CECÍLIA FORTES MERIGHI

Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu

São Paulo

2015

CECÍLIA FORTES MERIGHI

Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Profº. Drº. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do Autor:_____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação na publicação

Merighi, Cecília Fortes
Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu / C.F. Merighi. -- São Paulo, 2014.
201 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimentação asfáltica 2.Asfalto borracha 3.Comportamento de mistura asfáltica morna I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

Dedico estas páginas à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram diretamente e indiretamente para a concretização desta pesquisa. Em especial, quero agradecer:

Ao meu orientador **Carlos Suzuki** pelo apoio e motivação, pelos ensinamentos compartilhados, paciência e por acreditar em minha ideia.

Aos colegas do LTP, primeiramente a querida professora **Liedi**, pelo carinho e conselhos, à **Diomária, Edson, Erasmo, Kendi, Kamilla, Robson e Rosângela** pela contribuição positiva, pelo trabalho conjunto, auxiliando nas dúvidas e ajudando na realização dos ensaios.

Aos meus colegas de **EcoRodovias**, em especial ao **Adolfo**, pelos conselhos, paciência e preocupação, ao **Alexandre Ribeiro e Filippo Chiarielo**, por acreditar, incentivar e ajudar na viabilização desta pesquisa. Ao **Luiz Pacheco, Reginaldo e Giovanni**, por me ajudarem com os ensaios, atendendo a todas as solicitações/pedidos, em especial ao **Pacheco** por saber exatamente quanto de mistura asfáltica eu precisava para meus ensaios! Um agradecimento especial ao **Dr. Dultevir de Melo**, que se preocupa sempre em compartilhar seu conhecimento técnico, enobrecendo nosso trabalho diário, me instigando a estudar mais e mais.

Á Ecovias, especialmente ao **Naélson** pelo apoio, por estar diariamente envolvido neste trabalho, cobrando fornecedores e tornando possível a realização do trecho experimental. Ao **José Cassaniga** e **Rui Klein** que permitiram que estudasse o trecho da concessionária e acreditou na contribuição que este trabalho teria no desenvolvimento tecnológico da empresa.

Aos colegas da **Dynatest***,* em especial ao **Felipe, André, Douglas e Daniel**, por me ajudar com os levantamentos em campo, as retroanálise e módulos desta dissertação.

À **Váleria** e ao **Luis** da CCR pela troca de experiências e pela ajuda com artigos e referências de boas leituras.

Aos meus queridos pais, **Rita e João** que desde cedo despertaram este gosto por pavimentação, pela inspiração e apoio, pelas várias revisões de texto e trocas de experiência durante os jantares familiares. Aos meus irmãos pelo carinho e compreensão, mesmo nas horas mais estressantes.

Em especial, ao **Edson**, meu marido, pelo convívio diário, por ter cozinhado várias vezes enquanto eu estudava, por ter aprendido o que é Asfalto Morno após as infinitas discussões em jantares familiares ou nos meus momentos de epifania, etc., etc., etc., etc.

“Cada fracasso ensina ao homem algo que precisava aprender.”

(Charles Dickens).

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo realizado com uma mistura asfáltica morna utilizando ligante aditivado com agente surfactante e borracha moída de pneus inservíveis. Um trecho experimental foi executado com a mistura asfáltica morna, localizado na SPA-248-055, Pista Oeste, entre os quilômetros 3+000 e 6+000 e comparado ao trecho de referência, localizado na mesma rodovia, entre os quilômetros 1+000 e 3+000.

Foram feitos também ensaios fundamentais para caracterização do ligante modificado com borracha e com aditivo químico para mistura morna e também ensaios para verificar o comportamento mecânico da mistura de usina, de modo que possibilitou comparar seus resultados com uma mistura de referência, com produção na temperatura a quente.

Os ensaios realizados para verificação do comportamento mecânico foram: resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga e resistência à formação de trilha de roda no simulador de tráfego francês do LCPC. Comparando a mistura asfáltica morna com uma mistura de referencia, os resultados obtidos foram satisfatórios.

Além destes experimentos também foram realizados ensaios de resistência ao dano por umidade induzida (DUI). No caso deste estudo, os resultados foram satisfatórios.

Durante a produção da mistura asfáltica, foi realizada a análise da redução de emissões de poluentes, no momento da produção da mistura. Os resultados indicaram que há redução de poluentes como fumos totais, fumos solúveis e compostos orgânicos voláteis (VOC).

Tanto o trecho experimental quanto o trecho de referência foram avaliados durante 3 anos quanto aos parâmetros de desempenho do pavimento, como irregularidade e condição de superfície. Os resultados obtidos mostram o comportamento positivo da mistura asfáltica morna, quando comparado ao pavimento do trecho de referência, ao longo de dois anos de observação.

Palavras-Chave: Mistura asfáltica morna. Fadiga de mistura asfáltica. Emissões (redução). Trecho experimental. Asfalto borracha.

ABSTRACT

This paper presents a study of a warm asphalt mix using binder additive with surfactant agent and tire crumb rubber. A test section was performed with the warm asphalt mixture, located in SPA-248-055, West Lane, between kilometers 3+00 to 6+000 and compared to the reference section, a hot mix section, located on the same highway, between kilometers 1 + 000 and 3 + 000.

Basic tests were also made to characterize the rubber-modified binder and to verify the mechanical behavior of the plant mixture, than compared to results of a reference hot mixture.

The tests performed to check the mechanical behavior were: tensile strength, resilient modulus, fatigue and rooting in French LCPC traffic simulator. Comparing the warm asphalt mixture with a mixture of reference, the results achieved were satisfactory.

In addiction, in this research were also performed induced moisture damage, and check the adhesion of the binder to the aggregate. In the case of this study, the results were acceptable.

During warm asphalt mix and hot mix production, analysis of reducing pollutant emissions were recorded. The results indicated that there is a reduction of pollutants such as total smoke, fumes soluble and organic volatile compounds.

Both the experimental section and the reference section were evaluated for 3 years for pavement performance parameters such as roughness and surface condition. The results show a positive behavior of warm asphalt mix compared to the reference pavement section over two years of observation.

Keywords: Rubberized Warm mix asphalt. Fatigue test. Pollutant emissions (reduction). Experimental field test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fluxograma das etapas realizadas na dissertação..... 24
Figura 2.1 Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de produção (usinagem). Fonte: Motta (2011)..... 27
Figura 2.2 Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico com a variação da temperatura. Fonte: ANDERSON et al. (2008)..... 30
Figura 2.3 Utilização de mistura asfáltica morna na Noruega. (Fonte: EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2014)……..……. 62
Figura 2.4 Composição dos fumos de asfalto emitidos durante a produção de mistura asfáltica quente. (Fonte: GAUDEFROY; VIRANAIKEN; PARANHOS, 2008)……. 64
Figura 3.1 Resumo esquemático dos ensaios realizados no material colhido durante a fase de execução do trecho experimental..... 72
Figura 3.2 Adição do agente surfactante no caminhão transportador de ligante asfáltico..... 73
Figura 3.3 Localização do trecho experimental na Rodovia Cônego Domenico Rangoni, em São Paulo. Retirado de Google Earth..... 74
Figura 3.4 Fotografia aérea indicando os trechos. Fonte: Google Earth..... 74
Figura 3.5 Corpos de prova moldados..... 77
Figura 3.6 Distribuição granulométrica das misturas estudadas..... 79
Figura 3.7 Equipamento do ensaio para de RTFOT..... 81
Figura 3.8 Corpo de prova sendo solicitado no ensaio de resistência à tração indireta..... 83
Figura 3.9 Detalhe do corpo de prova na prensa universal 85
Figura 3.10 Prensa universal..... 85
Figura 3.11 Mesa compactadora LCPC. Fonte: Moura (2010)..... 87
Figura 3.12 Equipamento francês de deformação permanente..... 87
Figura 3.13 Bomba à vácuo. 89
Figura 3.14 Amostra sendo preparada para o condicionamento em baixas temperaturas..... 89
Figura 3.15 Corpos de prova em banho-maria durante ensaio..... 89
Figura 3.16 Corpo de prova no ensaio de resistência à tração por compressão diametral..... 89
Figura 3.17 Ensaio de compressão diametral do corpo de prova. Retirado de Santos, 2005. 91
Figura 3.18 Preparação para o ensaio..... 92
Figura 3.19 Tela do programa durante o ensaio..... 92
Figura 3.20 Prensa universal “MTS˜”..... 93
Figura 3.21 Corpo de prova da mistura AB..... 93
Figura 4.1 Comparação entre viscosidade da amostra BWMA e AB..... 95
Figura 4.2 Parâmetros volumétricos e características mecânicas da dosagem Marshall da mistura AB..... 98
Figura 4.3 Parâmetros volumétricos e características mecânicas da dosagem Marshall da

mistura BWMA..... 99
Figura 4.4 Valores de resistências à tração e volume de vazios da mistura BWMA..... 101
Figura 4.5 Valores de resistências à tração e volume de vazios da mistura AB..... 101
Figura 4.6 Resultado do ensaio de deformação permanente da mistura BWMA 107
Figura 4.7 Resultado do ensaio de deformação permanente da mistura AB 107
Figura 4.8 Corpos de prova rompidos após o ensaio de resistência à tração..... 109
Figura 4.9 Gráfico com resultado do ensaio de fadiga para as misturas AB e BWMA..... 110
Figura 4.10 Distribuição granulométrica dos corpos de prova da mistura AB e BWMA..... 111
Figura 4.11 Diagrama de caixas do ensaio de resistência à tração..... 117
Figura 4.12 Diagrama de caixas do ensaio de volume de vazio. 117
Figura 4.13 Diagrama de caixas do ensaio de módulo de resiliência ensaiado..... 119
Figura 4.14 Variação do volume de vazios (%) em diferentes temperaturas para a mistura AB e BWMA. 120
Figura 5.1 Usina de asfalto da Ecovias. 121
Figura 5.2 Mistura AB a 165°C. 121
Figura 5.3 Mistura BWMA a 135°C..... 121
Figura 5.4 Acabadora Vogële aplicando a massa na pista..... 122
Figura 5.5 Rolo tipo chapa..... 122
Figura 5.6 Realização de medição de temperatura no caminhão, em usina..... 123
Figura 5.7 Comparação entre temperaturas da mistura BWMA..... 124
Figura 5.8 Comparação entre temperaturas da mistura AB..... 124
Figura 5.9 Colaborador realizando levantamento de irregularidade longitudinal..... 126
Figura 5.10 Gráfico de equação de correlação entre o MERLIN e o IRI (CUNDILL, 1991)..... 127
Figura 5.11 Disposição da Irregularidade longitudinal..... 128
Figura 5.12 Densímetro não nuclear..... 129
Figura 5.13 Bomba para medição de emissões poluentes..... 131
Figura 5.14 Bomba com filtro posicionado acima do local que a mistura asfáltica é descarregada..... 131
Figura 5.15 Bomba com filtro posicionado no ponto do operador..... 132
Figura 5.16 Esquema do posicionamento das 5 bombas com filtro ao redor do caminhão basculante..... 132
Figura 5.17 Inspeção da bomba com filtro..... 133
Figura 5.18 Resultados obtidos na análise de emissões realizado na usina Ecovias..... 136
Figura 5.19 Vista dos tanques de GLP da usina Ecovias..... 137
Figura 5.20 Média quilométrica dos índices de gravidade dos anos 2012, 2013 e 2014 – faixa 02..... 139
Figura 5.21 Resultados do levantamento de irregularidade longitudinal da faixa 02 para anos 2012, 2013 e 2014..... 140
Figura 5.22 Resultados do levantamento deflectométrico realizado entre 2007 e 2013 no trecho experimental BWMA na faixa 02..... 142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Tecnologias existentes no mercado. Fonte: adaptado de D'Angelo et al. (2008), Perkins (2009), Austroads (2012) e Rubio et al. (2012)..... 34
Tabela 2.2 Relatos de aplicações de mistura asfáltica morna e avaliação do desempenho em longo prazo. (Adaptado de PROWELL; HURLEY; CREWS, 2007 e ESTAKHRI; BUTTON; ALVAREZ, 2010)..... 48
Tabela 2.3 Iniciativas para estudo e avaliação dos DOTs dos Estados Unidos. Modificado de Autroads (2012)..... 55
Tabela 2.4 Projetos da NCHRP para Mistura Asfáltica Morna. (Fonte: PROWELL; HURLEY; FRANK. 2012)..... 56
Tabela 2.5 Produção de mistura asfáltica morna em 2012 em diversos países europeus e do mundo. (Fonte: EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2013)..... 59
Tabela 2.6 Relatos resumidos da utilização de mistura asfáltica morna em países Europeus. (Fonte: European Asphalt Pavement Association, 2014)..... 61
Tabela 2.7 Resultados de medição da combustão de gás. (Fonte: DAVIDSON, 2005)..... 67
Tabela 2.8 Estimativa de custo da implantação da tecnologia em Nova Jersey (BENNERT, 2012)..... 70
Tabela 3.1 Esquema dos trechos em estudo..... 75
Tabela 3.2 Estrutura da SPA248/055 na pista Oeste, km 4+000, faixa 02..... 75
Tabela 3.4 VDM comercial do trecho de estudo. Fonte: Ecovias (2008)..... 76
Tabela 3.4 Previsão do número N para 2012..... 76
Tabela 3.5 Deflexões médias e características calculadas..... 76
Tabela 3.6 Valores limites das características da mistura com asfalto borracha. Fonte - modificado de DNIT (2009a)..... 77
Tabela 3.7 Temperaturas em diferentes estágios durante o estudo..... 78
Tabela 3.8 Resultados obtidos nos ensaios do agregado..... 80
Tabela 3.9 Valores limites de resistência à tração por compressão da mistura com asfalto borracha. Fonte - modificado de DNIT (2009a)..... 83
Tabela 4.1 Comparação propriedades físicas dos ligantes..... 94
Tabela 4.2 Resultados dos ensaios antes e após o envelhecimento pelo RTFOT..... 96
Tabela 4.4 Resultados de dosagem Marshall das misturas AB e BWMA. 100
Tabela 4.5 Resultado de módulo de resiliência da mistura BWMA..... 102
Tabela 4.6 Resultado de módulo de resiliência da mistura AB..... 103
Tabela 4.7 Resultado de módulo de resiliência do revestimento obtido por meio de retroanálise..... 104
Tabela 4.8 Resumo dos resultados de módulo de resiliência..... 105
Tabela 4.9 Resultados obtidos na retroanálise dos trechos BWMA e AB..... 105

Tabela 4.10 Resultados de resistência retida à tração diametral dos corpos de prova submetidos ao ensaio de dano por umidade induzida..... 108
Tabela 4.11 Valores de resistência à tração para ensaio de fadiga..... 109
Tabela 4.12 Comparação do teor de ligante entre os corpos de prova no ensaio de fadiga..... 111
Tabela 4.13 Parâmetros volumétricos dos corpos de prova ensaiados para verificação da resistência à fadiga – Mistura BWMA..... 113
Tabela 4.14 Parâmetros volumétricos dos corpos de prova ensaiados para verificação da resistência à fadiga – Mistura AB..... 114
Tabela 5.1 Resultados de Estabilidade Marshall (kgf) – Mistura BWMA..... 125
Tabela 5.2 Controle do grau de compactação e volumetria – 2012 e 2013..... 130
Tabela 5.3 Valores obtidos de emissões para cada conjunto de filtro da mistura AB..... 134
Tabela 5.4 Resumo dos valores obtidos..... 134
Tabela 5.5 Valores obtidos de emissões para cada conjunto de filtro da mistura BWMA... 135
Tabela 5.6 Resumo dos valores obtidos..... 135
Tabela 5.7 Taxa de consumo aproximado (kg/ton.) para produção da mistura AB e BWMA..... 137
Tabela 5.8 Resultado do levantamento de afundamento na trilha de roda, antes e após a obra, na faixa 02..... 141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB – Asfalto Borracha
APA - *Asphalt Pavement Analyser*
AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ACGIH – *American Conference of Government Industrial Hygienist*
ANTT – Associação Nacional de Transportes Terrestres
ARTESP – Agência de Transporte do Estado de São Paulo
BWMA – Borracha Warm Mix Asphalt
CALTRANS – California Department of Transportation
CAP – Cimento asfáltico de petróleo
CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CCOPE/RJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
CDV - *Transport Research Centre*
CP – Corpo de prova
CTU – *Czech Technical University*
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DOT – *Department of Transportation*
EAPA - European Asphalt Pavement Association
FHWA – Federal Highway Administration
FWD – Falling Weight Deflectometer
GC – Grau de compactação
GEE – Gases do efeito estufa
GLP – Gás liquefeito de petróleo
HPA - hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
HFCs – hidrofluorcarbonos
IGG – índice de gravidade global
IRI – Índice de Irregularidade Internacional
LAPAV - Laboratório de Pavimentação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTPP – *Long term pavement performance*
LVDT – *Linear variable differential transducer*
MERLIN - *Machine Evaluation Roughness Low-cost Instrumentation*
MDHS - *Methods for the determination of hazardous substances*
NAPA - *National Asphalt Pavement Association*
NCAT – *National Center for Asphalt Technology*
NCHRP - *National Cooperative Highway Research Projects*
NIOSH – *National Institute for Occupation Safety and Health*
OSHA - Occupational Safety and Health Administration

PFCs – Perfluorcarbonos
PG – Grau de desempenho
Ppm – Partículas por minuto
Ppmvd – Volume diluído em partes por milhão
QI – Quociente de Irregularidade
RBV – Relação betume-vazios
RMSE – Root mean square root
RT – Resistência à tração por compressão diametral
RTREF - Resistência à tração por compressão diametral de referência
RRT – Relação das resistências à tração diametral
RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test
SABITA – *South Africa Bitumen Association*
SBS – Estireno - butadiene - estireno
SMA – *Stone matrix asphalt*
SUPERPAVE - *Superior performing asphalt pavements*
SVOC – Compostos orgânicos semi-voláteis
TRB – Transportation Research Board
TRL – Transport Research Laboratory
TP – Condições técnicas (*Technické podmínky)*
US EPA – United States Environmental Protection Agency
USIRF - L'Union des Syndicats de l'industrie Routière Française
VDM – Volume médio diário
VOC – Compostos orgânicos voláteis
VTU – *Technical University of Brno*
Vv – Volume de vazios
WMA – *Warm mix Asphalt*

LISTA DE SÍMBOLOS

°C grau Celsius

CH_4 metano

cm centímetro

CO monóxido de carbono

CO_2 dióxido de carbono

cont/km contagem/quilômetro

cP centipoise

g grama

Gmb – Massa específica aparente

Gmm - Massa específica máxima medida

kg quilo

kgf – quilograma força

km quilômetro

kN quilo Newton

L litro

L/min litro por minuto

m metro

m^2 metro quadrado

Massa SSS – Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca

mm milímetro

MPa megapascal

N newton

N_2 nitrogênio

N2O óxido nitroso

NO_2, NO_x, N_2O óxidos nítrico e nitrosos

Pa pascal

R$ reais

s segundo

SO_2 dióxido sulfúrico

SF_6 - hexafluoreto de enxofre

t tonelada

U$ dólar americano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO 21
1.2 METODOLOGIA 22
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 25
2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA 26
2.1 O QUE É MISTURA ASFÁLTICA MORNA 26
2.2 PRINCIPAIS BENEFÍCIOS 35
2.3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS E ENSAIOS COMPLEMENTARES 39
2.3.1 Fadiga 39
2.3.2 Resistência à formação de trilha de roda 41
2.3.3 Resistência a danos por umidade induzida 43
2.4 ESTUDO DE MÉTODO DE DOSAGEM E DESEMPENHO DA MISTURA EM CAMPO 44
2.5 EXPERIÊNCIA NACIONAL 49
2.6 ESTUDOS EM DESENVOLVIMENTO NO MUNDO 53
2.7 O ASFALTO BORRACHA 62
2.8 REDUÇÃO DAS EMISSÕES 63
2.9 QUESTÕES ECONÔMICAS 69
3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA 72
3.1 DOSAGEM MARSHALL 76
3.1.1 Temperatura de usinagem e compactação 78
3.2 AGREGADOS – CARACTERÍSTICAS/CURVA 79
3.3 ENSAIOS DE PROPRIEDADE FÍSICA DO LIGANTE 80
3.3.1 Simulação do envelhecimento do ligante asfáltico 80
3.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MISTURA ASFÁLTICA E TESTES COMPLEMENTARES 82
3.4.1 Resistência à tração por compressão diametral 82
3.4.2 Módulo de resiliência 84
3.4.3 Deformação permanente em trilha de roda 86
3.4.4 Resistência ao dano por umidade induzida 87
3.4.5 Fadiga 90
4 RESULTADOS DOS ENSAIOS 94
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO 94

4.2 SIMULAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DO LIGANTE 95
4.3 DOSAGEM MARSHALL 97
4.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADE MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS COLETADAS NA USINA E TESTES COMPLEMENTARES.....101
4.4.1 Resistência à tração 101
4.4.2 Módulo de resiliência 102
4.4.3 Deformação permanente na trilha de roda.....106
4.4.4 Resistência ao dano por umidade induzida 108
4.4.5 Fadiga 109
4.4.6 Análise estatística dos resultados dos ensaios 115
4.4.7 Estudo do comportamento da mistura quanto à diminuição da temperatura.....119
5 EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL 121
5.1 APLICAÇÃO DO MATERIAL.....121
5.2 CONTROLE TECNOLÓGICO 123
5.2.1 Aferição da temperatura 123
5.2.2 Estabilidade marshall.....125
5.2.3 Irregularidade longitudinal 125
5.2.4 Grau de compactação 129
5.3 ANÁLISE DE EMISSÕES.....130
5.4 REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DURANTE A USINAGEM 137
5.5 MONITORAMENTO DO TRECHO.....138
5.5.1 Avaliação funcional – estado da superfície 138
5.5.2 Inventário de superfície do pavimento 138
5.5.3 Índice de irregularidade longitudinal.....140
5.5.4 Afundamento de trilha de roda.....141
5.5.5 Levantamento deflectométrico.....141
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 144

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 148
Anexo I – Controle de temperatura do trecho experimental.....161
Anexo II – Curva de viscosidade x temperatura das misturas AB e BWMA.....167
Anexo III – Ensaios de volumetria das misturas AB e BWMA..... 169
Anexo IV – Resultados do ensaio de resistência à fadiga realizado 172

na prensa MTS.....
Anexo V – Levantamento deflectométrico de 2013..... 175
Anexo VI – Retroanálise – levantamento deflectométrico 2013 177

1 INTRODUÇÃO

Com a conscientização da sociedade quanto ao efeito nocivo ao meio ambiente causado por substâncias poluidoras, nos últimos anos, a indústria petroquímica desenvolveu novas tecnologias, de modo a contribuir com a redução destes agentes lançados à atmosfera.

Em meio a este desenvolvimento, no setor rodoviário, surgiram novas alternativas sustentáveis. Com o objetivo de contribuir com a redução da emissão de gases e particulados, provenientes do aquecimento do cimento asfáltico de petróleo, e ainda se baseando no protocolo de Quioto de 1997, a Europa desenvolveu a tecnologia de misturas asfálticas mornas (em inglês – *Warm Mix Asphalt*), que permite a redução da temperatura de usinagem e aplicação da massa asfáltica, tipicamente entre 20 e 50°C em comparação à mistura convencional a quente (KVASNAK et al., 2009), contribuindo para menor emissão de gases causadores do efeito estufa (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012), no entanto, com características mecânicas, desempenho, durabilidade e resistência similares à mistura asfáltica convencional (NCHRP, 2012).

Os primeiros experimentos com aditivos desta tecnologia foram realizados em 1995, na Europa (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012) enquanto nos Estados Unidos há relatos de aplicação em 2004 (HARRINGAN, 2012a). Segundo D'Angelo et al. (2008), em 2005 o *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) e o *Federal Highway Administration* (FHWA) formaram um grupo técnico de engenheiros americanos, com o objetivo de estudar esta nova tecnologia e foram enviados à Europa para estudar e coletar dados sobre misturas asfálticas mornas e depois construíram uma pista de teste para análise da tecnologia. Deste estudo, o grupo técnico publicou uma brochura cobrindo elementos de engenharia, meio ambiente, saúde do trabalhador e também, aspectos de segurança (PROWELL e HURLEY, 2007).

Atualmente as misturas asfálticas mornas estão sendo aplicadas no mundo inteiro, sendo aliadas também a outras tecnologias como aditivos poliméricos e borracha

moída de pneu, ganhando mais vantagens em sua aplicação, além da contribuição com o meio ambiente na redução de emissões de agentes poluentes à atmosfera.

Foi estimado pelo FHWA que nos Estados Unidos, em 2010, 10% dos 358 milhões de toneladas de mistura asfáltica aplicadas seriam misturas mornas (HARRINGAN, 2012a) e que nos próximos cinco anos, esta proporção poderia crescer para 50% (SABITA, 2011). Harringan (2012a) afirma que 30 ou mais tecnologias de misturas mornas estão disponíveis em mercado, sendo elas derivadas de processos químicos (aditivos químicos), orgânicos e de processos como espumejo do asfalto. Segundo ainda o autor, no momento, pelo menos 30 departamentos de transportes dos Estados Unidos (*Department of Transportation* - DOTs) estabeleceram especificações para o uso da mistura asfáltica morna.

Benefícios

A adição de borracha moída de pneu na mistura asfáltica traz melhoramentos em seu desempenho, como aumento da elasticidade do ligante, influenciando a resistência à deformação permanente em trilha de roda e resistência à fadiga, redução da susceptibilidade térmica, diminuição do envelhecimento e oxidação do ligante asfáltico, entre outros benefícios (CALTRANS, 2006).

Diversos autores e fabricantes de aditivos de mistura morna enunciam como benefícios na pavimentação a melhoria na compactação, com relação a deixar a massa trabalhável; a tecnologia permite a pavimentação em ambientes frios e permite aumentar a distância de transporte da massa, pois a massa perde a temperatura mais devagar, devido ao gradiente de temperatura ser menor, em comparação a misturas a quente (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012; KVASNAK et al., 2009; D’ANGELO et al. 2008).

Outros benefícios também citados são, a redução do envelhecimento, uma vez que a massa não é produzida em temperaturas como das misturas a quente; a redução do consumo de combustível, durante a produção, e redução nas emissões de

agentes nocivos na usina e no campo, proporcionando melhores condições para os trabalhadores e redução da segregação termal (KVASNAK et al., 2009).

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta pesquisa compreendeu a comparação do comportamento de misturas asfálticas mornas utilizando agente surfactante com misturas a quente, ambas produzidas com ligante modificado com borracha moída de pneu, adicionado pelo método *terminal blending.*

Foram avaliadas as propriedades mecânicas de ambas as misturas e verificado o comportamento *in situ das misturas nos trechos experimentais*, entre 2012 e 2014. Estas avaliações dos trechos experimentais foram realizadas por meio de levantamentos dos parâmetros funcionais e estruturais do pavimento, em campanhas anuais realizadas pela concessionária Ecovias.

Por fim, este trabalho também buscou estudar e avaliar os benefícios que a tecnologia de mistura morna promete no âmbito sustentável – meio ambiente e economia de energia, além de verificar quais os reflexos que a redução de temperatura promove no comportamento da mistura.

1.2 METODOLOGIA

Duas misturas foram estudadas: uma mistura a quente, com ligante modificado por borracha de pneu moída, denominada AB ou de referência e uma mistura morna utilizando agente surfactante, com ligante modificado com borracha moída de pneu, chamada de BWMA. Foram realizados ensaios de caracterização dos ligantes como o ponto de amolecimento, penetração, viscosidade e envelhecimento do ligante.

No estudo, foi realizada a dosagem Marshall para as duas misturas e com a aprovação da dosagem das misturas, iniciou-se a produção em usina para execução do trecho de referência, com a mistura AB e o trecho experimental, com a mistura BWMA. Na primeira semana foi executado o trecho de referência e na segunda semana o trecho experimental. Durante a produção e aplicação das duas misturas, coletaram-se amostras para serem ensaiadas, sendo em cada caso coletada única amostra de um único caminhão.

Ainda durante as semanas de produção e aplicação das misturas, foi realizada a captação, por meio de filtros, dos poluentes liberados em usina, para posterior análise e comparação em laboratório especializado.

Os corpos de prova das misturas AB e BWMA foram submetidos a ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, teste de fadiga com tensão controlada, teste de deformação permanente, resistência ao dano por umidade, característica volumétricas, estabilidade e fluência. Foi conferido também a granulometria e o teor de ligante durante a produção em usina. A análise dos resultados dos corpos de prova ensaiados foi realizada através de ferramentas estatísticas, comparando os resultados das duas misturas ensaiadas.

O trecho de referência e o trecho experimental com mistura asfáltica morna, estão localizados no estado de São Paulo, na rodovia de acesso SPA 248/055, antiga Rodovia Piaçaguera-Guarujá, entre os quilômetros 1+000 e 6+000 da Pista Oeste, faixas 01 e 02. Foi acompanhado, nestes dois trechos, durante a execução, o modo de produção na usina, espalhamento, compactação e suas respectivas

temperaturas. Durante a execução, foi verificado o grau de compactação dos dois trechos com o densímetro não-nuclear e após a execução, levantado a condição de irregularidade das camadas de revestimento com o equipamento Merlin.

Anualmente a concessionária Ecovias realiza levantamentos de parâmetros como irregularidade longitudinal, afundamento de trilha de roda e condição de superfície. Foram coletados dados de 2012, antes da obra e posterior à execução dos trechos em 2013 e 2014. Com estes dados foi possível verificar o comportamento das misturas aplicadas e realizar comparação entre elas e com isso conferir se houve ganhos advindos da aplicação da mistura morna.

Em 2013 houve levantamento da condição estrutural da rodovia por meio de equipamento FWD. Com dados obtidos do levantamento foi possível realizar retroanálise das bacias deflectométricas para obtenção do módulo de resiliência da mistura asfáltica morna aplicada. O módulo de resiliência obtido por meio de retroanálise foi comparado com os resultados obtidos em ensaio com corpos de prova oriundos de mistura usinada.

Os demais resultados de ensaios de caracterização do ligante e desempenho mecânico da mistura asfáltica morna foram comparados com os resultados da mistura de referência, e também analisados estes resultados com os limites estabelecidos pelas normas brasileiras. O ensaio para obtenção da deformação permanente foi analisado pelos limites da norma da França, visto que o equipamento é Francês e não há normas brasileiras sobre o tema.

O fluxograma apresentado na Figura 1.1 demonstra todas as etapas deste estudo, desde a concepção da mistura, através da dosagem Marshall até após a aplicação, no acompanhamento do comportamento da mistura morna em pista.

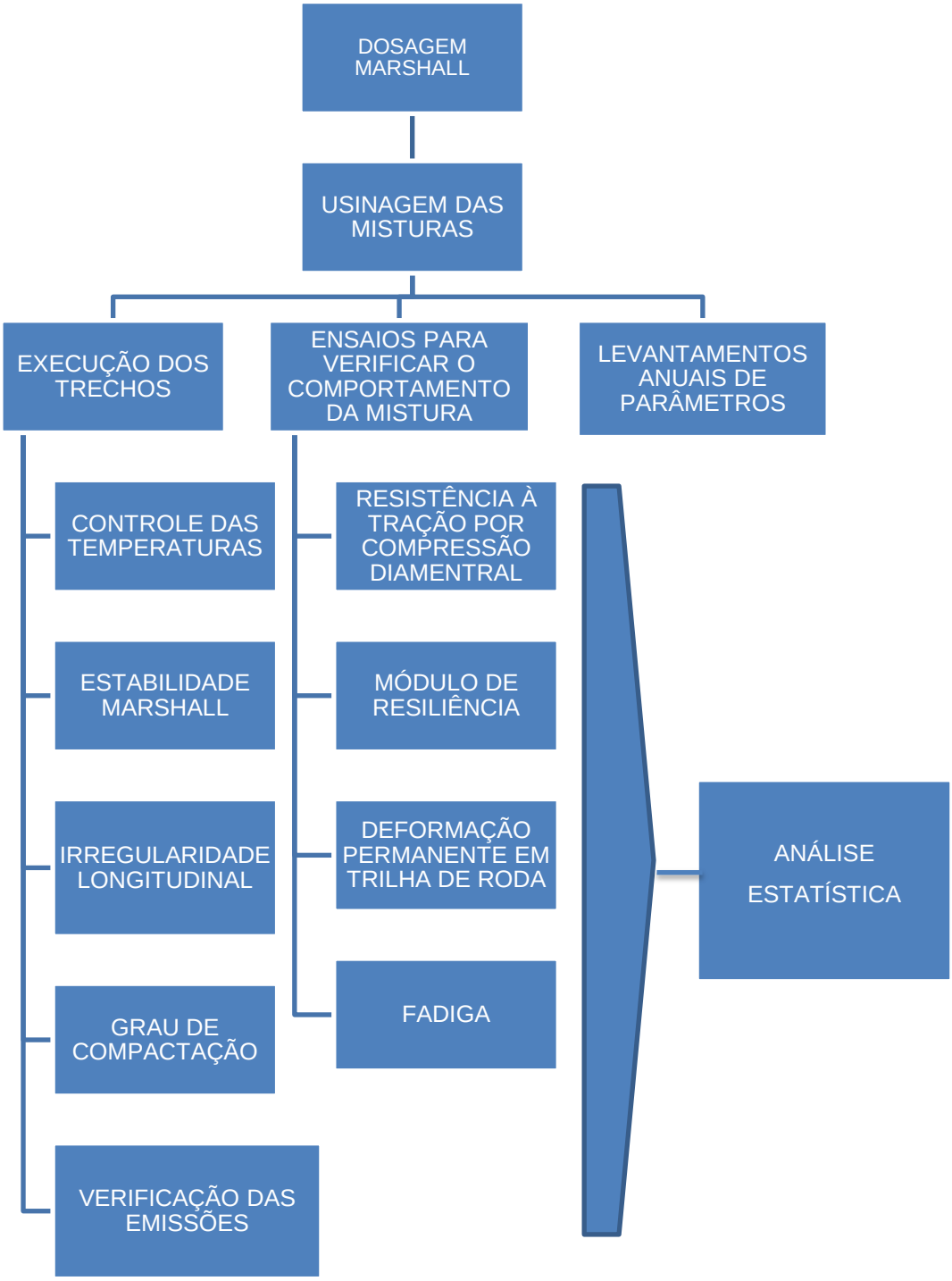


Figura 1.1 – Fluxograma das etapas realizadas na dissertação

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta seis capítulos. O primeiro capítulo traz a Introdução ao tema mistura asfáltica morna, apresentando a tecnologia, seus benefícios e os estudos que estão sendo realizados em alguns países, assim como projeto de normas e métodos para aceitação de novas tecnologias. A Introdução também apresenta o objetivo desta pesquisa e a metodologia adotada.

O capítulo dois, designado Pesquisa Bibliográfica apresenta a revisão bibliográfica sobre o tema da pesquisa, discorre sobre os fundamentos da mistura asfáltica morna e seus principais benefícios, expondo experiências realizadas no exterior e no Brasil.

O terceiro capítulo intitulado Desenvolvimento da Pesquisa discorre sobre o pacote de ensaios realizados com as misturas de referência e mistura experimental e também da implantação do trecho experimental e do trecho de referência. Este capítulo descreve a localização dos trechos, expõe o estudo de dosagem da mistura de asfalto-borracha e da mistura asfáltica morna, apresenta os ensaios realizados para caracterização do comportamento mecânico e demais ensaios.

No capítulo quatro, designado como Resultados apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização do ligante e ensaios para determinação do comportamento mecânico realizados com as duas misturas.

O quinto capítulo denominado Execução do Trecho Experimental relata a aplicação das misturas de referência e mistura asfáltica morna, como foi feito o controle tecnológico da obra e a análise das emissões durante a produção em usina além de apresentar o monitoramento anual do trecho realizado após a execução dos trechos.

