do ligante para sua melhor trabalhabilidade, devendo a viscosidade do asfalto ser tal que este possa ser bombeado em usina e possa recobrir os agregados de maneira adequada.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

Desta forma, as tecnologias disponíveis atualmente para produzir misturas de baixa energia basicamente consistem em: (i) empregar aditivos químicos que melhoram o recobrimento e a adesividade na mistura asfáltica; (ii) empregar aditivos orgânicos (ceras parafínicas) que alteram a viscosidade do asfalto; (iii) produzir uma espuma com o asfalto aquecido pela inserção de água e/ou aditivos com água em sua composição.

De maneira geral, a redução de temperatura na usinagem de misturas mornas é realizada através da diminuição da temperatura dos agregados, mantendo-se a temperatura usual do ligante asfáltico. A Tabela 1 apresenta algumas destas técnicas existentes no mercado nos dias de hoje.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

Tabela 1. Algumas tecnologias de misturas asfálticas de baixa energia existentes atualmente

Produto	Empresa	Processo
Gemul XT14	Quimigel	Aditivos químicos líquidos que funcionam como melhoradores de recobrimento e de adesividade. Geralmente inserido ao ligante em taxas de 0,2 a 0,5% (em massa de asfalto). Redução de temperatura de cerca de 30°C.
CECABASE RT®	Arkema Group	
Rediset WMX	Akzo Nobel	Aditivo químico em pastilhas que funciona como melhorador de recobrimento e de adesividade. Geralmente inserido ao ligante em taxas de 1 a 2% (em massa de asfalto). Redução de temperatura de cerca de 30°C.
Evotherm™	Mead-Westvaco	Emulsão com elevado teor de resíduo asfáltico com “pacote químico” (aditivos melhoradores de recobrimento, adesividade e trabalhabilidade). Taxa de aditivos de aproximadamente 0,5% (em massa de emulsão). Redução de temperatura de cerca de 40°C.
Sasobit®	Sasol	Aditivo orgânico (cera parafínica) capaz de alterar a viscosidade do ligante. Pode ser inserido ao asfalto ou à mistura, geralmente em taxa de 3% (em massa de ligante). Redução de temperatura de cerca de 30°C.
Aspha-Min®	Eurovia	Aditivo em forma de zeólitas sintéticas (possuem grande quantidade de água que é liberada à medida que são aquecidas). Efeito de asfalto espumado, permitindo trabalhabilidade por um período de 6 a 7 horas, quando a temperatura já terá caído a 100°C aproximadamente. Geralmente inserido em taxa de 0,3% (em massa de mistura). Redução de temperatura de cerca de 30°C.
Terex®	Terex Roadbuilding	Asfalto espumado. A usina deve ser adaptada para a colocação de um tanque de água e de uma caixa de expansão. Redução de temperatura de cerca de 30°C.
WAM-Foam®	Kolo Veidekke, Shell Bitumen e BP	Asfalto espumado. A usina deve ser adaptada. Uso de dois tipos de asfalto (viscosidades diferentes) e água em taxa de 1 a 5%. Pode ser inserido aditivo melhorador de adesividade ou agente surfactante para auxiliar no espumejo. A mistura asfáltica sai com temperatura entre 100 e 120°C.
LEA®	LEA-CO e McConnaughay Technologies	Asfalto espumado. A usina deve ser adaptada. Há a adição de aditivos melhoradores de recobrimento e de adesividade ao ligante, em taxa de cerca de 0,2 a 0,5% (em massa de asfalto). A mistura asfáltica é usinada abaixo de 100°C (mistura semimorna).



1.2 Objetivo da pesquisa

O objetivo desta pesquisa é introduzir no Brasil em uma concessionária de rodovias, no caso a Concessionária NovaDutra do grupo CCR, a técnica de redução de energia de usinagem e redução de emissões de poluentes para a produção e execução de misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos de modo a reduzir impactos ambientais decorrentes de novas obras de pavimentação ou de restauração em pavimentos asfálticos, o que pode até vir a ser introduzido em um projeto para comercialização de créditos de carbono.

Para tanto, procura-se avaliar em laboratório o comportamento de um tipo de mistura morna, comparando-o com o de uma mistura a quente convencional com os mesmos materiais, e apresenta-se a execução e o acompanhamento de um trecho experimental com tal mistura de baixa energia na Via Dutra.

Para a presente pesquisa foi escolhida uma tecnologia de mistura morna com aditivo químico surfactante, promotor de recobrimento e de adesividade.

Conforme o Plano de Trabalho inicial, esta pesquisa não deveria contemplar um estudo de custos relativo à mistura asfáltica morna, comparando-o com uma mistura convencional, entretanto será apresentada uma estimativa de custos e de economia de energia na fase de usinagem.

Na etapa laboratorial têm-se ensaios de caracterização dos materiais constituintes e de comportamento mecânico das misturas asfálticas. Tais testes foram realizados com a mistura de baixa energia e com uma mesma mistura em temperatura a quente convencional. São apresentados os resultados de volume de vazios (habilidade de compactação), deformação permanente, resistência à tração por compressão diametral e dano por umidade induzida.

A dosagem Marshall da mistura asfáltica quente convencional foi realizada pelo Método Marshall. O Plano de Trabalho inicial contemplava também a dosagem por prensa giratória (Superpave e PCG francesa), entretanto em estudos posteriores realizados em conjunto pelo LTP-EPUSP e as instituições LCPC e ESTP da França verificou-se que equipamentos giratórios conseguem diferenciar misturas asfálticas tão somente em função da granulometria e do teor e tipo de ligante, mas não de temperatura.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

A etapa de estudos laboratoriais foi iniciada com uma mistura asfáltica composta de CAP 50-70 e agregados provenientes da Pedreira Santa Isabel (SP). Entretanto, como o projeto de restauração do segmento em que se decidiu executar o trecho experimental contemplava o uso de materiais diferentes, passou-se então a trabalhar em laboratório com tais materiais, sendo CAP 30-45 e agregados oriundos da Pedreira Serveng Barueri (SP).

Como fase de campo têm-se a execução de um trecho experimental de mistura morna na Via Dutra, o controle tecnológico e o monitoramento de suas condições durante meses após a obra. São apresentados os resultados de levantamentos de deflexões (por viga Benkelman e FWD), controle tecnológico de vazios e espessura da camada, irregularidade (com perfilômetro laser e Merlin) e aderência (macro e microtextura por mancha de areia e pêndulo britânico). De maneira complementar são ainda apresentados os resultados laboratoriais referentes a ensaios de volume de vazios, deformação permanente e dano por umidade induzida realizados com a massa asfáltica morna preparada em usina para a aplicação no trecho experimental.



2. ESTUDO LABORATORIAL

2.1 Materiais

Os agregados pétreos e os ligantes asfálticos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa foram fornecidos ao LTP-EPUSP pela Concessionária NovaDutra, e são representativos dos materiais empregados nas obras de restauração da Rodovia Presidente Dutra.

O aditivo surfactante utilizado na produção das misturas mornas é comercialmente denominado Gemul XT14 e foi fornecido ao LTP-EPUSP pela empresa Quimigel. Este produto é um composto químico líquido, com base em amidas sintéticas, que é utilizado como agente tensoativo para ligantes durante as operações de fabricação de misturas asfálticas. A taxa empregada nesta pesquisa foi de 0,3% em massa de asfalto, sendo este aditivo incorporado ao ligante imediatamente antes da usinagem.

O laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Nova Dutra realizou a caracterização dos materiais pétreos e ligantes asfálticos empregados neste estudo, além das dosagens Marshall das misturas a quente convencionais. Já o LTP-EPUSP realizou os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas das misturas asfálticas mornas e quentes.

Cabe relembrar que, conforme mencionado anteriormente, este estudo foi iniciado com uma mistura asfáltica com CAP 50-70 e agregados Pedreira Sta. Isabel, sendo estes materiais posteriormente alterados para CAP 30-45 e agregados da Pedreira Serveng Barueri. Com isto, os resultados dos ensaios laboratoriais com ambas as misturas asfálticas serão apresentados em conjunto no presente Relatório Técnico Final, permitindo assim uma comparação de seus comportamentos mecânicos.



2.1.1 Mistura asfáltica com CAP 50-70 e agregados Pedreira Santa Isabel

Ligante asfáltico

O ligante asfáltico empregado nesta primeira etapa da pesquisa foi um CAP 50-70, originário da refinaria da Petrobras REVAP (São José dos Campos – SP), cujos resultados de caracterização são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização do CAP 50-70

Ensaio	Unidade	Norma	Resultado	Limites
Viscosidade Saybolt	135°C	s SF	185	141
	150°C		88	50
Furol	177°C		33	30 a 150
Penetração (25°C)	0,1 mm	NBR 6576	52	50 a 70
Ponto de amolecimento (mín.)	°C	NBR 6560	51	46
Índice de suscetib. térmica	-	ANP	-0,9	-1,5 a + 0,7
Densidade	g/cm ³	DNER ME 193	1,010	-

Agregados

Os agregados pétreos utilizados neste trabalho eram do tipo granito/gnaisse, provenientes da Pedreira Santa Isabel (localizada na Grande São Paulo).

Para composição da faixa granulométrica com diâmetro nominal máximo de 12,5 mm foram empregados 25% de brita 1/2, 30% de pedrisco, 33,5% de pó-de-pedra, 10% de areia artificial e 1,5% de cal CH-I, cuja massa específica destes materiais combinados resultou em 2,788 g/cm³ (pelo método do Instituto de Asfalto, 1989).

A curva de distribuição granulométrica, apresentada na Figura 2, era do tipo contínua e enquadrava-se na faixa “C” DNIT (DNIT 031/2006).

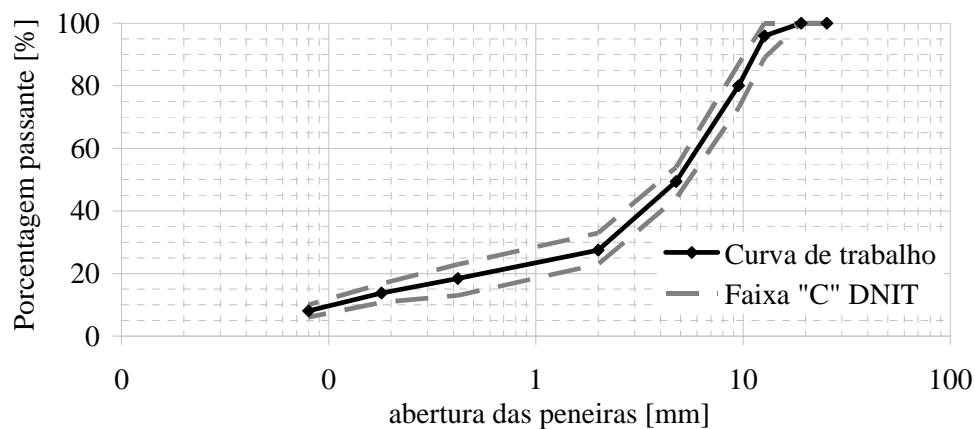


Figura 2. Distribuição granulométrica – Agregados Sta. Isabel

Dosagem Marshall

A dosagem da mistura asfáltica a quente de referência foi realizada pelo Método Marshall (DNER ME 043/95), com compactação em 75 golpes por face do corpo-de-prova, visando um volume de vazios de projeto de 4%. Os parâmetros obtidos nesta etapa são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros na dosagem Marshall

Parâmetro	Unidade	Norma	Resultado	Limites
Massa específica aparente da mistura compactada	g/cm ³	AASHTO T166	2,484	-
Massa específica máxima teórica	g/cm ³	Instituto de Asfalto	2,588	-
Volume de vazios	%	Instituto de Asfalto	4,0	entre 3 e 5
Vazios do agregado mineral	%	Instituto de Asfalto	13,9	mín. 14,0
Relação betume/vazios	%	-	71,2	entre 65 e 75
Resistência à tração por compressão diametral	MPa	DNIT ME138	1,91	mín. 0,6
Teor “ótimo” de asfalto	%	-	4,4	-



A dosagem da mistura morna foi considerada como sendo a mesma da mistura a quente.

Temperatura das misturas asfálticas

As temperaturas de usinagem e compactação da mistura a quente convencional foram determinadas pela viscosidade do ligante asfáltico (maneira usual), enquanto que para a mistura morna estabeleceu-se que a redução de temperatura seria da ordem de 30°C em relação àquela mistura a quente. A Tabela 4 apresenta as temperaturas empregadas em ambos os tipos de mistura asfáltica.

Tabela 4. Temperaturas das misturas asfálticas

	Temperatura [°C]	
	Mistura a quente	Mistura morna
Ligante	160	160
Agregados	170	115
Usinagem	150	115
Compactação	140	110

2.1.2 Mistura asfáltica com CAP 30-45 e agregados Pedreira Serveng Barueri

Ligante asfáltico

Nesta fase de pesquisa foi empregado um ligante asfáltico mais viscoso que na etapa inicial, sendo agora um CAP 30-45 proveniente da refinaria REPLAN da Petrobras (Paulínia – SP), embora o projeto da mistura de referência do CPR tenha sido executado com asfalto da REDUC (Duque de Caxias – RJ).



Na Tabela 5 são apresentados os resultados de caracterização do CAP 30-45 de Paulínia e de Duque de Caxias, onde é possível observar que ambos os ligantes mostraram características de consistência bastante semelhantes.

Tabela 5. Caracterização do CAP 30-45 da REDUC e da REPLAN

Ensaio	Unidade	Norma	Resultado		Limites
			REDUC	REPLAN	
Viscosidade Saybolt Furol	135°C	s SF	NBR 14950	245	- mín. 192
	150°C			115	- mín. 90
	177°C			40	- 40 a 150
Viscosidade Brookfield	135°C	cP	ASTM 4402	-	480 mín. 374
	150°C			-	238 mín. 203
	177°C			-	86 76 – 285
Penetração (25°C)	0,1 mm	NBR 6576	31	30	30 - 45
Ponto de amolecimento (mín.)	°C	NBR 6560	56	54	mín. 52
Densidade	g/cm ³	DNER ME 193	1,050	1,050	-

Agregados

Os agregados pétreos utilizados neste trabalho tinham origem granítica e eram provenientes da Pedreira Serveng Barueri (localizada na Grande São Paulo).

Para composição da faixa granulométrica com diâmetro nominal máximo de 12,5 mm foram empregados 14% de brita 1, 45% de pedrisco, 39,5% de pó-de-pedra e 1,5% de cal CH-I, cuja massa específica efetiva destes materiais combinados resultou em 2,685 g/cm³ (pelo método do Instituto de Asfalto, 1989).

A curva de distribuição granulométrica, apresentada na Figura 3, era do tipo contínua e enquadrava-se na faixa “C” DNIT (DNIT 031/2006).

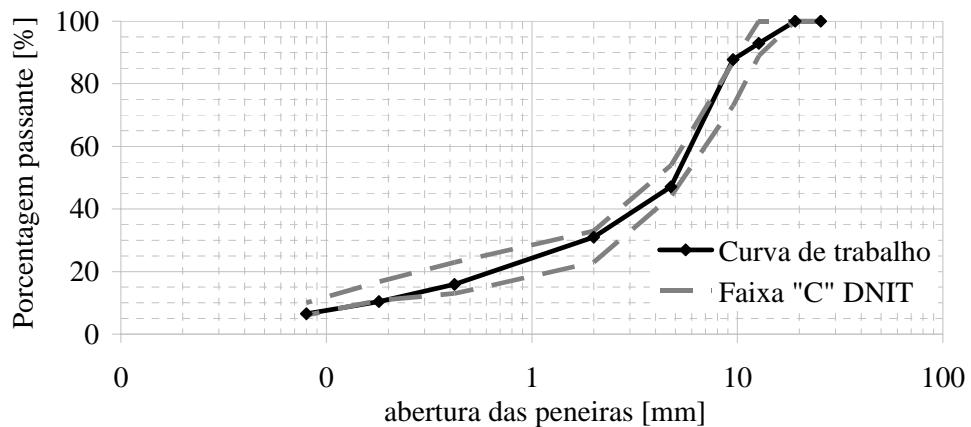


Figura 3. Distribuição granulométrica – Agregados Serveng Barueri

Dosagem Marshall

A dosagem da mistura asfáltica a quente de referência foi realizada pelo Método Marshall (DNER ME 043/95), com compactação em 75 golpes por face do corpo-de-prova, visando um volume de vazios de projeto de 4%. Os parâmetros obtidos nesta etapa são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros na dosagem Marshall

Parâmetro	Unidade	Norma	Resultado	Limites
Massa específica aparente da mistura compactada	g/cm ³	AASHTO T166	2,385	-
Massa específica máxima teórica	g/cm ³	Instituto de Asfalto	2,491	-
Volume de vazios	%	Instituto de Asfalto	4,2	entre 3 e 5
Vazios do agregado mineral	%	Instituto de Asfalto	15,1	mín. 14,0
Relação betume/vazios	%	-	1,4	entre 65 e 75
Resistência à tração por compressão diametral	MPa	DNIT ME138	2,1	mín. 0,6
Teor “ótimo” de asfalto	%	-	5,0	-



A dosagem da mistura morna foi considerada como sendo a mesma da mistura a quente.

Temperatura das misturas asfálticas

As temperaturas de usinagem e compactação da mistura a quente convencional foram determinadas pela viscosidade do ligante asfáltico (maneira usual), enquanto que para a mistura morna estabeleceu-se que a redução de temperatura seria da ordem de 25°C em relação àquela mistura a quente. A Tabela 7 apresenta as temperaturas empregadas em ambos os tipos de mistura asfáltica.

Tabela 7. Temperatura das misturas asfálticas

	Temperatura [°C]	
	Mistura a quente	Mistura morna
Ligante	160	160
Agregados	170	135
Usinagem	160	135
Compactação	150	125

2.2 Métodos

2.2.1 Volume de vazios (*habilidade de compactação*)

Segundo Brown et al. (2009), o volume de vazios em uma mistura asfáltica a quente provavelmente é o fator mais importante que afeta o desempenho de um concreto asfáltico ao longo da vida de serviço de um pavimento.

O volume de vazios está associado à maior ou menor densificação de uma mistura asfáltica, tendo relação com a trabalhabilidade do material. Esta trabalhabilidade, por sua vez,



tem relação com a temperatura, o que torna importante a verificação da habilidade de compactação em temperatura morna.

Neste estudo procurou-se observar esta habilidade de compactação por meio da determinação do volume de vazios por pesagem hidrostática de corpos-de-prova Marshall (Figura 4), segundo as especificações AASHTO T166 (2007) e ASTM D3203 (2005).

Por outro lado, tendo-se em mente que um aumento do teor de ligante pudesse influenciar na densificação da mistura asfáltica por aumentar a lubrificação do material (embora possa potencializar a deformação permanente), procurou-se também avaliar nesta pesquisa o volume de vazios das misturas mornas com um ligeiro aumento da quantidade de asfalto em sua composição, dentro do erro aceitável em usinas de asfalto no Brasil ($\pm 0,3\%$).



Fonte: Bernucci et al. (2008)

Figura 4. Pesagem hidrostática para determinação da habilidade de compactação

2.2.2 Deformação permanente em trilha de roda

Segundo Bernucci et al. (2007), o revestimento asfáltico pode contribuir com parcela significativa das deformações em trilha de roda de uma estrutura de pavimento, onde estes afundamentos podem decorrer da combinação de densificação adicional (devido à ação das cargas repetidas do tráfego) e de ruptura ao cisalhamento (fluência).

Nesta pesquisa o potencial para deformação permanente foi verificado por meio de ensaio em simulador de tráfego com corpos-de-prova em forma de placas (5 cm de espessura \times 18 cm de largura \times 50 cm de comprimento).



Como optou-se por avaliar as misturas mornas com teores de ligante ligeiramente acima daquele de projeto no ensaio de compactação, e isso poderia impactar negativamente no que se refere à deformação permanente, os ensaios para verificação do afundamento em trilha de roda também foram realizados com tais misturas de baixa energia mais ricas em ligante.

A moldagem das placas foi realizada em mesa compactadora francesa (Figura 5), segundo norma européia EN 12697-33 (2003a), onde a compactação da mistura asfáltica se dá por rolagem (como no campo), através de uma sequência de passagens de um pneu padronizado, com pressão variando entre 0,3 MPa e 0,6 MPa (3 e 6 bar).

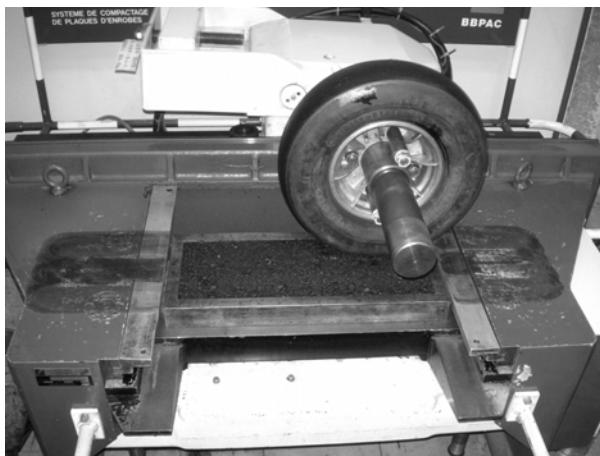


Figura 5. Compactação na mesa compactadora francesa do LTP-EPUSP

Já a simulação de tráfego também foi realizada em equipamento francês (Figura 6), de acordo com a especificação EN 12697-22 (2003b). Este equipamento é composto de um eixo com pneu sob pressão e carga reguláveis, normalizadas respectivamente em 6 bar e 5.000 N. O pneu rola em contato direto sobre a placa em ciclos (cada um correspondente a uma ida e uma volta, a uma freqüência de 1 Hz), gerando afundamentos progressivos que vão sendo lidos até 30.000 ciclos. Além disso, a fim de impor a condição mais desfavorável e acelerar a obtenção dos resultados, o ensaio é realizado a 60°C.



Figura 6. Simulador de tráfego francês do LTP-EPUSP

Sob estas condições é possível prever uma situação de deformação permanente ao longo de alguns anos em campo, podendo este tempo variar em função das condições de tráfego, número de solicitações e clima a que estará sujeito o pavimento.

Segundo recomendações européias, o afundamento em trilha de roda de revestimentos asfálticos densos sujeitos a tráfego pesado deve ser de no máximo 5% após 30.000 ciclos no simulador de tráfego francês. No Brasil também 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 este simulador no Brasil.

2.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

Segundo a especificação DNIT-ES 031 (2006), a resistência à tração por compressão diametral é um parâmetro que deve ser avaliado em concretos asfálticos densos.

Neste ensaio há a aplicação de um carregamento estático no sentido diametral de um corpo-de-prova Marshall a 25°C, que é levado até seu rompimento (Figura 7), conforme descreve a norma DNER-ME 138/94.



Figura 7. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Segundo a especificação do DNIT ES031 (2006), a resistência à tração a 25°C de misturas asfálticas a quente destinadas para camada de rolamento ou de *binder* deve ser de 0,65 MPa no mínimo.