Finalizando, o capítulo seis conclui o estudo e apresenta recomendações do estudo.

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 O QUE É MISTURA ASFÁLTICA MORNA

A maior parte da indústria de asfalto nos Estados Unidos define a tecnologia misturas mornas como um material que essencialmente tem a mesma mistura volumétrica básica e propriedades de desempenho que as misturas convencionais à quente (HARRIGAN, 2012), no entanto é produzida sob temperaturas menores, com redução de 28°C ou mais (BONAQUIST, 2011).

As misturas asfálticas podem ser classificadas como misturas a quente, mornas, semi-mornas e a frio. As misturas a quente são aquelas na qual o agregado é aquecido à temperatura de 10 a 15°C acima da temperatura do ligante, que não pode ultrapassar 177°C (BERNUCCI et al., 2010) e são as mais utilizadas para pavimentação (MOTTA, 2011; ASPHALT INSTITUTE, 2007; BERNUCCI et al., 2010). Misturas semi-mornas e mornas são as misturas preparadas em temperatura inferior a mistura à quente, ou seja, no caso da mistura morna, são aquelas preparadas acima de 100°C e, as misturas semi-mornas são produzidas com temperatura abaixo de 100°C (MOTTA, 2011),

No caso das misturas a frio, estas são produzidas em temperatura ambiente, sem aquecimento do agregado pétreo, com emulsão asfáltica (BERNUCCI et al., 2010). Muitos autores afirmam que este tipo de revestimento é utilizado em vias de baixo a médio volume de tráfego (ASPHALT INSTITUTE, 2007). A Figura 2.1 apresenta um esquema ilustrativo da classificação das misturas em função das temperaturas de produção.

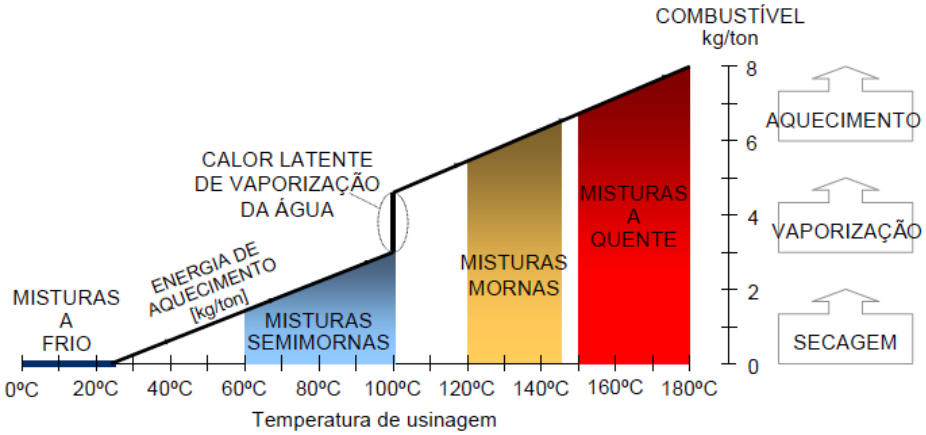


Figura 2.1 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de produção (usinagem). Fonte: Motta (2011).

A utilização de misturas asfálticas mornas para prolongar o período de pavimentação em estações frias é comumente observada. Aschenbrener, Schiebel e West (2011) explicam que este foi o motivo para a adoção deste tipo de mistura pelo Departamento de Transportes do Colorado, uma vez que pavimentar as estradas localizadas em montanhas era muito difícil, pois o alto tráfego impossibilitava a pavimentação durante o dia, e à noite as temperaturas eram muito baixas.

Braumgardner, Reinke, Brown (2012), Hanz e Bahia (2013) citam que as especulações originais eram que algumas tecnologias de WMA reduziriam a viscosidade do ligante asfáltico de modo a promover melhor cobrimento dos agregados sob baixas temperaturas, no entanto, tem-se observado que a redução da viscosidade não é o mecanismo primário da tecnologia e sim as características de lubricidade do ligante asfáltico que permitem a redução de temperatura na pavimentação. Braumgardner, Reinke, Brown (2012) realizaram ensaios tribológicos ligante asfáltico tipo PG64-22 e PG64-16 e aditivo orgânico e agentes surfactantes. Esta característica do ligante modificado também depende do tipo de aditivo utilizado.

As características das misturas mornas são vulneráveis à diversos fatores, como, a utilização de diferentes tipos de aditivos, que pode afetar as propriedades mecânicas da mistura morna, e a temperatura para a secagem do agregado pode afetar a resistência a danos causados por umidade (AUSTROADS, 2012). Segundo o

mesmo estudo, a variação de temperaturas na mistura do ligante asfáltico pode influenciar na durabilidade do pavimento em longo prazo e também seu desempenho e por fim, algumas tecnologias, como por exemplo espuma asfalto, necessitam de modificação nas especificações da usina de asfalto contribuindo para o aumento do custo da obra.

Existe a preocupação que a redução da temperatura de produção pode contribuir para deficiência da evaporação da água presente nos agregados elevando o potencial ao dano na mistura por umidade retida, causando deficiência na junção entre o agregado e o ligante (ASCHENBRENER; SCHIEBEL; WEST, 2011; SEBAALY; HAJJ, HITTI, 2012). Aschenbrener, Schiebel e West (2011), discorrem sobre a pesquisa feita no National Center for Asphalt Technology (NCAT) e a conclusão do órgão é que as misturas asfálticas mornas tendem a reduzir levemente à resistência a tração indireta, causada pela suscetibilidade ao dano por umidade retida no agregado. Os autores também citam que a redução da temperatura também poderia resultar em um ligante menos rígido, uma vez que a oxidação é menor, podendo acarretar em menor resistência à formação de trilha de roda e resistência à tração pobre, no entanto, como benefício, uma mistura menos rígida pode melhorar a resistência à fadiga, aumentando o tempo de vida do projeto.

Técnicas existentes

Atualmente, existem diversos produtos disponíveis no mercado, para a produção das misturas asfálticas mornas, que derivam de tipos de tecnologias diferentes.

Cheng, Hicks e Teesdale (2011) apontam que a escolha do aditivo para a mistura asfáltica morna depende de diversos fatores como quantas toneladas de mistura serão produzidas e qual o custo do aditivo, pois alguns produtos possuem custo inicial elevado. Os mesmos autores afirmam que outra consideração é sobre qual a redução de temperatura esperada no projeto, uma vez que alguns processos reduzem mais a temperatura que outros.

São vários os aditivos existentes no mercado e dependendo do tipo escolhido, pode haver ou não a necessidade de transformações/adaptações na usina de asfalto. Estes fatores são expostos neste item. Os tipos de aditivos existentes no mercado atual são:

a) Aditivos orgânicos

Os aditivos orgânicos (ceras) foram um dos primeiros tipos de aditivo para mistura asfáltica morna desenvolvida na Europa (BONAQUIST, 2011). Quando a temperatura do ligante aumenta acima do ponto de amolecimento da cera, usualmente a viscosidade diminui e, quando a mistura resfria, este aditivo se solidifica em partículas microscópicas e distribuídas uniformemente, o que aumenta a rigidez do ligante da mesma forma que aconteceria com a adição de fibras (Rubio et al., 2012) .

A escolha do aditivo orgânico deve ser feita com cuidado, verificando o ponto de amolecimento do aditivo e a temperatura de produção da mistura asfáltica, para evitar o risco de deformação permanente e também minimizar o potencial de trincamento térmico (PROWELL; HURLEY, 2007). Os tipos de ceras podem variar entre Fischer-Tropsch, cera de amida ácida e cera tipo Montan ou cera de linhita.

Entre alguns aditivos disponíveis no mercado pode-se citar o Sasobit, fabricado pela Sasol, CCBIT 113AD, fabricado pela Dr. H Technologies e o Asphaltan-B, fabricado pela Romonta GmbH. O Sasobit é uma cera sintética produzida a partir de gaseificação de carvão e requer pouca modificação na usina; o aditivo pode ser inserido diretamente no ligante ou na mistura (D'ANGELO et al., 2008). A substância possui ponto de amolecimento de aproximadamente 100ºC e é completamente solúvel em ligante asfáltico sob temperatura superior a 140ºC (ANDERSON et al., 2008).

Pesquisas mostram que as ceras Fischer Tropsch, que são oriundas da sintetização de hidrocarbonos e outros compostos asfálticos da síntese do gás carbono (RUBIO

et al., 2012), possuem boa oxidação e estabilidade ao envelhecimento (HURLEY; PROWELL, 2005).

A Figura 2.2 mostra o comportamento do ligante asfáltico e do ligante asfáltico modificado com aditivo orgânico. O ligante modificado com aditivo orgânico, com temperatura maiores tem viscosidade menor em comparação com o ligante convencional.

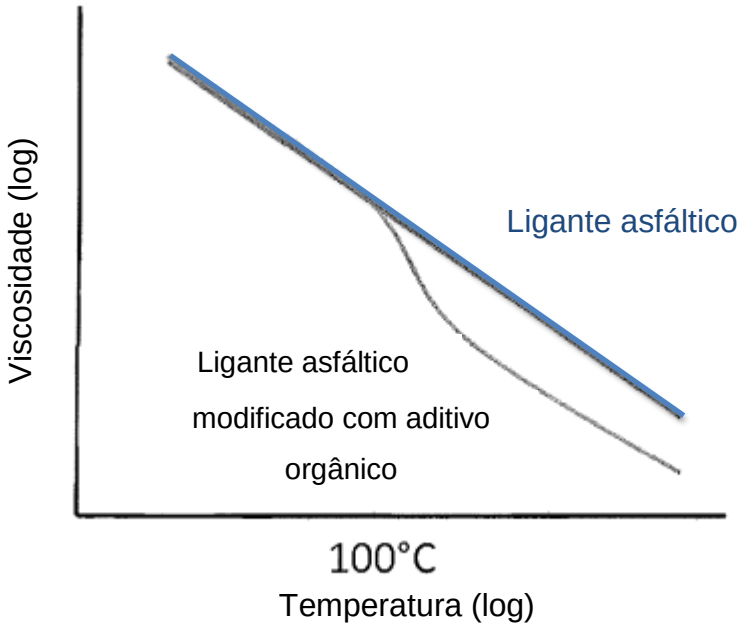


Figura 2.2: Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico com a variação da temperatura. Fonte: ANDERSON et al. (2008)

b) Agentes surfactantes

As misturas asfálticas que levam este agente não dependem de espuma ou redução de viscosidade para diminuir as temperaturas de produção e compactação e geralmente são constituídas de combinação de emulsificantes, surfactantes, polímeros e aditivos que ajudam na melhor cobertura do agregado pelo ligante. Este tipo de aditivo ajuda melhorando a trabalhabilidade da mistura e compactação como também promove melhor adesividade (possuem agentes anti-descolamento) (Rubio et al., 2012).

Segundo o relatório da AUSTROADS (2012), os agentes surfactantes não interferem na viscosidade do ligante e sim age como agentes tenso ativos ou surfactantes para regular e reduzir forças de atrito na interface microscópica dos agregados e o ligante, em intervalos de temperatura entre 85°C a 140°C.

O primeiro agente surfactante desenvolvido na Europa e Estados Unidos foi o Evotherm® desenvolvido pela MeadWestvaco em 2005 e em 2007, foi introduzido nos Estados Unidos o Rediset WMX, produzido pela AzkoNobel (BONAQUIST, 2011).

Atualmente, existem diversos produtos desta tecnologia no mercado de pavimentação. O aditivo pode ser inserido na mistura asfáltica durante a usinagem ou adicionado ao tanque contendo ligante asfáltico, dependendo do tipo de aditivo utilizado (AUSTROADS, 2012).

c) Aditivos mistos – orgânicos, com agente surfactante;

Nesta categoria estão aqueles aditivos que adicionam parte química e orgânica ao ligante asfáltico (AUSTROADS, 2012). Os autores afirmam que a parte química adicionada ao ligante, por exemplo, o enxofre, melhora o desempenho do ligante asfáltico, enquanto a parte orgânica diminui a viscosidade do ligante na temperatura de compactação, melhorando a trabalhabilidade da amostra.

Algum tipo de aditivo disponível é Shell Thiopave®, fabricado pela Shell, que combina aditivos plastificantes e outros tipos, necessita de pouca modificação e utiliza-se geralmente 25% deste aditivo por quilo de ligante asfáltico (AUSTROADS, 2012). O TLA-X, fabricado pela Trinibad and Tobago Ltd. consiste em pelotas com aditivo responsável pelo enrijecimento do ligante asfáltico (AUSTROADS, 2012).

d) Espuma de asfalto (espumejo de asfalto)

Tecnologia que envolve a adição uma pequena quantidade de água no asfalto quente, adição de material hidrófilo como as zeólitas ou agregado úmido (PROWELL; HURLEY, 2007). Tipicamente é adicionado 0,25% de zeólita sintética

por peso de mistura asfáltica (BONAQUIST, 2011). Este tipo de tecnologia requer adaptações significativas na usina de asfalto e o projeto de mistura asfáltica precisa ser revisado para incluir injeção de água e etapas de ação da espuma de asfalto até chegar à meia vida (PERKINS, 2009).

Clark e Rorrer (2011), na implantação da mistura asfáltica morna na Virgínia concluíram que para a utilização da tecnologia de espuma de asfalto, há necessidade de iniciar a produção da usina na temperatura da mistura convencional a quente e quando a produção e a temperatura estiverem estabilizada, pode-se iniciar a redução de temperatura.

O espumejo de asfalto também requer modificações na usina para permitir a adição de água no sistema de espumejo de asfalto, inferindo alto valor de investimento contrapondo ao baixo valor de compra do aditivo (AUSTROADS, 2012).

Um cuidado que deve ter ao escolher este tipo de tecnologia é a quantidade de água a ser inserida no ligante, que deve ser suficiente para causar o efeito espuma, e não superior, que possa causar problemas de falta de adesividade (RUBIO et al., 2012)

Exemplos desta tecnologia comercializada é o processo LEA (*Low Energy Asphalt),* Advera® WMA, Aspha-Min®, Double Barrel® Green e WAM-Foam.

O processo LEA foi desenvolvido na França e segundo Motta (2011) ocorre como descrito a seguir: Os agregados graúdos primeiramente passam por secagem em temperatura inferior ao processo usual e o ligante é aquecido em temperatura habitual para a mistura a quente e então são misturados. Após este processo, os agregados miúdos, contendo 3 a 4% de água são misturados aos agregados graúdos com ligante, resultando no espumejo do ligante, expansão que resulta na redução da temperatura da mistura a até aproximadamente 100°C. Por fim, segundo a autora, ocorre o equilíbrio térmico entre o agregado mineral, o ligante asfáltico e a água residual e então pode ser aplicada em pista.

O aditivo Aspha-Min é produzido pela indústria alemã Eurovia Services GmbH e MHI Group e sua base é a zeolita em pó, que é um silicato de alumínio e sódio sintético

(PROWELL; HURLEY 2005). Segundo os autores, durante a produção da espuma de asfalto, o Aspha-min, que tem a capacidade de armazenar 21% de água por massa é adicionado ao ligante na temperatura de aproximadamente 86 a 177°C e o fornecedor indica adicionar 0,3% do aditivo por peso de mistura asfáltica.

A Tabela 2.1 descreve resumidamente alguns tipos de aditivos das categorias listadas acima, disponíveis no mercado. É importante destacar que a redução de temperatura nas tecnologias de misturas asfálticas mornas acontece durante a produção na usina, com a diminuição de temperatura do aquecimento do agregado, mantendo a temperatura do ligante alta, ou seja, na temperatura indicada pelo fornecedor do ligante para a produção de uma mistura a quente.

Tabela 2.1 – Tecnologias existentes no mercado. Fonte: adaptado de D'Angelo et al. (2008), Perkins (2009), Austroads (2012) e Rubio et al. (2012).

Tecnologia	Nome comercial	Empresa fabricante	Descrição	Como funciona
Cera	Sasobit	Sasol (Fischer-Tropsch wax)	Cera sintética produzida a partir de gaseificação de carvão. A adição de cera altera a viscosidade do ligante. Pouca modificação da usina pode ser adicionada no ligante ou na mistura asfáltica.	Na Alemanha adiciona-se 2,5% por peso de ligante. Nos Estados Unidos utilizam de 1,0 a 1,5% por peso de ligante. A temperatura varia de 20 a 30°C abaixo da temperatura da mistura convencional.
Zeólita – asfalto espuma	Aspha-min	Eurovia e MHI	Pó de zeólita sintética que libera água durante a produção, formando espuma. Necessita modificação na usina de asfalto.	Utiliza-se aproximadamente 0,3% do peso da mistura. Temperatura varia de 20 a 30°C abaixo da temperatura da mistura convencional.
Asfalto espuma	Low energy asphalt (LEA2)	McConnaughay Technologies (USA)	Processo que envolve a mistura de agregados úmidos com o ligante, formando espuma de asfalto, que reduz a temperatura da mistura para 100°C. Modificação significativa da usina.	Adiciona-se entre 2 a 5% por peso de ligante. Mistura semi-morna trabalha com temperatura abaixo de 100°C.
Agente surfactante	Evotherm®	MeadWestvaco	Pacote químico de agentes surfactantes e melhoradores de adesividade	Nos Estados Unidos trabalha-se com temperaturas entre 85 – 115°C.
Asfalto espuma	Double-Barrel Green	Astec	Um bico injeta uma pequena quantidade de água no ligante aquecido, formando espuma. Necessita modificação na usina de asfalto.	Nos Estados Unidos trabalha-se com temperaturas entre 116 e 135 °C.
Químico-orgânico	Shell Thiopave ®	Shell	Combinação de vários aditivos, entre eles plastificantes.	Adiciona-se mais de 25% da massa de ligante asfáltico. Temperatura de produção e compactação aproximadamente igual a 130°C e 110°C. Pouca modificação na usina

2.2 PRINCIPAIS BENEFÍCIOS

A mistura morna proporciona diversos benefícios, melhorando condição na pavimentação e também tem capacidade de aumentar períodos de pavimentação e, no jargão de obra, ampliar a frente de obra para pavimentação e compactação da massa.

a) Melhoria na compactação;

Para misturas que utilizam grande porcentagem de material reciclado, a melhoria de compactação permite incorporar mais quantidade de material reciclado e esta característica é vantajosa na utilização de misturas mais rígidas (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012). A melhoria na trabalhabilidade na massa aumenta a coesão da mistura, lubrificando-a, garantido melhor compactação, principalmente em misturas com pouca trabalhabilidade (SABITA, 2011).

Pode-se afirmar que uma mistura asfáltica convencional quando compactada em temperaturas baixas, o ligante asfáltico se comporta no regime hidrodinâmico devido à existência de condições adequadas para as superfícies das partículas serem totalmente separadas (HANZ; BAHIA, 2013). Por este motivo, os autores afirmam que os aditivos de mistura morna ajudam na compactação, reduzindo a fricção interna do ligante asfáltico.

b) Permite pavimentar em ambientes frios sem perder qualidade;

As misturas asfálticas mornas permitem pavimentar em ambientes frios sem perder qualidade, pois sua temperatura é menor que a mistura asfáltica convencional. Prowell, Hurley e Frank (2012) discorrem que o potencial de estender o período de pavimentação, nos países que são castigados por condições meteorológicas no inverno é uma vantagem da tecnologia.

D’Angelo et al. (2008) relatam um caso na Alemanha que a pavimentação ocorreu com temperaturas entre -3 e 4°C. Eles afirmam que com a mistura asfáltica morna

obtém-se melhor densidade da massa com menos passadas do rolo compressor, em comparação com a mistura convencional em temperaturas baixas, neste nível de temperatura (-3°C e 4°C), não seria permitido aplicar a mistura a quente.

c) Habilidade para aumentar a distância de transporte ou ter mais frente de serviço e mesmo assim a massa ter capacidade de boa compactação;

Estas misturas, além de permitir a pavimentação em ambientes frios, também permitem aumentar a distância de transporte ou ter mais frente de serviço e mesmo assim a massa ter trabalhabilidade e compactação satisfatória.

Prowell, Hurley e Frank (2012) diz que similar a estender a época de pavimentação para locais que sofrem com condições meteorológicas severas, o uso de misturas asfálticas mornas ajudam a aumentar a distância de transporte entre a usina e o trecho de aplicação devido à taxa reduzida de esfriamento e viscosidade reduzida, no caso de alguns tipos de aditivos. Os autores citam um caso de obra na Austrália, que a mistura morna foi transportada por mais de nove horas em caminhão com isolamento e mesmo assim foi possível compactação satisfatória.

d) Habilidade de incorporar maior porcentagem de material reciclado à mistura asfáltica;

A utilização de material reciclado deixa a mistura asfáltica menos trabalhável e a tecnologia da mistura morna traz benefício neste aspecto, de modo que permite a adição de maior quantidade de material reciclado. Este potencial de incorporar maior quantidade de reciclado é por causa da redução de temperatura de usinagem, o que produz menor envelhecimento do ligante, neutralizando a rigidez do ligante do material reciclado (RUBIO et al., 2012).

Prowell e Hurley (2007) afirmam que o benefício pode acontecer de duas maneiras, a primeira é que ao reduzir a viscosidade da mistura há melhoria na compactação da massa e a segunda é a diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico, devido à produção em temperaturas menores, o que pode ajudar a rejuvenescer o ligante asfáltico do material reciclado, aumentando o tempo de serviço do pavimento, sem

problemas de craqueamento. Os autores ainda citam que trechos experimentais foram conduzidos utilizando várias tecnologias de mistura morna e a porcentagem de material reciclado variou de 20 a 45 por cento, em Maryland, em um projeto realizado com material reciclado, onde se verificou economia de U$4,55 por tonelada quando aumentaram a quantidade de material reciclado de 25 para 45 por cento.

e) Redução do envelhecimento do ligante asfáltico;

O aquecimento do ligante, em temperaturas elevadas, mesmo ocorrendo por período de tempo curto, igual o que acontece durante a usinagem pode causar o envelhecimento elevado do ligante (BERNUCCI et al., 2010).

No caso das misturas asfálticas mornas, há a diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico devido à produção da mistura em temperaturas menores. Esta diminuição ajuda a compensar os ligantes já envelhecidos no caso de utilização de material reciclado na mistura asfáltica, similarmente a utilizar um asfalto de grau menos rígido (D'ANGELO et al., 2008).

A diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico, devido à redução de temperatura na produção da mistura asfáltica morna resulta também em melhoria na flexibilidade e resistência à fadiga da mistura e também resistência ao surgimento de trincas térmicas (SABITA, 2011). Segundo o relatório da SABITA (2011), estes ganhos aumentam o desempenho do pavimento e o tempo entre as manutenções dos mesmos, o que promove economia financeira para os órgãos responsáveis pelas vias.

f) Redução de consumo do combustível;

Como a mistura morna requer aquecimento a temperaturas menores, o consumo de energia no aquecimento é reduzido, diminuindo consequentemente o consumo de combustíveis fósseis. Cervarich (2007) chegou a uma redução de 11 por cento para uma redução de temperatura de 28°C. Segundo Prowell, Hurley e Frank (2012) a média da redução de consumo no estudo desenvolvido foi de 23 por cento.

Prowell e Hurley (2007) apontam cálculos preliminares que indicam que uma redução de 28°C na temperatura resulta em economia de combustível de 11%. Segundo os autores, a economia de combustível fóssil em vários projetos que utilizaram a mistura morna variou entre 20 a 35 por cento, no entanto, eles apontam que a economia de combustível fóssil depende de diversos fatores como temperatura de produção, umidade dos agregados, e detalhes característicos das usinas de asfalto.

g) Redução de emissões de agentes nocivos na usina e no campo;

Há redução de emissões de agentes nocivos na usina e no campo, pois a mistura não chega à temperaturas que são responsáveis pela maior emissão de gases.

Pesquisas comprovam que as emissões na usina de asfáltica e no campo são diretamente dependentes da temperatura da mistura: quanto maior a temperatura que a mistura fica exposta, maior a emissão de anéis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (CAVALLARI et al., 2012) e baixas temperaturas de produção significam menor consumo de combustível, logo, novamente redução de emissões de poluentes. Isso é uma vantagem para locais que possuem problemas ambientais ou com condições que não permitem acúmulo de gases e fumaça, como por exemplo, pavimentação em túneis.

Na Austrália, aproximadamente 390.000 toneladas de CO_2 são anualmente lançadas à atmosfera oriunda da produção de oito milhões de toneladas de mistura asfáltica, enquanto que com a diminuição da temperatura de produção, utilizando a mistura morna, poderia gerar redução de mais de 120.000 toneladas de CO_2 por ano (JENNY, 2009 apud AUSTROADS, 2012). A estimativa citada mostra o impacto significativo que a diminuição da emissão de CO_2 causaria na Austrália.

O relatório emitido pela SABITA (2011) expõe que investigações realizadas em usinas de asfalto americanas concluíram que quando a temperatura de produção reduz de 29°C a 43°C, há diminuição de emissão de materiais particulados entre 67% e 77%, enquanto o nível dos fumos do asfalto, medido através do método de

materiais solúveis em benzeno foi reduzido para 72% a 81%, comparado com a mistura de referência a quente.

h) Melhores condições para os trabalhadores;

A redução de temperatura tanto na produção da mistura asfáltica quanto na sua aplicação em pista promove melhores condições de trabalho. Segundo SABITA (2011), a segurança ao trabalhador é beneficiada diretamente pela redução da temperatura da mistura asfáltica, que reduz o risco de acidentes relacionados com temperatura, com ganhos de conforto, referentes à redução da emissão dos gases e de temperatura.

2.3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS E ENSAIOS COMPLEMENTARES

2.3.1 Fadiga

O Asphalt Institute (2007), afirma que resistência à fadiga é a resistência do revestimento asfáltico à sua flexão repetida devido ao tráfego. O resultado do rompimento à fadiga é o trincamento do pavimento, conhecido como trinca tipo Jacaré. Um importante fator para a falta de resistência à fadiga é o envelhecimento do ligante asfáltico, pois o ligante oxidado tende a ficar mais rígido, reduzindo sua ductilidade e afetando sua resistência ao trincamento por fadiga (AREGA; BASHIN, 2012).

Diversos fabricantes, como já citado anteriormente, afirmam que um dos principais benefícios das misturas asfálticas mornas é a melhoria nas características de fadiga, em comparação com as misturas à quente, devido à redução do envelhecimento que ocorre durante a usinagem, uma vez que são produzidas sob temperaturas menores que o convencional. Contudo, Bonaquist (2011), em seu estudo obteve, na comparação da mistura asfáltica morna com a mistura asfáltica à quente, resultados

similares para as curvas de fadiga, concluindo que para as misturas produzidas com o mesmo tipo de agregado e ligante, os resultados tendem a ser praticamente iguais.

Otto (2009) em pesquisa realizada com zeólita aditivando a mistura asfáltica, preparada a 135°C com CAP 50-70, encontrou resultados de fadiga para a mistura morna inferiores aos valores da mistura convencional (mesmo tipo de CAP – cimento asfáltico de petróleo, produzido à 150°C), embora os parâmetros de módulo complexo tenham sido superiores em temperaturas abaixo de 30°C.

Na pesquisa realizada por Arega e Bashin (2012) com aditivos distintos para misturas mornas e ligantes com diferente grau de desempenho obtiveram como resultado dados que sugeriam que a rigidez da mistura que sofreu envelhecimento em longo prazo é similar ou menor que a da mistura asfáltica convencional, mas também depende do tipo de ligante utilizado. No caso, foram estudadas as misturas utilizando os ligantes com grau de desempenho PG76-28 e PG64-22, onde alguns corpos de prova com tecnologias de mistura morna diferentes, utilizando o ligante PG76-28 tiveram resultados de resistência à fadiga significantemente diferente dos resultados dos corpos de prova com o ligante convencional menor, o que não foi observado para o PG64-22, que no experimento mostrou que o aditivo morno não afetava a rigidez da mistura (AREGA; BASHIN, 2012).

No relatório de avaliação da tecnologia de mistura morna no estado de Washington, Bower et al. (2012), encontraram, no caso de mistura morna utilizando a cera Sasobit valores de resistência a fadiga menores que da mistura a quente, de referência.

2.3.2 Resistência à formação de trilha de roda

Diversos autores afirmam que a deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da engenharia rodoviária (BERNUCCI et al., 2010; SANTUCCI, 2001; AREGA; BASHIN, 2012), além da fadiga e trincamento térmico, no caso de países que sofrem com baixas temperaturas (SANTUCCI, 2001). Os revestimentos asfálticos estão sujeitos a sofrerem afundamentos com o tráfego devido à redução dos seus vazios, principalmente quando o volume de vazios do pavimento é alto, com 10 a 12% de volume de vazios (BROWN et al., 2009).

Para verificar a resistência à formação de trilha de roda no pavimento é necessário analisar o tipo de ligante empregado na mistura, e o grau de compactação que influencia diretamente para o surgimento deste problema (MOURA, 2010). Esta informação vem de encontro ao teste de um novo tipo de ligante aditivado e a compactação da mistura morna em temperaturas inferiores ao usual.

Na mistura asfáltica morna, a deformação permanente é apontada com ponto de atenção e é de grande preocupação de pesquisadores, como para Bower (2011). O autor expõe que esta preocupação deve-se à temperatura inferior que a mistura é produzida e compactada, causando menor envelhecimento ao ligante que o esperado na mistura asfáltica à quente, e isso significa que o ligante pode ser muito menos rígido, o que poderia ser um dos causadores da deformação em trilha de roda.

Hurley e Prowell (2006), quando a tecnologia ainda estava sendo descoberta pelos Estados Unidos, estudaram e realizaram ensaios no equipamento Asphalt Pavement Analyser (APA, em português – analisador de pavimento asfáltico) em misturas mornas com aditivo Evotherm®, utilizando dois tipos de agregado - granito e calcário, e dois tipos de ligante – PG 64-22 e PG76-22. Segundo os autores, foram moldados corpos de prova de mistura morna e mistura de referência (sem adição do Evotherm®) em diferentes temperaturas (149, 129, 110 e 88°C). Após os ensaios, os pesquisadores chegaram à conclusão que o aditivo melhora a trabalhabilidade da mistura, mas se preocuparam com o fato de abrir a pista ao tráfego e a mistura

ainda estar “trabalhável”, aumentando potencialmente o risco de deformação permanente. Para verificar tal situação, Hurley e Prowell (2006) moldaram dez corpos de provas usando o ligante PG 64-22 e ambos os tipos de agregados, em temperatura de 121°C, no compactador giratório do Superpave, e os ensaiaram sob condição de envelhecimento a curto e longo prazo e depois realizaram ensaio de tração indireta.

Hurley e Prowell (2006) afirmam que o tipo do ligante influencia diretamente o afundamento de trilha de roda encontrada no simulador APA, seguido da temperatura de compactação. Na pesquisa, os autores notaram que as misturas com PG 76-22 tiveram resultados melhores que o PG 64-22, ou seja, menor potencial de deformação permanente em relação ao PG 64-22, principalmente em temperaturas baixas de compactação. Eles notaram que a presença do Evotherm® diminuiu significantemente o potencial de formação de trilha de roda no corpo de prova ensaiado e que as misturas com calcário tiveram maior resistência que as misturas com agregado granítico.

Os mesmos autores também perceberam que o potencial de deformação permanente aumenta com a diminuição da temperatura de usinagem e compactação, e acredita-se que isso é relacionado à diminuição do envelhecimento do ligante.

No entanto, Bower et al. (2012) em pesquisa realizada no estado de Washington com diversas tecnologias de mistura morna obtiveram resultados dispersos. Alguns aditivos apresentaram deformação em trilha de roda parecida ao obtido com a mistura a quente, de referência, como no caso do Sasobit® e outros aditivos apresentaram menor resistência á deformação permanente que a mistura de referência, como no caso da tecnologia de espumejo de asfalto.

2.3.3 Resistência a danos por umidade induzida

Em pesquisa realizada por Hurley e Prowell (2006), utilizou-se o aditivo Evotherm® em versão anterior ao Evotherm® 3G, dois tipos de agregados (granito e calcário) e dois tipos de ligantes asfálticos (PG 64-22 e PG 76-22) e foram comparados o comportamento e trabalhabilidade destas misturas, inclusive a resistência a danos causados por umidade induzida. No caso de resistência a danos causados por umidade induzida, na pesquisa os autores realizaram ensaios das misturas seguindo a ASTM D 4867 (ASTM, 2009b).

Com o objetivo de simular a realidade no processo de mistura na usina, Hurley e Prowell (2006) adicionaram, antes de o agregado ser misturado ao ligante, três por cento de água a mais do valor de absorção, ou seja, para o granito que possui grau de absorção de 1,1 por cento, o total de porcentagem de água foi 4,1 (HURLEY; PROWELL, 2006), simulando assim a umidade típica na pilha de agregado. Os autores notaram que a resistência à tração indireta, sujeito à umidade induzida depende do tipo de ligante utilizado e tipo de agregado, como por exemplo, o ligante PG 76-22 que teve resultado maior de resistência à tração indireta utilizando o granito do que com calcário.

No relatório 691 do National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), encabeçado por Bonaquist (2011), os pesquisadores concluíram que o dano causado por umidade depende do tipo de processo e aditivo utilizado. Nesta pesquisa foram estudados 11 tipos de misturas asfálticas mornas e comparadas com dois tipos de mistura asfáltica a quente. Após os ensaios, o autor obteve como resultado que a resistência à tração seca, a resistência à tração do corpo de prova condicionado e as relações entre as resistências (RRT) das misturas mornas foram significantes menores, comparando com as misturas asfálticas a quente. Bonaquist (2011) também afirma que nas amostras com aditivos que usam em sua composição agente *anti-stripping* não se obteve resultados da relação das resistências à tração (RRT) abaixo que as das misturas asfálticas a quente.

A adição de cal hidratada na mistura asfáltica morna também é um procedimento utilizado para evitar o descolamento entre o ligante asfáltico e o agregado. Esta preocupação é acentuada no caso da mistura asfáltica morna, quando esta, ao ser submetida a temperaturas inferiores que a mistura a quente, para a secagem do agregado, pode apresentar danos em decorrência da umidade retida no agregado. Button, Estakhri e Wimsatt (2007) sugerem que a utilização de cal hidratada como agente anti-descolamento enrijece a mistura asfáltica morna e ajuda a aumentar a resistência à formação de trilha de roda.

Button, Estakhri e Wimsatt (2007) sumarizam no relatório publicado algumas descobertas feita em pesquisa realizada pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) e entre os itens citam que vários agentes anti-descolamento foram utilizados para medir o potencial dano causado pela umidade retida e com a utilização de cal hidratada na mistura de Aspha-Min e agregado granítico resultou na melhoria de coesão e resistência à danos causados pela umidade retida.

Os autores também citam que os resultados do simulador de Hamburg sugeriram que a cal hidratada aumentaria a resistência à deformação permanente das misturas contendo Aspha-Min, compactadas a baixa temperatura devido ao efeito enrijecedor da cal.

Perkins (2009) afirma que foi observado que a utilização de cal hidratada na mistura asfáltica morna melhora a coesão e aumenta à resistência à dados causado pela umidade retida, além de também aumentar a resistência à deformação permanente, sendo que a adição de cal é importante quando a mistura morna apresenta problema de descolamento entre o agregado e o ligante.

2.4 ESTUDO DE MÉTODO DE DOSAGEM E DESEMPENHO DA MISTURA EM CAMPO

Bonaquist (2011), junto com o National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) percebeu a necessidade estudar um método para dosagem de misturas

asfálticas mornas e emitiu o relatório 691 – *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt* (Práticas para dosagem de mistura asfáltica morna), nos Estados Unidos.

O relatório foi dividido em duas fases, a primeira fase determinou uma metodologia preliminar do projeto de mistura baseado em estudos de bibliografias e pesquisas em andamento e na segunda fase, a metodologia criada na primeira fase foi avaliada através de estudo minucioso em laboratório, incluindo testes para verificar se a mistura tinha engenharia razoável, sensitividade, a praticidade e aplicabilidade da metodologia entre outras características e também verifica o comportamento quanto à fadiga do material e aplicação em trechos experimentais (BONAQUIST, 2011).