2.2.4 Dano por umidade induzida

Com a redução de temperatura dos agregados no processo de usinagem das misturas mornas, é importante avaliar o impacto que uma eventual água residual possa provocar na mistura asfáltica. Assim, a avaliação do dano causado pela umidade em misturas asfálticas é de grande importância, uma vez que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos (Bernucci et al., 2007), podendo este ensaio ser realizado segundo a especificação AASHTO T283 (2007), também denominada de ensaio *Lottman* modificado.

Para tanto, devem ser utilizados corpos-de-prova Marshall compactados até um volume de vazios de $\pm 7\%$ (no mínimo seis corpos-de-prova em cada mistura, sendo três submetidos ao condicionamento à água e três de referência).

Na presente pesquisa optou-se pela situação de maior severidade neste teste, com congelamento dos corpos-de-prova em situação de condicionamento (Figura 8).



Figura 8. Condicionamento no ensaio de dano por umidade induzida

A especificação do DNIT ES031 (2006) determina-se que a resistência retida à tração de concretos asfálticos densos a quente deve ser superior a 0,7 (ou 70%), ou seja, a água deve impor à mistura asfáltica uma perda de resistência de no máximo 30%.

2.3 Resumo dos experimentos laboratoriais

Para melhor ilustração, a Figura 9 e a Figura 10 apresentam um esquema que resume as diferenças entre as misturas asfálticas estudadas na primeira e na segunda etapa laboratorial (com CAPs 50-70 e 30-45, respectivamente).



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

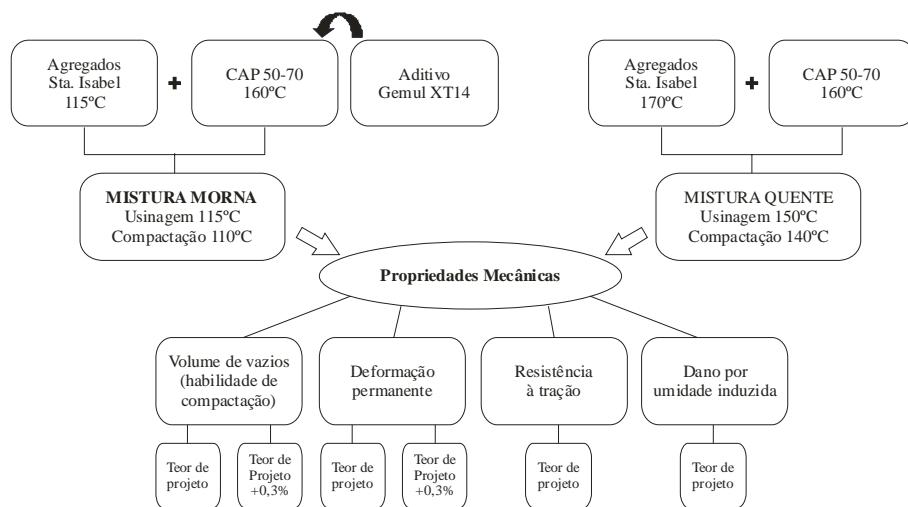


Figura 9. Esquema-resumo da primeira etapa laboratorial, com CAP 50-70 e agregados Sta. Isabel

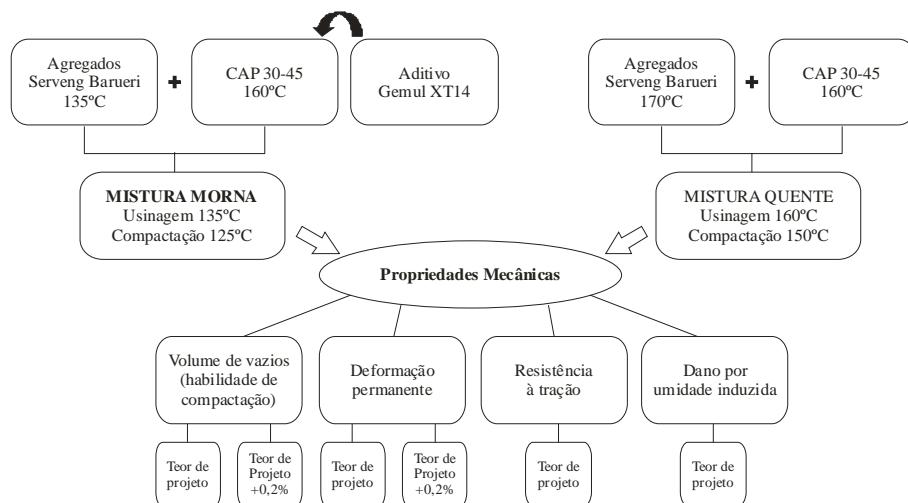


Figura 10. Esquema-resumo da segunda etapa laboratorial, com CAP 30-45 e agregados Serveng Barueri



2.4 Resultados

2.4.1 Volume de vazios (*habilidade de compactação*)

A Figura 11 apresenta os resultados de volumes de vazios das misturas asfálticas quentes e mornas, com os diferentes CAPs e agregados utilizados. Cabe mencionar que as temperaturas indicadas se referem àquelas empregadas para a compactação.

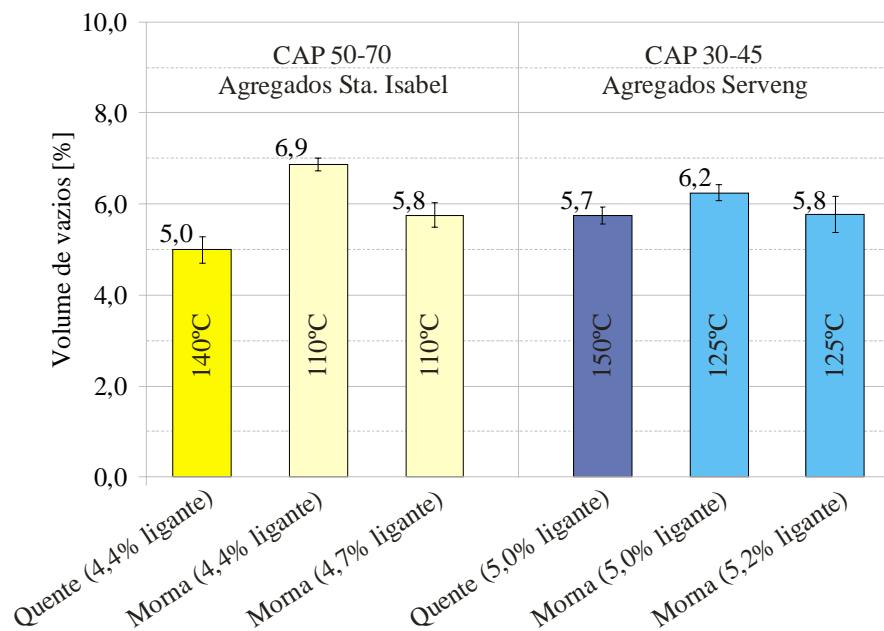


Figura 11. Volume de vazios (*habilidade de compactação*)

Por meio da Figura 11 é possível observar que, em relação às misturas a quente convencionais, as misturas mornas em todos os casos demonstraram maior dificuldade de compactação, embora de maneira menos significativa quando se tratava da mistura com CAP 30-45.

Além disso, pode-se notar que o incremento do teor de ligante tornou mais efetiva a compactação das misturas de baixa energia, particularmente no caso da mistura com CAP 50-70. Poderia-se ter em mente que de fato haveria uma redução do volume de vazios devido ao



aumento da quantidade de asfalto na mistura, entretanto como a diminuição de vazios foi muito significativa nesta mistura morna, tal incremento de ligante parece ter melhorado a lubrificação e aumentado a densificação da mistura asfáltica.

No geral, pode-se dizer que a mistura morna com o CAP 30-45 propiciou uma compactação mais efetiva do que aquela com CAP 50-70, embora deva-se atentar para as temperaturas empregadas, onde a diferença entre quente e morna foi de 30°C no primeiro caso e 25°C no segundo caso.

2.4.2 Deformação permanente

A Figura 12 apresenta os resultados de deformação permanente das misturas asfálticas quentes e mornas, com os diferentes CAPs e agregados utilizados.

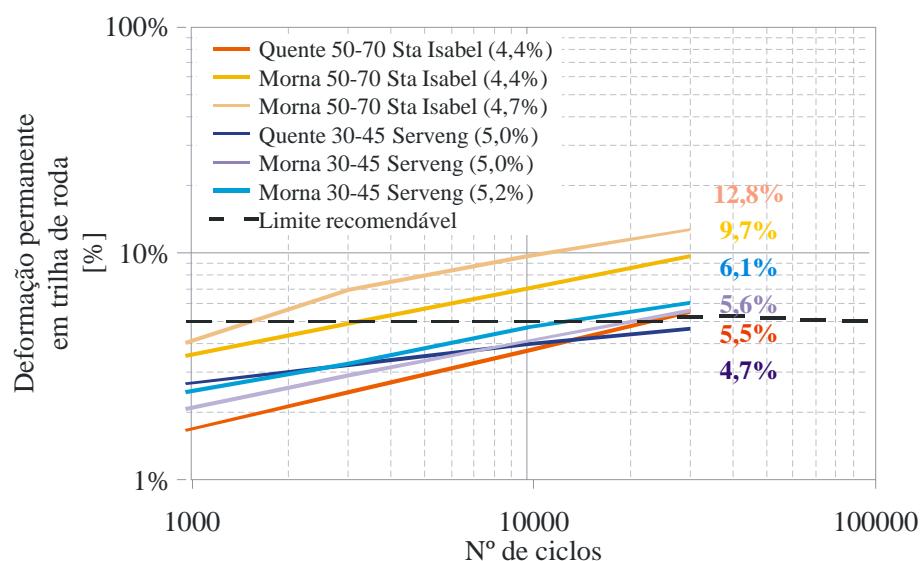


Figura 12. Deformação permanente em trilha de roda

Conforme observado na Figura 12 as misturas mornas com CAP 50-70 se mostraram muito suscetíveis à formação de trilha de roda, em comparação com sua mistura a quente de



referência, mesmo no mesmo teor de ligante de projeto, demandando assim maior atenção quando da definição deste para a mistura morna.

Por outro lado, as misturas de baixa energia com CAP 30-45 apresentaram melhor resistência à deformação permanente, com comportamento bastante próximo ao de sua mistura de referência.

Nota-se ainda que o incremento do teor de ligante foi danoso em ambos os casos, embora de maneira menos acentuada nas misturas mornas com asfalto mais consistente.

No geral, as misturas mornas mostraram maior tendência de afundamento em trilha de roda. Uma hipótese para tal fato poderia ser a influência lubrificante do aditivo na mistura asfáltica, levando a um maior “fluidez” desta.

2.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 13 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas quentes e mornas, com os diferentes CAPs e agregados utilizados.

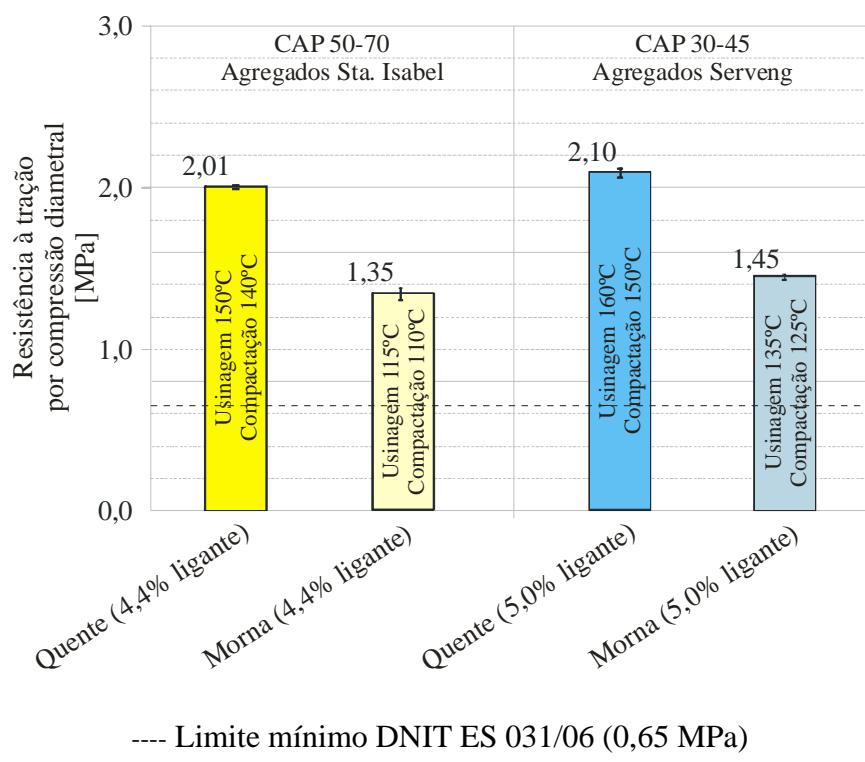


Figura 13. Resistência à tração por compressão diametral

Por meio da Figura 13 é possível observar que as misturas mornas apresentaram resistência à tração inferior àqueles das misturas a quente de referência. Entretanto, mostraram valores de resistência significativamente superiores ao mínimo recomendado pelo DNIT para concretos asfálticos densos.

As misturas asfálticas com CAP 30-45 apresentaram resistência à tração ligeiramente superior que as misturas com CAP 50-70, seguindo a mesma tendência dos ensaios descritos nos itens anteriores.

2.4.4 Dano por umidade induzida

A Figura 14 apresenta os resultados obtidos no ensaio que quantifica o dano causado pela água, em forma de resistência retida à tração, das misturas asfálticas quentes e mornas com os diferentes CAPs e agregados utilizados.

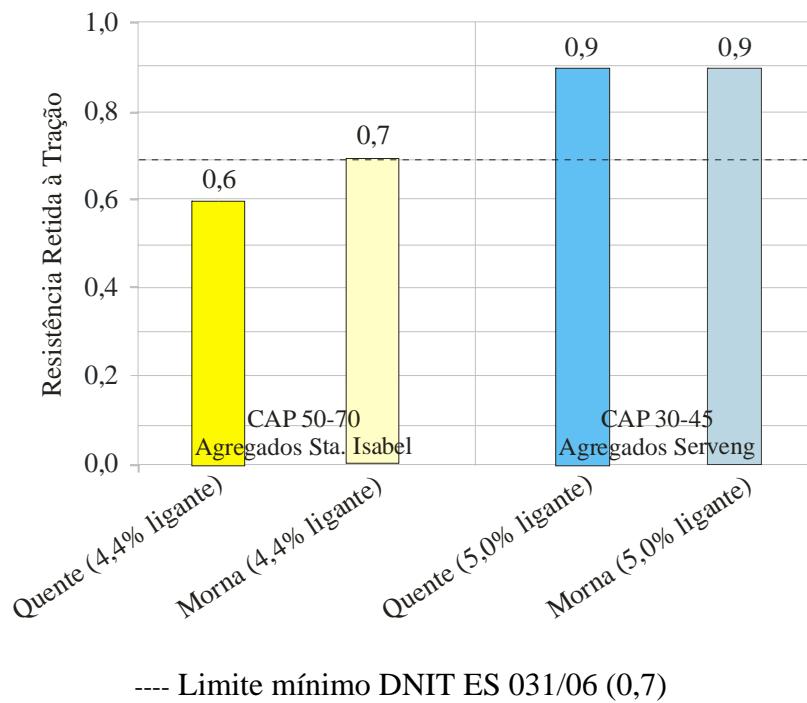


Figura 14. Resistência Retida à Tração após dano por umidade induzida

Observando-se a Figura 14 nota-se que as misturas mornas mostraram comportamento satisfatório no teste de dano por umidade, principalmente aquela com ligante mais viscoso, onde ambas atenderam a especificação do DNIT.

A mistura morna com CAP 50-70 resistiu um pouco melhor que sua mistura a quente, mostrando que o aditivo de fato pode ter funcionado como melhorador de adesividade. Já a mistura morna com CAP 30-45 demonstrou ter sofrido uma pequena perda de resistência após a exposição à água, e de modo similar à de sua mistura de referência.

De maneira geral, a mistura de baixa energia com ligante mais consistente apresentou melhor comportamento ao dano por umidade induzida que aquela com CAP de maior penetração.



3. TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental com mistura morna foi realizado na Rodovia Presidente Dutra, dentro de uma programação de intervenções de restaurações que vinham sendo realizadas pela Concessionária. A mistura de baixa energia a ser aplicada seria aquela estudada em laboratório, com CAP 30-45 e agregados da Pedreira Serveng Barueri.

O local escolhido para a obra foi determinado pela NovaDutra, no km 225 (altura da cidade de Guarulhos, na Grande São Paulo), pista expressa sul (sentido São Paulo), faixa 1 (menos carregada). Esta foi a primeira intervenção realizada neste ponto, desde que a concessionária assumiu a gestão da Via Dutra, em 1996.

O pavimento do trecho em questão possuía uma camada asfáltica de 20 cm e uma sub-base de 35 cm. O Volume Diário Médio (VDM) de veículos comerciais é de pouco mais de 5000, com número N de $1,65 \times 10^8$ para 10 anos, classificando esta rodovia como sendo de tráfego muito pesado.

3.1 Levantamento das condições iniciais do pavimento

3.1.1 Deflexões

Segundo Bernucci *et al.* (2007), a avaliação estrutural está associada à capacidade de carga, podendo ser determinada por meio de levantamento das deflexões (deslocamentos verticais). Estas últimas são as responsáveis pelo surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento e podem levar à fadiga do revestimento.

No caso do trecho experimental com mistura morna foi feito um levantamento inicial (antes da obra) de deflexões com FWD, com carga aplicada no D₀ de 4,8t, cujos valores são apresentados na Figura 15.

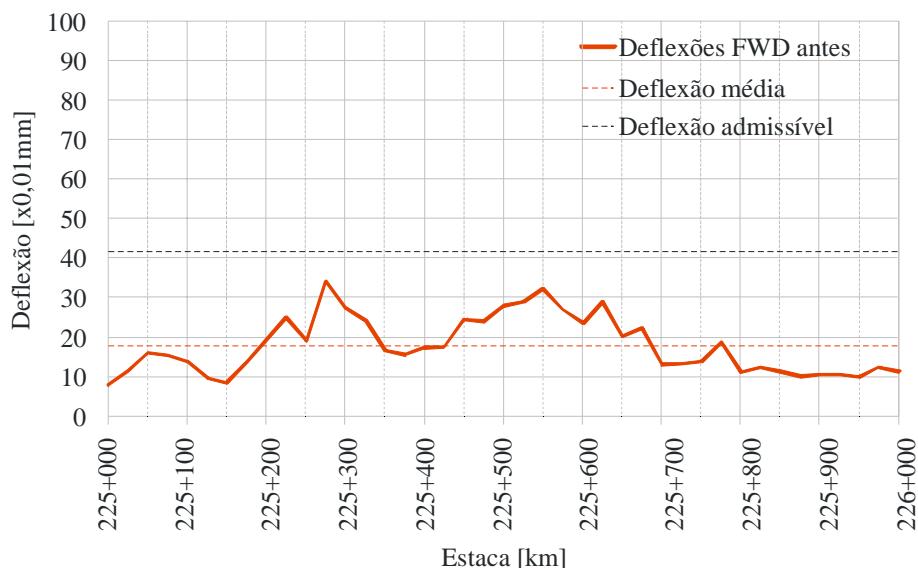


Figura 15. Valores iniciais de deflexão (por FWD) no km do trecho experimental

Segundo os resultados encontrados as deflexões se mostravam dentro do limite aceitável, embora acima da média em alguns pontos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), a ordem de grandeza das deflexões dos pavimentos asfálticos varia muito com as características da estrutura, o tipo de revestimento, o nível de trincamento, as condições climáticas etc., mas como valor típico poder-se-ia indicar de 30 a $50 \times 0,01$ mm para um pavimento com revestimento de concreto asfáltico e base granular em boa condição estrutural. Considerando-se então estes números, verifica-se que as deflexões na Via Dutra são significativamente baixas, o que decorre do fato desta rodovia ter uma estrutura de pavimento bastante espessa e consolidada com o tráfego e o tempo.

3.1.2 QI e IRI

O conforto ao rolamento, a condição de superfície, a interação pneu/pavimento, os defeitos e as irregularidades estão relacionados à avaliação funcional, que pode ser efetuada com a obtenção de parâmetros como o IRI (*International Roughness Index*) e o QI (Quociente de Irregularidade).



A Tabela 8 apresenta resumidamente a classificação das condições de superfície do pavimento em termos de QI e de IRI, segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006).

Tabela 8. Classificação das condições de superfície no Manual de Restauração do DNIT (2006)

Conceito	Irregularidade	
	QI [cont/km]	IRI [m/km]
Excelente	13 - 25	1 – 1,9
Bom	25 – 35	1,9 – 2,7
Regular	35 - 45	2,7 – 3,5
Ruim	45 - 60	3,5 – 4,6
Péssimo	> 60	> 4,6

Nesta pesquisa o levantamento de irregularidade inicial (antes da obra) foi realizado com o perfilômetro laser, a cada 100m, com o veículo operando em cerca de 97km/h (em média). Os resultados são apresentados na Figura 16.

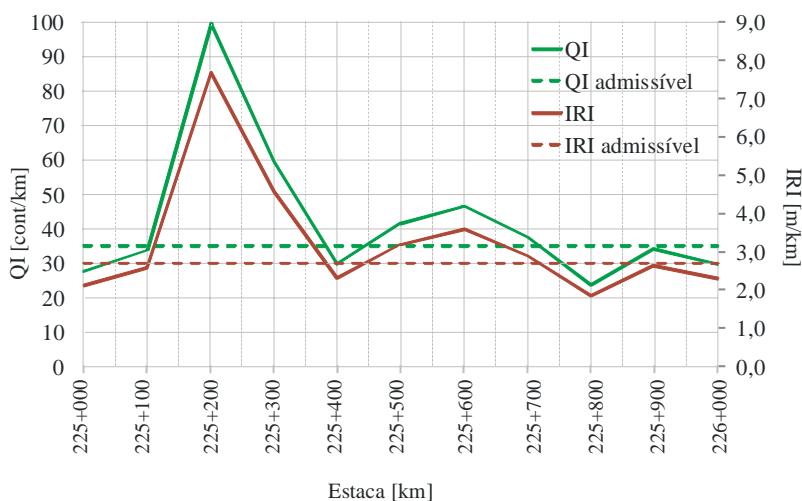


Figura 16. Valores iniciais de QI e IRI no km do trecho experimental

Observando-se a Figura 16 verifica-se que metade dos valores de irregularidade levantados se mostraram acima dos limites aceitáveis, contribuindo para a decisão de se fazer uma intervenção neste quilômetro.



3.1.3 Defeitos

Complementando o levantamento inicial das condições do pavimento, a NovaDutra também realizou verificações de defeitos, cujos resultados são apresentados na Tabela 9. A localização da intervenção é mostrada em forma de croqui na Figura 17. Cabe mencionar que não são apresentados aqui os defeitos levantados nas outras faixas da rodovia (faixa 2 e acostamento), já que somente a faixa 1 é de interesse na presente pesquisa.