Na primeira fase, os aditivos utilizados foram o Advera, Evotherm® ET, LEA (Low energy asphalt), Sasobit, WAM FOAM (Espuma), entre outros (BONAQUIST, 2011). O projeto preliminar de especificação para projeto de mistura asfáltica morna foi feito baseado nas especificações americanas como a AASHTO R35 - Prática Normativa para Projeto Volumétrico Superpave de Misturas Asfálticas à Quente e a AASHTO M32 - Especificação Normativa para Projeto Volumétrico Superpave de Misturas Asfálticas à Quente (BOANAQUIST, 2011).

Na segunda fase foram conduzidos três estudos para avaliar o procedimento da primeira fase: estudo laboratorial de dosagem da mistura, estudo de validação em campo e estudo de fadiga das misturas asfálticas mornas (BONAQUIST, 2011). Segundo o autor, foram testadas diversas misturas, com ligante convencional e ligante modificado com diferentes tipos de aditivos, preparados segundo a AASHTO R35 e comparados as características volumétricas e teor de ligante, absorção do ligante, resistência à formação de trilha de roda, resistência à tração, entre outras propriedades.

Na validação em campo, foram estudadas misturas mornas e quentes de seis projetos diferentes (BONAQUIST, 2011). As misturas foram avaliadas ao grau de desempenho (PG), envelhecimento ao longo do tempo, usinagem e compactação, dano por umidade e resistência à formação de trilha de rodas (BONAQUIST, 2011). O autor afirma que destas 16 misturas, quatro eram misturas a quente para controle,

duas com aditivo Advera, duas com Evotherm® ET, duas de tecnologia Low energy asphalt (LEA), duas com tecnologia de asfalto espumado (Gencor Ultrafoam GX e Astec Double Barrel Green) e por fim, três com aditivo Sasobit. A temperatura de produção variou de 99 a 135°C e de compactação de 90 a 121°C (Bonaquist, 2011).

Na conclusão do estudo, Bonaquist (2011) afirma que será necessária pouca mudança no método de dosagem atual para atender os projetos com misturas asfálticas mornas. No entanto, apesar das propriedades volumétricas, observados durante o estudo serem similares, como a absorção do ligante é de 1% ou menos, a compactação, a susceptibilidade à umidade, deformação permanente das misturas asfálticas mornas é diferente das misturas a quente produzidas com os mesmos agregados e ligantes é diferente e é recomendado que o estudo realizado no Projeto 09-43 seja utilizado na concepção de misturas asfálticas mornas (Bonaquist, 2011).

Bonaquist (2011) conclui também que para auxiliar na implantação do presente estudo, foi elaborado um anexo da norma AASHTO R 35 intitulado Projeto Mistura Especial: Considerações e Métodos para Misturas Asfálticas Mornas (WMA), desenvolvido para abordar as diferenças entre a concepção de misturas mornas e misturas a quente.

Kim et al. (2012) realizaram um trabalho que estudou a introdução do aditivo LEADCAP (em inglês - *low energy and low carbon-dioxide asphalt pavement*) na Coréia e avaliou o desempenho da mistura asfáltica, analisando a rigidez e resistências em laboratório, através de ensaios de módulo dinâmico, tração indireta e simulador de tráfego para deformação permanente em trilha de roda. Segundo os autores, para a investigação de campo foram acompanhados 9 trechos experimentais com o total de 4.090 metros. Também foi avaliada a taxa de emissão de gases e consumo de combustível e, como resultado, obtiveram 32% de economia em energia, redução de 32% na emissão de CO_2, 18% de redução da emissão de CO, 24% de redução de SO_2 e 33% de redução na emissão de NO_x (KIM et al., 2012).

A maioria dos trechos experimentais de aplicação da tecnologia de mistura morna é recente, de modo que a avaliação de desempenho em longo prazo é limitada. O

projeto da NCHRP 09-49A fase II que tem por objetivo identificar quais os materiais e suas propriedades que são determinantes para o bom desempenho em longo prazo e propor um guia de melhores práticas para o uso de tecnologias de misturas mornas está em desenvolvimento, com previsão de conclusão para 2016 (TRB, 2014).

O FHWA criou o programa de avaliação do desempenho do pavimento em longo prazo (LTPP), que vem avaliando tecnologias desde 1991 (FHWA, 2014). No boletim de inverno de 2013 do LTPP a tecnologia de mistura morna foi abordada, falando principalmente das aplicações em Ohio, Louisiana e Ontário (FHWA, 2013). Nesta publicação, é relatado que a equipe do LTPP, nos últimos anos, vem visitando estados e províncias americanas e, durante estas visitas, as agências de transportes expressaram a necessidade de conduzir um monitoramento do desempenho em longo prazo das seções com misturas mornas.

A Tabela 2.2 a seguir reúne relatos de experiências e análise do desempenho após mais de um ano de serviço, de projetos executados com mistura asfáltica morna nos Estados Unidos, inclusive o teste realizado na pista experimental da NCAT em Auburn. Nestes testes não houve evidência de deformação permanente após um a três anos de serviço, no entanto não é fácil encontrar na literatura relatos de trechos experimentais com análise do desempenho após 6 ou 7 anos de serviço.

Tabela 2.2: Relatos de aplicações de mistura asfáltica morna e avaliação do desempenho em longo prazo. (Adaptado de PROWELL; HURLEY; CREWS, 2007 e ESTAKHRI; BUTTON; ALVAREZ, 2010)

Estado/ Província	Projeto	Ano	Espessura (cm)	Aditivo utilizado	Avaliação (pós obra)	Descobertas
Texas	San Antonio Loop 368	2006	5	Evotherm ® ET	1 mês 1 ano 3 anos	Comportamento da mistura morna foi equivalente aos segmentos com mistura a quente. Corpos de prova foram extraídos após um ano da pavimentação. Nestes corpos de prova foram observados que a absorção do ligante pelo agregado na mistura a quente foi evidente, enquanto na mistura morna não. Esta redução da absorção na mistura morna pode ser devido à temperatura de produção. Após 3 anos de serviço, algumas trincas começaram a surgir na seção de mistura morna e na de mistura a quente, no entanto sem sinal de deformação permanente em ambas as seções, que tiveram desempenho equivalente.
Texas	Austin SH71	2008	5	Evotherm ® DAT	1 ano	A avaliação do pavimento após um ano da compactação não verificou sinais de defeitos/desgaste superficiais na seção de mistura morna e na de mistura a quente. Durante o primeiro ano de serviço, na seção com mistura morna houve aumento da rigidez em comparação com a seção de mistura a quente, que permaneceu igual. Com um ano de serviço, o desempenho das duas seções foram similares, com a mistura morna um pouco menos rígida que a mistura a quente.
Texas	Lufkin FM 324	2008	3,8	Sasobit, Evotherm ® DAT, Rediset, Advera	1 ano	Durante a compactação foi utilizado termômetro com mapeamento térmico e mostrou que na mistura a quente o material espalhado tinha grande diferença de temperatura, em comparação com a mistura morna, que por sua vez era muito mais uniforme. Inspeção visual realizada nas quatro seções de mistura morna e na seção de mistura a quente, após um ano de serviço, indicou bom comportamento, sem evidencia de deformação permanente e trincamento..
Saginaw Michigan	Forth Worth BU 287	2008	Seção B – 25 Seção D – 8,9	Evotherm ® DAT	1 ano	Foi realizado levantamento com georadar para verificar a uniformidade da mistura na profundidade compactada de 25 cm. A utilização do georadar permite identificar problemas de densidade na mistura e deficiência na compactação. Os dados medidos foram comparados com a seção de espessura menor e mostraram uniformidade na compactação e sem sinal de defeitos. Após um ano de serviço não havia evidências de deformação permanente e trincamento.
Auburn Alabama	NCAT Paveme nt Test Track			Evotherm ® ET	Simulador de tráfego – 43 dias	O desempenho em longo prazo da mistura morna, após a aplicação de pouco mais de meio milhão de eixos simples em 43 dias demonstrou ser comparável ao desempenho da mistura a quente em relação à durabilidade e resistência à deformação permanente.

2.5 EXPERIÊNCIA NACIONAL

No Brasil, os estudos com misturas asfálticas mornas começaram a partir de 2006, como é possível observar no relato feito por MOTTA (2011).

Em 2006 foram estudadas por pesquisador da Universidade do Ceará as propriedades mecânicas de misturas mornas produzidas com um tipo de zeólita, em comparação com misturas convencionais a quente (SOUZA FILHO, 2006). Os resultados que o pesquisador encontrou mostraram que não houve comprometimento dos parâmetros mecânicos das misturas mornas (resistência à tração, módulo de resiliência), em comparação com misturas asfálticas convencionais a quente e o produto utilizado na pesquisa mostrou-se eficaz para diminuição da temperatura de produção.

No ano de 2008 o Laboratório de Pavimentação da Escola de engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV) divulgou um relatório realizado com a concessionária Concepa junto à ANTT sobre o estudo laboratorial do comportamento de misturas mornas em relação à vida de fadiga e deformação permanente. Na pesquisa foram utilizadas as técnicas de emulsão asfáltica modificada por aditivo a base de enxofre e adição de 0,3% sobre o peso total de zeólita sintética durante a produção da mistura (LAPAV, 2008).

Neste estudo realizado pela Lapav e Concepa foram ensaiados os ligantes e emulsão quanto ao ponto de amolecimento, penetração, viscosidade, densidade e massa específica entre outros (LAPAV, 2008). Segundo Lapav (2008) as misturas avaliadas quanto à resistência à deformação permanente, submetendo os corpos de prova ao ensaio de *creep* dinâmico e vida de fadiga, com o ensaio de tensão controlada. Na produção e aplicação da mistura com zeólita, a temperatura de mistura variou entre 100 e 120°C e a temperatura de compactação entre 80 e 100°C. Os resultados obtidos no estudo foram satisfatórios e os autores afirmam que as duas técnicas são promissórias visto que as baixas temperaturas podem aumentar a distância de transporte entre a usina e o local de execução, além de permitir o

trabalho em condições climáticas mais adversas que as misturas asfálticas a quente convencionais (LAPAV, 2008).

Cavalcanti (2010) estudou a adição de 2% de surfactante amínico Rediset ™ WMX em ligante asfáltico com grau de desempenho PG 64-22 e PG 76-22, dosada pela metodologia SUPERPAVE e as misturas produzidas a 130°C e compactadas a 110°C. O autor constatou em sua pesquisa que com relação à resistência à deformação permanente não houve variação de resultado quanto à redução da temperatura de compactação e quanto à rigidez da mistura, esta obteve ligeiramente maior rigidez quanto às misturas a quente.

Em 2011, a pesquisadora Rosângela Motta apresentou um estudo realizado com misturas mornas em sua tese de doutorado. O trecho experimental foi executado em 2010, na Rodovia dos Bandeirantes, na pista Sul, e compreendeu 400 metros de revestimento com mistura asfáltica morna de graduação *gap-graded* e asfalto borracha, com o aditivo Gemul XT14 (MOTTA, 2011). Nesta pesquisa foram estudadas as características mecânicas e complementares como compactação Marshall, compactação PCG, módulo de resiliência, deformação permanente e dano por umidade induzida (MOTTA, 2011). No estudo, a mistura morna apresentou valores de resistência à tração e deformação permanente próximo aos resultados da mistura a quente preparada em laboratório, e também a resistência ao dano por umidade, com valor acima da exigência da norma. Além deste estudo, a pesquisadora também investigou a questão da redução de emissões de poluentes durante a usinagem da mistura.

MOTTA (2011) afirma que foi observado, em sua pesquisa, que a situação de maior temperatura, na mistura asfáltica, leva ao aumento de concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), e na avaliação de emissões em pista, verificou-se que a mistura asfáltica morna apresentou menor quantidade de HPAs, exceto por duas substâncias. A autora também aponta que alguns HPAs são potenciais cancerígenos e que esta redução deve ser encarada positivamente.

Em outubro de 2011, a concessionária Ecovias, responsável pela operação do Sistema Anchieta Imigrantes, em São Paulo realizou a primeira aplicação no grupo

EcoRodovias Concessões e Serviços, na rodovia SP-055, Rodovia Padre Manuel da Nóbrega, pista Leste, entre os quilómetros 278 e 279. O teste compreendeu três segmentos. No primeiro segmento foi utilizado asfalto borracha Ecoflex B 3G, que é um produto de mistura morna desenvolvido pela empresa Greca Asfaltos. No segundo segmento foi utilizado asfalto borracha (Ecoflex B 2G) com adição de Evotherm® M1, e um terceiro segmento contíguo a estes dois onde foi executada a mistura a quente com asfalto borracha – Ecoflex B 2G. Nas três misturas, o teor de ligante era igual a 6%.

O projeto destes segmentos abrangia uma camada de três centímetros de reforço de mistura asfáltica com borracha - *Gap Graded* faixa *D* da Caltrans (Departamento de Transportes da Califórnia – Estados Unidos). Os equipamentos de pavimentação utilizados foram a pavimentadora Vögele 1103 e 2 rolos tipo chapa de 11 toneladas cada (Dynapac CC422) para compactação e acabamento de revestimento. O tempo médio entre a usina e a aplicação em campo era de 1h45 a 2h30.

Neste primeiro teste, foram observados diversos pontos que serviram como alerta para correção e observação em testes futuros com mistura morna, tanto na usinagem quanto na aplicação. Entre o observado pode-se destacar (MERIGHI, et al., 2012):

a) Percebeu-se que quanto menor for a temperatura dos agregados maior será a corrente (ampères - A) dos motores do misturador durante os processos de mistura, durante todo o processo. Notou-se que com picos de corrente acima de 84A (limite dos motores), houve sobrecarga dos disjuntores, que causou o desarme dos mesmos e interrupção no processo de usinagem, além da redução na vida útil destes componentes da usina;

b) Controle de pré-aquecimento das mesas vibratórias das vibro acabadoras, em função da redução causada pelas temperaturas mais baixas (inferiores a 130ºC). Houve necessidade de aquecimento da mesa da vibro acabadora com o serviço em andamento devido ao acabamento superficial da massa estar fora do padrão normal do traço (arrepiado), fato anormal em operações com material a quente.

Ainda no grupo EcoRodovias, a Ecopistas executou em dezembro de 2011 o primeiro teste da concessionária, na Rodovia SP-070, Rodovia Carvalho Pinto entre os quilômetros 53+400 e 52+970, faixa 02 da pista Oeste. O projeto executado compreendia fresagem de nove centímetros e recomposição de dez centímetros, com mistura asfáltica Faixa IVb do Instituto de Asfalto. O aditivo utilizado foi o Evotherm® M1, na quantidade de 0,4% por peso de ligante, em conjunto com o CAP modificado por polímero Poliflex tipo 60-85. Durante a execução do trecho houve a preocupação com relação ao grau de compactação na pista em função da espessura da camada e de não ter se utilizado rolo de pneus, mas verificou-se por ensaios que o grau de compactação (GC) variou entre 98 e 100%, dentro do esperado.

Apesar do resultado satisfatório, a execução não atendeu padrão de irregularidade exigido pelo grupo, devido a problemas executivos na compactação com rolo liso vibratório e o número de paradas da acabadora ocasionadas pela logística do transporte, a irregularidade da superfície, medida por meio do MERLIN (*Machine Evaluation Roughness Low-cost Instrumentation)* atingiu valores de Quociente de Irregularidade (QI) da ordem de 42 cont/km, bem superiores aos limites de especificação do grupo EcoRodovias (QI < 25 cont/km).

Em março de 2012, a Ecopistas executou o segundo segmento experimental na rodovia SP-070 Carvalho Pinto, entre os quilômetros 72 e 74 da pista Leste, faixa 2 (km 72+100 a 73+193) e faixa 3 (73+193 a 74+000). Na mistura asfáltica foi adicionado 0,4% do aditivo Evotherm® M1. O CAP foi modificado por polímero SBS - Poliflex tipo 60-85, a mistura aplicada foi a faixa IVb do Instituto de Asfalto e a dosagem da mistura asfáltica teria 5% de CAP. Neste segundo testes os resultados obtidos foram satisfatórios, atendendo padrões de qualidade, inclusive de irregularidade longitudinal.

Em 2010, um grupo de pesquisadores do COPPE/RJ e da Concer liderados pela professora Laura Motta escreve um relatório para a Associação Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) avaliando o comportamento de trechos experimentais, na BR-040, rodovia concessionada pela CONCER, com três tipos de tecnologia (MOTTA et al., 2010). Um destes trechos seria executado com mistura

asfáltica morna com tecnologia de espumejo, utilizando a faixa C do DNIT, CAP 50-70 e usinado em usina gravimétrica, com espessura de revestimento de oito centímetros (MOTTA et al., 2010).

O objetivo da pesquisa seria avaliar o desempenho de um trecho dimensionado pelo método mecanístico empírico SisPav, em comparação com uma mistura convencional, cujas dosagens serão realizadas pelo método SUPERPAVE (MOTTA et al., 2010). Este trecho foi executado em abril de 2012 e até o momento da conclusão do trabalho, pelo trecho ser recente não havia conclusões sobre seu desempenho, mas a mistura asfáltica morna mostrou-se adequada para o espalhamento e compactação em baixas temperaturas (MOTTA et al., 2012).

Ainda em 2012, Jaelson Budny (2012) estudou em sua dissertação de mestrado o uso do aditivo CCBit113ad, sendo adicionado 2 e 3% do aditivo orgânico ao CAP 30/45, mistura que estava sendo aplicada na região metropolitana do Rio de Janeiro. Na pesquisa, Budny conseguiu redução 15°C na temperatura de produção da mistura e não observou problemas de adesividade. Budny (2012) também estudou o comportamento da mistura quanto á sua resiliência e observou que os valores do módulo de resiliência aumentaram com a diminuição da temperatura dos agregados, em cerca de 8% em cada caso.

2.6 ESTUDOS EM DESENVOLVIMENTO NO MUNDO

Estados Unidos

Nos Estados Unidos, diversos trechos experimentais com mistura morna estão sendo estudados em 45 estados, enquanto 41 DOTs (*Department of Transportation*) estão desenvolvendo especificações próprias que permitem a substituição da mistura asfáltica convencional pela mistura asfáltica morna (AUSTROADS, 2012).

Austroads (2012) afirma que a empresa produtora de aditivos químicos MeadWestvaco executou mais de 150 projetos de mistura asfáltica morna em 2008

ao redor do mundo, totalizando mais de 400 mil toneladas de mistura asfáltica morna.

Diversos projetos do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) foram desenvolvidos e iniciados devido à esforços do *WMA Technical Working Group* e outras instituições americanas (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012). Neste mesmo relatório os autores afirmam que os DOTs nos Estados Unidos, aliados com a indústria química, criaram oportunidades para demonstração dos projetos e desenvolvimento de especificações.

O relatório da Austroads (2012) cita diversos projetos e iniciativas que foram reproduzidas na Tabela 2.3 a seguir:

Tabela 2.3 - Iniciativas para estudo e avaliação dos DOTs dos Estados Unidos. Modificado de Autroads (2012).

DOT	Quantidade	Síntese
Florida DOT	Mais de 300.000 toneladas em 25 projetos até Julho/2010.	A especificação da Flórida permite que as misturas asfálticas mornas sejam utilizadas em contratos de obras após realização do projeto e análise da mistura convencional. O DOT da Flórida está monitorando os trechos com mistura morna (aditivos e asfalto espuma) e espera conseguir formar um banco de dados para futuras decisões sobre a utilização da mistura.
Texas DOT	Mais de 1 milhão de toneladas aplicadas até 2010.	No Texas, é adotada a prática de: Avaliação em laboratório de uma mistura asfáltica durante seu projeto; Avaliação de rotina de deformação permanente e susceptibilidade à umidade das misturas à quente, utilizando o simulador de Hamburgo. É requerido aos empreiteiros executar trecho de teste com 50 toneladas, que é analisado no início do projeto. Estes requerimentos permitem que a mistura a quente seja avaliada. Após a avaliação das propriedades e desempenho em curto prazo da mistura, o DOT aprova o projeto para ser executado. Durante a obra, são colhidas amostras da mistura para ensaios, inclusive de resistência à deformação permanente. Aplicando exatamente os mesmos procedimentos da mistura a quente para a mistura morna, o DOT do Texas espera avaliar as misturas antes e durante a obra.
Nova Iorque DOT (NYSDOT)	Programa de avaliação de misturas mornas, envolvendo 24 trechos experimentais.	Cada projeto deverá incluir uma seção experimental de mistura convencional (mínimo 1000 toneladas) que permita comparação com a mistura morna. Empreiteiros serão autorizados a selecionar um aditivo de mistura morna a partir de uma lista de tecnologias pré-aprovadas pelo DOT de Nova Iorque. Antes da obra, ambas as misturas, convencional e morna, devem ser ensaiadas e testadas para resistência à deformação permanente e sensibilidade à umidade e os resultados submetidos à aprovação do DOT. O DOT desenvolveu um protocolo de avaliação para a mistura morna que já foi adotado pela costa nordeste dos Estados Unidos.

Como citado anteriormente, a NCHRP tem desenvolvido nos últimos tempos diversos projetos para estudo e avaliação, além de coleta de informações e formação de banco de dados das misturas asfálticas mornas com diversos tipos de aditivos. Algumas pesquisas têm como objetivo a criação de guias para projeto de misturas mornas, além de estudos de suas propriedades e desempenho. A Tabela 2.4 apresenta os projetos em desenvolvimento ou já desenvolvidos pelo NCHRP.

Tabela 2.4 - Projetos da NCHRP para Mistura Asfáltica Morna. (Fonte: PROWELL; HURLEY; FRANK. 2012).

Projeto NCHRP	Título	Data de conclusão esperada
9-43	Práticas para Projeto de Mistura Asfáltica Morna (*Mix Design for Warm Mix Asphalt)*	Finalizado (2011)
9-47 A	Propriedades e Desempenho das Tecnologias de Misturas Asfálticas Mornas (*Proprierties and Performance of Warm Mix Asphalt Technologies*)	Finalizado (2014)
9-49	Comportamento das Tecnologias de Mistura Asfáltica Morna: Estágio I – Suceptibilidade à Umidade (*Performance of WMA Technologies Stage I – Moisture Susceptibility)*	Setembro/2013
9-49A	Desempenho das Tecnologias de Mistura Asfáltica Morna: Estágio II – Desempenho em Campo a Longo Período (*Performance of WMA Technologies Stage II – Long-Term Field Performance)*	Julho, 2016
20-07 (311)	Programa de Avaliação do Desenvolvimento da tecnologia de Mistura Asfáltica Morna (*Development of Warm Mix Asphalt Technology Evaluation Program)*	Finalizado (2012)
9-53	Propriedades da Aplicação para Mistura Asfáltica Morna Espumada (*Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications)*	2014

O projeto do NCHRP 9-43 foi desenvolvido com o objetivo de criar uma metodologia de projeto de dosagem e análise de procedimento para as mistura asfálticas mornas (BONAQUIST, 2011), utilizando a metodologia SUPERPAVE para misturas asfálticas e incluía um grupo de ensaios para analisar se o projeto da mistura asfáltica morna iria fornecer resultados satisfatórios e bom desempenho em campo e ser aplicável a qualquer tecnologia de mistura morna (TRB, 2011).

Segundo Austroads (2012), o projeto 9-47 da NCHRP, na fase II teria como objetivo desenvolver relações entre as propriedades mecânicas dos ligantes asfálticos mornos e o desempenho da mistura em laboratório e no campo, comparar a produção entre as duas misturas, e verificar as práticas de pavimentação e custos destas misturas, incluindo recomendações de ajustes na usina, além de analisar emissões da mistura morna em comparação com a mistura convencional.

Ainda de acordo com o relatório da Austroads (2012), outro projeto em desenvolvimento na NCHRP denominado 9-49, estuda a susceptibilidade à umidade das misturas asfálticas mornas. O objetivo do projeto é avaliar se as tecnologias de mistura morna podem afetar a resistência aos danos causados por umidade nos pavimentos flexíveis, diminuindo esta resistência e desenvolver um guia para identificar e limitar a susceptibilidade à umidade nos pavimentos de mistura morna (AUSTROADS, 2012).

Em 2012, a NCHRP publicou um artigo denominado Research Results Digest 374, que propõe um programa para avaliação da tecnologia das misturas asfálticas mornas e resume as principais conclusões do relatório final do projeto NCHRP 20-07.

Coréia do Sul

Pesquisas a respeito do desempenho de pavimentos asfálticos na Coréia do Sul começaram em 1999 (AUSTROADS, 2012). Segundo o relatório, três projetos estão em desenvolvimento, sendo eles relacionados à pesquisa de materiais/método de projeto e tecnologia de construção sustentável. O principal objetivo é desenvolver pavimentos sustentáveis com alta tecnologia de construção e controle tecnológico (AUSTROADS, 2012). O orçamento para o projeto de mais de cinco anos é de U$ 17,3 milhões, divididos entre a iniciativa privada (13 empresas privadas), o governo coreano e 13 universidades, sendo o projeto controlado pelo Instituto Coreano de Tecnologia da Construção (Korea Institute of Construction Technology – KICT) (AUTSROADS, 2012).

Com relação às tecnologias de misturas mornas, a Coréia do Sul está desenvolvendo estudos almejando implementá-las no país, avaliando suas propriedades, e desenvolvendo processos através de análises em trechos experimentais, priorizando o processo de mistura morna espumada, e com o objetivo de elaborar uma norma/especificação para pavimentos com mistura asfáltica morna (AUSTROADS, 2012).

Austrália

O relatório da Austroads de 2012 conta a trajetória dos estudos e experimentos realizados na Austrália com as misturas asfálticas mornas, além do processo para introdução da tecnologia no país. Segundo os autores, em Melbourne, o objetivo do estudo que está sendo realizado é comprovar que o desempenho da mistura asfáltica morna é similar à mistura asfáltica convencional. Eles acreditam que se a afirmação for verdadeira, muitos projetos irão utilizar a mistura morna.

Os autores do relatório (AUSTROADS, 2012) apontam ainda a importância de examinar os projetos desenvolvidos pela NCHRP e sua aplicabilidade às condições da Austrália e também especial atenção para o estudo do desempenho em longo prazo e a de susceptibilidade à umidade.

Europa

A norma europeia para misturas betuminosas, EN 13108-1 a número 7 está em vigência desde 2008 e umas das conclusões obtidas na norma é que não existe temperatura mínima de produção, apenas temperaturas máximas (Rubio et al., 2012). Segundo os autores, a norma requer que a densidade in situ seja satisfatória, portanto, é função do fabricante da mistura asfáltica estabelecer qual a temperatura mínima de produção que atenda as exigências da norma. A Associação Europeia de Pavimentação Asfáltica (European Asphalt Pavement Association – EAPA), que representa indústrias produtoras de misturas betuminosas e companhias envolvidas com pavimentação rodoviária afirma que a Norma Europeia não deve ser vista como uma barreira para a implantação do uso de misturas mornas nos países (EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2013).

A EAPA divulgou em 2013 um quadro com a produção de misturas asfálticas mornas nos países europeus no ano de 2012, considerando como mistura asfáltica mornas aquelas produzidas com temperatura entre 100°C e 150°C (EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2013). Os valores apresentados estão expostos na Tabela 2.5, junto com valores de produção nos Estados Unidos, Japão, Canadá e África do Sul, para comparação.

Tabela 2.5 – Produção de mistura asfáltica morna em 2012 em diversos países europeus e do mundo. (Fonte: EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2013).

País	2012 (milhões de ton.)
Dinamarca	0,020
Finlândia	0,490
França	2,633
Grã Bretanha	< 1,000
Hungria	0,002
Irlanda	0,001
Luxemburgo	0,010
Holanda	0,070
Noruega	0,020
Espanha	0,070
Suécia	0,500
Suíça	0,780
Romênia	1,500
Estados Unidos	77,100
Japão	0,156
Canadá-Ontário	0,600
África do Sul	0,120

Observando a Tabela 2.5 é possível notar que a maior produção na Europa, de misturas asfálticas mornas é na Grã-Bretanha, um país com aproximadamente 245,1 mil km de vias pavimentadas (DEPARTMENT FOR TRANSPORT, 2010), contrastando com os Estados Unidos com 2,6 milhões de milhas de rodovias, ou seja, aproximadamente 4,2 milhões de quilômetros de rodovias, sendo delas 93% cobertas com revestimento asfáltico (NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2014).

Na Grã-Bretanha foi produzido no ano de 2012 aproximadamente 18,5 milhões de toneladas de mistura asfáltica, sendo deste montante mais de um milhão de tonelada em mistura asfáltica morna (EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2013), o que equivale a aproximadamente 5,4% do valor total de produção de mistura asfáltica sendo mistura morna, enquanto que nos Estados Unidos, é produzido cerca de 550 milhões de toneladas de mistura asfáltica por ano (NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION), e deste montante, segundo a Tabela 2.5, 77,100 milhões de toneladas são mistura asfáltica morna, equivalendo a quase 14% do total de mistura asfáltica produzida no país.

O EAPA relata as últimas experiências com mistura asfáltica morna nos países como República Tcheca, Dinamarca, França, Noruega e Suécia. A Tabela 2.6 resume estes relatos.

Tabela 2.6 – Relatos resumidos da utilização de mistura asfáltica morna em países Europeus. (Fonte: EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2014).

País	Relato
República Tcheca	Pesquisadores da Czech Technical University em Praga (CTU) e a Technical University of Brno (VUT) publicaram em conjunto com o Ministério dos Transportes Tcheco a primeira especificação preliminar de mistura morna (TP 238). Esta especificação também é válida para o mastique asfáltico aplicado em temperatura menor que o usual. Em 2013 foi realizada uma importante obra de pavimentação em um túnel rodoviário em Praga. Esta aplicação foi requerida pela Administração e toda a emissão de poluentes controlada pelo centro de pesquisa em transporte (CDV).
Dinamarca	Em setembro de 2012 foi realizado estudo na rodovia 321 em Ulladulla onde pavimentaram com mistura asfáltica morna nas mesmas condições que a mistura a quente. A mistura utilizada foi um SMA 11 com polímero e a temperatura foi 20°C menor que da mistura a quente. Como resultado obtiveram as mesmas características volumétricas e adesão que da mistura a quente.
França	Segundo a EAPA, atualmente a França utiliza muito misturas asfálticas mornas. Em 2019, a União dos Sindicatos da Indústria de Estradas Francesa (L'Union des Syndicats de l'industrie Routière Française – USIRF) publicou uma recomendação para promover o uso de misturas asfálticas mornas. O comunicado dizia resumidamente que recomendava sistematicamente o uso de misturas mornas exceto em casos particulares com limitações técnicas específicas ou em caso que a autoridade rodoviária não permitisse sua utilização. Ainda no comunicado o USIRF lembra que o incentivo à utilização da mistura é um dos objetivos do acordo voluntário assinado em Março de 2009 pelos projetistas, construtores e responsáveis pela manutenção da infraestrutura rodoviária e vias públicas urbanas. A EAPA afirma que a partir de então houve aumento na utilização de misturas mornas chegando em 7,5% da produção total de misturas asfálticas em 2012.
Noruega	Em 2012, a autoridade de inspeção do trabalho (Labor Inspection Authority) decidiu por acelerar o uso de misturas asfálticas mornas e para isso, a Administração de Estradas da Noruega começou a recompensar contratos que utilizavam a mistura com um bônus de €4 por tonelada, quando a mistura asfáltica era produzida com a mesma qualidade e pelo menos 25°C abaixo que a mistura convencional. Até o final de 2013 3 contratos produziram 210.000 toneladas de mistura asfáltica morna. A Figura 2.3 mostra o crescimento da utilização de misturas mornas no país ao longo dos anos.
Suécia	Em 2013 produziram cerca de 145.000 toneladas de mistura asfáltica morna
Turquia	Na Turquia as especificações técnicas de rodovias possuem disposições para lidar com aditivos de misturas mornas, sujeitos a demonstração de desempenho equivalente ao das misturas a quente. Até agora não há experiência em rodovias, no entanto há projeto em desenvolvimento para fabricação de aditivo no país.

Observando a Figura 2.3 é nítido que a utilização da mistura morna se deu praticamente a partir de 2012 e seu crescimento tem sido significativo.

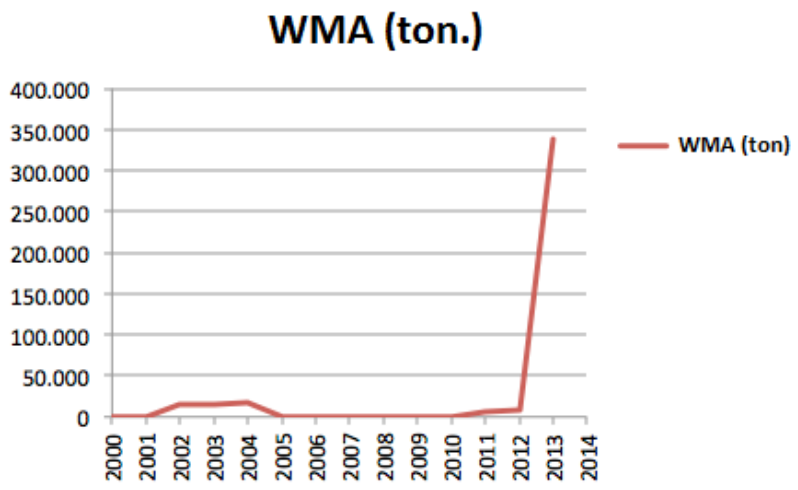


Figura 2.3 - Utilização de mistura asfáltica morna na Noruega. (Fonte: EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2014).

2.7 O ASFALTO BORRACHA

O asfalto borracha vem sendo utilizado em misturas asfálticas desde o meio da década de 1960, quando a cidade de Phoenix, no Arizona foi pioneira na aplicação deste material em lama asfáltica, em um projeto de pavimentação na cidade (CHENG, HICKS e TEESDALE, 2011). Desde 1988 o departamento de transportes do Arizona já aplicou mais de 4,2 milhões de toneladas de asfalto borracha, totalizando U$ 225 milhões e utilizando 15 milhões de pneus (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

A adição de borracha proveniente da moagem de pneus promove melhoria nas resistências à deformação permanente, trincas térmicas, trincas de fadiga e envelhecimento (BERNUCCI et al., 2010). No entanto, a inserção de borracha moída de pneu no ligante asfáltico diminui a trabalhabilidade da mistura asfáltica, necessitando então de maior temperatura de mistura e compactação que a mistura convencional precisa (CHOWDHURRY; BUTTON, 2008) e a elevação da temperatura de produção da mistura asfáltica com inserção de borracha pode emitir mais gases poluentes e nocivos à saúde humana.

Xiao, Zhao e Amirkhanian (2009) discorrem que inserir borracha moída de pneu na mistura asfáltica morna é uma combinação benéfica que melhora as propriedades reológicas do ligante asfáltico, inclusive, Motta (2011) cita diversos autores que afirmam que é sabido que produtos asfálticos submetidos a elevadas temperaturas emitem elementos como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), em que alguns são suspeitos de serem mutagênicos e/ou cancerígenos.

2.8 REDUÇÃO DAS EMISSÕES

Na usinagem de misturas asfálticas há emissões de substâncias nocivas ou não, causadas pelo aquecimento do ligante asfáltico, e este segundo Gaudefroy, Viranaiken e Paranhos. (2008) é influenciado pela temperatura de mistura e tipo de mistura asfáltica utilizada, aquecimento do agregado e queima de combustível para funcionamento da usina.

Quando o ligante asfáltico é aquecido, há liberação de vapores que são ricos em compostos voláteis, que são potencialmente tóxicos (WESS; OLSEN; SWEENEY, 2004), portanto, os trabalhadores ficam expostos aos fumos e vapores durante a execução do revestimento asfáltico. Estes fumos do asfalto tem a forma de uma nuvem de pequenas partículas, e são formados pela condensação dos gases, após a volatização do ligante asfáltico, (WESS; OLSEN; SWEENEY, 2004).