Tabela 9. Levantamento de defeitos do km 225 a 226, pista expressa sul, faixa 1, da Rodovia Presidente Dutra

Km inicial	Nº de ocorrências	Tipo de defeito	Dimensão [m] largura comprim.	Área [m ²]	Intervenção
225 + 255	1	TLL, TTL	3,6	625,0	Fresagem 6 cm

Sendo: TLL = Trincas Longitudinais Longas

Sendo: TTL = Trincas Transversais Longas

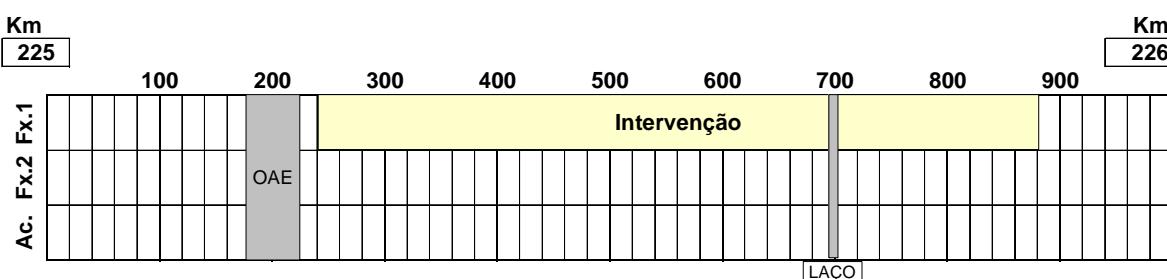


Figura 17. Croqui da localização da intervenção, no quilômetro de localização do trecho experimental

Sendo: OEA = Obra de Arte Especial



3.2 Dosagem da mistura morna

Com base nos resultados de laboratório, estabeleceu-se que o teor de ligante a ser empregado no trecho experimental seria 5,4% (ou seja, +0,4% em relação ao teor “ótimo” de projeto da mistura a quente). Esta decisão foi tomada em função da preocupação em se garantir uma boa lubrificação da mistura morna que mostrou, em laboratório, uma dificuldade ligeiramente maior de compactação que a mistura a quente convencional.

A Tabela 10 apresenta o traço e as temperaturas que foram indicados para a usina de asfalto da Serveng Barueri para a execução da mistura morna a ser aplicada no trecho experimental.

Tabela 10. Parâmetros para produção de mistura morna em usina para o trecho experimental

Ligante asfáltico CAP 30-45		Teor em peso adicionado: 5,4%			
Agregados [%]	Brita 1	14,0			
	Pedrisco	45,0			
	Pó-de-pedra	39,5			
	Cal CH-I	1,5			
Aditivo para mistura morna Gemul XT14		Teor em peso de asfalto: 0,3%			
Temperatura [°C]	Ligante	156	163	159	
	Agregados	131	138	134	
	Usinagem	131	138	134	
	Compactação	120	125	122	

Recomendou-se ainda que o Gemul XT14 fosse introduzido no tanque de ligante, devendo ser mantido sob agitação até momento de uso do asfalto.



3.3 Produção da mistura morna em usina e aplicação em campo

A execução do trecho experimental ficou agendada para a madrugada do dia 11 para o dia 12 de novembro de 2009. Devido ao tráfego elevadíssimo da Via Dutra, as obras são sempre executadas durante a madrugada para causar o menor transtorno possível aos usuários.

O trecho foi fresado em 6 cm, entre o km 225+250 e 225+600, antes da chegada da massa asfáltica.

O processo de usinagem deu-se sem problemas, 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.

Foram coletados cerca de 100 kg deste material usinado e enviados ao LTP-EPUSP para ensaios posteriores.

Para a pista foram enviados oito caminhões de massa asfáltica morna. Da Figura 18 à Figura 23 tem-se algumas fotos da execução do trecho experimental com a mistura asfáltica morna. Cabe mencionar que a temperatura do material no momento da compactação era de 120°C, sob uma temperatura ambiente de cerca de 15°C a 20°C.



Figura 18. Caminhão ao bascular na vibroacabadora

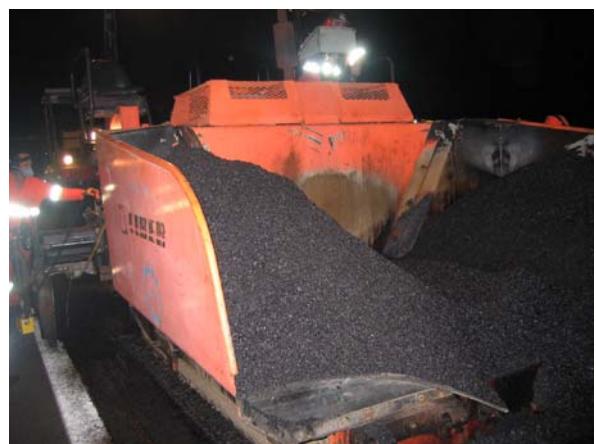


Figura 19. Detalhe da massa asfáltica dentro do silo da vibroacabadora



Figura 20. Espalhamento da massa asfáltica morna em pista



Figura 21. Compactação por pneus seguindo logo atrás da vibroacabadora



Figura 22. Detalhe da compactação com rolo de pneus próxima à vibroacabadora



Figura 23. Detalhe da compactação com rolo de chapa

Entretanto, após a execução de cerca de 70 metros com sucesso (até km 225+320) ocorreu um problema na vibroacabadora, fazendo com que a obra se desse de maneira intermitente. Com isto, a massa asfáltica foi sofrendo queda de temperatura e começou a apresentar segregação em seu lançamento na pista (Figura 24).



Figura 24. Detalhe da segregação da massa asfáltica

A obra seguiu com dificuldade até o km 225+600 como previsto, mas devido ao problema ocorrido deve-se considerar como trecho experimental desta pesquisa o segmento do km 225+250 ao 225+320.

3.4 Estimativa de economia de energia e de custos

Conforme mencionado anteriormente, embora o estudo de custos não seja parte do escopo desta pesquisa no Plano de Trabalho inicial, apresenta-se neste item uma estimativa da economia de energia e de custos no processo de mistura morna, comparando-a com o de uma mistura a quente convencional.

Os processos de usinagem e compactação da mistura morna deste estudo foram executados do mesmo modo que seria com uma mistura convencional, exceto no que se refere redução da temperatura de usinagem e à inclusão do aditivo ao ligante.

A secagem e aquecimento dos agregados em usina é uma etapa que demanda grande consumo energético. Considerando-se esta situação, pode-se efetuar uma estimativa da economia de energia obtida com a redução da temperatura de usinagem, como realizado por



Romier *et al.* (2006) e Olard (2008), a partir do estabelecimento de algumas hipóteses listadas na Tabela 11.

Tabela 11. Hipóteses adotadas no cálculo de economia de energia na usinagem

Parâmetro	Valor
Calor específico dos agregados	850 J/kg/°C
Calor específico da água	4,2 kJ/kg/°C
Calor específico de vapor	1,85 kJ/kg/°C
Calor latente de evaporação da água	2250 kJ/kg/°C
Teor de umidade dos agregados	3%
Temperatura ambiente no dia da execução do trecho experimental	15°C
Temperatura de aquecimento/secagem dos agregados na mistura morna	135°C
Temperatura de aquecimento/secagem dos agregados em uma mistura a quente	170°C

Por meio da expressão (1) é possível calcular a energia consumida:

$$\text{Energia consumida} = m \cdot c_{esp} \cdot (\Delta_{\text{temperatura}}) \quad (1)$$

Onde:

m = massa [kg]

c_{esp} = calor específico característico do material [J/kg/°C]

$\Delta_{\text{temperatura}}$ = temperatura inicial – temperatura final

Levando-se em conta que foram usinados cerca de 160 t de massa asfáltica para o trecho experimental de mistura morna (8 caminhões), necessitando assim de 151,4 t de agregados (94,6%, segundo a dosagem), a Tabela 12 apresenta uma estimativa da energia gasta para aquecer e secar os agregados em usina quando da execução do segmento, comparativamente com o que seria com uma mistura a quente convencional.



Tabela 12. Estimativa do gasto energético em usina para secagem e aquecimento dos agregados na produção de 160 t de mistura morna do trecho experimental

	Mistura morna	Mistura a quente	
Aquecimento dos agregados	15.438.720	19.941.680	MJ
Aquecimento da água	16	20	MJ
Vaporização da água	70	70	MJ
Aquecimento do vapor	2	4	MJ
Total gasto de energia na secagem/aquecimento dos agregados	15.438.807	19.941.774	MJ
Economia de energia na secagem/aquecimento dos agregados	22,6		%

A usina da Serveng Barueri costuma utilizar gás GLP na produção de misturas asfálticas convencionais, consumindo cerca de 5,8 kg de combustível por tonelada de mistura. Ao se considerar uma redução de 22,6% de energia para produzir a mistura morna, tal consumo cairia para 4,5 kg/t. Deste modo, para usinar as 160 t de massa asfáltica (do trecho experimental) seriam necessários aproximadamente 928 kg de GLP para mistura convencional e 720 kg para a mistura morna.

Como o preço do GLP no Brasil é de cerca de R\$ 38,00/13kg, ou R\$ 2,92/kg (segundo dados da ANP), a estimativa de gasto de combustível na mistura convencional seria de R\$ 2.710,00, enquanto que na mistura morna este valor cairia para R\$ 2.102,00, gerando uma economia de pouco mais de R\$ 600,00.

O aditivo Gemul XT14 utilizado para produzir a mistura morna custa aproximadamente R\$ 8,00/kg (U\$ 4,50/kg) e foi usado em uma taxa de 0,3% em massa de ligante. Como foram empregados cerca de 8,6 t de asfalto (5,4%, segundo a dosagem), a quantidade de aditivo utilizado foi de aproximadamente 26 kg, o que incorporou um custo de cerca de R\$ 210,00 para executar as 160 t de massa asfáltica morna utilizadas no trecho experimental.

Deste modo, verifica-se que para produzir a mistura morna houve um custo adicional, que seria compensado pela redução do consumo de energia, considerando-se a etapa de secagem e aquecimento dos agregados na usina.



3.5 Ensaios laboratoriais com a massa asfáltica coletada em usina

Uma parte do material usinado para a execução do trecho experimental foi enviada ao LTP-EPUSP para ensaios posteriores.

Como forma de evitar sucessivos reaquecimentos e de se obter uma boa amostragem para cada ensaio, levou-se o material à estufa em temperatura de no máximo 120°C (Figura 25) e foi-se destorroando-o. Em seguida, era feito um quarteamento (Figura 26) e separadas amostras com quantidade suficiente para cada tipo de ensaio.



Figura 25. Amostra vista da usina submetida à estufa em laboratório



Figura 26. Quarteamento da massa asfáltica morna da usina, em laboratório

Uma amostra foi levada à extração pelo método de Abson para verificação da granulometria e recuperação de ligante, a fim de definir o seu teor na mistura, penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. Além disso, foram realizados ensaios para cálculo do volume de vazios, deformação permanente, módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e dano por umidade induzida.

3.5.1 Granulometria

A Figura 27 apresenta a curva granulométrica obtida com o material recuperado. É possível observar que a curva é bastante similar à que foi originalmente determinada no projeto da mistura.

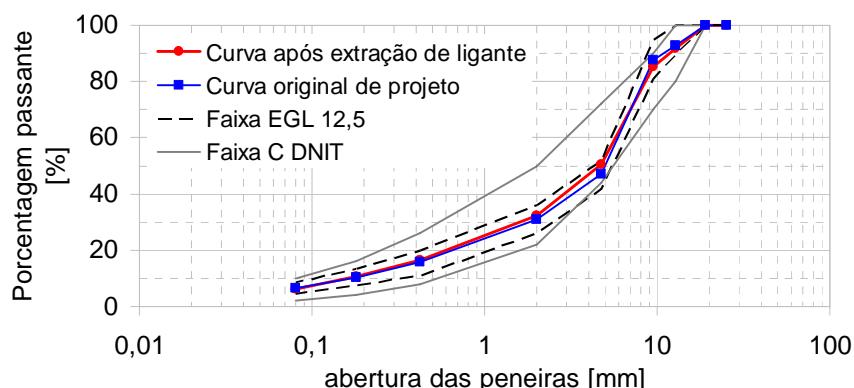


Figura 27. Curva granulométrica após a extração por Abson da mistura morna de usina

3.5.2 Teor de ligante

Para a determinação do teor de ligante na mistura foram utilizadas duas amostras. O teor de asfalto médio encontrado na mistura morna preparada na usina foi de 5,1%. Considerando-se que o teor de projeto era 5,4%, verifica-se que o valor encontrado se situa no erro usualmente aceitável em usina ($\pm 0,3\%$).

3.5.3 Ponto de amolecimento

A Figura 28 apresenta o ponto de amolecimento médio do ligante recuperado, juntamente com os valores obtidos anteriormente em laboratório com o CAP 30-45 virgem e misturado a 0,3% do aditivo Gemul XT14.

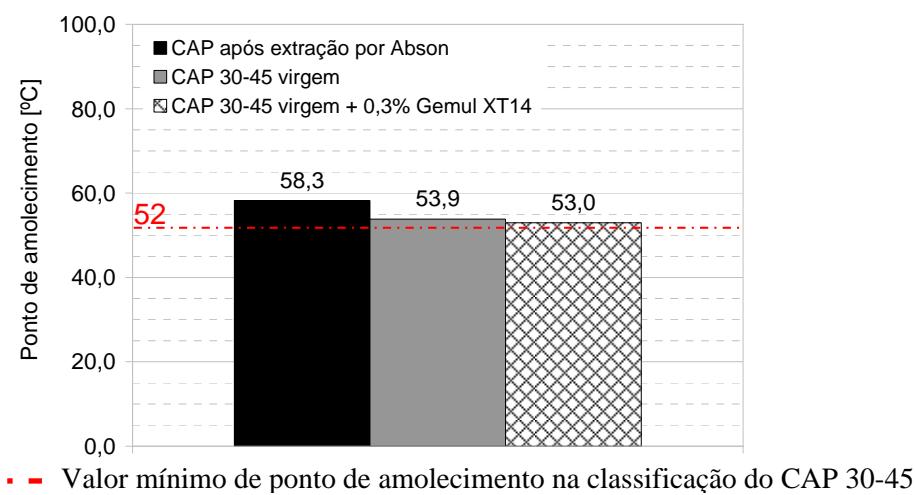


Figura 28. Ponto amolecimento médio do ligante após a extração por Abson da mistura morna de usina

Neste caso é possível observar que o asfalto extraído apresentou ponto de amolecimento um pouco acima daquele que vem sendo empregado na pesquisa em laboratório, mostrando que houve aumento da rigidez do ligante na usinagem.

3.5.4 Penetração

A Figura 29 apresenta a penetração média do ligante recuperado, juntamente com os valores obtidos anteriormente em laboratório com o CAP 30-45 virgem e misturado a 0,3% do aditivo Gemul XT14.

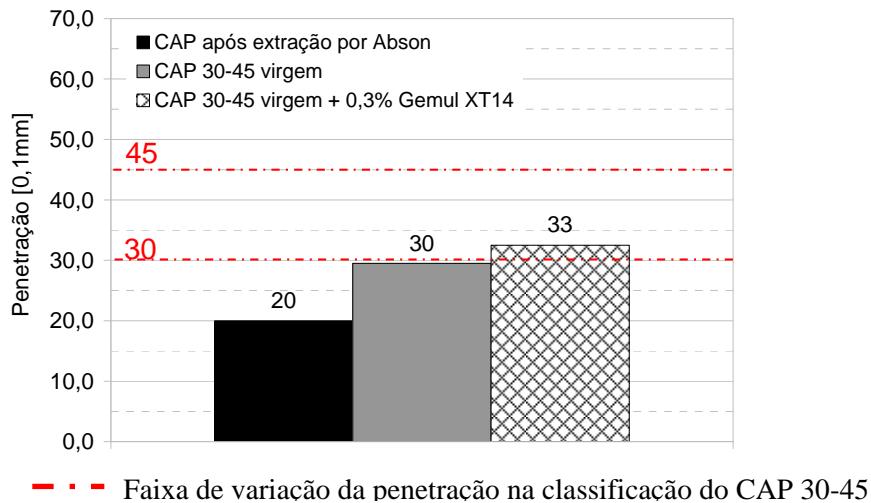


Figura 29. Penetração média do ligante após a extração por Abson da mistura morna de usina

Neste caso é possível observar que o asfalto extraído apresentou penetração significativamente mais baixa ($20 \times 0,1\text{mm}$) em comparação com o CAP 30-45 empregado nas pesquisas em laboratório, com e sem o aditivo.

Do mesmo modo que no item anterior, parece ter havido um envelhecimento do ligante, que tornou-o mais rígido e, por consequência, aumentou sua penetração.

3.5.5 Viscosidade

A Figura 30 apresenta a viscosidade média do ligante recuperado obtida em ensaio com viscosímetro Brookfield, juntamente com os valores obtidos anteriormente em laboratório com o CAP 30-45 virgem e misturado a 0,3% do aditivo Gemul XT14.

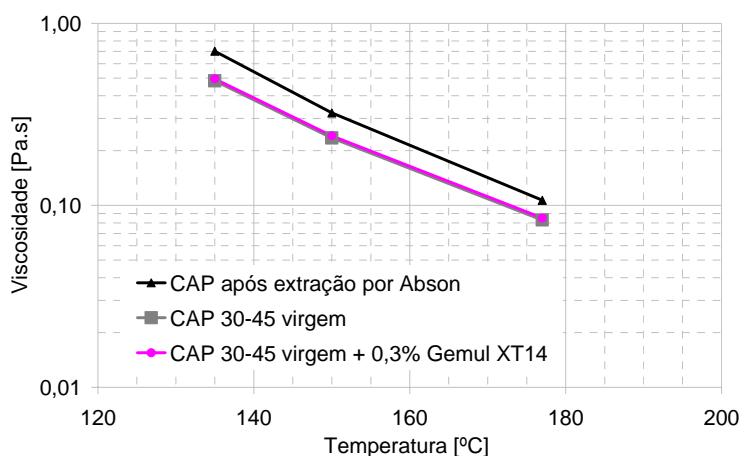


Figura 30. Viscosidade média do ligante após a extração por Abson da mistura morna de usina

Mais uma vez observa-se que houve aumento da consistência do ligante submetido da usina, desta vez em termos de viscosidade.

3.5.6 Volume de vazios (*habilidade de compactação*)

Para cálculo do volume de vazios (ASTM D3203, 2005) foram moldados no LTP-EPUSP três corpos-de-prova Marshall com a mistura proveniente de usina, sendo posteriormente realizadas pesagens hidrostáticas (AASHTO T166, 2007). A Figura 31 apresenta os volumes de vazios obtidos. Para fins de comparação, o gráfico mostra também o valor verificado anteriormente em laboratório.

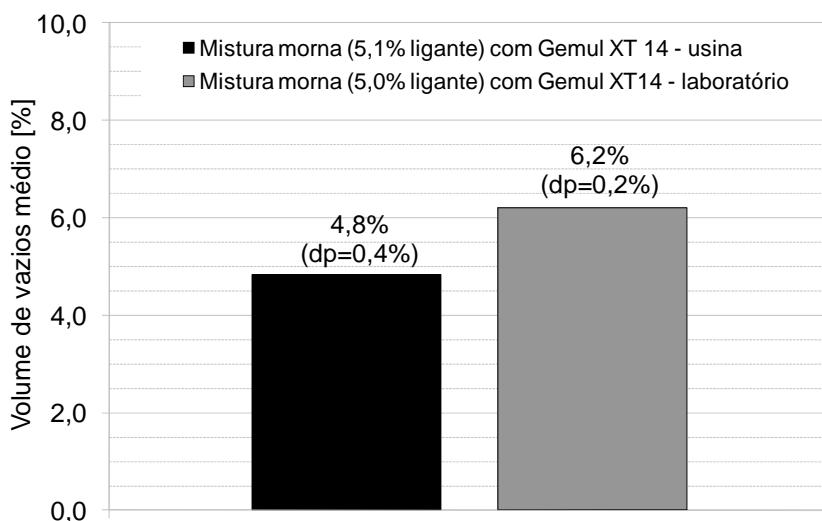


Figura 31. Volume de vazios Marshall com a mistura morna de usina

Por meio da Figura 31 observa-se que a compactação se deu de maneira mais eficiente com o material misturado em usina do que no caso do concreto asfáltico preparado em laboratório, com teor de ligante próximo.

3.5.7 Deformação permanente em trilha de roda

A Figura 32 apresenta a deformação permanente obtida no simulador de tráfego francês com a mistura asfáltica morna proveniente da usina.

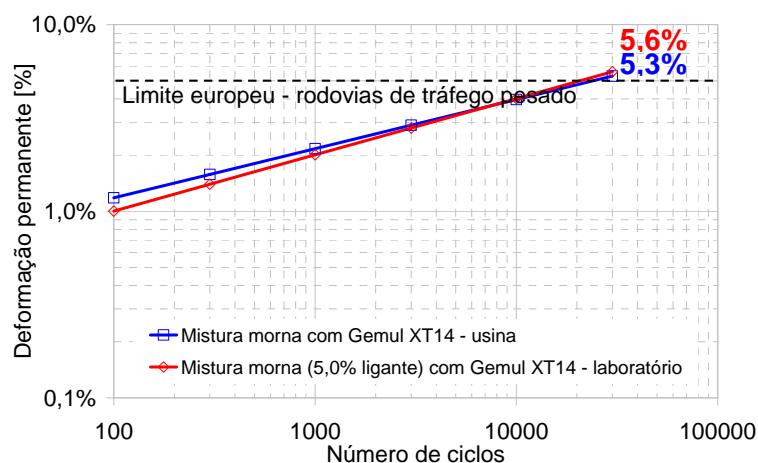


Figura 32. Deformação permanente em trilha de roda da mistura morna de usina



Segundo a Figura 32 nota-se que a deformação permanente da mistura de usina se mostrou bastante similar àquela encontrada em laboratório em teor de asfalto próximo. Além disso, pode-se dizer a se trata de uma mistura com baixo potencial para a formação de trilhas de roda por estar próximo do limite recomendável de 5% para tráfego pesado.

3.5.8 Dano por umidade induzida

A Figura 33 apresenta o resultado obtido no ensaio de dano por umidade induzida com a mistura morna de usina, em comparação com a mistura de laboratório.

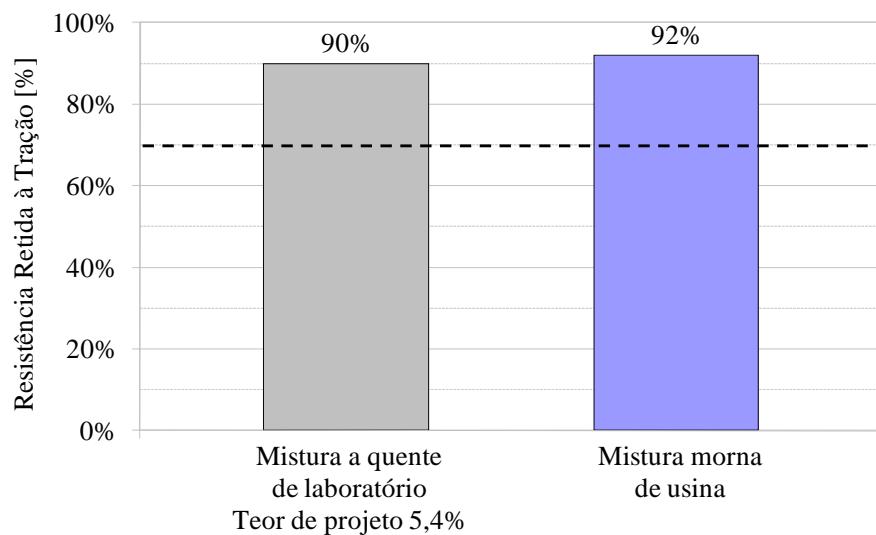


Figura 33. Resistência Retida à Tração no ensaio de dano por umidade induzida da mistura morna de usina

Verifica-se pela Figura 33 que a mistura morna de usina apresentou boa resistência à água, em comparação com o limite estabelecido pelo DNIT e em relação à mistura de projeto.