A composição química dos vapores e fumos de asfalto pode variar, dependendo do tipo de petróleo de origem, tempo e temperatura de usinagem (MOTTA; BERNUCCI; VASCONCELLOS, 2013). A verificação do nível de emissão de poluente é tão importante que na Espanha, a regulação requer que as companhias de asfalto devem realizar medidas periódicas dos gases de combustão e partículas em suspensão (Rubio et al., 2013).

O fumo de asfalto pode ser dividido em duas frações, sendo uma em partículas e outra em fração gasosa (GAUDEFROY; VIRANAIKEN; PARANHOS, 2008). Na fração partícula, é dividido em compostos orgânicos, que são solúveis em benzeno, de onde surgem os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) particulados,

enquanto que na fração gasosa são obtidos os compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis, ou seja, HPAs gasosos (GAUDEFROY; VIRANAIKEN; PARANHOS, 2008). A Figura 2.4 exemplifica a composição dos fumos de asfalto quanto à emissões.

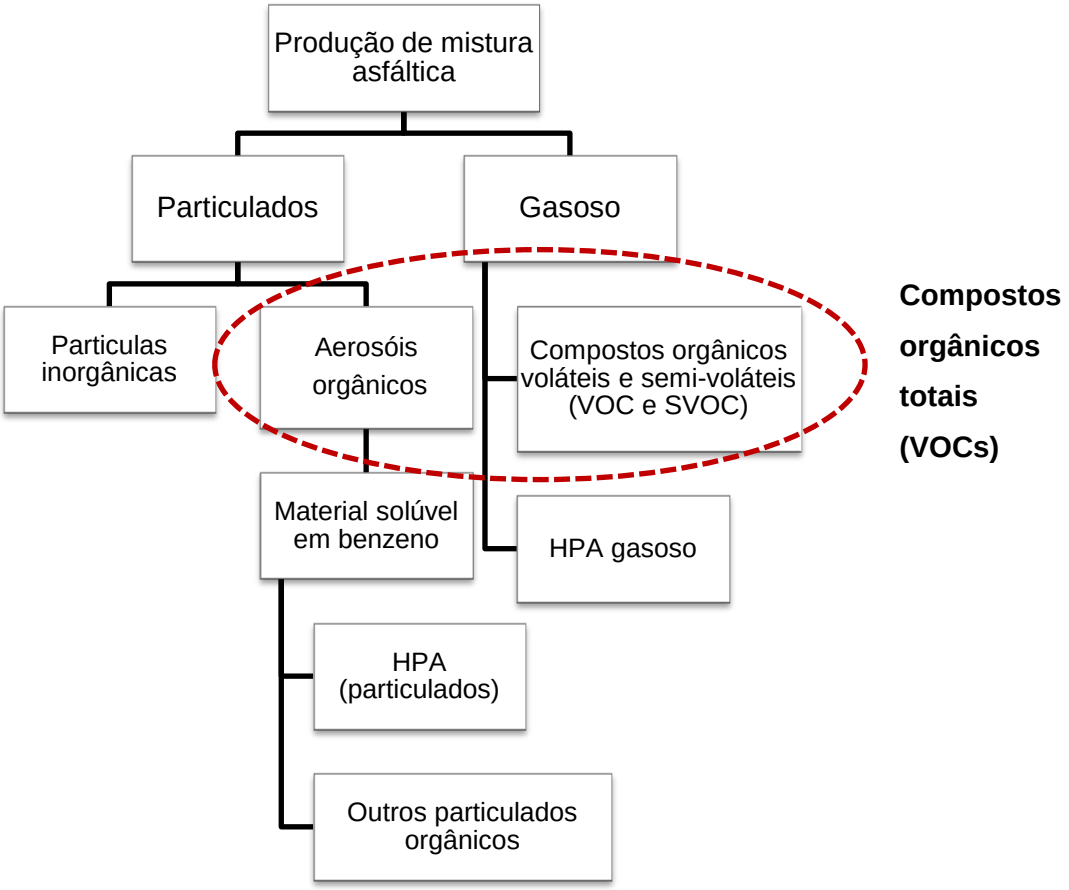


Figura 2.4 – Composição dos fumos de asfalto emitidos durante a produção de mistura asfáltica quente. (Fonte: GAUDEFROY; VIRANAIKEN; PARANHOS, 2008).

Pesquisas indicam que alguns HPAs foram causadores de câncer de pele em experimentos laboratoriais realizados com animais, mas o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) concluiu que estas concentrações de HPA são baixas e não representam perigo aos trabalhadores (THE ASPHALT ROOFING INDUSTRY SCIENCE & MEDICAL GROUP, 199?). No entanto, eles ainda estão sujeitos a problemas de saúde respiratória e irritações oculares ao serem expostos ao fumo de asfalto (THE ASPHALT ROOFING INDUSTRY SCIENCE & MEDICAL GROUP, 199?).

O NIOSH recomenda a exposição limite de cinco mg/m3 por 15 minutos ao asfalto e seus fumos, medidos em partículas totais em suspensão enquanto a United States

American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH) limita a exposição a 0,5 mg/m3 em 8 horas as frações inaláveis que são totalmente solúveis benzeno (BUTLER et al., 2000).

Segundo Motta (2011), ainda não existe um protocolo internacional para amostragem e análise dos fumos de asfalto, sendo a escolha de uma região/país/companhia, o que dificulta a comparação de resultados. Apesar de reconhecidos e estudados os compostos HPA, estes são formados, praticamente, durante a combustão, onde no ligante, é em torno de 500°C. Logo, durante a produção, quanto o ligante é aquecido por volta de 170°C-177°C no máximo não se forma compostos HPA (FARSHIDI; JONES; HARVEY, 2013). Os autores também expõe que alguns fatores contribuem para a variação da composição e toxidade dos fumos como, por exemplo, a fonte de ligante, tipo e temperatura de produção.

Além dos HPAs, outros elementos que contribuem para problemas de qualidade de ar, influindo também na saúde dos colaboradores envolvidos na pavimentação são as emissões “fugitivas”, oriundas do carregamento dos caminhões basculantes, transporte e aplicação durante a obra, além das emissões provenientes do secador de agregados da usina (FARSHIDI; JONES; HARVEY, 2013). Dentre as emissões os autores citam o dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos sulfúricos (SO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis e ozono troposférico.

A grande vantagem que vem sido defendida pelos fornecedores de aditivo para misturas mornas e também em função do investimento da Europa nesta tecnologia para ajudar a atingir as metas estabelecidas na assinatura do Protocolo de Quioto, é a redução das emissões de gases do efeito estufa durante a produção e aplicação da mistura asfáltica, principalmente gases do efeito estufa (GEE) como Prowell e Hurley (2007) citam.

Os principais gases do efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) (CGEE, 2008).

Prowell e Hurley (2007) expõem que quanto menor for a quantidade de combustível utilizada na produção da mistura asfáltica, menos emissão de poluentes é lançada ao meio ambiente. A geração de energia pela queima de combustíveis fósseis está entre as principais atividades que emitem GEE (CGEE, 2008), portanto, uma vez que a mistura morna necessita de menor temperatura de produção, menor o lançamento de gases causadores de efeito estufa ao meio ambiente.

Como exemplo da possível redução de emissão de poluentes, calcula-se que na Alemanha são produzidas 60 milhões de toneladas de mistura asfáltica convencional ao ano, que por sua vez geram 1,5 milhão de toneladas de CO_2, e utilizando a mistura asfáltica morna, poderia haver redução de 10% de CO_2 por ano (MOTTA, 2011).

Em 2010, a Petrobras produziu 2,763 milhões de toneladas de cimento asfáltico de petróleo (PETROBRÁS, 2011). Hipoteticamente, se 70% desta quantidade for destinada à produção de mistura asfáltica, utilizando 5% de CAP, seria possível produzir aproximadamente 38,68 milhões de toneladas de mistura asfáltica. Utilizando a proporção encontrada na Alemanha, citada por Motta (2011), aplicando na realidade brasileira, seria gerado aproximadamente 960 mil toneladas de CO_2, podendo haver uma redução de 6% por ano.

No trabalho feito por Kvasnak et al. (2009) para uma seção de teste em Boone County em Indiana, Estados Unidos, obtiveram durante a medição de matéria orgânica, para a mistura a quente, com temperatura de descarga em caminhão de 159°C, o valor de 1,69mg/m^3 enquanto que na mistura morna, com temperatura de descarga de 93 a 100°C, utilizando o aditivo Evotherm^{TM} 0,988mg/m^3, ou seja, redução de 42%. Em experiência realizada em Ramara Township em Ontario, Canadá os mesmos pesquisadores chegaram aos resultados exibidos na Tabela 2.7, utilizando a metodologia da agência de proteção ambiental americana (U.S. EPA) 40 CFR 60 Apêndice A.

Tabela 2.7 – Resultados de medição da combustão de gás. (Fonte: DAVIDSON, 2005).

Combustão de gás	Concentração		Porcentagem de redução
	Mistura asfáltica a quente	Mistura asfáltica morna – utilizando Evotherm™	
Oxigênio	14,6%	17,5%	-
CO_2	4,8%	2,6%	45,8
CO	70,2%	25,9%	63,1
SO_2	17,2 ppm	10,1 ppm	41,2
NO_x	62,2 ppm	26,1 ppm	58,0
Média temperatura gás	162°C	121°C	-

Na Tabela 2.7 pode-se notar que a temperatura de produção da mistura morna foi de 121°C enquanto na mistura a quente, 162°C. A redução de CO_2 encontrada na produção da mistura a quente foi de 45,8% e de NO_x, de 58%.

Rubio et al. (2013), em pesquisa realizada na Espanha, verificaram a redução na emissão de poluentes comparando a utilização de mistura a quente com a mistura morna, que foi aplicado em rodovia no sul do país, em um trecho de 13,85 km, durante a produção e processo de pavimentação. Na pesquisa, os autores obtiveram diminuição substancial do nível de emissões, aproximadamente 58% no caso do CO_2 e 99,9% do caso de SO_2.

O DOT da Califórnia (Caltrans) em conjunto com o centro de pesquisas rodoviárias da Universidade da Califórnia desenvolveu uma pesquisa para comparar o potencial impacto ambiental, em termos de emissão, que misturas a quente e morna, com adição de borracha moída de pneu promovem durante a construção e atividades do processo de pavimentação (FARSHIDI; JONES; HARVEY, 2013).

Nesta pesquisa, seguindo os autores foi desenvolvida uma metodologia específica que permitiu quantificar e caracterizar emissões de compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis, além de HPA e outros gases, durante a aplicação e compactação das misturas em pista. Foram 04 projetos separados de misturas de quatro diferentes usinas, todas as amostras com ligante PG64-22, aditivado de borracha moída de

pneu, sendo entre elas, no total, oito misturas asfálticas mornas utilizando aditivos variados, três misturas a quente, uma mistura a quente com 15% de material reciclado (FARSHIDI; JONES; HARVEY, 2013).

Farshidi, Jones e Harvey (2013), como conclusão do estudo validaram a metodologia aplicada para quantificação e caracterização das emissões. Encontraram também diferença significativa entre as concentrações de emissões em termos de compostos orgânicos voláteis (fator dois na média) medidos no material solto (no caminhão e quando solto na acabadora) do que a concentração medida imediatamente após a compactação. Também perceberam que a concentração na fase gasosa do HPA depende da temperatura da mistura no momento da quantificação e que a temperatura de produção das misturas a quente e morna não são altas suficientes para iniciar a formação de HPA.

Quanto ao efeito das tecnologias de misturas mornas durante a construção, os autores concluíram que as emissões de alcanos (série de hidrocarbonetos saturados) dependem do tipo de mistura e temperatura, sendo que em alguns casos as misturas mornas eram significantemente menores que as medidas na mistura a quente, no entanto para alguns tipos específicos de aditivo para mistura morna, a concentração de alcanos foi maior do que o encontrado na mistura a quente, ou seja, Farshidi, Jones e Harvey (2013) afirmam não é possível generalizar a redução de emissões para qualquer tipo de mistura morna, e estas devem ser restritas somente à comparação do mesmo tipo de tecnologia.

2.9 QUESTÕES ECONÔMICAS

Na pavimentação os processos que concentram a maior utilização de energia é na usina asfáltica, durante a usinagem e no espalhamento e compactação da mistura asfáltica na pista. Na usina de asfalto, esta energia é gerada a partir da queima de combustível fóssil ou energia elétrica, e no caso da obra em si, combustível fóssil para movimentar as máquinas de espalhamento e compactação.

Como já exposto anteriormente, uma das vantagens clamada pelos fornecedores e fabricantes de aditivos de mistura morna é a possibilidade de redução de custos na produção da mistura. Segundo EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (2010) esta redução de custos pode ser causada pela diminuição da temperatura de usinagem, logo é menor o consumo de combustível para secar e aquecer o agregado, e também, com menores temperaturas, o desgaste da usina é menor (VON DEVIVERE; BARTHEL; MARCHAND, 2003). No entanto, os autores apontam que o aumento no custo da produção da mistura morna é decorrente do investimento e depreciação da usina de asfalto, quando há necessidade de modificação da mesma e também com o custo do aditivo, e em alguns casos, custo da licença da tecnologia. A importância deste benefício depende do tipo e custo da energia utilizada; em locais onde o custo de fonte energética é alto, a utilização da tecnologia pode receber grande incentivo (KRISTJÁNSDÓTTIR et al., 2007).

Bennert (2012) em sua pesquisa realizou uma simulação de custo da implantação da tecnologia, com diversos tipos de aditivos, no estado de Nova Jersey. Esta comparação de custos é exibida na Tabela 2.8, em dois cenários, sendo o primeiro se a tecnologia fosse implantada parcialmente, e o segundo cenário seria a utilização total de misturas mornas em todos os projetos de pavimentação do estado. Os valores utilizados foram de 2008 e estão em dólares americanos (BENNERT, 2012).

Tabela 2.8 – Estimativa de custo da implantação da tecnologia em Nova Jersey. (Fonte: BENNERT, 2012).

Tecnologia	Cenário	Custo do equipamento (compra)	Custo da mobilização do equipamento (por semana)	Custo do aditivo com frete	Utilização de agente ante-descolamento de película de asfalto	Custo estimado (ton.)
Advera	1	NA	$6.900	$2,01	Não	$3,39
	2	$130.000	NA	$1,45	Não	$1,69
Double Barrel Green	1	$90.000	NA	$0	Não	$2,81
	2	$90.000	NA	$0	Não	$0,12
Evotherm DAT	1	$3.500	NA	$2,25	Sim	$1,86
	2	$3.500	NA	$2,25	Sim	$1,75
Low Energy Asphalt	1	$72.000	NA	$0,88	Sim	$2,63
	2	$72.000	NA	$0,88	Sim	$0,48
Rediset (adicionado na distribuidora de CAP)	1	NA	NA	$3,48	Sim	$2,98
	2	NA	NA	$3,48	Sim	$2,98
Rediset (adicionado na usina de asfalto)	1	NA	$5.250	$2,85	Sim	$3,40
	2	$55.000	NA	$2,85	Sim	$2,42
Sasobit (adicionado na distribuidora de CAP)	1	NA	NA	$2,88	Não	$2,88
	2	NA	NA	$2,88	Não	$2,88
Sasobit (adicionado na usina de asfalto)	1	NA	$5.250	$2,28	Não	$3,33
	2	$55.000	NA	$2,28	Não	$2,35
WAM – Espuma	1	$100.000	NA	$0	Não	$3,13
	2	$100.000	NA	$0	Não	$0,13

Observações:
1 – Advera: adicionado 5 libras por tonelada
2 – Evotherm DAT: adicionando 0,25% por peso de ligante
3 – Rediset: adicionando 1,5% por peso de ligante
4 – Sasobit: adicionado 1,5% por peso de ligante

Apesar dos valores serem de 2008, pode-se notar na Tabela que a utilização da tecnologia é um custo a mais para o projeto, e este custo varia de acordo com o tipo de aditivo utilizado, como este aditivo é inserido no ligante ou na mistura asfáltica e se há ou não necessidade de adaptações na usina de asfalto com compra ou mobilização de equipamentos. No caso, para esta pesquisa, Bennert (2012) afirma que para a economia de combustível, tipicamente reportada na bibliografia de

aproximadamente 30% equivaleria à economia de $1,00 por tonelada de mistura, nos valores de 2008.

3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Nesta pesquisa foram estudadas duas amostras. A primeira, amostra de referência, é composta de asfalto aditivado com 15% de borracha moída de pneu, aqui denominada AB e a segunda amostra é composta de asfalto com 15% de borracha e aditivo morno – agente surfactante, denominado BWMA. As características que diferenciam a mistura de referência e a mistura morna são o acrescimento de aditivo para mistura morna e a temperatura de usinagem, aplicação e compactação.

O estudo de dosagem das duas misturas foi realizado no laboratório da EcoRodovias. Após verificar se ambas as misturas atenderiam os padrões exigidos quanto à resistência mecânica e parâmetros volumétricos, foram aprovadas para a aplicação em pista. Este estudo da mistura compreendeu ensaios como:

a) Características físicas do ligante;
b) Dosagem Marshall (Estabilidade e Parâmetros volumétricos);
c) Resistência à tração por compressão diametral;
d) Característica do agregado mineral (Los Angeles, granulometria e equivalente de areia);

Durante a aplicação de ambas as misturas em pista, foram coletadas amostras para a realização ensaios conforme exibe a Figura 3.1:

Figura 3.1 - Resumo esquemático dos ensaios realizados no material colhido durante a fase de execução do trecho experimental.

O ligante utilizado nas misturas asfálticas avaliadas neste estudo é o Ecoflex B 2G, ligante modificado por borracha de pneu moída que recebe a adição de 15 por cento de borracha moída de pneu por massa de ligante asfáltico. Nesta pesquisa, o aditivo usado foi o agente surfactante Evotherm® M1, fabricado pela indústria americana MeadWestvaco e tem como base química amina (MEADWESTVACO, 2011).

A adição do agente surfactante no ligante asfáltico modificado com borracha moída aconteceu no terminal da distribuidora de asfalto, no próprio tanque que transportou o ligante para a usina de asfaltos da Ecovias. A Figura 3.2 ilustra a adição do Evotherm® no tanque do caminhão transportador do ligante asfáltico. Foram adicionados 0,4% do agente surfactante por massa de ligante asfáltico. O ligante utilizado na mistura para execução dos trechos foi fornecido pela empresa Greca Asfaltos.

Figura 3.2 - Adição do agente surfactante no caminhão transportador de ligante asfáltico.

Segundo o fabricante, o Evotherm® M1 é um surfactante que age melhorando a adesão do ligante ao agregado, promovendo trabalhabilidade e melhor compactação, e pode ser aplicado em diversos tipos de misturas asfálticas, entre elas misturas com reciclado, misturas com ligante modificado por borracha moída de pneu ou polímeros, misturas densas, misturas abertas, SMA, etc. (MEADWESTVACO, 2010).

O trecho experimental com mistura morna acompanhado nesta pesquisa foi realizado na Rodovia de acesso SPA 248/055 (Rodovia Cônego Domenico

Rangoni), entre os quilômetros 3+000 e 6+000 da Pista Oeste, no sentido de São Paulo. Este trecho em questão foi inserido dentro de uma programação de intervenções da concessionária,

Esta rodovia de acesso é a antiga Piaçaguera-Guarujá, construída no município de Guarujá, São Paulo, na década 1970 e atualmente sob concessão da empresa Ecovias. O trecho experimental com mistura morna aditivada com Evotherm e com asfalto borracha é ilustrado na Figura 3.3 a seguir.

Figura 3.3 - Localização do trecho experimental na Rodovia Cônego Domenico Rangoni, em São Paulo. Retirado de Google Earth.

Figura 3.4 – Fotografia aérea indicando os trechos. Fonte: Google Earth.

Com o objetivo de comparar o desempenho da mistura morna modificada por borracha com a mistura asfáltica a quente modificada por borracha, esta mistura foi

aplicada em um trecho da rodovia com as mesmas características quanto ao tráfego e estrutura do pavimento e denominado trecho de referência. Este trecho de referência foi aplicado entre os quilômetros 1+000 e 3+000, durante a semana do dia 22 de agosto de 2012 enquanto o trecho de mistura morna foi aplicado durante a semana do dia 29 de agosto de 2012. Na Figura 3.4 é possível conferir os dois trechos. A Tabela 3.1 tem como objetivo esquematizar os trechos em análise.

Tabela 3.1 – Esquema dos trechos em estudo.

Início	Final	Pista	Descrição
1+000	3+000	Oeste	Mistura asfalto borracha a quente. Trecho de referência.
3+000	6+000	Oeste	Mistura asfáltica morna modificado por borracha moída de pneu. Trecho de estudo.

Foi realizada sondagem no local, abertura de janela no pavimento no quilômetro 4+000 da faixa 02 e a estrutura encontrada é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Estrutura da SPA248/055 na pista Oeste, km 4+000, faixa 02.

Localização (km)	Pista	Estrutura
4+000	Oeste	30 cm camada betuminosa 30 cm camada granular 10 cm camada betuminosa 20 cm camada granular

O projeto de restauração da SPA 248/055 foi elaborado em 2008, com dados de parâmetros estruturais e funcionais levantados, seguindo a norma DNER PRO 269/94.

O volume de tráfego médio comercial (VDM) apresentado no projeto está reproduzido na Tabela 3.3. Os dados foram coletados no período de junho de 2006 a julho de 2007 (ECOVIAS, 2008).

Tabela 3.3 – VDM comercial do trecho de estudo. Fonte: Ecovias (2008).

Segmento	Pista Leste	Pista Oeste
1,000 ao 6,000	4224	5237

A partir de dados de 2008 do volume médio diário da rodovia foi feito a previsão do número “N” em 2012, data da restauração, com taxa de crescimento de 3,18% ao ano, como apresentado na Tabela 3.4 a seguir:

Tabela 3.4 - Previsão do número N para 2012.

Ano	AASHTO	USACE
2012	5,10E+06	1,45E+07
2020	7,11+07	2,03E+08

A partir do levantamento das deflexões recuperáveis realizado em 2007, foi possível calcular, através da norma DNER PRO 269/94 a deflexão média e a característica do trecho de projeto, e estas são reproduzidas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Deflexões médias e características calculadas.

Trecho	D_0 Médio (10^{-2} mm)	Desvio Padrão	D característica (10^{-2} mm)
1+000 ao 3+000	24,45	8,27	32,72
3+000 ao 6+000	20,81	7,05	27,86

O projeto realizado indicou como solução para o segmento do km 1+000 a 6+000 o recapeamento com 3 cm de revestimento asfáltico, com mistura asfáltica descontínua.

3.1 DOSAGEM MARSHALL

A dosagem Marshall foi desenvolvida pelo departamento de estradas do Mississippi em 1939 pelo engenheiro Bruce Marshall (Asphalt Institute, 2007). A Figura 3.5 exibe os moldes metálicos com a mistura asfáltica compactada.

Figura 3.5 – Corpos de prova moldados.

A mistura de referência AB e a mistura morna BWMA foram conceituadas segundo a dosagem Marshall. A norma DNIT 112/2009 ES define a sistemática a ser empregada na execução de revestimento com asfalto borracha (DNIT, 2009a), pelo processo via mistura úmida, do tipo “Terminal Blending”. Nesta norma, são apresentadas os limites mínimos e máximos de diversos requisitos que a mistura asfáltica deve atender. Estes limites são exibidos na Tabela 3.6 a seguir.

Tabela 3.6 - Valores limites das características da mistura com asfalto borracha. Fonte - modificado de DNIT (2009a).

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento tipo GAP GRADED
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	4 a 6
Relação betume/vazios (%)	DNER-ME 043	65- 78
Estabilidade mínima (Kgf) (75 golpes de cada lado)	DNER-ME 043	700

Atualmente ainda não foi criada uma especificação técnica especificamente para misturas asfálticas mornas, no entanto, é usual utilizar valores de referência das misturas a quente.

Nos ensaios de dosagem de ambas as misturas asfálticas foram utilizados cinco conjuntos com três corpos de prova com teores de ligante de 5,0% a 7,0% sendo os intervalos de 0,5% entre eles. Os resultados obtidos são exibidos no item 4.4.

3.1.1 Temperatura de usinagem e compactação

Os corpos de prova da mistura de referência (AB) foram aquecidos e misturados a 170°C e compactados entre 160 e 165°C.

Para o estudo da dosagem da mistura asfáltica morna, ou seja, para a mistura BWMA, os materiais foram misturados a 155°C e compactados a 150°C, por recomendação do fornecedor do agente surfactante. Os outros ensaios de análise da mistura asfáltica morna, com a mistura proveniente de usina, foram aquecidos e compactados a 135°C, que foi a temperatura que durante a usinagem conseguiu-se produzir a mistura asfáltica morna. A Tabela 3.7 resume as temperaturas utilizadas neste estudo.

Tabela 3.7 - Temperaturas em diferentes estágios durante o estudo.

Item	Temperatura (^{o}C)	AB	BWMA
Dosagem Marshall	Temperatura de mistura	170	155
	Temperatura de compactação	160 - 165	150
Amostra trecho experimental	Temperatura de usina	165	135 - 150
	Temperatura de aplicação em pista	155	120 - 135
	Temperatura de moldagem de corpo de prova	160	135

Durante a produção em usina, da mistura BWMA, obteve-se temperaturas de mistura a partir de 175°C até 135°C. Por se tratar de um trecho experimental, o objetivo foi verificar até qual temperatura seria possível aplicar a mistura sem perder qualidade e até qual temperatura a usina também conseguiria manter a produção, pois temperaturas muito baixas demandam mais energia da usina, como Merighi et al. (2012) citam.

3.2 AGREGADOS – CARACTERÍSTICAS/CURVA

Os agregados utilizados nas misturas são provenientes da Pedreira Embu Itapeti, localizada no município de Mogi das Cruzes (SP) e de origem granítica. Foram utilizadas em ambas as misturas 2% de cal hidratada fornecida pela CH-I Adhercal de Salto de Pirapora, em São Paulo, com o objetivo de melhoramento da adesividade do ligante asfáltico.

Tanto a mistura de referência AB quanto a mistura morna com borracha BWMA seguem a faixa granulométrica *Gap graded* do Caltrans. Bernucci et al (2010) explicam que a mistura *gap-graded* é uma faixa granulométrica especial, que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas sem teor de vazios (Vv %) elevados e pode ser empregada em camada estrutural de revestimento, aliada ao asfalto borracha. A distribuição granulométrica das misturas é exibida na Figura 3.6.

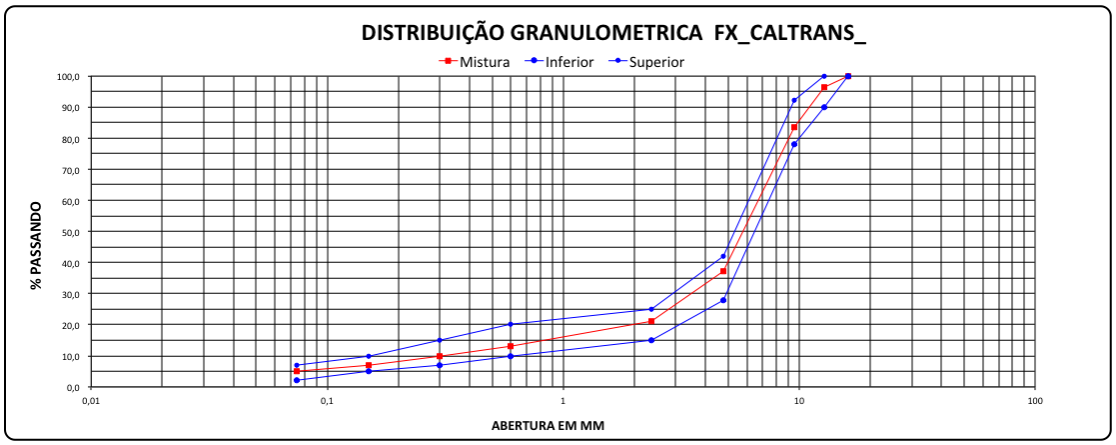


Figura 3.6 - Distribuição granulométrica das misturas estudadas.

Todo o carregamento de agregado mineral que a usina recebe é submetido a ensaios de avaliação de propriedades de característica mecânica e física como o desgaste Los Angeles (DNER-ME 035/98) e equivalente de areia (DNER-ME 054/97). No caso do ensaio de desgaste Los Angeles foi ensaiada uma amostra no recebimento do agregado na usina da Ecovias e no ensaio de equivalente de areia, 2 amostras do mesmo material. A Tabela 3.8 mostra os valores médios obtidos nestes ensaios.

Tabela 3.8 – Resultados obtidos nos ensaios do agregado.

Ensaio	Limite (DNIT, 2009a)	Resultado
Desgaste Los Angeles (%)	< 50	35
Equivalente de areia (%)	> 55	58,7

3.3 ENSAIOS DE PROPRIEDADE FÍSICA DO LIGANTE

Os ensaios de propriedade física do ligante asfáltico modificado abrangem estudos de comportamento do material em determinadas temperaturas. No capítulo 4 serão exibidos os resultados dos ensaios realizados no ligante da mistura de referência e da mistura asfáltica morna, sendo eles:

a) Viscosidade rotacional - Brookfield;
b) Penetração;
c) Ponto de amolecimento – anel e bola;
d) Ponto de fulgor – Vaso aberto Cleveland;
e) Determinação da recuperação elástica Torciômetro;
f) Determinação da recuperação elástica Ductilômetro;
g) Massa específica 25°C.

3.3.1 Simulação do envelhecimento do ligante asfáltico

A preocupação ao realizar o estudo de envelhecimento do ligante asfáltico ao efeito do calor e ar é verificar a perda de voláteis (saturados ou aromáticos), ou seja, o que pode causar a variação de sua viscosidade, ponto de amolecimento e penetração (BERNUCCI et al., 2010).

O teste de envelhecimento conhecido como estufa de filme fino rotativo ou película delgada rotacional, em inglês – *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) avalia o envelhecimento por oxidação e evaporação de forma severa do ligante asfáltico ao efeito do ar (BERNUCCI et al. 2010). Este teste simula o envelhecimento do ligante asfáltico durante usinagem e aplicação em pista, em curto prazo. A Figura 3.7 exibe o equipamento para o ensaio de RTFOT.

Figura 3.7 – Equipamento do ensaio para de RTFOT.

A norma que rege o ensaio é a ASTM D2872-12 e tem por objetivo medir o efeito do calor e ar em um filme de ligante asfáltico em movimento, através da comparação de algumas propriedades do ligante antes e após o teste (ASTM, 2012).

3.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MISTURA ASFÁLTICA E TESTES COMPLEMENTARES

Os ensaios compreendidos neste estudo estão apresentados nos itens a seguir.

3.4.1 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração indireta (RT) é um parâmetro muito utilizado no Brasil, desde 1972, para a caracterização de misturas asfálticas (MOTTA, 2011). Os corpos de prova de ambas as misturas foram moldados em laboratório na forma cilíndrica com diâmetro de 100 ± 2 mm e altura de aproximadamente 6,50 cm e ensaiados conforme a norma DNIT 136/2010 ME (DNIT, 2010b), a 25°C. A resistência à tração do material, segundo esta norma é calculada pela relação da carga de ruptura pelas características geométrica do corpo de prova (altura e diâmetro), através da seguinte expressão (3.1):

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \qquad (3.1)$$

sendo:

σ_R = resistência à tração (kgf/cm^2);

F – carga de ruptura (kgf);

D – diâmetro do corpo de prova (cm)

H – altura do corpo de prova (cm)

Para a obtenção da carga de ruptura os corpos de prova foram condicionados à temperatura de 25°C por duas horas e então colocado sobre uma superfície cilíndrica entre dois frisos. Este conjunto foi ajustado à prensa mecânica e por fim aplicado carga até sua ruptura. Este valor de ruptura equivale à carga de ruptura. A Figura 3.8 a seguir exibe um corpo de prova sendo ensaiado e na tabela 3.9 pode-se verificar o valor limite mínimo que a norma DNIT 112/2009 - ES indica para resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 3.8 – Corpo de prova sendo solicitado no ensaio de resistência à tração indireta.

Tabela 3.9 - Valores limites de resistência à tração por compressão da mistura com asfalto borracha. Fonte - modificado de DNIT (2009a).

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento tipo GAP GRADED
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C mínima (MPa)	DNER-ME 136	0,5

Nesta pesquisa, foram moldados e ensaiados 15 corpos de prova da mistura asfáltica morna e 12 corpos de prova da mistura de referência. Os resultados são apresentados no item 4.5.1.

3.4.2 Módulo de resiliência

Para obter um bom projeto, é necessário combinar materiais e espessuras das camadas conforme a rigidez de cada uma dessas camadas, propiciando resposta estrutural do conjunto atendendo às solicitações do tráfego (BERNUCCI et al., 2010).

Segundo a norma do DNIT (2010a), o módulo de resiliência é a relação entre a deformação específica recuperável e a correspondente tensão aplicada repetitivamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica.

O ensaio para obtenção do modulo de resiliência do material foi feito em uma prensa universal, onde são aplicados carregamentos cíclicos indiretos (com aproximadamente 15% da carga máxima de ruptura) sob temperatura de 25°C em corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 100mm de diâmetro e 65mm de altura. A frequência da carga utilizada foi de 1 Hz e as leituras dos deslocamentos horizontais foram obtidas por meio de um transdutor diferencial LVDT (*Linear Variable Differenctial Transducers*).

Foram moldados e ensaiados 8 corpos de prova de cada tipo de mistura. A mistura de referência AB foi moldada na temperatura de 160°C e a mistura experimental BWMA foi moldada na temperatura de 135°C. Os resultados e análise são exibidos no item 4.5.2.

A Figura 3.9 ilustra o corpo de prova na prensa universal e a Figura 3.10 mostra a prensa universal.

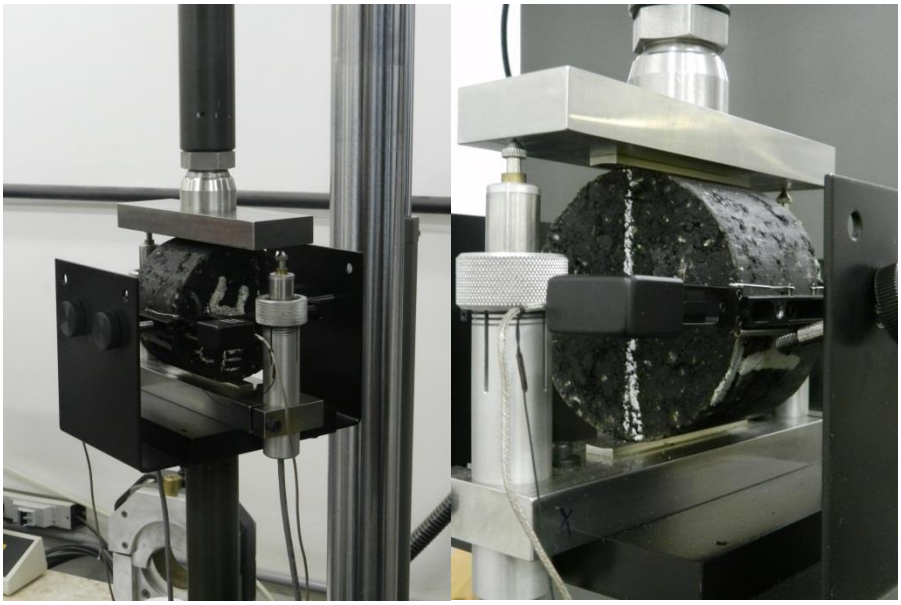


Figura 3.9 - Detalhe do corpo de prova na prensa universal.

Figura 3.10 - Prensa universal.

3.4.3 Deformação permanente em trilha de roda

A deformação permanente na trilha de roda resulta da acumulação de pequenas deformações não recuperáveis de aplicação repetitiva de carga no pavimento (ASPHALT INSTITUTE, 2007). A resistência à deformação permanente depende da fricção interna fornecida pelo agregado, dependendo de sua forma e textura e pela coesão e rigidez provida pelo ligante asfáltico (ASPHALT INSTITUTE, 2007). .

Um dos métodos para determinar a susceptibilidade do revestimento asfáltico à deformação é medida pela profundidade dos sulcos causados pela passagem repetida de uma carga de rolamento, à uma temperatura fixada, conforme recomendação da norma europeia EN 12697-22 (2003).

A norma francesa E 12697-22 (2003) preconiza que amostras que utilizaram o molde de grandes dimensões, na ausência de requisitos específicos, revestimentos com no máximo cinco cm de espessura, a placa a ser utilizada deve ser de cinco cm e para misturas com maior espessura deve ser utilizada a placa de 10cm. No caso deste estudo foram utilizadas placas de 5 cm.

Primeiramente duas placas são compactadas por amassamento na mesa compactadora tipo LCPC, exibida na Figura 3.11. Após a compactação, espera-se de 2 a 3 dias para a consolidação da mistura asfáltica e então as placas são ensaiadas no simulador de tráfego, como mostra a Figura 3.12. No ensaio foi aplicado pressão de pneu de 0,6 MPa e carga no eixo de 5kN, enquanto a frequência do ensaio foi de 1Hz, onde em um único ciclo ocorrem duas passagens de carga. O ensaio termina após aplicação de 30.000 ciclos, ou 60.000 passagens de carga.

Figura 3.11 – Mesa compactadora LCPC. Fonte: Moura (2010).

Figura 3.12 – Equipamento francês de deformação permanente.

Para a medição do desenvolvimento da formação de trilha de roda, é feito medida de afundamento em 15 pontos diferentes na placa no tempo inicial do ensaio (t_0), após 100 ciclos, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e por fim 30.000 ciclos. O ensaio é realizado sob temperatura controlada de 60°C.

3.4.4 Resistência ao dano por umidade induzida

O dano por umidade no pavimento asfáltico é uma das principais causas da diminuição da durabilidade do revestimento, pois a perda da adesividade procede da ação da água ou vapor de água entre o agregado e o ligante, “descolando” o

agregado do ligante (ASPHALT INSTITUTE, 2007). Inicialmente ocorre apenas a perda da adesividade, que com a ação do tráfego promove a falhas locais no pavimento asfáltico e consequentemente buracos e formação de trilha de roda.

Neste estudo, este ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 15617 (2011), que prescreve o método para determinar o dano de umidade que o corpo de prova sofrerá após ser condicionado à baixa e alta severidade. Foram ensaiados três corpos de prova de mistura asfáltica morna e três de mistura a quente. A mistura de referência foi moldada na temperatura de 160°C e a mistura experimental BWMA foi moldada na temperatura de 135°C

A norma ABNT NBR 15617 (2011) preconiza que o ensaio deve ser realizado com seis corpos de prova com altura de 50 mm a 70 mm e diâmetro de 100 mm + 2 mm. Estes corpos de prova são pesados com o objetivo de calcular o volume de vazios e depois de saturado, calcular o grau de saturação do corpo de prova. Dos seis corpos de prova moldados, separa-se metade para ensaio de resistência à tração por compressão diametral enquanto a outra metade é condicionada a baixas temperaturas, conforme explicado a seguir.

Primeiramente o corpo de prova é submergido em água destilada e retira-se todo o ar através de bomba à vácuo (Figura 3.13), de modo que a água entre nos vazios do corpo de prova. Depois se retira o corpo de prova da água, seca-se a superfície e pesa. Assim é obtido o volume de água absorvido e calcula-se o grau de saturação.

Após a saturação, o corpo de prova é embalado/lacrado, como mostra a Figura 3.14, e é levado ao sistema de resfriamento e permanece por 16 horas a 18°C negativos. Depois deste período o corpo de prova é deixado em banho-maria por 24h a 60°C, como exibido na Figura 3.15.

Figura 3.13 – Bomba à vácuo.

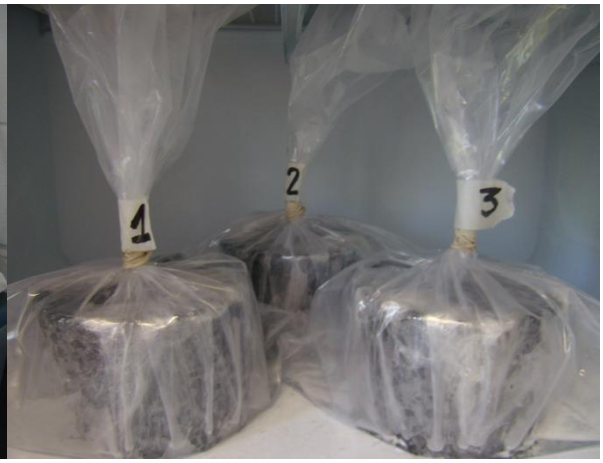


Figura 3.14 - Amostra sendo preparada para o condicionamento em baixas temperaturas.

Figura 3.15 – Corpos de prova em banho-maria durante ensaio.

Por fim determina-se a resistência à tração por compressão diametral destes corpos de prova estabilizados a 25°C, na prensa, como mostra a Figura 3.16.

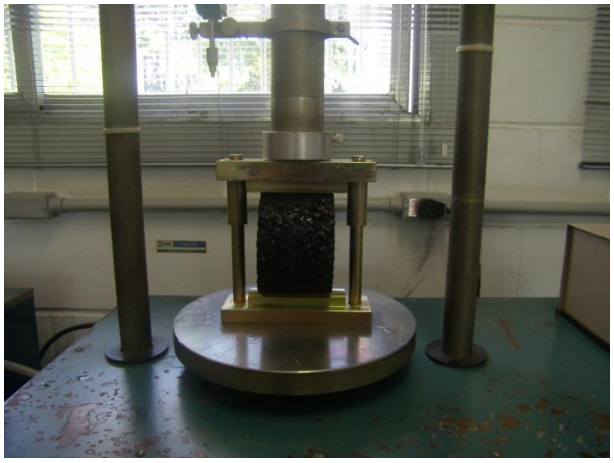


Figura 3.16 – Corpo de prova no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A razão da resistência dos corpos de prova condicionados pela resistência dos corpos de prova não condicionados deve ser maior que 0,7, segundo a norma DNIT 112/2009-ES (DNIT, 2009a).

3.4.5 Fadiga

A fadiga da mistura asfáltica pode ser descrita como a diminuição gradual da resistência deste material por efeito de repetidas solicitações (SANTOS, 2005) resultando em trincas induzidas devido aos repetidos estados de tensão ou deformação inferior ao estado último de tensão ou deformação do material (YODER; WITCZAK, 1975). A fadiga do revestimento asfáltico é um dos principais fatores de trincamento do pavimento e consequentemente deterioração do mesmo.

Os ensaios que melhor reproduzem as condições de carregamento induzidas pelo tráfego, para estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas são os ensaios de carregamento cíclico (SANTOS, 2005). Segundo o autor, a fadiga de um corpo de prova pode ser influenciada pelo tipo de mistura, teor de ligante, granulometria e disposição granulométrica no corpo de prova e seu volume de vazios, como também pela frequência, temperatura, magnitude da carga no ensaio.

Primeiramente foram obtidos os valores de resistência à tração por compressão diametral, chamado de RT REF para ajuste da carga inicial a ser aplicada nos corpos de prova no ensaio de fadiga, estes valores são apresentados no item 4.5.5. Foram moldados 16 corpos de prova de cada mistura com aproximadamente 100mm de altura e 65mm de diâmetro para ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de fadiga.

A mistura de referência AB foi moldada na temperatura de 160°C e a mistura experimental BWMA foi moldada na temperatura de 135°C. Estes corpos de prova foram condicionados a 25°C por mais de 2 horas para então ser realizado o ensaio na prensa universal MTS.

Após esta etapa o ensaio de fadiga foi realizado por compressão diametral à tensão e temperatura controlada. No momento não existe norma brasileira que reja o ensaio, mas utilizou-se frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundos de duração do ciclo. A Figura 3.17 esquematiza a aplicação da carga no corpo de prova.

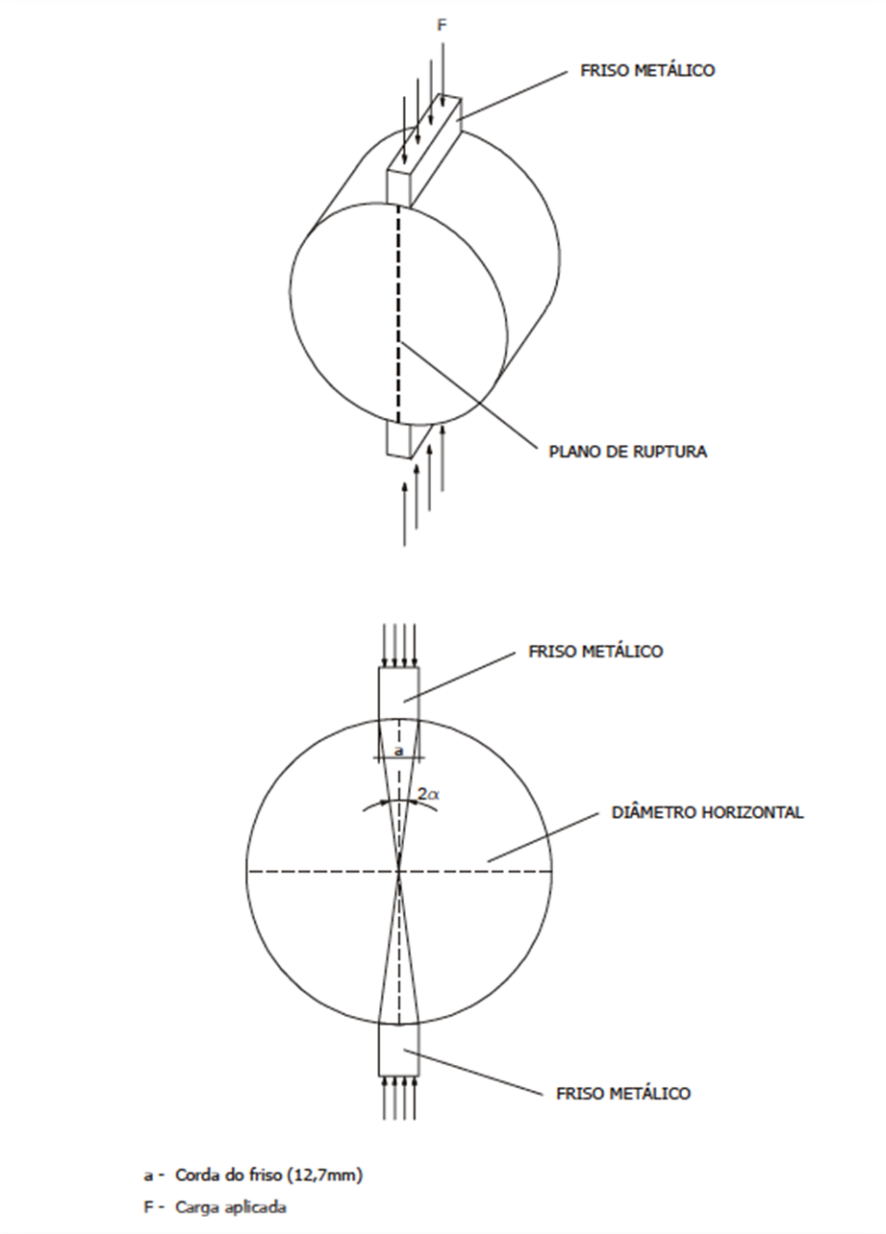


Figura 3.17 – Ensaio de compressão diametral do corpo de prova. Retirado de Santos, 2005.

Para a mistura BWMA foram ensaiados 14 corpos de prova e para a mistura AB, 12 corpos de prova, sendo os níveis de tensões de 50%, 40%, 30% e 20% em relação

ao valor médio de resistência à tração RT REF. A força para aplicação da carga equivalente ao nível de tensão é obtida por meio da expressão 3.2.

$$F = \frac{RT\ x\ \pi\ x\ D\ x\ H}{2000}\ x\ \frac{\%RT_{REF}}{100} \qquad (3.2)$$

F = Força (kN)

RT = Resistência à tração (MPa)

D = diâmetro do corpo de prova (mm)

H = altura do corpo de prova (mm)

% RT_{REF} = porcentagem de RT de referência para ensaio de fadiga

Nos casos dos corpos de prova submetidos à baixa tensão, para evitar um tempo de ensaio maior que 72 horas (duração longa do ensaio) até a ruptura do material, foi adotado deformação máxima de 5mm para finalização do teste.

As Figuras 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21 a seguir mostram, respectivamente, etapas do ensaio como aferição de diâmetro e altura, a tela do computador durante a realização do ensaio, a prensa universal “MTS” durante a realização do ensaio e o corpo de prova ensaiado, com o trincamento na seção diametral.

Figura 3.18 – Preparação para o ensaio.

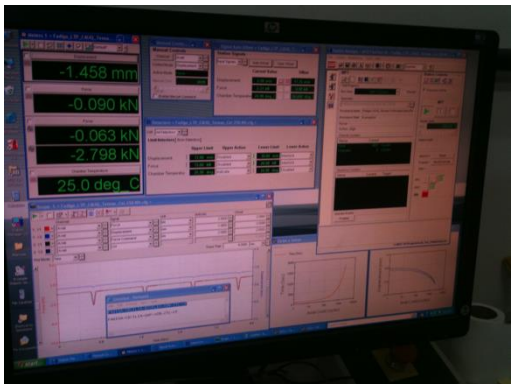


Figura 3.19 – Tela do programa durante o ensaio.

Figura 3.20 - Prensa universal “MTS”.

Figura 3.21 – Corpo de prova da mistura AB.

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Os resultados dos ensaios de propriedades físicas do ligante asfáltico, conforme citado no item 3.3 são exibidos na Tabela 4.1, tanto para a mistura BWMA quanto para a AB. Para efeito de comparação, os resultados fornecidos pelo fabricante foram confrontados com aqueles obtidos nesta pesquisa. Por normativa da concessionária, todo o carregamento de ligante asfáltico recebido é ensaiado para conferencia dos valores apresentados pela fornecedora. No ensaio de viscosidade Brookfield, a 175°C, por exemplo, os dois ligantes obtiveram resultados similares.

A Ecorodovias (2011) estabelece que todo o carregamento de ligante a ser usinado deverá estar na faixa de 1400 a 1700cP. Esta é uma forma para controlar a viscosidade do ligante e assegurar qualidade na execução de misturas com ligante adicionado de borracha moída de pneu.

Tabela 4.1– Comparação propriedades físicas dos ligantes.

Ensaios	Método Normas	Unid.	Limites (resolução ANP 39/2008)	Resultado fabricante		Resultado EcoRodovias	
				AB	BWMA	AB	BWMA
Viscosidade Brookfield À 175ºC cP, Spindle 3, 20 rpm	ASTM D 2196/10 ABNT NBR 15529/07	cP	800 a 2000	1570	1640	1580	1645
Penetração Temperatura 25ºc Carga: 100g Tempo: 5s	ABNT NBR 6576/07	0,1 mm	30 a 70	49	52	48	49
Ponto de amolecimento anel e bola	ABNT NBR 6560/00	ºC	50 min	59	58	58	57
Ponto de fulgor Vaso aberto Cleveland	ABNT NBR 11341/08	ºC	235 min.	> 235	> 235	>240	>240
Determinação da recuperação elástica Torciômetro	NLT 329/91	%	50 min.	73	72	70	72
Determinação da recuperação elástica Ductilômetro	ABNT NBR 15086	%	50 min.	69	70	81	82

Para efeito de estudo e avaliação da afirmação que é feita pelo fabricante, que a viscosidade do ligante com aditivo morno não deve ser alterada, são apresentados os resultados do ensaio de viscosidade Brookfield com o ligante da mistura morna BWMA e o ligante da mistura AB, em 5 temperaturas diferentes, utilizando o Splinde 03, conforme é exibido na Figura 4.1. Analisando os resultados, percebe-se que a viscosidade aumenta com o decréscimo de temperatura de ensaio, característica normal de materiais newtonianos.

Ainda analisando a Figura 4.1, é possível perceber que as viscosidades dos dois ligantes são praticamente iguais, fato que corrobora com a afirmação que o aditivo não age na viscosidade do ligante e sim como agente surfactante.

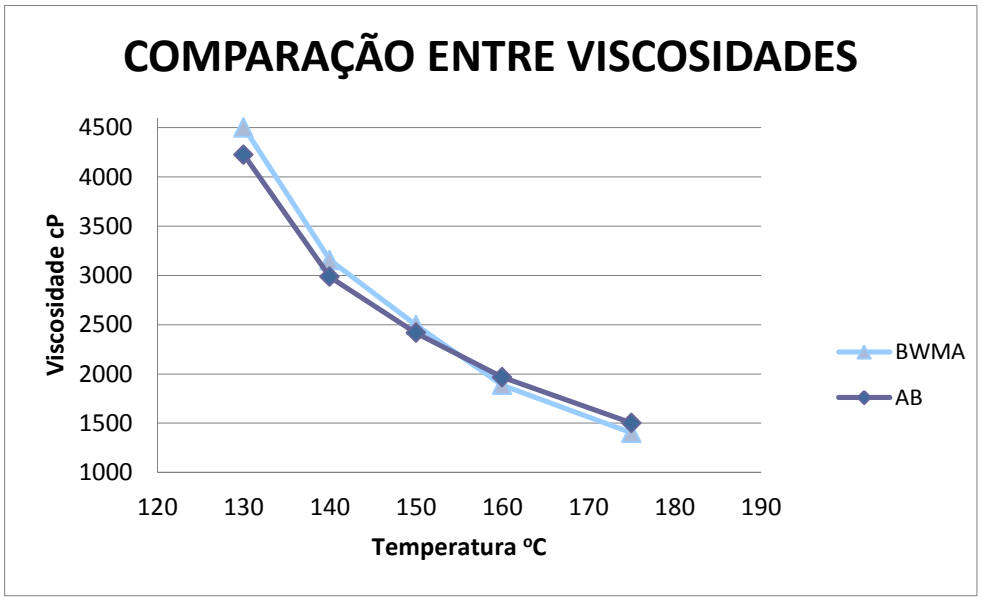


Figura 4.1 – Comparação entre viscosidade da amostra BWMA e AB.

4.2 SIMULAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DO LIGANTE

Para comparar o efeito do envelhecimento pelo RTFOT e a mistura original, pode-se verificar a Tabela 4.2 que mostra o resultado antes do efeito do calor e ar e após o ensaio. Pode-se afirmar que o ligante estudado em ambas as misturas atende os índices estipulados pela norma DNIT 111/2009-ME (DNIT, 2009b). Os resultados de variação em massa, ponto de amolecimento, penetração original e recuperação

elástica dos dois ligantes foram similares, apoiando a ideia que o acrescimento do aditivo de mistura asfáltica morna não interfere nas características do ligante modificado, no envelhecimento a 163°C.

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios antes e após o envelhecimento pelo RTFOT.

Ensaio	Unid.	Norma	Valor de referência	Resultados	
				Ecoflex B (AB)	Ecoflex B + 0,4% de Evotherm M1 (BWMA)
Penetração 100g, 5s, 25°C	0,1 mm	NBR 6576	30 a 70	48	49
Ponto de Amolecimento,	ºC	NBR 6560	55 (mín.)	58	57
Recuperação Elástica, 25ºC Torciômetro	%	NLT 329 / 91	50 (mín.)	70	72
Recuperação Elástica Ductilômetro 25ºC, 10 cm,	%	NBR 15086	50 (mín.)	81	82
Ponto de Fulgor, °C	ºC	NBR 11341	235 (mín.)	>240	>240
Viscosidade Brookfield a 175°C, cP, Sp 3, 20 rpm	cP	NBR 15529	800 - 2000	1580	1645
Efeito do Calor e do Ar (RTFOT) a 163 ºC					
Variação em massa, máx.	%	NBR 15235	1 (máx.)	0,15	0,14
Variação do Ponto de amolecimento, máx.	ºC	NBR - 6560	10 (máx.)	4	4
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	NBR - 6576	55 (mín.)	79,1	78,4
Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25ºC 10 cm, mín.	%	NBR 15086	100 (mín.)	105,8	102,8

É importante notar que no ensaio de envelhecimento, preconizado pela norma americana ASTM 2872 (ASTM, 2012), o ligante asfáltico fica exposto ao calor de 163°C por 85 minutos e é um procedimento utilizado para verificar o envelhecimento do ligante asfáltico durante a produção de misturas asfálticas a quente. Esta temperatura é maior que a temperatura de produção em usina da mistura morna. Portanto, se o ensaio for realizado em temperatura que equivalha à temperatura de produção da mistura morna, poderá haver diferença na comparação entre ligante convencional e ligante de mistura morna.

4.3 DOSAGEM MARSHALL

Para a mistura asfáltica morna e mistura de referência foram moldados em laboratório, a partir de misturas virgens, corpos de prova para ensaios caracterizados na dosagem Marshall como massa específica aparente, massa específica máxima teoria, estabilidade, porcentagem de vazios, entre outros, como já citado no item 3.1. Os resultados são exibidos a seguir.

Mistura AB

A Figura 4.2 a seguir indica os valores obtidos nos ensaios de estabilidade, porcentagem de vazios, relação betume-vazios (RBV), vazios do agregado mineral, massa específica, massa específica máxima teórica e fluência, conforme especificado nas normas reguladoras do DNIT.

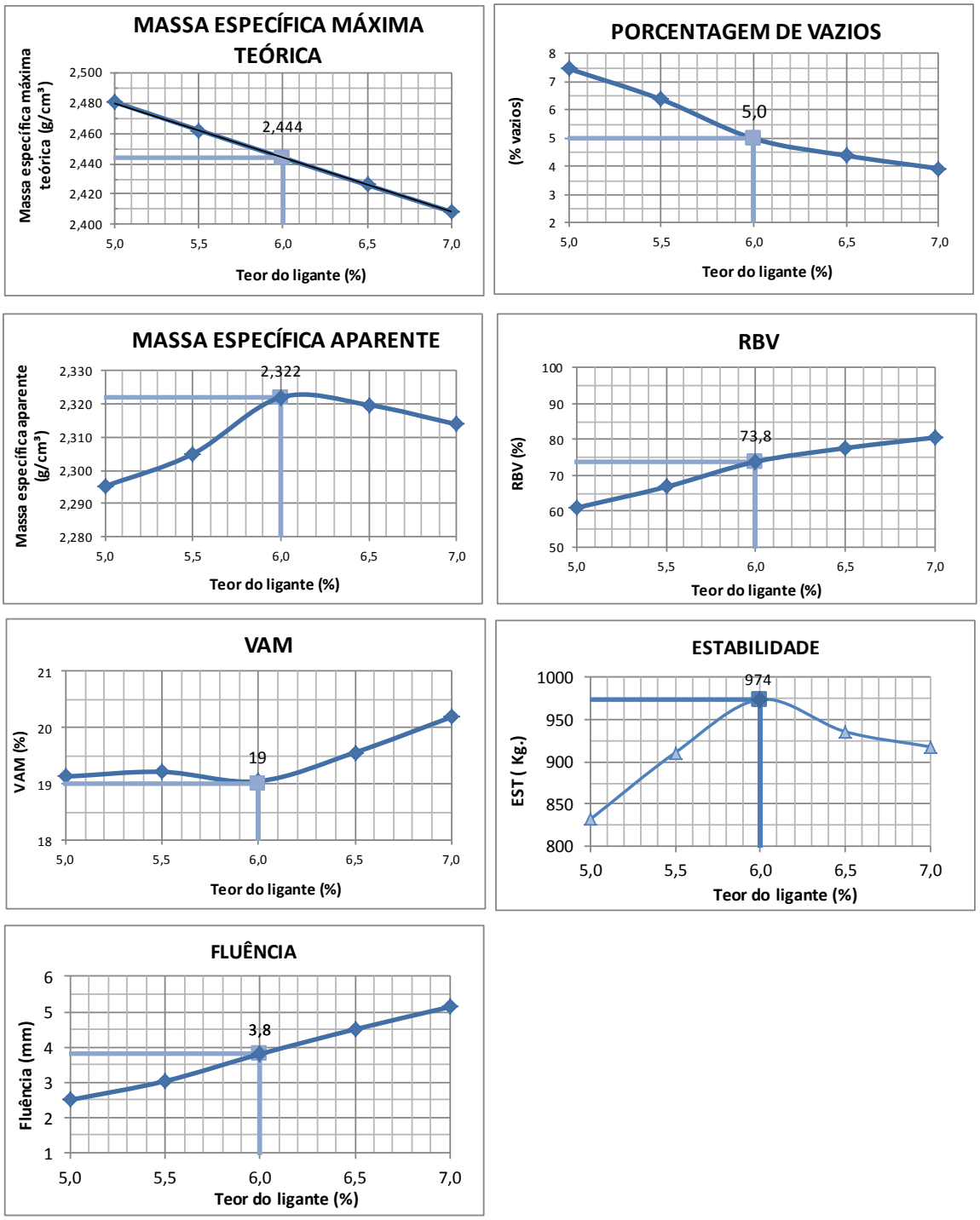


Figura 4.2 - Parâmetros volumétricos e características mecânicas da dosagem Marshall da mistura AB.

Nesta mistura, com o teor de ligante asfáltico de 6% foram encontrados valores de 5% de volume de vazios, estabilidade igual a 974 kgf e relação betume-vazios de 73,8%, massa específica aparente de 2,322 g/cm^3, VAM de 19% e fluência de 3,8mm, e massa específica máxima teórica de 2,444g/cm^3.

Mistura BWMA

A Figura 4.3 mostra os gráficos de parâmetros volumétricos e características mecânicas obtidos na dosagem Marshall da mistura BWMA para teor ótimo de ligante de 6%, igual ao teor da mistura AB.

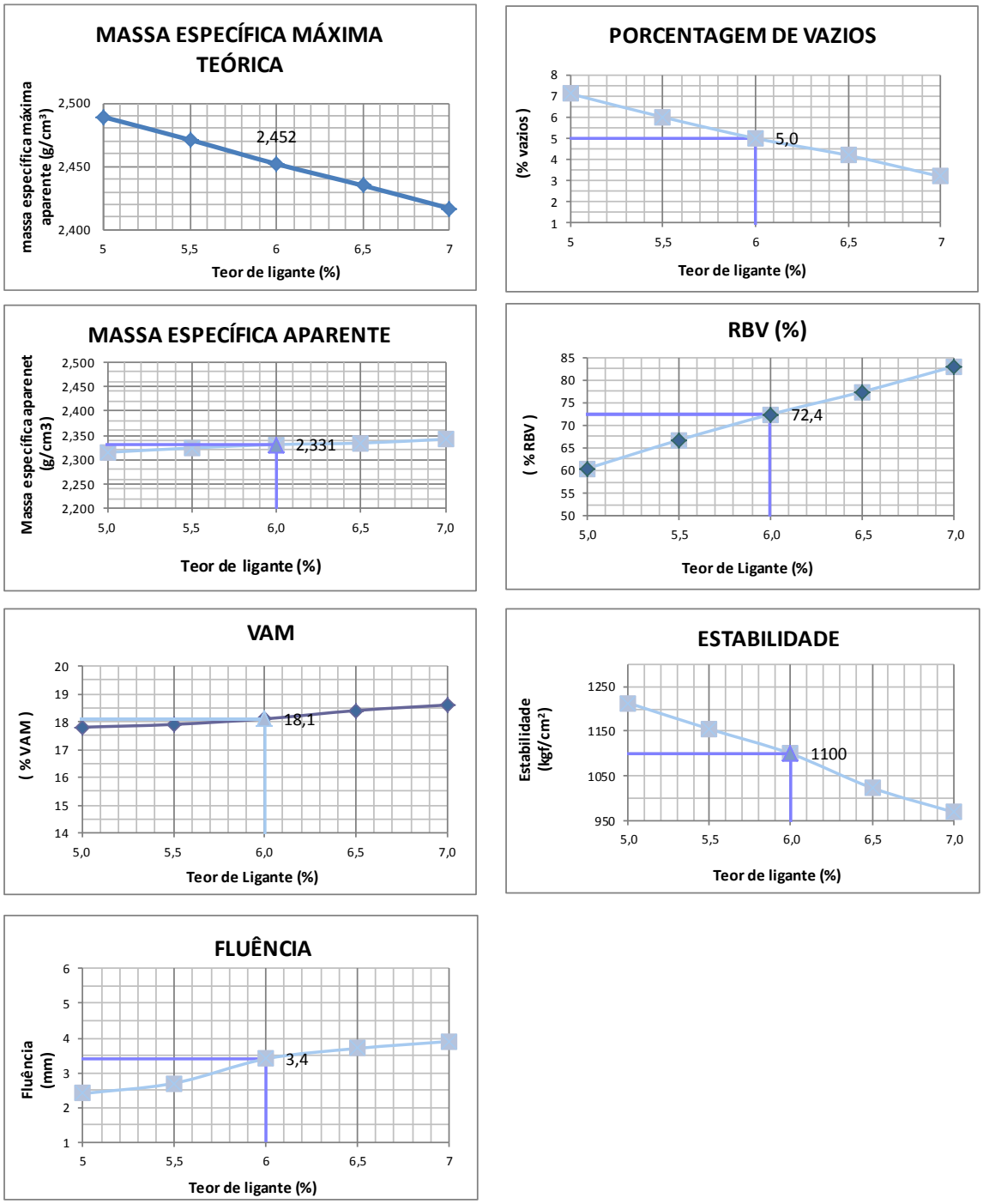


Figura 4.3 - Parâmetros volumétricos e características mecânicas da dosagem Marshall da mistura BWMA.

Para o teor ótimo de 6% de ligante, o volume de vazios foi de 5%, a relação betume-vazios de 72,4%, densidade aparente de 2,331 kg/m^3 e estabilidade Marshall de 1100 kgf, massa específica de 2,331 g/cm^3, VAM de 18,1%, fluência de 3,4mm e massa específica máxima teórica de 2,452 g/cm^3.

Em breve comparação, as duas misturas obtiveram o mesmo teor ótimo de ligante, para o mesmo volume de vazios, densidade aparente próxima, no entanto, a estabilidade Marshall da mistura BWMA foi superior ao resultado encontrado na dosagem da mistura AB, como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Resultados de dosagem Marshall das misturas AB e BWMA.

Característica	**Unidade**	**Resultados**		**Coeficiente de variação (c.v. %)**	**Limites** (DNIT 112/2009-ES)
		AB	**BWMA**		
		Média	**Média**		
Teor ótimo	%	6,00	6,00	0,0	5,7 a 6,3
Vazios totais	%	5	5	0,0	4 a 6
Relação betume /vazios	%	73,80	72,40	1,4	65 a 78
Massa específica aparente	g/cm³	2,322	2,331	0,3	-
Estabilidade	kgf	974	1100	8,6	min. 800
Fluência	mm	3,8	3,4	7,9	2,0 a 4,5
Massa específica máxima teórica	g/cm³	2,444	2,452	2,8	-
Relação finos - betume	%	0,9	0,8	8,3	0,6 a 1,2

4.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADE MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS COLETADAS NA USINA E TESTES COMPLEMENTARES

4.4.1 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado conforme descrito no item 3.4.1, com a mistura recém usinada, ou seja, não foram reaquecidas. A Figura 4.4 a seguir exibe os resultados obtidos de amostras colhidas na usina da Ecovias, entre os dias 27 e 31 de agosto de 2012, durante a execução do trecho experimental com mistura asfáltica morna. Para cada dia foi colhida uma amostra e moldado três corpos de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e verificação de volume de vazios.

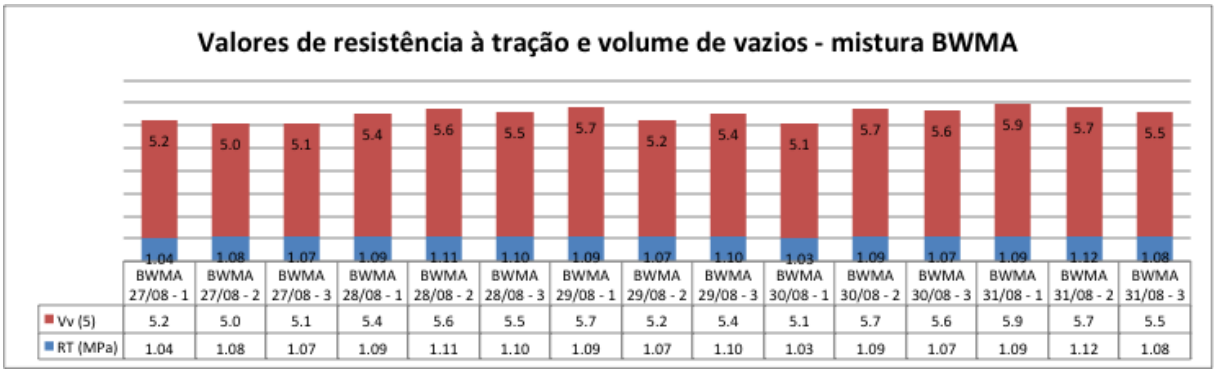


Figura 4.4 – Valores de resistências à tração e volume de vazios da mistura BWMA.

A Figura 4.5 exibe os resultados de resistência à tração e volume de vazios da mistura de referência aplicado na semana anterior ao dia 28-08.

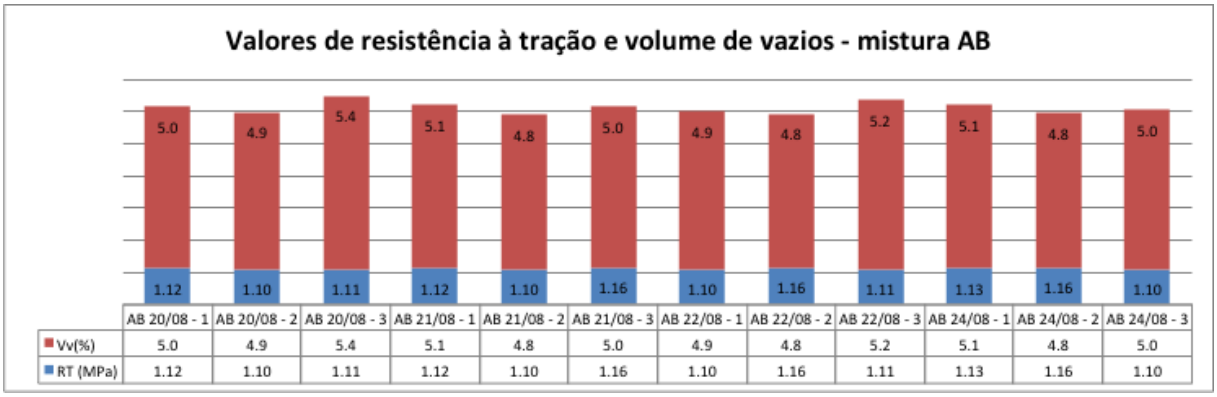


Figura 4.5 – Valores de resistências à tração e volume de vazios da mistura AB.

O volume de vazios, em média, da mistura BWMA é ligeiramente maior que a mistura AB, sendo respectivamente a média de todos os corpos de prova ensaiados, 5,4% e 5,0%, isso pode ocorrer em decorrência da temperatura de compactação da mistura morna ser inferior. O valor de resistência à tração da mistura BWMA é pouco menor que a mistura AB, o que pode ser decorrente do maior volume de vazios. No entanto, ambas as misturas atendem o especificado pela norma DNIT 112/2009 – ES.

4.4.2 Módulo de resiliência

O método de ensaio de módulo de resiliência foi descrito no item 3.4.2. As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os valores obtidos para módulo de resiliência para os 8 corpos de prova ensaiados em ambas as misturas.