3.6 Controle tecnológico

Dentro da fase de controle tecnológico de campo foram extraídos vários corpos-de-prova ao longo do tempo para a realização de alguns ensaios. A Figura 34 apresenta um croqui dos pontos onde estes corpos-de-prova foram extraídos.

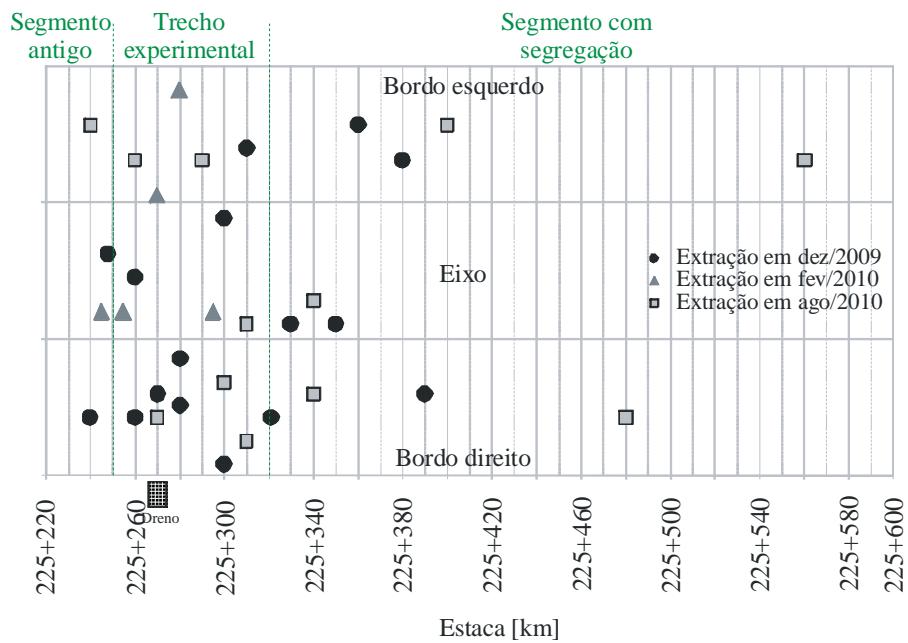


Figura 34. Croqui da localização de extração de corpos-de-prova

3.6.1 Volume de vazios e espessura da camada logo após a obra

Para este controle foram extraídos quatro corpos-de-prova, dentre os quais um pertencia ao seguimento do trecho experimental que foi executado sem problemas de segregação, devido à pequena extensão deste. Os resultados de volumes de vazios e de espessuras no controle tecnológico logo após a obra são apresentados na Tabela 13.



Tabela 13. Controle de compactação e espessura da camada de revestimento da obra

Km	Vazios [%]	Limite aceitável [%]	Espessura do CP [cm]	Limite aceitável [cm]
225+260	3,0		6,9	
225+360	5,6	> 2,5	6,0	> 5,7
225+460	4,1	e	7,0	(95% de 6 cm)
225+560	3,3	< 7,5	7,0	

 Segmento de mistura morna com problemas de segregação durante a execução

Como se pode verificar na Tabela 13, as amostras retiradas de campo se mostraram dentro dos limites aceitáveis pela concessionária e, com isto, o trecho de mistura morna foi aprovado por compactação e por espessura.

3.6.2 Volume de vazios e espessura da camada após um mês

Um mês após a execução do trecho experimental (em dezembro de 2009) foram retirados novos corpos-de-prova em diferentes pontos do pavimento. Foram ainda extraídas duas amostras no segmento anterior (mais antigo) para comparação. A Tabela 14 apresenta os valores obtidos nos ensaios laboratoriais com estes corpos-de-prova.



Tabela 14. Controle de compactação e espessura um mês após a obra

Km	Vazios [%]	Limite aceitável [%]	Espessura do CP [cm]	Limite aceitável [cm]
225+240	0,5		8,4	
225+250	0,4		7,0	
225+280	3,7		6,0	
225+300	5,8		5,9	
225+300	5,6		5,7	
225+310	4,7	> 2,5	5,9	
225+320	4,5	e < 7,5	6,0	> 5,7 (95% de 6 cm)
225+330	2,6		7,2	
225+350	7,9		6,7	
225+380	4,1		5,3	
225+380	4,7		5,9	
225+390	5,3		5,6	



Segmento antigo

Segmento de mistura morna com problemas de segregação durante a execução

Segundo a Tabela 14, os vazios do trecho antigo são significativamente baixos, mostrando um revestimento bastante fechado e consolidado. No caso do trecho experimental de mistura morna (70m iniciais) os valores de vazios e espessura ficaram dentro do aceitável, o que não ocorreu no segmento com segregação, que por sua vez mostrou pontos com vazios e espessura fora dos limites aceitáveis.

3.6.3 Resistência à tração por compressão diametral após um mês

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado no LTP-EPUSP, com alguns dos corpos-de-prova extraídos. O valor médio encontrado foi de 1,69 MPa, com um desvio padrão de 0,08 MPa. A Figura 35 mostra a aparência dos corpos-de-prova após serem rompidos por compressão diametral.



Figura 35. Corpos-de-prova da pista rompidos por compressão diametral

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), à medida que as misturas asfálticas envelhecem em pista, a resistência à tração aumenta, o que não necessariamente representa uma vantagem, uma vez que isto pode significar uma perda de flexibilidade com aumento do módulo de resiliência.

3.6.4 Verificação dos vazios, das deflexões e das condições superficiais do pavimento após três meses

Após três meses da execução do trecho experimental com mistura asfáltica morna (em fevereiro de 2010) houve uma nova visita de monitoramento, desta vez não só para extraír corpos-de-prova, mas também para fazer um levantamento das condições superficiais do pavimento. Nesta ocasião, o trecho apresentava não ter defeitos visíveis e nem problemas de trilha de roda.

Nesta visita foi extraído um corpo-de-prova no trecho mais antigo e outros três no segmento de mistura morna, além de um novo levantamento deflectométrico (desta vez com viga Benkelman), ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico e avaliação da irregularidade com o equipamento Merlin.

A Tabela 15 apresenta os resultados de volume de vazios obtidos nesta ocasião.



Tabela 15. Controle de compactação após três meses de obra

Km	Vazios [%]	Limite aceitável [%]
225+240	0,5	
225+250	4,1	> 2,5
225+270	4,1	e
225+280	5,4	< 7,5

Segmento antigo

Os resultados após três meses de execução do trecho morno mostram vazios ainda dentro do aceitável. Já a amostra coletada no segmento antigo confirma o baixo volume de vazios verificado anteriormente.

Já o levantamento de deflexões foi realizado por viga Benkelman eletrônica, entre os km 225+000 a 225+340. A Figura 36 apresenta os resultados obtidos.

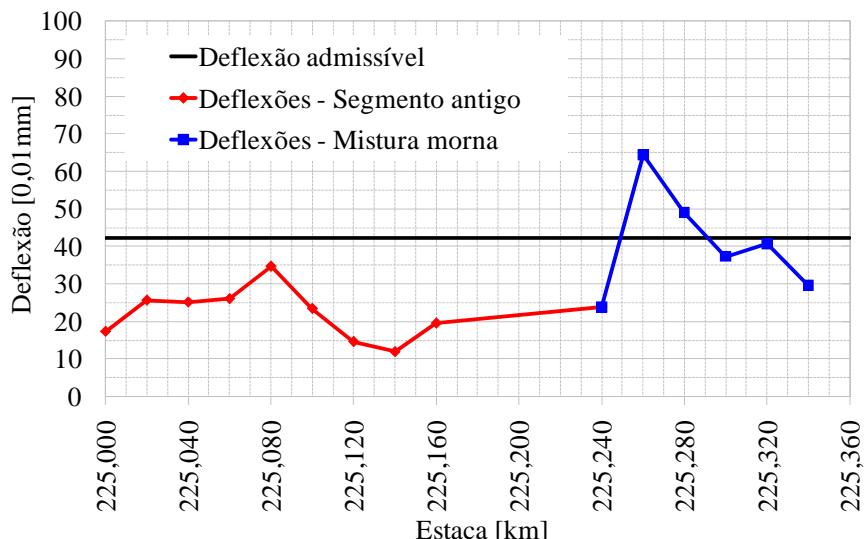


Figura 36. Levantamento de deflexões com viga Benkelman após três meses

No trecho experimental de mistura morna ocorreram dois pontos acima do admissível, mas isto se deve à localização de um dreno posicionado no km 225+270. No mais, as deflexões do trecho de mistura de baixa energia se mostraram abaixo do admissível, mas ligeiramente acima dos níveis encontrados no segmento antigo.



Para verificação da macro e microtextura do revestimento asfáltico foram realizados ensaios de mancha de areia (de acordo a especificação ASTM E965, 2006), e de pêndulo britânico (segundo a norma ASTM E303, 2008). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Levantamento das condições de aderência da superfície do pavimento, segundo Pêndulo Britânico (PB) e Mancha de Areia (MA)

	Trecho mistura a quente (antigo)		Trecho mistura morna	
	PB	MA	PB	MA
Valor médio	39	0,41	41	0,52
Desvio padrão	3	0,03	6	0,06
Classificação (função da média)	lisa	média	Insuficient. rugosa	média
Classificação (função do desvio padrão)	Lisa a insufficient. rugosa	Fechada a média	Lisa a medianam. rugosa	média

De acordo com a Tabela 16, nota-se que, de maneira geral, os segmentos avaliados apresentaram uma condição relativamente “fechada” quanto à textura, com o trecho de mistura morna mostrando uma condição de aderência ligeiramente melhor que o segmento antigo. Neste caso, é bastante provável que o tráfego extremamente elevado da Rodovia Presidente Dutra cause um polimento acelerado dos agregados, tornando a superfície mais fechada.

Por fim tem-se o levantamento da irregularidade superficial com o Merlin, que foi efetuado somente na trilha esquerda. Isto porque o fechamento da pista se deu por períodos muito curtos, não havendo tempo hábil para fazer as medições em outros pontos do pavimento. Além disso, para o uso deste equipamento na avaliação da condição de irregularidade, o ideal seria ter ao menos 200 registros, mas não foi possível fazê-los.

No segmento antigo foram feitos 122 registros de medidas, do km 225+000 ao 225+250. Já no trecho de mistura morna foram realizados 57 registros, do km 225+250 ao 225+340. A partir dos registros foi possível calcular o IRI e o QI, cujos valores obtidos são apresentados na Tabela 17.



Tabela 17. Resultados do levantamento com o Merlin - Valores de IRI e de QI obtidos

	D [mm]	IRI ($IRI = 0,593 + 0,0471 * D$) [m/km]	QI ($QI = 13 * IRI$) [cont/km]
Trecho antigo (mistura a quente)	26	1,82	23,6
Trecho mistura morna	40	2,48	32,2

Considerando-se o valor máximo de QI especificado pelo Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos do DNIT (35 cont/km), pode-se dizer que ambos os trechos mostraram valores dentro do aceitável.