Tabela 4.5 - Resultado de módulo de resiliência da mistura BWMA.

CP Nº	M.R (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	2.438		
2	2.505		
3	2.553		
4	2.234	**2.506**	**197,2**
5	2.325		
6	2.719		
7	2.835		
8	2.435		

Tabela 4.6 - Resultado de módulo de resiliência da mistura AB.

CP Nº	M.R (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	2.943		
2	2.916		
3	3.002		
4	3.337	**2.992**	**176,5**
5	2.912		
6	3.084		
7	2.718		
8	3.022		

A média do módulo de resiliência da mistura AB é 19% maior que a mistura BWMA. As duas misturas apresentam resultados entre 2.000 e 3.084 MPa, o que é considerado valores típicos para concretos asfálticos a 25°C, e são próximos a 2.000MPa, valor característico para misturas com borracha (BERNUCCI et al., 2010).

Esta diferença de módulos de resiliência também foi observada em estudos de outros pesquisadores. Segundo Cavalcanti (2010), em seu estudo com aditivo Rediset^{TM} WMX e CAP 30/45, compactada a 110°C e 120°C pelo método Marshall, obtiveram resultado de módulo de resiliência inferior em comparação com a mistura de referência produzida em temperatura convencional a quente.

Bernucci et al. (2010) apontam que há uma boa correlação entre módulo de resiliência e resistência à tração, em misturas asfálticas com composição granulométrica e tipo de ligante da mesma “família”, e esta relação permanece constante. Portanto, observando os valores médios obtidos no ensaio de módulo de resiliência e os resultados obtidos de resistência à tração no item 4.5.1 verifica-se que tal afirmação é verdadeira.

Para verificar se os valores obtidos em laboratório reproduziam o que ocorre em campo, com o levantamento deflectométrico realizado em 2013 foi feito a retroanálise das bacias obtidas por meio de levantamento de FWD a cada 200

metros (valores apresentados na Tabela 5.20) para a obtenção do módulo de resiliência, através do programa Elsym 5, utilizando como dados de camada, o que foi descrito no item 3, acrescidos de 3cm, que foi a camada asfáltica colocada. Tanto para o trecho de referência quanto para o trecho experimental as deflexões foram analisadas e os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.7.

O anexo VI apresenta os valores de módulo de resiliência de cada camada, para cada ponto de leitura de FWD, tanto no trecho de referência quanto no trecho experimental, espaçados a cada 200 metros. O Elsym 5 permite determinar 5 camadas, por tanto estas camadas foram subdivididas em:

a) Camada de revestimento com 3 cm (camada aplicada AB e BWMA, em seus respectivos trechos);
b) Mistura asfáltica existente;
c) Brita graduada simples;
d) Mistura asfáltica existente
e) Subleito

Para o subleito, após estudo, verificou-se que tanto a camada de solo quanto a camada granular, como descrito na tabela 3.2 possuíam módulos similares, portanto foram consideradas uma única camada na retroanálise apresentada no Anexo VI.

A retroanálise das bacias de deflexão utiliza os dados de deflexões medidas em campo, espessuras das camadas e seus respectivos coeficientes de Poisson, e através da Teoria da Elasticidade faz-se cálculo de um sistema de módulos para as camadas da estrutura do pavimento, de forma a se obter, por meio de tentativas, uma boa comparação entre a bacia de deflexões teórica (calculada) com a existente.

O processo interativo foi realizado para uma medida individual do ensaio, com o objetivo de minimizar o RMSE (*Root Mean Square Error*), ou seja, a raiz quadrada das somas dos quadrados das diferenças entre as deformadas calculadas e medidas.

Tabela 4.7 – Resultado de módulo de resiliência do revestimento obtido por meio de retroanálise.

Trecho	Média dos módulos da retroanálise (MPa) do revestimento	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Trecho AB	2956	1.555	0,53
Trecho BWMA	2875	1328	0,46

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados de módulo de resiliência.

Trecho	Média dos módulos - da retroanálise (MPa)	Média dos módulos – ensaio (MPa)
Trecho AB	2956	2992
Trecho BWMA	2875	2506

A tabela 4.9 a seguir exibe todos os valores encontrados para cada ponto de leitura da bacia deflectométrica. Pode-se observar a subdivisão das camadas de revestimentos. Os valores do módulo de subleito encontrados variam entre 250 e 3000 MPa, valores que podem ser considerados alto principalmente para um solo localizado na baixada santista, no entanto as camadas já estão consolidadas.

Tabela 4.9 – Resultados obtidos na retroanálise dos trechos BWMA e AB

Bacia		Módulo de Resiliência (Mpa)				
		CBUQmod.	CBUQ	BGS	CBUQ	Subleito
Trecho experimental BWMA	1	2200	1800	300	1000	250
	2	2200	2500	300	1000	300
	3	4500	5000	400	4000	300
	4	4500	5000	400	4000	300
	5	2200	2500	300	1000	300
	6	1800	2200	250	1000	300
	7	2200	1800	300	1000	250
	8	1700	1400	230	800	250
	9	1300	1500	150	600	250
	10	1800	1800	300	900	250
	11	1400	1300	120	900	250
	12	2200	2500	300	1000	300
	13	4500	5000	400	4000	300
	14	4500	5000	400	4000	300
	15	4500	5000	430	4000	300
	16	4500	4500	350	3500	250
Trecho de referencia AB	17	3000	4500	350	3500	250
	18	1300	1500	150	600	250
	19	1300	1500	150	600	250
	20	1700	1500	250	800	250
	21	1300	1500	150	600	250
	22	4500	4500	350	3500	300
	23	4500	4500	350	3500	300
	24	4500	5000	430	4000	300
	25	4500	5000	430	4000	300

4.4.3 Deformação permanente na trilha de roda

Para o ensaio de deformação permanente, tanto para a mistura BWMA quanto para a AB, nos dias de teste, foi recolhido a amostra e levada diretamente para o laboratório LTP da Escola Politécnica para a moldagem das placas. O objetivo era não deixar a mistura esfriar e não trabalhar com reaquecimento da mesma.

A Figura 4.6 e 4.7 demonstra os resultados obtidos durante a aplicação de carga e respectivos afundamentos até 30.000 ciclos para as duas misturas: BWMA e AB.

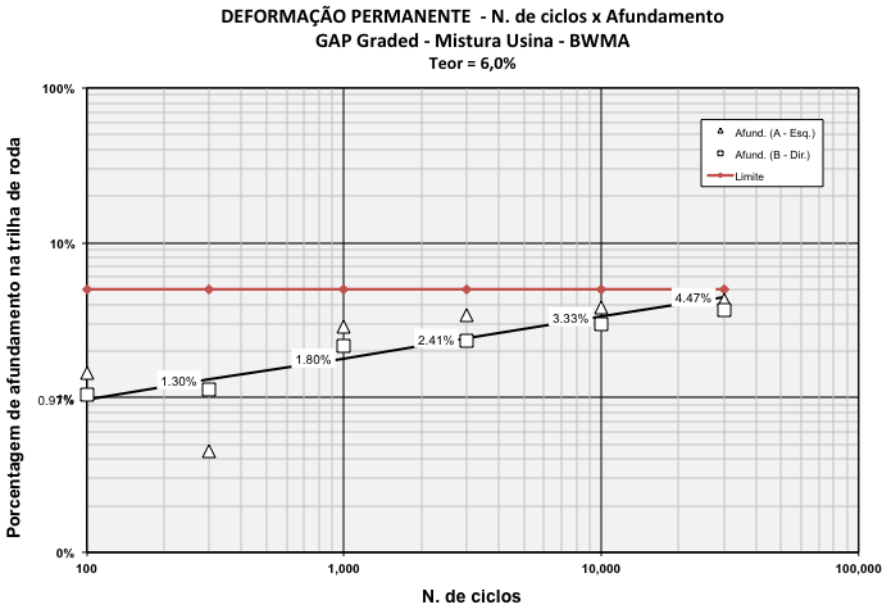


Figura 4.6 - Resultado do ensaio de deformação permanente da mistura BWMA

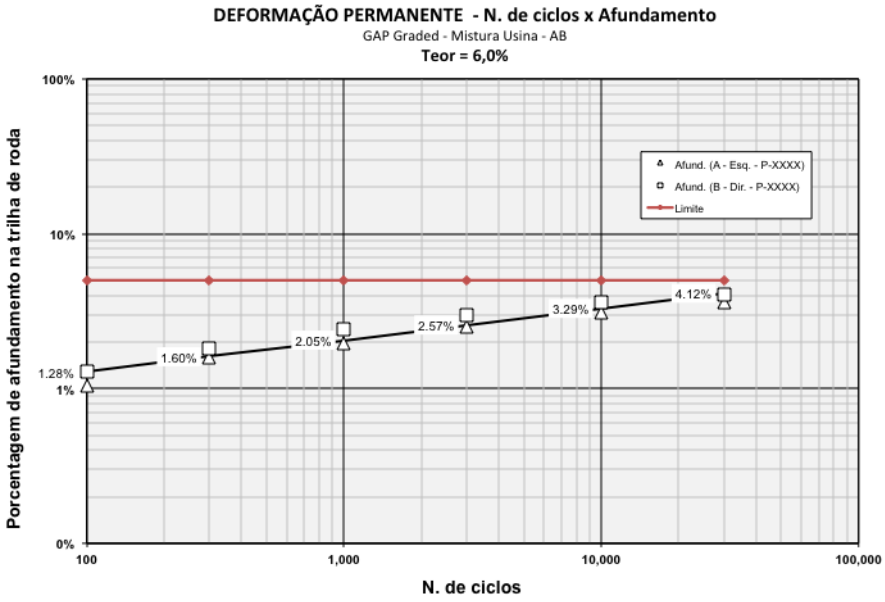


Figura 4.7- Resultado do ensaio de deformação permanente da mistura AB.

Ambas as misturas resultaram em afundamento de trilha de roda inferior a 5% após 30.000 ciclos e os resultados de porcentagem de afundamento foram entre si, próximos, onde a mistura AB teve 4,12% de afundamento, enquanto a mistura BWMA 4,47%.

4.4.4 Resistência ao dano por umidade induzida

No ensaio de dano por umidade induzida ambas as misturas tiveram resultados acima do mínimo preconizado pela norma DNIT 112/2009-ES (DNIT, 2009a), que é 0,7 da razão entre as resistências à tração por compressão diametral após e antes do condicionamento. No caso, o resultado da mistura morna idêntico ao obtido na mistura borracha, comprovando que mesmo aquecendo o agregado mineral em temperatura inferior ao padrão da mistura convencional à quente, não há problemas na resistência à tração da mistura morna, conforme mostra a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Resultados de resistência retida à tração diametral dos corpos de prova submetidos ao ensaio de dano por umidade induzida.

Número do corpo de prova	1	2	3	4	5	6	Média	Desvio Padrão	RRT (%)
FX. Caltrans com Ecoflex B adicionado Evotherm - BWMA									
Grau de saturação (%)				68%	69%	77%	71%	0.05	
Volume de vazios (%)	7.0	7.8	7.1	7.4	7.4	7.2	7.29	0.44	
Resistência à tração diametral seco (MPa)	0.90	0.93	0.96	-	-	-	0.93	0.03	**0.79**
Resistência à tração diametral saturado (MPa)	-	-	-	0.73	0.72	0.74	0.73	0.01	
FX. Caltrans com Ecoflex B - AB									
Grau de saturação (%)	-	-	-	78%	68%	72%	73%	0.05	
Volume de vazios (%)	5.4	5.6	5.2	5.3	5.5	5.6	5.39	0.18	
Resistência à tração diametral seco (MPa)	0,91	0.91	0.92	-	-	-	0.92	0.01	**0.79**
Resistência à tração diametral saturado (MPa)	-	-	-	0.69	0.71	0.78	0.73	0.05	

A Figura 4.8 mostra os corpos de prova rompidos após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral após serem condicionados à severidades. Não foram observados falhas de adesão e coesão nas misturas BWMA e AB.

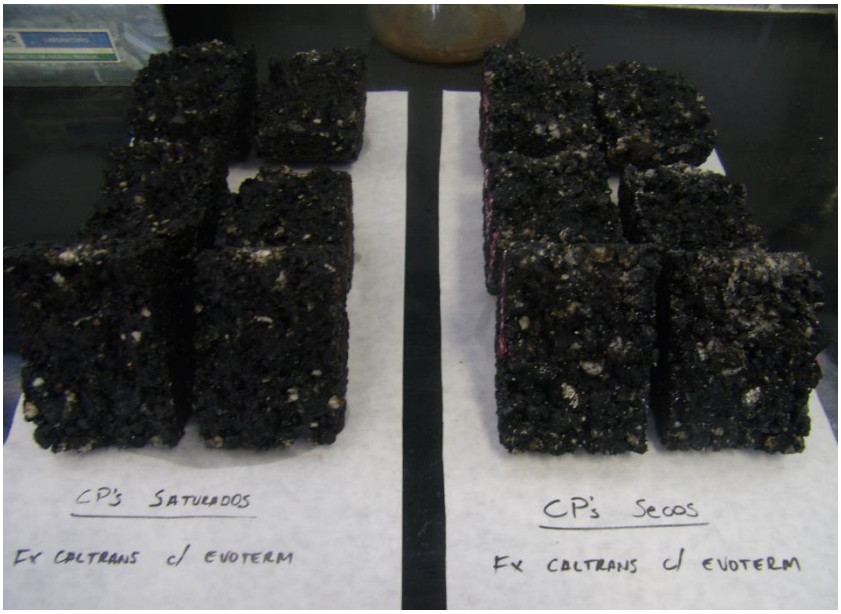


Figura 4.8– Corpos de prova rompidos após o ensaio de resistência à tração.

4.4.5 Fadiga

A Tabela 4.11 reúne o valor de resistência à tração de referência (RT_{REF}). Foi ensaiado um corpo de prova para cada mistura.

Tabela 4.11 – Valores de resistência à tração para ensaio de fadiga.

Mistura	Resistência à tração por compressão diametral (RT_{REF}) (MPa)
BWMA	0,91
AB	1,19

A Figura 4.9 demonstra os resultados do ensaio de fadiga para as misturas AB e BWMA. De modo geral, os modelos de fadiga obtidos no ensaio apresentam coeficiente de determinação (R^2) próximos a 1,0, o que indica um bom ajuste dos modelos com os valores experimentais obtidos no laboratório.

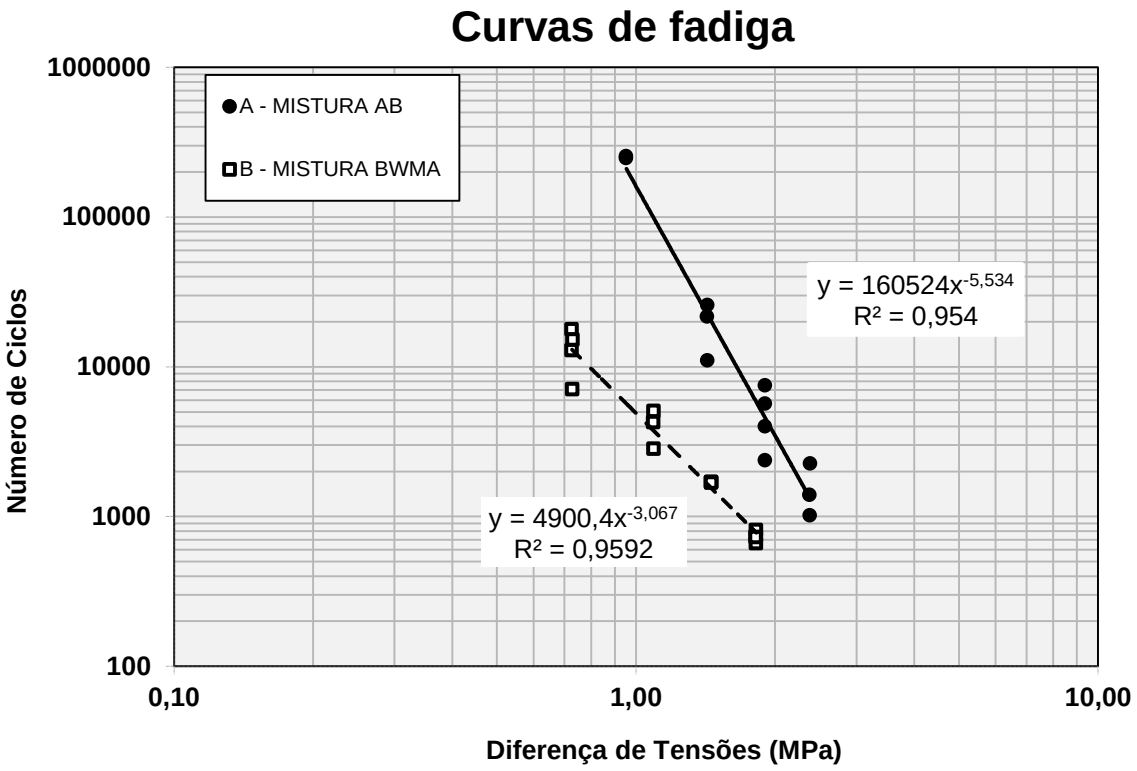


Figura 4.9 – Gráfico com resultado do ensaio de fadiga para as misturas AB e BWMA.

Pode-se notar que a mistura AB resistiu a maior número de ciclo que a mistura BWMA. No entanto, neste caso não se pode julgar o desempenho da mistura devido a diversos fatores que o resultado de fadiga é diretamente dependente como, por exemplo, o volume de vazios e disposição da matriz de agregados. É importante lembrar que ambas as misturas colhidas em usina foram estocadas e posteriormente reaquecidas para este ensaio. Como será verificado em outros ensaios e no item 4.4.7, este procedimento pode afetar a vida de fadiga das misturas uma vez que as reaquecendo estas são expostas novamente ao envelhecimento devido ao calor.

O volume de vazios também influi diretamente na resistência à fadiga do pavimento (INSTITUTO DE ASFALTO, 2007). Segundo o Instituto de Asfalto (2007) com o aumento do índice de vazio no pavimento, podendo ser causado pelo projeto da mistura ou pela compactação deficiente, a resistência à fadiga do pavimento é drasticamente reduzida, assim como também acontece com pavimentos que sofreram envelhecimento ou com ligante muito enrijecido.

Para melhor investigação das características dos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga, foi feito extração do ligante de três corpos de prova de cada

mistura e granulometria, na tentativa de encontrar algum desvio de valores. Os resultados de teor de ligante obtidos não variaram, exceto para o CP 14 da mistura BWMA, que obteve variação de 0,1% no teor do ligante, no entanto, dentro dos limites da norma DNIT 112/2009-ES (Tabela 4.12).

Na granulometria, todos os corpos de prova das duas misturas estiveram dentro da faixa de trabalho da Caltrans e sem grandes diferenças da porcentagem de material passando nas peneiras. As curvas granulométricas são exibidas na Figura 4.10.

Tabela 4.12 – Comparação do teor de ligante entre os corpos de prova no ensaio de fadiga.

Mistura	CP	Teor de ligante (%)
AB	11	5,8
	10	5,8
	12	5,8
BWMA	12	5,8
	13	5,8
	14	5,7

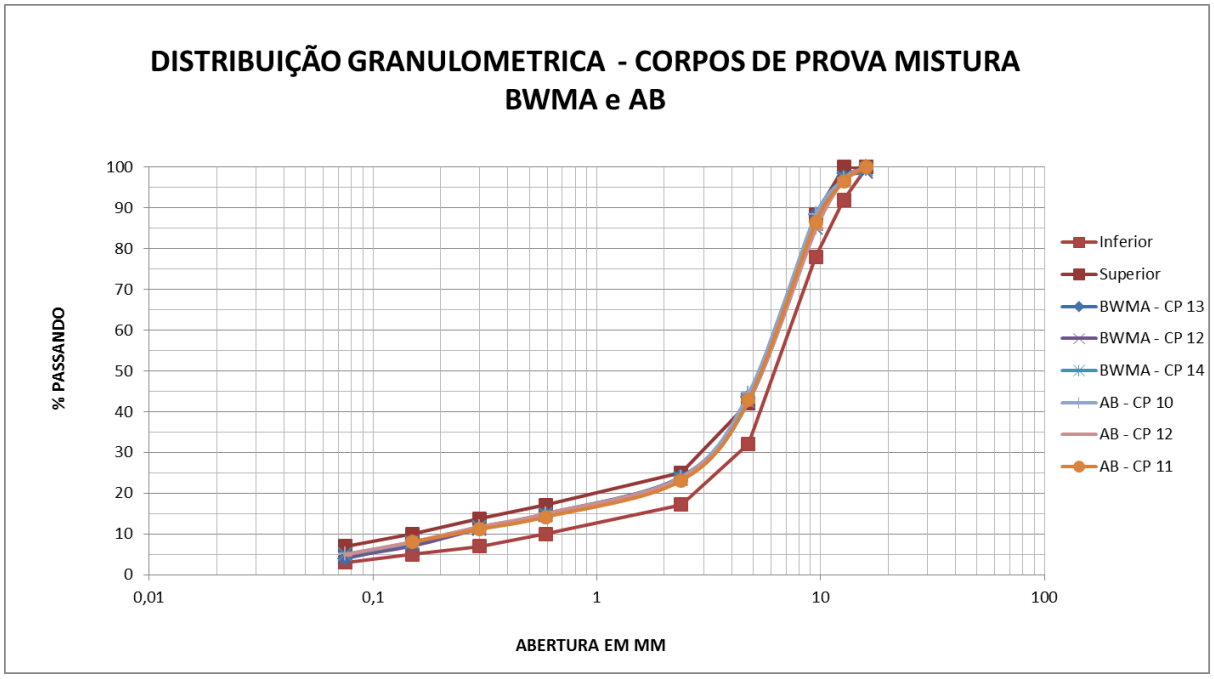


Figura 4.10 – Distribuição granulométrica dos corpos de prova da mistura AB e BWMA.

Nos estudos dos parâmetros volumétricos dos corpos de prova ensaiados de ambas as misturas é que foi possível observar a causa dos resultados de resistência à fadiga da mistura BWMA ser inferior à mistura AB. Após a determinação das medidas e pesos dos corpos de prova, foi calculado o volume de vazios. Analisando

a Tabelas 4.13 e 4.14, nota-se que o volume de vazios dos corpos de prova da mistura BWMA é aproximadamente 10% superior ao volume de vazios dos corpos de prova da mistura AB. No caso, as amostras da mistura BWMA apresentam volume de vazios superior a 7%. Pode ser devido ao volume de vazios alto, que a resistência à tração indireta e vida de fadiga resultou em valores menores que da mistura AB, uma vez que existe relação entre a resistência à fadiga e a resistência à tração. Bernucci et. al. (2010) apontam que uma vez que a resistência à tração alta, ou seja, maior resistência à ruptura também é associada à resistência à fadiga.

Tabela 4.13 – Parâmetros volumétricos dos corpos de prova ensaiados para verificação da resistência à fadiga – Mistura BWMA.

PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS CP's COMPACTADOS EM LABORATÓRIO - MISTURA RETRABALHADA - MISTURA BWMA

CP Nº	Teor de Ligante (%)	Massa ao Ar (g)	Massa Imersa (g)	Massa SSS (g)	Absorção %	Temperatura Água ºC	(Gmm - g/cm³)	Gmb (g/cm³)	Grau de Compactação (%)	Vazios Cheios de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Média Volume de Vazios (%)	Desv. Pad. VV (%)
3	5,80	1139,85	645,72	1.144,77	0,43	27,00	2,452	2,276	97,6	12,82	7,2		
6	5,80	1142,72	647,55	1.146,25	0,31	27,60	2,452	2,283	97,9	12,86	6,9		
9	5,80	1141,68	645,95	1.146,97	0,46	28,00	2,452	2,270	97,4	12,78	7,4		
12	5,80	1142,22	645,55	1.147,54	0,47	28,00	2,452	2,267	97,3	12,77	7,5		
11	5,80	1141,68	645,83	1.146,48	0,42	27,30	2,452	2,272	97,5	12,80	7,3		
13	5,80	1141,92	645,10	1.146,63	0,41	27,00	2,452	2,269	97,3	12,78	7,5	**7,35**	**0,19**
14	5,70	1143,73	646,74	1.149,39	0,49	27,30	2,452	2,267	97,3	12,55	7,5		
15	5,80	1142,09	646,77	1.148,18	0,53	27,30	2,452	2,270	97,4	12,78	7,4		
2	5,80	1145,05	645,48	1.148,15	0,27	26,60	2,452	2,270	97,4	12,78	7,4		
10	5,80	1142,88	646,48	1.147,02	0,36	28,00	2,452	2,275	97,6	12,81	7,2		
8	5,80	1140,98	645,78	1.146,85	0,51	28,00	2,452	2,269	97,3	12,77	7,5		

Massa SSS: massa de corpo-de-prova compactado na condição de superfície saturada seca, g, que corresponde ao corpo-de-prova com os poros superficiais saturados, sendo eliminado o excesso de água.
Gmm: Massa específica máxima medida.
Gmb: massa específica aparente da mistura asfáltica compactada.

Tabela 4.14 - Parâmetros volumétricos dos corpos de prova ensaiados para verificação da resistência à fadiga – Mistura AB.

PARAMETROS VOLUMÉTRICOS CP's COMPACTADOS EM LABORATÓRIO - MISTURA RETRABALHADA - MISTURA AB													
CP Nº	Teor de Ligante (%)	Massa ao Ar (g)	Massa Imersa (g)	Massa SSS (g)	Absorção %	Temperatura Água ºC	(Gmm - g/cm³)	Gmb (g/cm³)	Grau de Compactação (%)	Vazios Cheios de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Média Volume de Vazios (%)	Desv Pad VV (%)
9	5,80	1139,78	645,88	1.142,97	0,28	27,30	2,444	2,285	98,4	12,93	6,5	6,43	0,66
6	5,80	1140,84	649,67	1.141,94	0,10	27,00	2,444	2,309	99,5	13,07	5,5		
13	5,80	1139,84	644,82	1.141,77	0,17	27,00	2,444	2,286	98,4	12,93	6,5		
14	5,80	1139,47	647,60	1.141,34	0,16	26,40	2,444	2,300	99,1	13,02	5,9		
10	5,80	1140,39	645,79	1.143,26	0,25	27,00	2,444	2,284	98,4	12,93	6,5		
11	5,80	1139,35	641,50	1.144,94	0,49	27,00	2,444	2,255	97,1	12,76	7,7		
12	5,80	1138,54	648,24	1.142,31	0,33	27,10	2,444	2,296	98,9	12,99	6,0		
15	5,80	1134,07	641,44	1.137,28	0,28	27,20	2,444	2,279	98,2	12,90	6,7		

Massa SSS: massa de corpo-de-prova compactado na condição de superfície saturada seca, g, que corresponde ao corpo-de-prova com os poros superficiais saturados, sendo eliminado o excesso de água.
Gmm: Massa específica máxima medida.
Gmb: massa específica aparente da mistura asfáltica compactada.

4.4.6 Análise estatística dos resultados dos ensaios

Para a análise dos dados nesta pesquisa, foram utilizados testes de hipótese não paramétricos, pois, segundo Siegel e Castellan Junior (2008) são os mais adequados quando não se pode supor uma distribuição normal, uma vez que o número de amostras realizadas por este trabalho é relativamente pequeno, isto é, menor que trinta corpos de provas (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Os testes foram executados com auxilio do software R-project,[1] que é um ambiente específico para análise estatística.

As técnicas empregadas para o tratamento estatístico, assim como as respectivas hipóteses são apresentadas na lista abaixo, assim como as ferramentas de análise gráfica, o nível de significância escolhido para os testes de hipótese citados foi de α igual 1% por conta de sua ampla aceitação no meio acadêmico (SIEGEL; CASTELLAN JUNIOR, 2008, MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

a) Teste de Wilcoxon da soma dos postos: segundo Montgomery e Runger (2009) é a alternativa não paramétrica ao teste t, para comparar duas ou amostras aleatórias e independentes, é utilizado para testar a hipótese nula em que a média da amostra de referencia é igual à média da amostra experimental (H_0: $\mu_{AB} = \mu_{BWMA}$). O teste é adequado para análise das características mecânicas estocásticas, em que os resultados dos ensaios são comparados diretamente sem nenhum tipo de tratamento.

b) Kolmogorov-Smirnov**:** é um teste de aderência, isto é, quantifica a distância entre a função de referência e a experimental, a rigor é uma análise de variância em que a variável de teste é a maior diferença observada entre as duas funções (COSTA NETO, 2002). Este teste é mais adequado para comparação de variáveis continuas e funções, onde a hipótese nula é que a

[1] R-project: software disponível em http://www.r-project.org/

distribuição da função da amostra de referência é igual à função da amostra experimental.

c) Box-plot: ou diagrama de caixas, descreve simultaneamente várias características dos dados de forma condensada, como centro, dispersão, simetria e possíveis pontos fora da curva (*outliers*), como descrevem Montgomery e Runger (2009).

Dado o resultado do ensaio laboratorial de deformação permanente, apresenta uma curva característica gerada pela função obtida através de uma regressão, desta forma, o teste de hipótese mais adequado para tais casos é o Kolmogorov-Smirnov. O valor P, na análise foi de 0,9999, sendo maior que o nível de significância adotado, portanto não se pode rejeitar a hipótese nula, concluindo que deformação permanente da amostra de AB é aderente a amostra BWMA no nível de confiança estabelecido.

Para os ensaios de resistência à tração, volume de vazios e módulo de resiliência, utilizou-se o teste de Wilcoxon da soma dos postos por conta da característica dos resultados, que fornece um valor pontual para cada amostra recolhida. Para estes casos foi testado se a média da amostra AB é igual à amostra BWMA, dentro do nível de confiança estabelecido de 99%.

A Figura 4.11 mostra que o valor P, calculado para o ensaio de resistência a tração, que foi menor que α adotado, implicando na rejeição da hipótese que as médias são iguais. Na análise, o valor P foi de 0,0005495, sendo inferior ao α estabelecido.

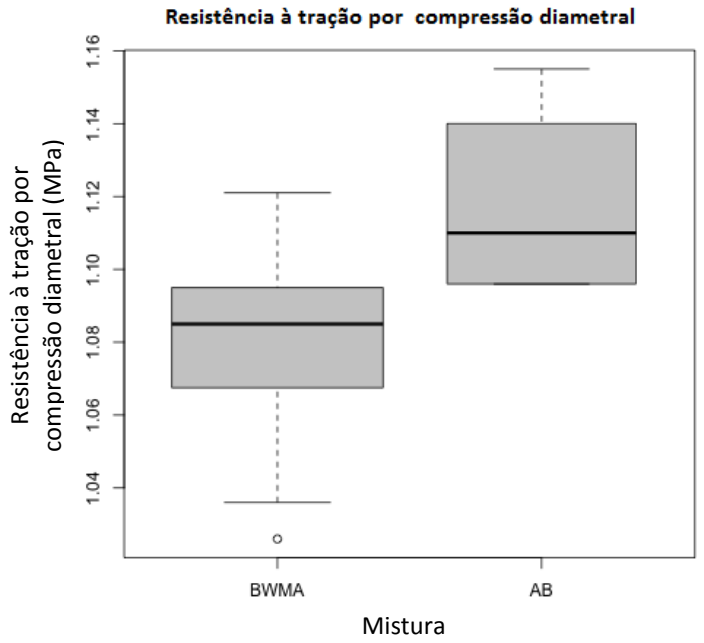


Figura 4.11 **–** Diagrama de caixas do ensaio de resistência à tração.

A Figura 4.12 mostra o resultado do teste estatístico dos valores de volume de vazios obtidos. Pode-se notar que neste caso, o valor –P também foi inferior ao α adotado, resultando em 0,0002807, logo, pode-se rejeitar a hipótese nula.

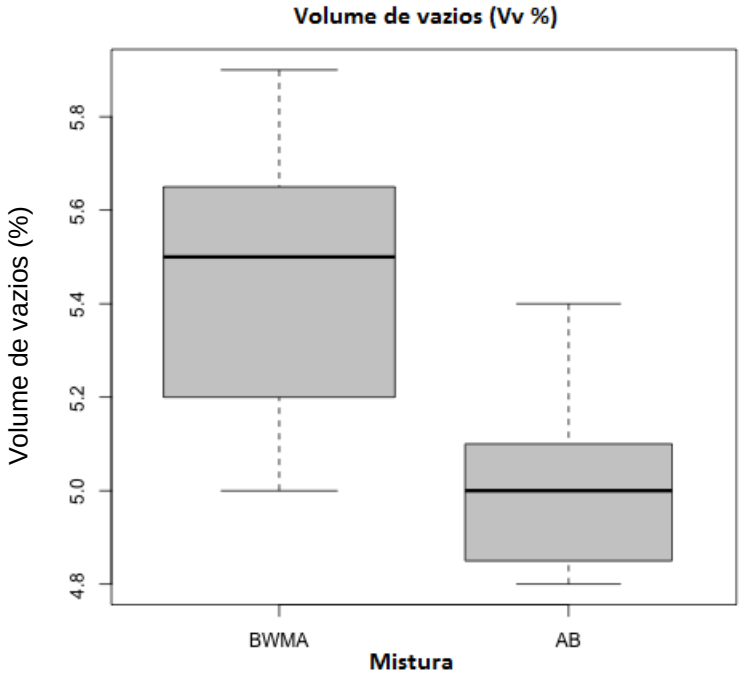


Figura 4.12 **–** Diagrama de caixas do ensaio de volume de vazios.

É fato é que os dois parâmetros, volume de vazios e resistência à tração por compressão diametral, estão intrinsecamente ligados e, portanto, é de se esperar que os dois falhem em conjunto.

Uma das possíveis causas do valor de volume de vazios da mistura BWMA pode ser devido ao reaquecimento da amostra. Segundo BONAQUIST (2011) no relatório do NCHRP sobre a dosagem de misturas mornas, é normal o reaquecimento de misturas asfálticas para ensaios laboratoriais, no entanto no caso de misturas asfálticas mornas que utilizem como aditivo substâncias químicas como agentes surfactantes, não é possível o estudo da volumetria da mistura. O autor ainda discorre que o reaquecimento tem o mesmo efeito nas características mecânicas das misturas mornas e nas misturas a quente, sendo que reaquecer misturas deixa-as mais rígidas.

Para verificação da vida de fadiga em misturas asfálticas mornas deve-se realizar estudo detalhado em misturas virgens e compará-las a misturas asfálticas quentes também produzidas em laboratório, sem o reaquecimento da mesma.

O mesmo procedimento estatístico foi executado na Figura 4.13 para o módulo de resiliência, calculando o valor P igual a 0,0006216, novamente inferior ao nível de confiança adotada, levando a rejeição da hipótese nula, em que as médias são iguais, o que leva a conclusão, novamente, que o módulo da amostra BWMA é menor que o da amostra AB.

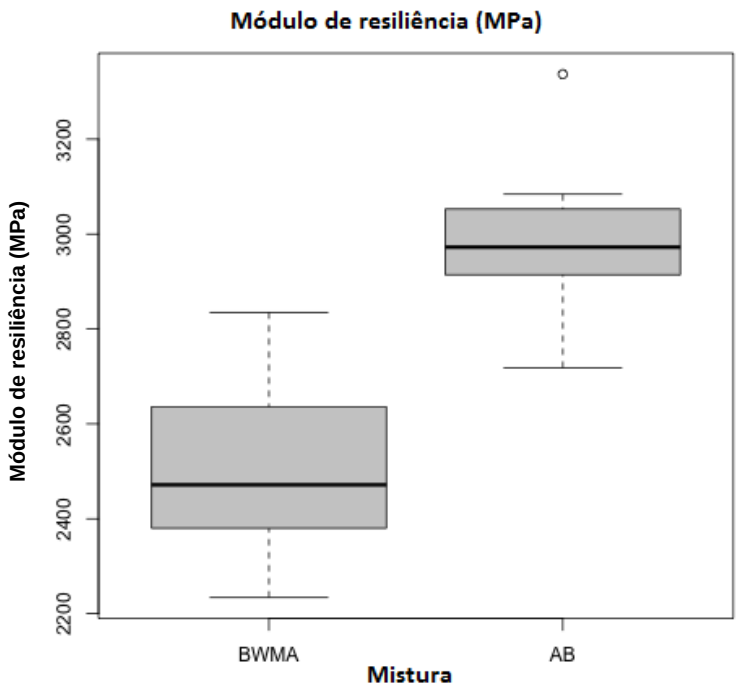


Figura 4.13 – Diagrama de caixas do ensaio de módulo de resiliência ensaiado.

4.4.7 Estudo do comportamento da mistura quanto à diminuição da temperatura

Após verificar que a característica volumétrica dos corpos de prova da amostra BWMA, coletada em usina e reaquecida, foi diferente da mistura AB e resultados como resistência à tração e fadiga foram abaixo do esperado, realizou-se um estudo com corpos de prova de misturas virgens, ou seja, misturas produzidas em laboratório para verificar há diferença na volumetria entre misturas reaquecidas e misturas virgens.

É importante apontar que nestes ensaios, os corpos de prova foram moldados com ligante de outro fornecedor, mas também aditivado com a mesma porcentagem de borracha moída de pneu. Este fato ocorreu por motivos comerciais da concessionária. Os corpos de prova foram produzidos com 6% de ligante.

Foram moldados grupos de três corpos de prova em seis temperaturas, variando entre 160°C e 110°C, tanto para a mistura AB quanto para a BWMA. Estes resultados são exibidos na Figura 4.13 a seguir.

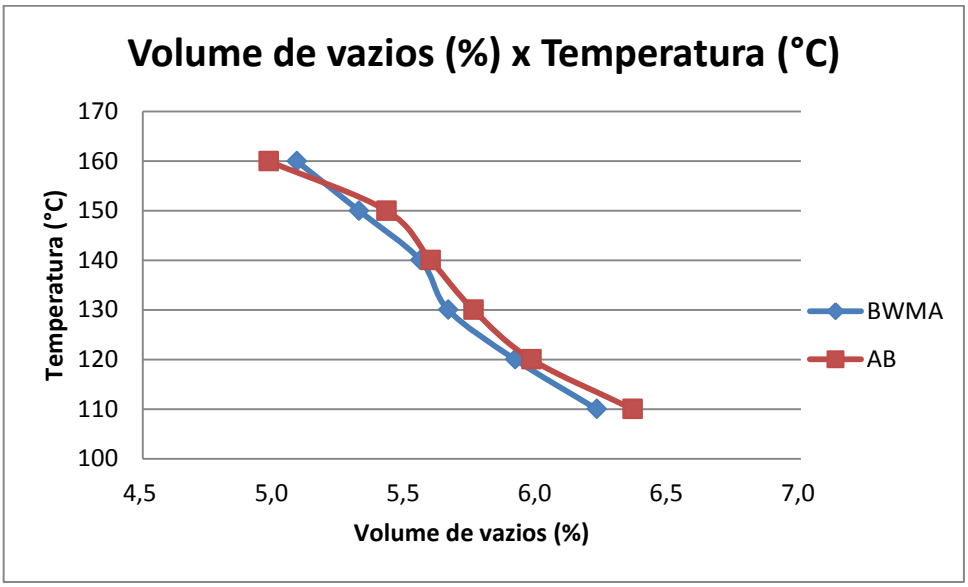


Figura 4.14 – Variação do volume de vazios (%) em diferentes temperaturas para a mistura AB e BWMA.

Na Figura 4.14 pode-se perceber que à medida que a temperatura de compactação do corpo de prova diminui, no caso variando entre 160°C a 110°C, o volume de vazios dos corpos de prova da mistura BWMA e AB aumentam, variando de 5,0 % para 6,4%, extrapolando o normatizado na norma DNIT 112/2009 ES (DNIT, 2009a). Mesmo assim, os valores obtidos foram diferentes dos encontrados para corpos de prova de misturas reaquecidas.

É importante frisar que, para futuras pesquisas é recomendado verificar com mais profundidade a possível influência nos valores volumétricos ao se reaquecer misturas asfálticas mornas utilizando como aditivo surfactante químico.

5 EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

5.1 APLICAÇÃO DO MATERIAL

A mistura asfáltica morna foi aplicada na semana do dia 28-08 como foi dito anteriormente, preparada na usina da Ecovias, exibida na Figura 5.1. A usina é do tipo gravimétrica.

Figura 5.1– Usina de asfalto da Ecovias.

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram a diferença do aspecto da massa, em termos de fumos de asfalto, na saída da usina. A Figura 5.2 é a mistura AB, a 165°C e a Figura 5.3 é a mistura BWMA a 135°C (30°C inferior à mistura de referência). Esta diminuição de fumaça é um ganho para o colaborador de usina, além de ser notável a redução de emissões de particulados e voláteis com a mistura asfáltica morna.

Figura 5.2 – Mistura AB a 165°C.

Figura 5.3 - Mistura BWMA a 135°C.

A Figura 5.4 é a vista da acabadora espalhando a mistura asfáltica em pista.

Figura 5.4 – Acabadora Vogële aplicando a massa na pista.

A compactação foi obtida, para os dois trechos, com dois rolos tipo chapa de 11 toneladas, conforme exibido na Figura 5.5. Durante a compactação, no total foram cinco passadas de rolo, sem vibração para obter grau de compactação maior que 97%, conforme especificado pelas normas DNIT e EcoRodovias. Para melhor acabamento das juntas, foi utilizada vibração na passagem do rolo tipo chapa.

Figura 5.5 – Rolo tipo chapa.

Ambos os trechos foram executados similarmente. Não obtiveram dificuldades na execução do trecho de mistura morna.

5.2 CONTROLE TECNOLÓGICO

5.2.1 Aferição da temperatura

A temperatura foi verificada durante o enchimento do caminhão com mistura asfáltica, na saída do misturador da usina, na chegada ao local de aplicação e durante a rolagem do rolo chapa (temperatura de compactação). A Figura 5.6 exibe a medição de temperatura sendo feita na usina.

Figura 5.6 – Realização de medição de temperatura no caminhão, em usina.

A Figura 5.7 mostra a comparação feita com as temperaturas de saída da usina, chegada ao local de aplicação e temperatura de compactação. Exceto alguns pontos com temperatura acima de 150°C, que são leituras feitas no primeiro caminhão do dia, a temperatura de saída de usina varia entre 130 e 140°C, e na média 135°C. Durante o transporte para o trecho, a mais de 70 km da usina, a mistura perdeu em torno de 10°C e a compactação ocorreu com a mistura a 125°C, em média.

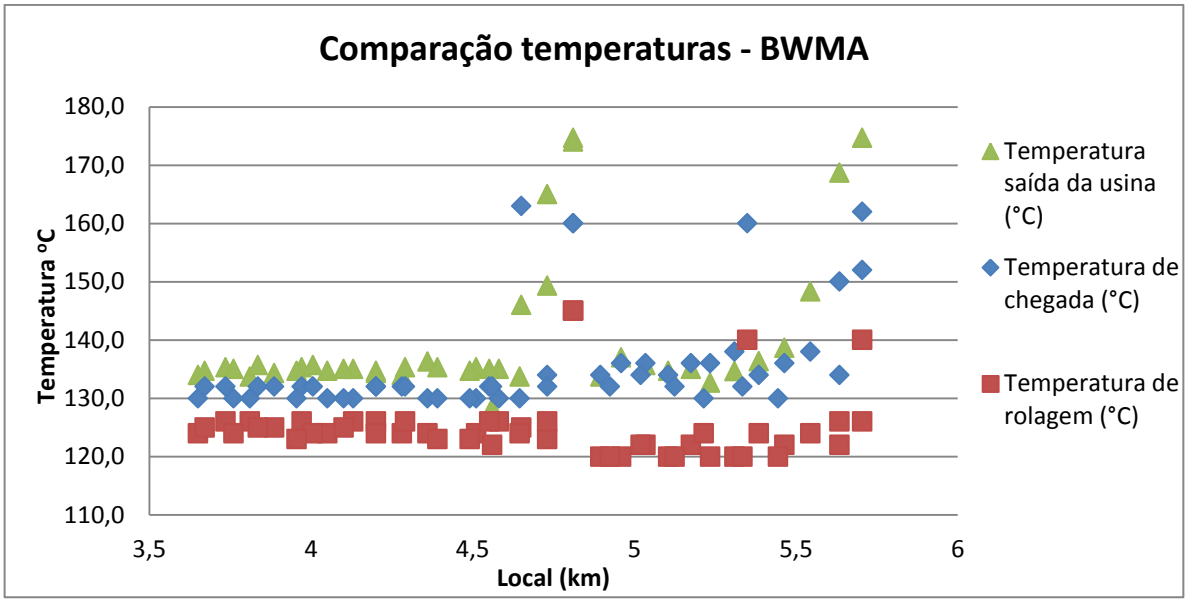


Figura 5.7 – Comparação entre temperaturas da mistura BWMA.

A Figura 5.8 exibe o controle de temperaturas feito durante a execução do trecho de referência. Inicialmente pode-se notar a diferença entre as temperaturas de chegada em pista e a de compactação é grande, caindo de 174°C na média para 161ºC em média.

Os dois trechos foram executados em condições climáticas similares, e pode-se perceber que no caso da mistura de referência, a perda de calor em campo foi maior que no caso da mistura morna.

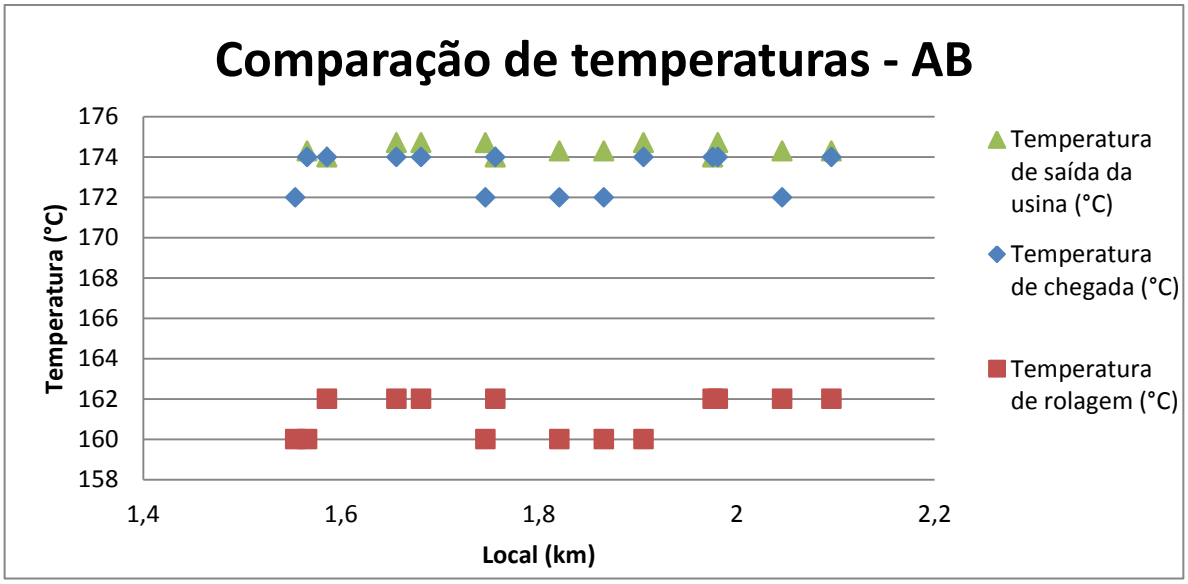


Figura 5.8 – Comparação entre temperaturas da mistura AB.

5.2.2 Estabilidade Marshall

No dia 29 de agosto foi colhida uma amostra na usina, durante a produção da mistura e realizado o ensaio de estabilidade Marshall. A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos. Para cada amostra foram ensaiados três corpos de prova e obtido a média.

Tabela 5.1 – Resultados de Estabilidade Marshall (kgf) – Mistura BWMA.

Corpo de prova	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
Peso no ar (g)	1156,23	1,19	0,10
Peso imerso (g)	656,8	1,7	0,3
Massa específica aparente (g/cm^3)	2,319	0,006	0,281
Massa específica máxima teórica (g/cm^3)	2,452	0	0
V. vazios %	5,4	0,3	4,6
V.C.B. %	13,1	0,1	0,5
V A M %	18,6	0,3	1,4
R.B.V. %	70,7	1,1	1,6
Estabilidade corrigida (kgf)	1.088	34	3

Fazendo a média simples dos resultados obtidos, chega-se a estabilidade de aproximadamente 1.088 kgf, com desvio padrão de 33,53, valor muito próximo ao observado na dosagem Marshall, apresentado na Tabela 4.4 (item 4.4).

5.2.3 Irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal após a execução do trecho experimental foi levantado por meio do equipamento Merlin, acrônimo de *Machine Evaluation Roughness Low-cost Instrumentation*, ou em português, Equipamento de baixo custo para avaliação da irregularidade, que foi desenvolvido pelo laboratório britânico – *Transport Reserach Laboratory* (TRL). Este equipamento é muito utilizado em pequenos trechos, e uma alternativa para medição da irregularidade longitudinal, de modo

prático, principalmente para trechos recém-executados. A Figura 5.9 ilustra a execução do levantamento de irregularidade com o equipamento.

Figura 5.9 – Colaborador realizando levantamento de irregularidade longitudinal.

O equipamento é composto de treliça de metal com 1,80m, uma roda à frente do equipamento, um pé na parte traseira e uma sapata no meio, o qual é apoiado o equipamento à superfície. A sapata é ligada a um braço móvel, que contém um ponteiro no final, que se move sobre uma Tabela. Para fazer a medição de irregularidade, basta mover o equipamento sobre a superfície, e a cada determinado espaçamento, marcar o local que o ponteiro aponta na Tabela formando assim um histograma. O índice de irregularidade é correspondente à largura do histograma.

Segundo Cundill (1991), o braço conectado à sonda (sapata) multiplica a medida obtida da irregularidade por 10 vezes, portanto, o movimento da sonda de 1 mm produzirá um movimento na ponta de 1 cm. O impresso, ou seja, a Tabela consiste numa série de colunas, cada qual com 5 mm de largura e dividida em quadrículas (CUNDILL, 1991). O autor afirma que é importante que a posição vertical da sonda ligada ao braço móvel esteja de tal forma que o ponteiro aponte o meio do impresso quando o deslocamento da sonda é zero.

O índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index* – IRI) pode ser obtido por meio da equação 5.1 (CUNDILL, 1991), correlacionando com os resultados do Merlin:

a) Para todas as superfícies de rodovias, medido em metros por quilômetro:

$$IRI = 0{,}593 + 0{,}0471D \qquad (5.1)$$

$$42 > D > 312 \ \ (2{,}4 > IRI > 15{,}9)$$

Onde:

D = irregularidade longitudinal em termos da escala do MERLIM e é medido em milímetros.

IRI = Índice de irregularidade internacional, medido em m/km

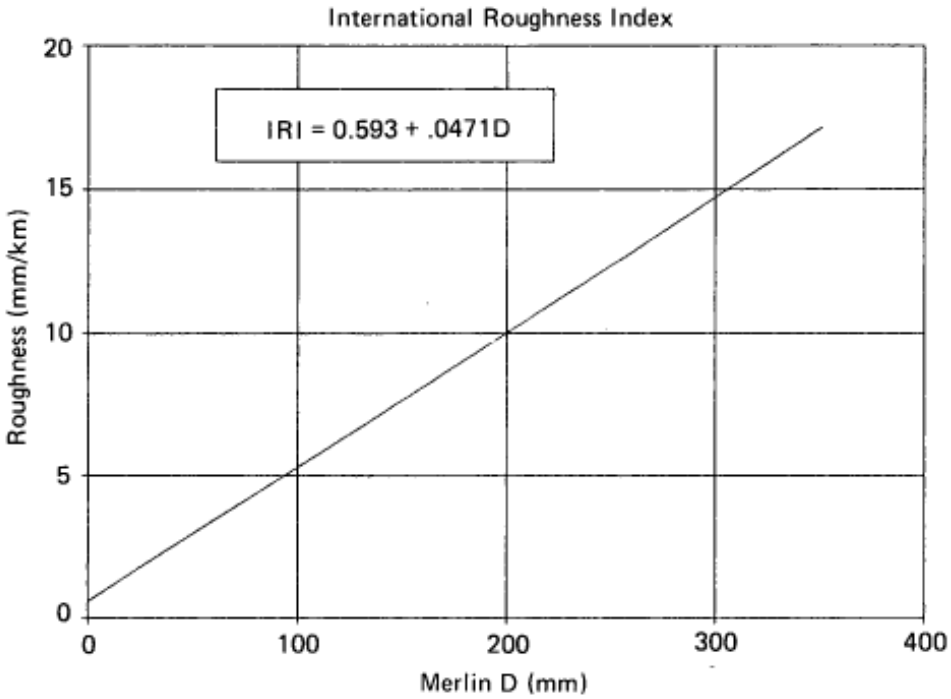


Figura 5.10 - Gráfico de equação de correlação entre o MERLIN e o IRI (CUNDILL, 1991).

A Figura 5.10 mostra o gráfico de equação da correlação entre o equipamento MERLIN e o índice de irregularidade IRI.

É importante atentar ao fato que a medida da irregularidade longitudinal utilizando o MERLIN é sujeita a imprecisões, primeiramente, pois depende de amostra de observações e, portanto sujeitas a erros de amostragem aleatória, e , segundo, há diferenças sistemáticas entre as escalas de irregularidade longitudinal as quais

podem ser reduzidas somente pela repetição de medição em diferentes trechos da rodovia (CUNDILL, 1991).

A Figura 5.11 apresenta os resultados obtidos no levantamento de irregularidade longitudinal realizada com o Merlin após a aplicação da camada de revestimento. Este procedimento é normativo na concessionária como controle da qualidade da execução da obra e liberação de serviço para medição da empreiteira que realizou o serviço. Analisando a Figura 5.11 percebe-se que todos os pontos são inferiores a 1,9 m/km, como preconizado pela concessionária. O eixo da abscissa equivale ao quilômetro levantado, com leituras a cada 200 metros, conforme apontado em especificação particular da EcoRodovias ET-S2.001.000-PAV/031 (ECORODOVIAS, 2011).

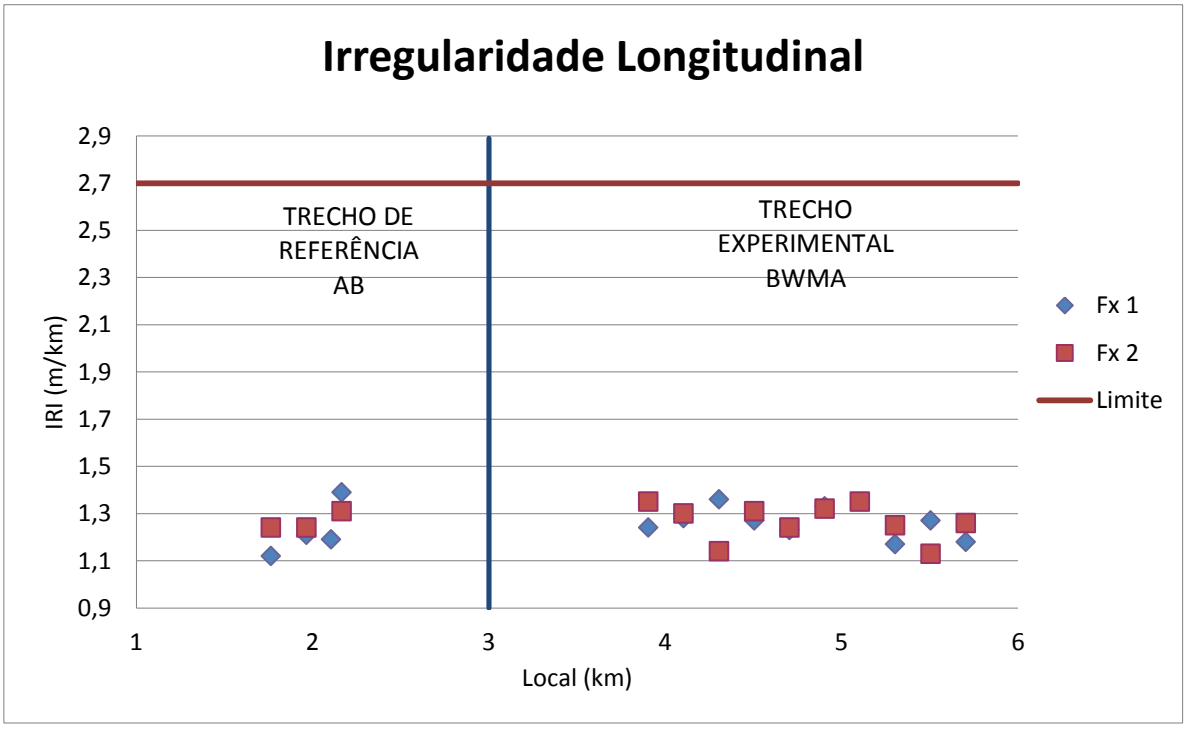


Figura 5.11 – Disposição da Irregularidade longitudinal.

5.2.4 Grau de compactação

Durante a compactação da mistura, foi utilizado o densímetro não nuclear para verificação da densidade da mistura aplicada, de modo a controlar a temperatura mínima para obter uma boa compactação. Este equipamento, que é exibido na Figura 5.12, permite a obtenção rápida da densidade e grau de compactação da camada de revestimento asfáltico, desde que calibrado com dados da mistura asfáltica aplicada (exemplo, mas específica máxima teórica).

Figura 5.12 – Densímetro não nuclear.

Após a execução do trecho experimental, a concessionária realizou o broqueamento e extração de corpos de prova da pista para a constatação do grau de compactação em laboratório. Para verificar o comportamento do trecho quando à compactação e volume de vazios quando exposto ao tráfego, um ano após a obra foram broqueados novos corpos de prova nos mesmos pontos e ensaiados. Os resultados obtidos no trecho BWMA são apresentados na Tabela 5.2

Tabela 5.2 - Controle do grau de compactação e volumetria – 2012 e 2013.

Faixa	Local (km)	Ago/12		Out/13	
		GC (%)	Vv (%)	GC (%)	Vv (%)
1	5+600	98	5,9	98,2	5,8
	5+490	97,8	6,2	97,9	6,1
	5+080	98,1	5,9	98,2	5,8
	4+500	97,8	6,2	97,8	6,2
	4+000	97,5	6,5	97,6	6,4
2	5+500	98,2	5,8	98,5	5,5
	5+275	98	6,0	98	6,0
	5+100	99	5,0	99	5,0
	4+920	97,9	6,1	98,2	5,8
	4+860	98	6,0	98,2	5,8

Na tabela 5.2 é possível verificar quem em todos os pontos ensaiados, o grau de compactação é satisfatório, estando acima de 97% (DNIT 112/2009-ES).

5.3 ANÁLISE DE EMISSÕES

Para a análise das emissões, foram realizadas avaliações em pontos fixos, na usina, do ar atmosférico, utilizando métodos de higiene ocupacional, sendo os testes e laudo realizados pela empresa *Environ*. Realizou-se a medição de Fumos de Asfalto (HPAs em fração solúvel em Benzeno e particulado total) além dos compostos orgânicos voláteis (VOCs), como o n-Hexano na usina de asfalto. Para cada tipo de mistura foram realizados dois dias de medição de emissão, no entanto, para estudo foi descartado o primeiro dia de medição da mistura de referência, pois os filtros foram saturados, o que comprometeu os resultados.

A metodologia utilizada para a amostragem da emissão de fumos de asfalto (fração solúvel em benzeno e particulado total) foi o MDHS 14/3 e NIOSH 5042 para análise gravimétrica. Foi utilizado filtro de fibra de vidro com porosidade de 1µm e diâmetro de 25 mm, montado cassete pré-pesado em micro balança eletrônica com sensibilidade de 0,001 mg e amostrador tipo IOM com vazão de 2,0 ± 0,1L/min. Numa mesma amostra foi determinado particulado total, fração solúvel e HPAs.

Para a determinação de compostos orgânicos voláteis (VOC), foi utilizado o método NIOSH 1500 – Cromatografia de gás com detector de ionização de chama, utilizando um amostrador tipo tubo de carvão ativo de 400/200mg. O solvente utilizado foi o dissulfeto de carbono.

A Figura 5.13 mostra um filtro utilizado na captação de emissões. As Figuras 5.14 e 5.15 mostram os locais de captação de poluentes sendo logo acima do local que a mistura asfáltica é descarregada no caminhão basculante (50 cm da caçamba do caminhão) e no ponto que o operador de usina faz medição de temperatura da massa descarregada no caminhão, de modo a permitir o estudo da diferença entre as emissões da mistura convencional e a mistura asfáltica morna.

Figura 5.13 – Bomba para medição de emissões poluentes.

Figura 5.14 – Bomba com filtro posicionado acima do local que a mistura asfáltica é descarregada.

Figura 5.15 – Bomba com filtro posicionado no ponto do operador.

Na análise em campo, foram realizadas 5 coletas simultâneas com filtro, como mostra a figura 5.16. Quatro filtros foram posicionados próximo à caçamba do caminhão basculante, circulando-o e o quinto filtro, próximo ao local que o operador da usina fica.

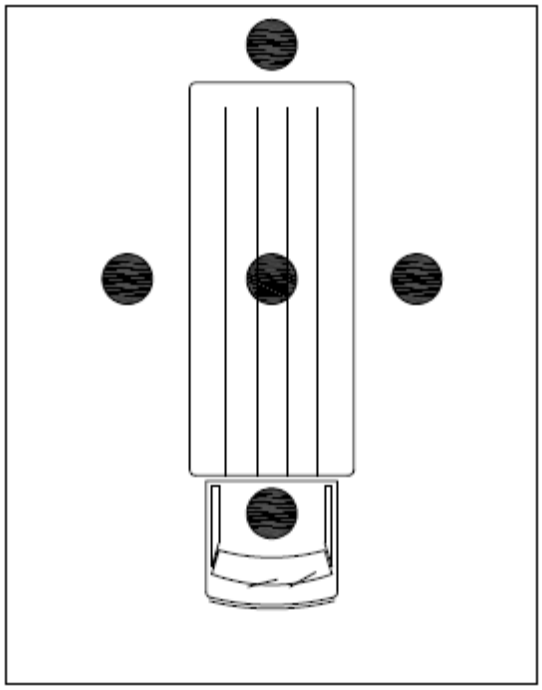


Figura 5.16 – Esquema do posicionamento das 5 bombas com filtro ao redor do caminhão basculante.

Para este ensaio é necessário realizar a troca dos filtros antes de sua saturação. Uma vez saturado, a bomba continua medindo a vazão em m^3/hora dos poluentes lançados, no entanto sem retenção no filtro e o resultado fica falso positivo para baixo, como se não houvesse emissão, devido a este motivo, os valores obtidos no primeiro dia de medição da mistura convencional foram descartados.

A Figura 5.17 mostra o responsável pelo ensaio inspecionando a bomba com os filtros. Neste estudo foi feito a troca dos filtros, em média, a cada 4 horas, exceto no caso de utilização de um único conjunto de filtro. Foram utilizados dois tipos de filtros, um de carbono ativado que absorve os VOCs e outro mecânico, que retém os fumos totais.

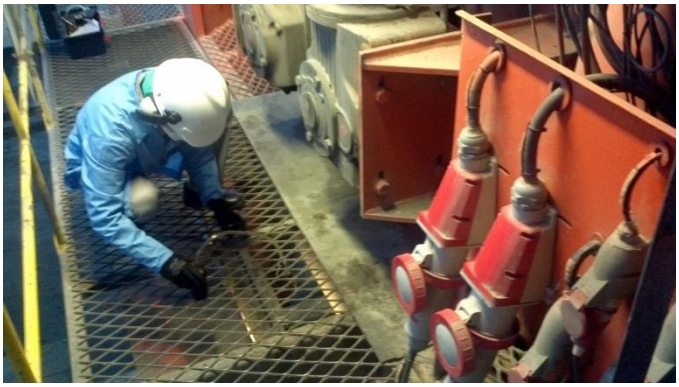


Figura 5.17 – Inspeção da bomba com filtro.

No dia de medição de emissões da mistura a quente, foram utilizados dois conjuntos de filtros e cada um mediu o carregamento de 7 caminhões. Para a medição das emissões da mistura asfáltica morna, foram dois dias de medição, no primeiro dia 5 caminhões com dois conjuntos de filtros e no segundo dia, 4 caminhões, com um único conjunto de filtros. Durante a realização do ensaio, cada caminhão demora em média 15 minutos para ser carregado. É importante citar as variáveis que podem afetar os resultados como o comprimento dos caminhões, altura e largura da caçamba, condições climáticas, principalmente velocidade e direção dos ventos. Estes fatores podem afetar a medida, no entanto não é possível isolar a medição em usina, mas durante as coletas foram registradas a velocidade e direção do vento, com o auxílio de um anemômetro, localizado na usina. Na medição da mistura BWMA e AB a temperatura ambiente e condições climáticas foram similares. Na usina, a posição do caminhão durante o carregamento faceia o lado Leste, e o vento pela manhã sopra no sentido Leste-Oeste, e durante a realização dos ensaios foi possível notar que os filtros posicionados à frente do caminhão obtiveram valores menores, como mostra as Tabelas 5.3 e 5.5. Nas Tabelas 5.4 e 5.6 são resumidos os valores obtidos no ensaio.

Tabela 5.3 – Valores obtidos de emissões para cada conjunto de filtro da mistura AB.

Amostra - 23/8/12 Mistura AB 175°C	**Esquerda**	**Frontal**	**Direita**	**Traseira**	**Operador**	**Total**	**Cargas por amostra**	**Volume amostrado (L)**	**Tempo da Coleta (min)**	**Total (ton.)**
VOCs, ppm	0,9	0,3	0,5	1,9	0,2	3,8	7,0	6,6	131,0	0,950
	1,0	1,2	0,2	1,5	1,4	5,3	6,0	5,5	110,0	1,136
Fumos de Asfalto (solúvel em benzeno), mg/m³	4,438	0,121	0,145	5,300	0,120	10,1	7,0	262,0	131,0	2,531
	1,836	0,144	0,119	0,145	0,145	2,4	6,0	220,0	110,0	0,512
Fumos de Asfalto (particulado total), mg/m³	18,367	4,066	44,952	15,848	2,182	85,4	7,0	262,0	131,0	21,354
	10,355	9,542	13,803	23,640	6,348	63,7	6,0	220,0	110,0	13,647

Tabela 5.4 – Resumo dos valores obtidos.

Resumo	VOC (ppm)	Fumos Solúveis (mg/m³)	Fumos Totais (mg/m³)
Média - Mistura AB - 175°C	1,036	1,599	17,797
Desvio padrão	0,101	1,094	4,176

Tabela 5.5 – Valores obtidos de emissões para cada conjunto de filtro da mistura BWMA.

Mistura BWMA - 135°C	**Dia**	**Esquerda**	**Frontal**	**Direita**	**Traseira**	**Operador**	**Total**	**Cargas por amostra**	**Volume amostrado (L)**	**Tempo da Coleta (min)**	**Total (ton.)**
VOCs, ppm	1o. Dia - 29/08	1,6	0,9	0,7	0,7	0,5	0,9	2,0	1,8	36,0	0,0503
		-	3,3	0,6	0,6	3,1	1,9	3,0	2,6	52,0	0,0502
	2o. Dia - 30/08	2,0	0,2	0,2	0,9	1,2	4,5	4,0	3,4	68,0	0,0501
Fumos de Asfalto (solúvel em benzeno), mg/m³	1o. Dia - 29/08	0,420	0,420	0,416	0,422	0,422	2,1	2,0	72,0	36,0	2,0000
		0,291	0,291	0,288	0,292	0,292	1,5	3,0	104,0	52,0	2,0000
	2o. Dia - 30/08	0,386	0,222	0,221	0,222	0,222	1,3	4,0	136,0	68,0	2,0000
Fumos de Asfalto (particulado total), mg/m³	1o. Dia - 29/08	6,632	9,887	3,745	2,557	5,894	28,7	2,0	72,0	36,0	2,0000
		6,645	6,118	0,807	0,837	1,149	15,6	3,0	104,0	52,0	2,0000
	2o. Dia - 30/08	6,391	1,298	1,241	6,778	7,310	23,0	4,0	136,0	68,0	2,0000

Tabela 5.6 – Resumo dos valores obtidos.

Resumo	VOC (ppm)	Fumos Solúveis (mg/m³)	Fumos Totais (mg/m³)
Mistura BWMA - 135°C	0,368	0,166	2,473
Desvio padrão	0,308	0,017	0,910

A Figura 5.18 a seguir mostra a comparação entre os resultados obtidos na leitura de um dia de operação da mistura de referência e da mistura asfáltica morna. Foram considerados 28 toneladas por caminhão. Pode-se notar redução de 64% na emissão de compostos orgânicos voláteis (VOC), 90% nos fumos voláteis de asfalto e 86% nos fumos totais.

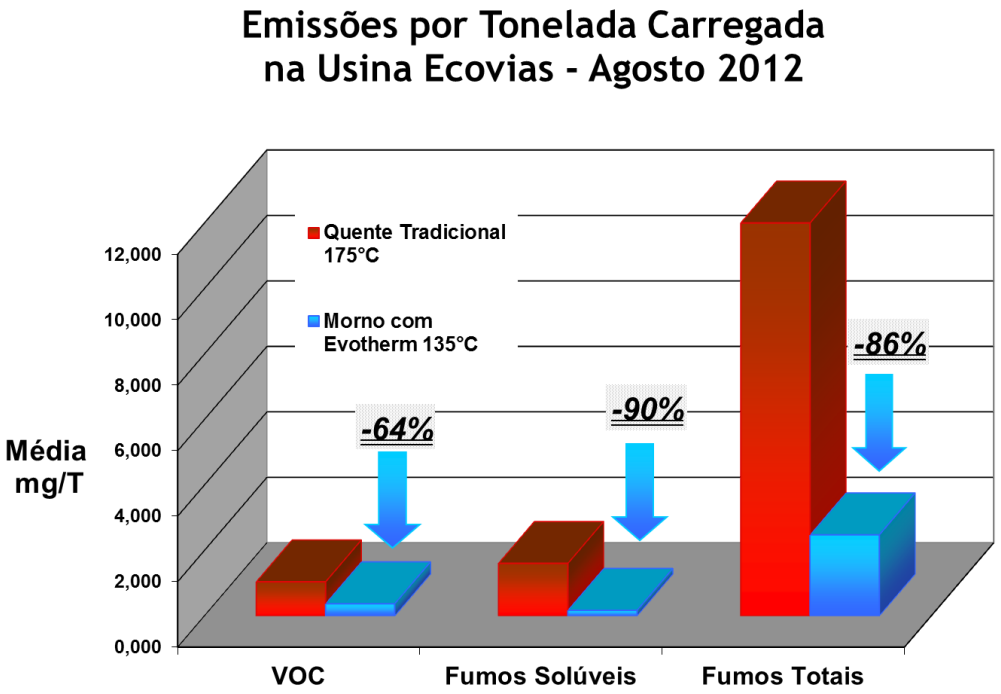


Figura 5.18 – Resultados obtidos na análise de emissões realizado na usina Ecovias.

5.4 REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DURANTE A USINAGEM

A usina de asfalto da Ecovias é do tipo gravimétrica – UAB 18 *Advanced*, com pug-mill de eixo duplo e é movida a gás liquefeito de petróleo (GLP), com capacidade de produção de 100 a 140 ton./hora. A Figura 5.19 mostra o local onde ficam os seis tanques de GLP que alimentam a usina da Ecovias.

Figura 5.19 – Vista dos tanques de GLP da usina Ecovias.

Durante a produção da mistura asfáltica morna, diariamente foi medido o nível do tanque de GLP no início da produção e no final, de modo que foi possível verificar qual o consumo médio. Para a mistura de referência (AB), como é uma mistura usualmente aplicada na Ecovias, a taxa de consumo em um dia de produção sem chuvas (período seco) e temperatura variando entre 18°C a 27°C é um número já conhecido pela Ecovias. A Tabela 5.7 exibe a taxa de consumo de GLP para cada uma das misturas.

Tabela 5.7 – Taxa de consumo aproximado (kg/ton.) para produção da mistura AB e BWMA

Item	Mistura AB	Mistura BWMA
Taxa de consumo aproximado (kg/ton.)	5,5	4,4

Comprando as duas taxas, percebe-se a redução de aproximadamente 1 kg por tonelada produzida ou 20% do consumo de GLP na produção da mistura asfáltica morna utilizando agente surfactante. Se o valor de compra do GLP é de R$ 2,08/kg

(valor de outubro de 2014), supondo a produção diária de 700 toneladas (7 horas de produção na capacidade mínima da usina), haveria economia de R$1.600,00 aproximadamente. É válido apontar que o consumo de GLP na usina pode variar em função de diversos motivos como a variação na umidade do agregado e clima (chuvoso e frio).

5.5 MONITORAMENTO DO TRECHO

5.5.1 Avaliação funcional – estado da superfície

Para a avaliação funcional do pavimento, a Ecovias executa ano a ano levantamentos de condição de superfície, baseado na norma DNIT 006/2003 PRO e levantamento de irregularidade longitudinal de superfície, executado por meio de leitura laser do pavimento com barra de 05 pontos de leitura, norma ASTM E950. Nos próximos itens serão apresentados os resultados destes parâmetros obtidos em 2012, antes da execução do trecho experimental e de 2013 e 2014, após a execução do trecho.

5.5.2 Inventário de superfície do pavimento

O cadastro da condição de superfície do pavimento foi feito seguindo a norma DNIT 006/2003 PRO, aplicando a terminologia de defeitos definidos na norma DNIT 005/2003 TER. O Índice de Gravidade Global (IGG) foi calculado pela norma DNIT 006/2003 PRO.

A Figura 5.20 exibem os resultados do índice de gravidade global (IGG) da faixa 02, obtidos em três anos, ou seja, em 2012 antes da execução do trecho experimental e em março de 2013 com 7 meses e março de 2014, após um ano e 5 meses da execução dos trechos.

	km inicial	km final	2012 IGG	2013 IGG	2014 IGG
AB	0,0	1,0	25	3	13
	1,0	2,0	16	2	15
	2,0	3,0	15	17	16
BWMA	3,0	4,0	14	2	14
	4,0	5,0	11	2	13
	5,0	6,0	20	7	14

Figura 5.20 – Média quilométrica dos índices de gravidade dos anos 2012, 2013 e 2014 – faixa 02.

Na Figura 5.20 é observado que no trecho experimental, o IGG não era elevado antes da obra, estando abaixo do limite de 30, valor estipulado em edital de concessão pela Agência de Transportes do Estado de São Paulo - ARTESP. No entanto, pode-se notar que após a execução da camada com a mistura asfáltica morna, houve melhoria neste índice, como é esperado após obra de restauração de pavimento. Em 2014, o indicie começa a subir, comportamento considerado normal e uma rodovia solicitada pelo tráfego.

As duas misturas, morna e de controle, obtiveram resultados satisfatórios no desempenho do índice de gravidade global.

5.5.3 Índice de irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal do pavimento foi medida através do equipamento com barra de leitura a laser, com cinco sensores de medidas, em cada faixa de tráfego a cada 200 metros, ou seja, em um quilometro são cinco pontos levantados e é realizada média simples destes valores. A Figura 5.20 exibe os valores médios quilométricos, da faixa 02, também com valores obtidos em 2012 e após a obra em março de 2013 e março de 2014. Analisando os dois gráficos é possível verificar que a irregularidade longitudinal diminuiu em 2013, na maior parte dos pontos abaixo de 1,5m/km, permanecendo praticamente igual em 2014. O ponto do quilómetro 2,60 deve ser desconsiderado, uma vez que o pico após a restauração pode indicar erro construtivo no momento da execução dos trechos.

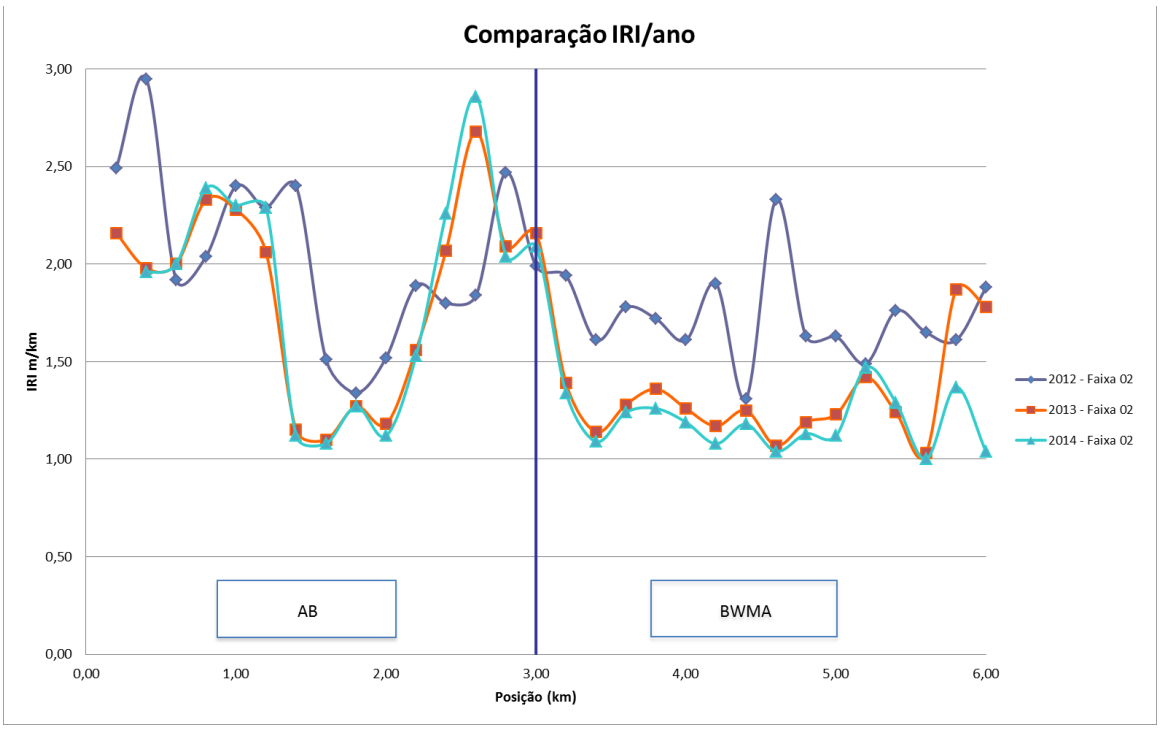


Figura 5.21 – Resultados do levantamento de irregularidade longitudinal da faixa 02 para anos 2012, 2013 e 2014.

Tanto para o trecho de referencia quanto para o trecho experimental, os resultados foram satisfatórios, dentro do esperado para uma obra de restauração do pavimento.

5.5.4 Afundamento de trilha de roda

O afundamento de trilha de roda foi medido através do perfilômetro a laser de barra com cinco sensores, a cada 10 metros. A Tabela 5.8 apresenta as médias do levantamento, por quilometro, obtidos em 2012, antes da aplicação da mistura asfáltica morna e em março/abril de 2013, após mais de seis meses da aplicação da mistura, na faixa mais solicitada, ou seja, faixa 02.

Pode-se observar na Tabela, que para o trecho de mistura asfáltica morna, o afundamento de trilha de roda manteve-se praticamente igual, de 2012, antes da obra e 2013 após seis meses de obra, sendo este um local com alto tráfego de caminhões, que abastecem os pátios de logística que existem beirando a rodovia. O limite máximo estabelecido pela ARTESP é de 7 milímetros, todos os pontos estão abaixo deste valor.

Tabela 5.8 – Resultado do levantamento de afundamento na trilha de roda, antes e após a obra, na faixa 02.

TRECHO	Km		ATR (mm)	
	Inicio	Final	2012	2013
AB	0	1	1,0	1,1
	1	2	0,9	1,1
	2	3	2,0	1,2
BWMA	3	4	1,4	1,4
	4	5	1,1	1,1
	5	6	1,3	1,3

5.5.5 Levantamento Deflectométrico

O levantamento das deflexões recuperáveis do pavimento foi realizado por meio do equipamento FWD – *Falling Weight Deflectometer*, que é um equipamento desenvolvido para medir os pequenos deslocamentos do pavimento ao ser solicitado por uma determinada carga.

Em 2007 a concessionária realizou campanha de levantamento deflectométrico para compor o projeto de restauração do pavimento da SPA 248/055, onde o trecho experimental está inserido. Em 2009 foi realizada nova campanha, no entanto antes da execução do trecho. Ambos os levantamento foram feito a cada 50 metros na faixa 02. Aproximadamente um ano após a execução do trecho experimental, em setembro de 2013, a Ecovias realizou nova campanha de levantamento, sendo realizados a cada 200 metros, na mesma faixa. Em outubro de 2014, foi realizado novamente levantamento deflectométrico na faixa 02, com espaçamento a cada 50 metros. Os valores obtidos de 2007 e 2014 são apresentados na Figura 5.21.

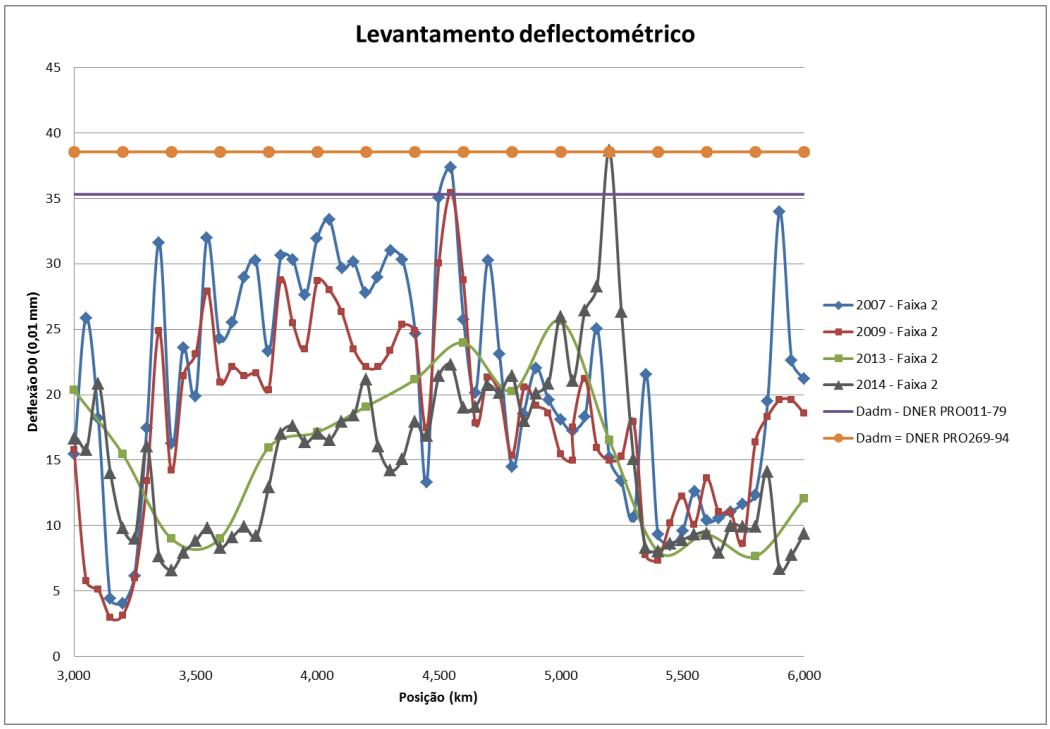


Figura 5.22 – Resultados do levantamento deflectométrico realizado entre 2007 e 2014 no trecho experimental BWMA na faixa 02.

Os valores de deflexão admissível foram calculados segundo as normas DNER PRO 269/94 e DNER PRO 011/79 do DNIT. Como pode ser observada, a deflexão no trecho, antes da restauração estava com valor mais alto, com alguns pontos próximos ao valor admissível proposto pelos dois procedimentos do DNER, atual DNIT para avaliação deflectométrica. No caso, o fator de conversão da deflexão lida pelo FWD para Viga Benkelmann, como pede os dois métodos, foi dada pela equação 5.2, retirado do trabalho de Ramos et al. (2006).

$$D_{VB} = 0{,}9786 D_{FWD} \qquad (5.2)$$

Comparando os valores obtidos em 2007 e 2014, em geral, estes são próximos, o que indica a consolidação da estrutura do pavimento, de forma que a restauração do pavimento em 2012 teve o objetivo tratar problemas funcionais como trilha de roda, trincamento e irregularidade longitudinal do pavimento, mas também melhorou a condição estrutural do pavimento, como era esperado. Podem ser notadas na Figura 5.21 algumas leituras de 2007 pontuais onde o valor da deflexão estava alto, muito provável pela presença de água no ponto, que foi tratado pela concessionária. Os valores de 2014 acompanham as deflexões obtidas em 2013, um ano antes, o que demostra que a estrutura está estável e comporta-se dentro do esperado, para o período que já foi solicitada após a restauração.

Em geral, o comportamento do trecho experimental (BWMA), quando aos parâmetros estruturais e funcionais, demonstrou ser similar ao trecho de referência, e até o presente momento atendeu as expectativas esperada para o período de serviço.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa abrangeu especificamente a utilização de agente surfactante, adicionado no ligante asfáltico com borracha moída de pneu, na própria distribuidora.

Durante sua usinagem das misturas AB e BWMA, para ser aplicado na rodovia SPA-248/055, foi recolhido, de um mesmo caminhão, quantidade de massa asfáltica para a realização de todos os ensaios laboratoriais para estudo e avaliação da tecnologia.

Para as duas misturas foram avaliadas o comportamento das misturas, com a verificação da resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga, deformação permanente e resistência a danos causados por umidade.

As conclusões obtidas neste estudo foram separadas em itens, detalhados a seguir:

Ligante

Nos ensaios de caracterização dos ligantes, os resultados obtidos foram similares, indicando que mesmo com a adição do agente químico da tecnologia de asfalto morno, não houve alteração das caraterísticas do asfalto, em termos de penetração a 25°C e ponto de amolecimento (método do anel e bola).

Foi estudado também se a viscosidade do ligante com tecnologia morno alterava, em comparação como ligante com borracha de pneu, nas temperaturas 175, 160, 150, 140 e 130°C. Comparando o ligante da mistura BWMA e o ligante da mistura AB, não houve diferenças significativas. Portanto, nas diferentes temperaturas, a viscosidade dos ligantes é igual, logo, o aditivo químico da tecnologia morna não age na viscosidade do ligante e sim como agente surfactante.

Na verificação das características do ligante apos o envelhecimento RTFOT, também não houve variação nos resultados, preservando as características do ligante com borracha de pneu, no entanto com ensaio realizado a 163°C.

Dosagem

Com relação ao teor de ligante da dosagem de misturas mornas, constatou-se que pode ser utilizado o mesmo teor de ligante determinado pela dosagem Marshall para mistura a quente com ligante borracha.

Volumetria

A volumetria dos corpos de prova da mistura asfáltica morna apresentou volume de vazios superior ao obtido com a mistura de referência, no entanto foram trabalhadas amostras reaquecidas. Para conferir esta elevação no volume de vazios foram moldados corpos de prova de misturas virgens e estes mantiveram o volume de vazios conforme esperado. Para estudos futuros é recomendado verificar se esta ocorrência é padrão no caso de trabalho com amostras reaquecidas.

Resistência à tração por compressão diametral

A mistura asfáltica morna obteve menor resistência à tração indireta, comparando à mistura de referência, bem como o módulo de resiliência também foi inferior. Existe uma correlação entre estes dois parâmetros, que estão intimamente ligados à volumetria do corpo de prova. É acreditado que estes valores foram inferiores devido ao volume de vazios superior dos corpos de prova das misturas mornas. É importante ressaltar que estes ensaios foram feitos com misturas reaquecidas, e uma vez que a resistência à tração está intimamente ligada à conexão dos vazios do corpo de prova, é esperado que fosse este o resultado.

Fadiga

A resistência à fadiga também foi inferior e o valor volume de vazios do corpo de prova também explica este resultado, que vai contra as afirmações encontradas na literatura.

Deformação permanente

A mistura asfáltica morna teve bom desempenho no ensaio de resistência à formação de trilha de roda, e após de 30.000 ciclos teve afundamento menor que 5% da espessura da placa. Em comparação com a mistura de referência, os valores foram similares.

Módulo de resiliência

Nos ensaios realizados, o módulo de resiliência da mistura asfáltica morna apresentou-se menor que da mistura de referência, e o mesmo aconteceu na retroanálise dos valores deflectométricos. Estatisticamente, a hipótese que as médias eram iguais foi rejeitada.

Na retroanálise realizada com os dados deflectométrico levantados com o FWD também mostrou que a média dos módulos da mistura BWMA é inferior à mistura AB.

Execução e acompanhamento do trecho experimental

O trecho experimental com mistura BWMA foi aplicado na rodovia de acesso SPA-248/055, entre os quilômetros 3 e 6 da rodovia. Durante sua execução foram avaliadas as temperaturas de produção, transporte/chegada em pista e execução. Os caminhões percorreram distância de mais de 70 quilômetros, saindo da usina com temperaturas entre 140 e 130°C, chegando ao campo com aproximadamente 130°C e início de rolagem de 130 a 120°C. A compactação da massa foi feita com rolo metálico e os resultados dos corpos de prova retirados para ensaio de grau de compactação (GC) foram satisfatórios, atendendo normas e especificação vigentes.

Foram avaliadas as condições de irregularidade longitudinal do pavimento, afundamento em trilha de roda e avaliação funcional (índice de gravidade global – IGG) e avaliação estrutural do pavimento antes da execução do trecho, em 2013 e 2014. Os resultados obtidos foram satisfatórios, até o momento atende às solicitações de serviço, no entanto ainda é cedo para afirmar que a mistura morna se comporta de forma semelhante à mistura a quente com ligante-borracha, pois é necessário aguardar terminar o período de projeto previsto e proceder à conclusão quanto ao desempenho da mistura asfáltica morna.

Sustentabilidade

Durante as medições de emissões na usina no momento de produção da mistura asfáltica morna, houve redução na emissão de poluentes ao meio ambiente. Obteve-se decréscimo de até 86% de fumos totais. Por meio de registro fotográfico é possível verificar que a quantidade de fumaça que sai da usina no momento do

descarregamento no caminhão basculante é menor em comparação ao que acontece durante a produção da mistura a quente.

A produção da mistura asfáltica morna apresentou economia no consumo de combustível (GLP) em comparação à produção da mistura de referência.

Em geral, esta dissertação apresenta resultados positivos quanto ao comportamento mecânico da mistura asfáltica morna modificada por borracha moída de pneu e verificou-se se as vantagens anunciadas pelos fabricantes do aditivo eram de fato válidas, principalmente no quesito de redução de poluentes, redução de temperatura e maior tempo de pavimentação. No entanto, quanto ao trecho experimental, as avaliações ainda são preliminares, devido ao curto período de análise e recomenda-se, para futuras pesquisas, avaliar o desempenho deste trecho em longo prazo, a fim de verificar se a mistura atendeu ao período de projeto, com uma estrutura ainda servível.

Até o presente momento, a tecnologia ainda não ganhou grandes adeptos devido a motivos sustentáveis e sim devido à vantagem da mistura com capacidade de guardar mais temperaturas, aguentar clima desfavorável à pavimentação e ser ao mesmo tempo trabalhável. É claro que um ponto negativo é a elevação do custo do ligante e isto prejudica a incorporação da tecnologia ao leque de soluções culturalmente exequíveis no Brasil.

Esta pesquisa foi muito importante para desenvolver a minuta de Especificação Técnica no grupo EcoRodovias para aplicação de misturas mornas, com agente surfactante proporcionando qualidade na execução dos trabalhos de pavimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO R35: Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA). Washington, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 950-98. Standard Test Method for Measuring tge Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. West Conshohocken, 1999.

_____ ASTM D1856-09: Standard test method for recovery of asphalt from solution by Abson Method. West Conshohocken, PA, 2009a, DOI: 10.1520/D1856-09.

_____ ASTM D4867-09: Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures. West Conshohocken, PA, 2009b, DOI: 10.1520/D4867_D4867M-09.

_____ ASTM D2172 / D2172M - 11: Standard test methods for quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures. West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D2172_D2172M-11.

_____ ASTM D2872 -12e1: Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D2872-12E01.

_____ ASTM D 2196/10: Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/D2196-10.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6560:2000 - Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. São Paulo, 2000.

ABNT NBR 15529:2007 - Asfalto borracha - Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional. São Paulo, 2007

ABNT NBR 6576:2007 - Materiais asfálticos - Determinação da penetração. São Paulo, 2007.

ABNT NBR 15617:2011 - Misturas asfálticas — Determinação do dano por umidade induzida. São Paulo, 2011.

ABNT NBR 11341:2008 - Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. São Paulo, 2008.

ABNT NBR 15235:2009 - Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. São Paulo, 2009.

ABNT NBR 15086:2006 - Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo Ductilômetro. São Paulo, 2006.

ABNT NBR 15617: Misturas asfálticas — Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2011

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. RESOLUÇÃO ANP N º 39 , DE 24.12.2008 - DOU 26.12.2008. Brasília, 2008.

ANDERSON, R. M.; BAUMGARDNER, G.; MAY, R.; REINKE, G. Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies. NCHRP PROJECT 9-47. Transportation Research Board of The National Academies. Washington D.C., 2008.

AREGA, Z.; BASHIN, A. Final report: Binder rheology and performance in warm mix asphalt. Center of Transportation Research at the University of Texas at Austin. Texas, 2012.

ASPHALT INSTITUTE. The Asphalt Handbook. MS-4. 7th edit. Asphalt Institute, 2007.

ASCHENBRENER, T.; SCHIEBEL, B.; WEST, R. Three-year of the Colorado Department of Transportation's warm mix Asphalt experimental feature on I-70 in Silverthorne, Colorado. National Center of Asphalt Technology, Auburn, Alabama. 2011.

AUSTROADS. Review of overseas trials of warm mix asphalt pavements and current usage by Austroads members. Austroads. Sydney, 2012.

BENNERT, T. Evaluation of warm asphalt technology. Report no. FHWA-NJ-2011-005. Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT). New Jersey, 2012.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA, CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica : formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BRAUMGARDNER, G. L., REINKE, G. R., BROWN, J. Lubricity properties of asphalt binders used in hot-mix and warm-mix asphalt pavements. 5th E&E Congress EUROASPHALT & EUROBITUME CONGRESS. 2012. Disponível em <http://www.eecongress2012.org/?s=home>. Acesso em ago. 2013.

BONAQUIST, R. Mix design practices for warm mix Asphalt. NCHRP report 691. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. Washington D.C. 2011

BOWER, N. Laboratory evaluation of performance of warm mix asphalt in Washington State. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Washington University. Washington D.C., 2011.

BOWER, N.; WEN, H.; WILLOUGHBY, K.; WESTON, J.; DEVOL, J. Evaluation of the performance of warm mix asphalt in Washington State. Department of Transportation, Washington D.C., 2012.

BROWN, E. R.; KANDHAL, P. S.; ROBERTS, F, L,; KIM, Y. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY T. W. Hot mix Asphalt material, mixtures design, and construction. Third edition. NAPA Research and Educational Foundation. Lanham, 2009.

BUDNY, J. Avaliação do Comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas/ Jaelson Budny. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 137p. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012.

BUTTON, J. W., ESTAKHRI, C., WIMSATT, A. A synthesis of warm-mix asphalt. Texas Department of Transportation e Federal Highway Administration.Texas, 2007. Disponível em < http://d2dtl5nnlpfr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/0-5597-1.pdf>. Acesso em: jul., 2014.

BUTLER M., NA.; BURR, G.; DANKOVIC, D.; LUNSFORD, R., A.; MILLER, A.; NGUYEN, M.; OLSEN, L.; SHARPNACK, D.; SNAWDER, J.; STAYNER, L.; SWEENEY, M., H.; TEASS, A.; WESS, J.; ZUMWALDE, R. Hazard review: Health effects of occupational exposure to asphalt. U.S. department of health and human services. National Institute for Occupational Safety and Health. Ohio, 2000.

CALTRANS. Asphalt rubber usage guide. Caltrans/CIWMB Partnered Research . Califórnia, 2006.

CAVALCANTI, L. S. Efeito de alguns modificadores de ligantes na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas/ Leonardo Santana Cavalcanti. – Rio de Janeiro. 196p. Dissertação (mestrado) - UFRJ/ COPPE, 2010.

CAVALLARI, J. M.; ZWACK, L. M.; LANGE, C. R.; KERRICK, R., F. MCCLEAN, M., D. Temperature-dependent emission concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in paving and built-up roofing asphalts. In: The Annals of Occupational Hygiene Volume 56, Issue 2Pp. 148-160. Oxford University Press. Oxford, 2012. Disponível em <http://annhyg.oxfordjournals.org/content/56/2/148.full> . Acesso em: 26 de maio de 2014.

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>. Acesso em: 07 jan. 2014.

CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS. NLT 329/91 – Recuperación elástica por torsión de betumes asfálticos modificados. Madri, 1991.

CERVARICH, M. Foaming the Asphalt New Warm-mix Technique Challenges Conventional Wisdom. “Hot Mix Asphalt Technology Volume 12, Number 4, p. 23-24, National Asphalt Pavement Association, Lanham, 2007,

CLARK, T. M.; RORRER, T. M. The rapid implementation of WMA in Virginia. In: 2nd International Warm Mix Conference. 2011, St. Louis, Missouri, Estados Unidos. Disponível em: <http://www.asphaltpavement.org/big_files/11mwmx/Papers/WM83_Clark.pdf >. Acesso em: 10 de maio de 2011.

CHENG, D.; HICKS, R. G.; TEESDALE, T. Assessment of warm mix technologies for use with asphalt rubber paving applications. In: Transportation Research Board Annual Meeting, 2011. Washington D.C.

CHOWDHURRY, A.; BUTTON, J. W. A Review of warm mix asphalt. Publicação SWUTC/08/473700-00080-1. Texas Transportation Institute, Texas A&M University. Texas, 2008.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 12697-22: Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 22: Essai d'orniérage. Version française. Bruxelles, 2003.

COSTA NETO, P., L., de O. Estatística. 2ª. Edição, Editora Edgar Blücher Ltda. São Paulo. 2002.

CUNDILL, M.A. Digest research report: 301 The MERLIN low-cost road roughness measuring machine. Transport and Road Research Laboratory. Berkshire, 1991.

DAVIDSON, J.K. Evotherm Trial in Ramara Township, Road 46 on October 4 and 5, 2005. McAsphalt Engineering Services, Ontario, 2005.

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES W.; NEWCOMB, D.; PROWELL B.; SINES, R.; YEATON, B. Warm mix Asphalt: European practice. National Cooperative Highway Research Program. Virginia, 2008.

DEPARTMENT FOR TRANSPORT. Transport Statistics Great Britain. United Kingdom, 2010. Disponível em < http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20110218142807/http:/dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/#complete>. Acesso em: 12 de jun. de 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.DNER-PRO 011/79: Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 1979.

_____ DNER-PRO 269/94: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. Rio de Janeiro, 1994.

_____ DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas à quente – ensaio Marshall: método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

_____ DNER-ME 054/97: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____ DNER-ME 035/98: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 006/2003-PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003

_____ DNIT 005/2003 - TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos -Terminologia . Rio de Janeiro, 2003.

_____ DNIT 112/2009 - ES: Pavimentos flexíveis: concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”: Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2009a.

_____ DNIT 111/2009 - ME: Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2009b.

_____ DNIT 135/2010 - ME: Pavimentação asfáltica: Misturas asfálticas: Determinação do módulo de resiliência: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a.

_____ DNIT 136/2010-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. EAPA position paper The use of Warm Mix Asphalt. Bélgica, 2010. Disponível em <http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/the_use_of_warm_mix_asphalt_january_2010.pdf>. Acesso em jul., 2014.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. Asphalt in figures 2012. Bélgica, 2013. Disponível em <

http://eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/Asphalt%20in%20figures%2022-11-2013.pdf>. Acesso em: abr. 2014.
_____. Warm Mix Asphalt. Bélgica, 2014. Disponível em < http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPA%20paper%20-%20Warm%20Mix%20Asphalt%20-%20version%202014.pdf >. Acesso em: jun. 2014.

ECOVIAS. Projeto de Reabilitação dos Pavimentos Flexíveis - RT-22.248.000-0-P09/001 – Revisão 0. São Bernardo do Campo, 2008.

ECORODOVIAS. ET-S2.001.000-PAV/031 - Especificação particular para concreto asfáltico com asfalto borracha. São Bernardo do Campo, 2011.

ESTAKHRI C., BUTTON, J., ALVAREZ, A. E. Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas. Texas Transportation Institute. Austin, 2010.

FARSHIDI, F.; JONES, D.; HARVEY, J. T. Warm-mix asphalt study: evaluation of rubberized hot and warm mix asphalt with respect to emissions. Institute of Transportation Studies. University of California, California, 2013.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. LTPP Newsletter, winter 2013. Volume 9. Issue 1. 2013. Disponível em < http://www.fhwa.dot.gov/publications/ltppnews/13055.pdf> . Acesso em: 25 de ago. de 2014.

_____ FHWA. About Long-Term Pavement Performance. 2014. Disponível em <http://www.fhwa.dot.gov/research/tfhrc/programs/infrastructure/pavements/ltpp/>. Acesso em 25 de ago. de 2014.

GAUDEFROY V.; VIRANAIKEN, V.; PARANHOS, R.; Laboratory identification of fumes during manufacturing of hydrocarbon mixtures. In: International Society for Asphalt Pavements, Zürich. Anais… 2008.

HANZ, A. J.; BAHIA, H. U. Asphalt Binder Contribution to Mixture Workability and Application of Asphalt Lubricity Test to Estimate Compactability Temperatures for Warm-Mix Asphalt. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2371, p. 87–95. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2013.

HARRIGAN, E. T. Research Results Digest 374: A proposed technology evaluation program for warm mix asphalt. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C., 2012.

HURLEY, G.C.; PROWELL, B.D. Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt. NCAT Report 05-06. Auburn, 2005.

HURLEY, G.C.; PROWELL, B.D. Evaluation of Evotherm® for use in warm mix asphalt. NCAT Report 06-02. Auburn, 2006.

KVANASK, A., WEST, R., HURLEY G., PROWELL, B., JONES, D., KREICH T., OSBORN, L., PEREGRINE, K., FRANK B. NCHRP 09-47A: Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies. Interim report appendix literature review. Volume I. Auburn, 2009.

KIM, Y.; LEE, J.; BAEK, C.; YANG, S.; KWON, S.; SUH, Y. Performance evaluation of warm and hot mix asphalt mixtures based on laboratory and accelerated pavement tests. In: Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2012, Artigo ID 901658. 9 pages. Nova Iorque, 2012.

KRISTJÁNSDÓTTIR, O.; MUENCH, S. T.; MICHAEL, L.; BURKE, G. Assessing the Potential for Warm Mix Asphalt Technology Adoption. Transportation Research Board of the National Academies, Washignton, D. C., 2007.

LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO - LAPAV. Estudo laboratorial de comportamento à fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas mornas. Relatório Fina. Porto Alegre, 2008.

MOURA; E de. Estudo de deformação permanente em trilha de roda de mistura asfáltica em pista e em laboratório/E De Moura. –ed. rev. – São Paulo, 2010. 299p.Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Transportes.

MEADWESTVACO. Product dada bolletin. 2010. Disponível em: <https://www.meadwestvaco.com/mwv/groups/content/documents/document/mwv026276.pdf. Acesso em: 13 de jan. de 2011.

_____ Material safety data sheet. 2011. Disponível em:

<http://www.wardenasphalt.com/MSDS/WarmMixEvothermM1.pdf>. Acesso em: 13 de jan. de 2011.

MERIGHI, C.; MAGALHAES, A.; CANDIDO, N.; MELO, D.; ROSA, P.; SUZUKI, C. Experiência da Concessionária Ecovias na utilização da tecnologia do asfalto morno com adição de borracha. In: 41ª RAPv Reunião Anual de Pavimentação, 2012, Fortaleza. 41ª RAPv Reunião Anual de Pavimentação, 2012.

MONTGOMERY, D., C.; RUNGER, G., C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MOTTA, L. M. G.; FRITZEN, M. A., VIANNA, A. A. D.; ÁVILA, G. M.; BARRA, R. Avaliação do comportamento de dois tipos de revestimentos asfálticos, dosados pelo método SUPERPAVE, sob ação de tráfego real na Rodovia BR040 – Trecho da Concessionária CONCER. In: WORKSHOP DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NAS CONCESSÕES RODOVIÁRIAS: SOLUÇÕES TÉCNICAS APLICADAS, 5., 2010. Brasília. Anais... Brasília: ANTT, 2010.

MOTTA, R. dos S. Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético / R.S. Motta. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011. 229 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

MOTTA, R.; BERNUCCI L. B.; VASCONCELLOS, P. Emissões de misturas asfálticas mornas e a quente devido à temperatura. In: Boletim Técnico SINICESP. São Paulo, 2013. Disponível em < http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt05a.htm>. Acesso em 13 de fev. de 2014.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. NCHRP Report 714: Special mixture design considerations and methods for warm mix asphalt: A supplementation to NCHRP Report 673: A manual for design of hot mix asphalt with commentary. Washington D.C., 2012.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. NAPA. Asphalt pavement overview. Disponível em <http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=34>. Acesso em jun., 2014.

OTTO, G. G. Misturas asfálticas mornas: Verificação da fadiga e do módulo complexo. 179 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PERKINS, S. W. Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving Strategies for use in Montana highway construction – FHWA/MT-09-009/8117-38 Final Report. Montana, 2009.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; Evaluation of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt – NCAT Report 05-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn, 2005.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C; CREWS, E. Field performance of warm mix asphalt at the NCAT test track. TRB, Washington DC, 2007. Disponível em < http://www.pavetrack.com/documents/Pdf/E9-E10-2005.pdf>. Acesso em: 25 de ago. de 2014.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; Warm mix asphalt: Best practices. National Asphalt pavement association – NAPA. Quality Improvement Publication 125. Lanham, 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. Warm-mix asphalt: Best practices. 3rd Edition. National Asphalt Pavement Association. Quality Improvement Publication 125, 3rd Edition. Lanham, 2012.

PETROBRAS. Batemos recordes de produção e vendas de asfaltos em 2010. 2011. Disponível em http://www.petrobras.com.br/pt/noticias/batemos-recordes-de-producao-e-vendas-de-asfaltos-em-2010/. Acesso em: 04 de nov. 2013.

RAMOS, D.; PRIETO, V.; SUZUKI, C. Y.; PREUSSLER, E. R.; VALE, A. F.; PEREIRA, A. C. O.; SANTOS, C. R. G. Relação entre deflexões medidas com viga Benkelman e falling weight defectometer: estudo de caso durante implantação do sistema de gerência de pavimentos do DER-SP. V Jornadas Luso-Brasileiras de pavimento: Políticas e Tecnologias. Recife, 2006.

READ, J.; WHITEOAK, D.; HUNTER, R. Shell Bitumen Handbook. Thomas Telford Publishing; 5th edition. London, 2003.

RUBIO, M. C.; MARTINEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. Warm mix asphalt: an overview. Journal of Cleaner Production 24 – p. 76-84, 2012. Disponível em <www.elsevier .com/ locate/ jclepro>. Acesso em: fev. 2014.

RUBIO, M. C.; MORENO, F.; MARTINEZ-ECHEVARRIA, M. J.