3.6.5 Verificação das deflexões após oito meses

Após oito meses da execução do trecho experimental de mistura morna foi realizado um novo levantamento de deflexões por viga Benkelman e por FWD.

Os resultados referentes à viga Benkelman são apresentados na Figura 37.

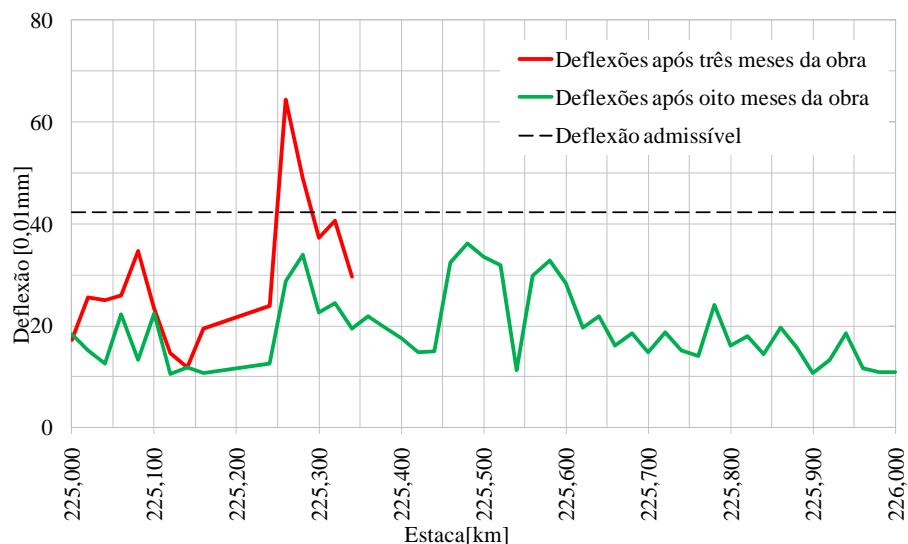


Figura 37. Levantamento de deflexões com viga Benkelman após oito meses



É possível observar que as deflexões diminuíram entre três e oito meses após a execução do trecho de mistura morna, demonstrando que houve aumento da rigidez do pavimento com o tempo.

Já os resultados referentes ao FWD são apresentados na Figura 38. Cabe mencionar este levantamento foi feito em três níveis de carga, sendo 2t, 4,1t e 6,5t.

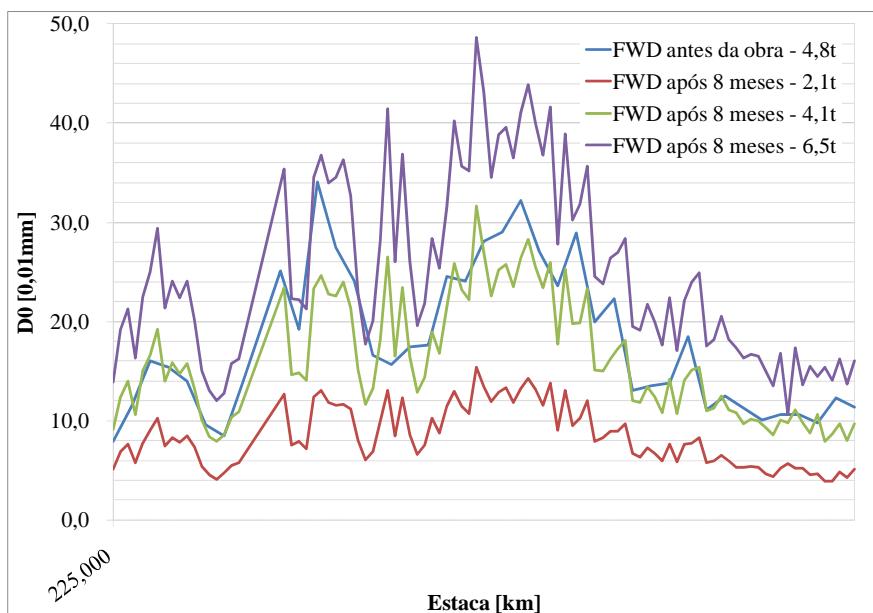


Figura 38. Levantamento de deflexões com FWD, em três intensidades de carga, antes e após oito meses da obra

Considerando-se que o levantamento antes e após a obra, em níveis de carga similares, nota-se que não houve variação significativa das deflexões após a execução do trecho experimental de mistura morna.



4. CONCLUSÕES

A pesquisa mostrou que a mistura morna apresentou de maneira geral um comportamento mecânico satisfatório em laboratório, comparável às misturas a quente, com algumas diferenças que a tornam menos rígidas, com pequeno aumento nas deformações permanentes. Estes resultados estão relacionados ao aumento de volume de vazios de algumas misturas mornas, devido à redução de temperatura de compactação. Este ponto mostra a importância de estabelecer qual temperatura deve ser empregada e qual é a redução em que se pode trabalhar de modo a garantir propriedades mecânicas similares.

O aditivo empregado mostrou-se eficiente em termos de perdas eventuais por dano por umidade induzida. Ou seja, apesar de redução de temperatura dos agregados no momento da usinagem, uma boa adesão está garantida.

Na usina, não se constataram dificuldades para a usinagem das misturas mornas. No campo, o relato dos responsáveis pela obra foi que as misturas mornas não apresentam dificuldades de densificação. Foram mantidos todos os procedimentos que normalmente se realizam na execução dos revestimentos a quente.

A estimativa de economia de energia em usina entre a mistura morna e uma mistura a quente convencional mostrou que há uma redução significativa do consumo de combustível quando se diminui a temperatura de usinagem, compensando com folga o custo adicional da utilização do aditivo para mistura morna. Dentro deste contexto, os benefícios iniciais do emprego da mistura morna parecem compensar os custos (principalmente se ainda forem considerados alguns aspectos de difícil mensuração como a melhoria da qualidade do ambiente de trabalho dos operários da pavimentação). Resta analisar a questão da durabilidade, que deve ser verificada em longo prazo. Dentro desta pesquisa o trecho experimental foi construído há cerca de um ano, sendo submetido desde então a tráfego extremamente intenso e pesado na Via Dutra, parecendo não apresentar problemas até o momento.

Os resultados de controle mostram que a densificação atingiu as metas e o revestimento encontra-se nos padrões de propriedades mecânicas adequadas. A aplicação em pista da mistura de baixa energia ocorreu, portanto, de maneira satisfatória, com resultados



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

posteriores de controle tecnológico dentro de níveis aceitáveis. Há um leve aumento de irregularidades superficiais, porém que não desqualificam os revestimentos asfálticos mornos.

Espera-se que haja um menor envelhecimento do ligante asfáltico nas misturas mornas devido à menor exposição dos mesmos a elevadas temperaturas, principalmente no contato direto com a superfície dos agregados no momento da usinagem. Este menor envelhecimento levará, certamente, a uma melhoria de vida de fadiga. Porém, este estudo deve ainda ser realizado e consta de proposta para uma segunda fase de pesquisa.

Os resultados deste Relatório Técnico aplicam-se somente aos materiais analisados.



5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Regulamento Técnico nº 3/2005. Rio de Janeiro, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M323:**
Standard specification for Superpave volumetric mix design. Washington DC, 2004.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T209-99:**
Standard method of test for theoretical maximum specific gravity and density of hot mix asphalt paving mixtures. Washington DC, 1999.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T269-97:**
Percent air voids in compacted dense and open asphalt mixtures. USA, 1997.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T283-07:**
Standard method of test for resistance of compacted hot mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage. USA, 2007.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T11:**
Standard method of test for materials finer than 75- μm (nº 200) sieve in mineral aggregates by washing. Washington, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T166:**
Standard method of test for bulk specific gravity of compacted hot mix asphalt (HMA) using saturated surface-dry specimens. Washington, 2007.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T27:**
Standard method of test for sieve analysis of fine and coarse aggregates. Washington, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1856:** Standard test method for recovery of asphalt from solution by Abson method. West Conshohocken, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2493:** Standard viscosity-temperature chart for asphalts. West Conshohocken, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872:** Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3203:** Standard test method for percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures. West Conshohocken, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D341-03:** Standard test method for viscosity-temperature charts for liquid petroleum products. USA, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4402:** Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. West Conshohocken, 2006.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7369-09**: Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension test. USA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E303**: Standard test method for measuring surface frictional properties using the British pendulum tester. West Conshohocken, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E965**: Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. West Conshohocken, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **DNER ME043/95**: Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950**: Materiais betuminosos: Determinação da viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15087**: Misturas asfálticas :Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15617**: Misturas asfálticas: Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Materiais betuminosos: Determinação do ponto de amolecimento: Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais asfálticos: Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2006.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2007.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Manual de capacitação – Mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2008. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br/publicacoes/MudancaDoClima.php>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 12697-33**: Mélange bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque. Version française. Bruxelles, 2003a.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 12697-33**: Mélange bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque. Version française. Bruxelles, 2003a.

CONEJERO, M. A. **Marketing de créditos de carbono: Um estudo exploratório**. 2006. 265p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME043/95: Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME138/94: Misturas betuminosas: Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME193/96: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: Determinação da densidade e da massa específica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER PRO277/97: Metodologia para controle estatístico de obras e serviços. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 138/94: Misturas betuminosas: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 193/96: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: Determinação da densidade e da massa específica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006-ES: Pavimentos flexíveis: Concreto asfáltico: Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Publicação IPR-720. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

INSTITUTO DO ASFALTO. Manual de asfalto. Série número 4 (MS-4). PETROBRAS: Rio de Janeiro, 1989.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007: Synthesis Report. 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2009.

ITPS. Warm-mix asphalt: European practice. Virginia: FHWA, 2008. (Report FHWA-PL-08-007).

NEWCOMB, D. An introduction to warm-mix asphalt. 2007. National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD. Disponível em: <http://fs1.hotmix.org/mpc/Introduction_to_Warm-Mix_Asphalt.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2009.

OLARD, F. Low energy asphalts. Routes Roads, n. 336-337, p. 131-145, 2008. Apresentado a 23 World Road Congress – General Report and Conclusions – PIARC Prizes, 23., Paris, 2008.

QUIMIGEL – DIVISÃO QUÍMICA. Gemul XT-14. Disponível em:

<<http://quimigel.plughosting.com.br/br/detalhes.php?codigo=5&PHPSESSID=2b52da2e5e7105fa461fa02554e54dd2#mostrar>>. Acesso em: 15 jul. 2009.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R., LEE, D-Y.; KENNEDY, T. W. Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação “Prof. Dr. Job Shuji Nogami”

RT-360/10.12.2010_rev 10012011

ROMIER, A.; AUDON, M.; DAVID, J.; MARTINEAU, Y.; OLARD, F. Low-energy asphalt (LEA) with the performance of hot-mix asphalt. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 85., 2006, Washington. **Anais...** Washington: TRB, 2006.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Kyoto Protocol**. 2005.

Disponível em: <http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php>. Acesso em: 10 jun. 2009.

WARM MIX ASPHALT TECHNICAL WORKING GROUP. **Warm Mix Asphalt**. Disponível em: <<http://www.warmmixasphalt.com>>. Acesso em: 15 jul. 2009.



6. EQUIPE TÉCNICA DO LTP-PTR-EPUSP

Profa. Dra. Liedi Bariani Bernucci, *Professora Titular, Coordenadora Geral*

Rosângela Motta, *Doutoranda*

Edson de Moura, *Técnico Nível Superior, Doutorando*

Kendi Sanbonsuge, *Tecnólogo de Laboratório*

Cláudio Izeppato Del Priore, *Aluno de Graduação, Iniciação Científica*

Erasmo Alves, *Técnico de Laboratório*

Diomária Rocha Santos, *Secretária*

São Paulo, 10 de dezembro de 2010.

Profa. Dra Liedi Légi Bariani Bernucci

Coordenadora do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação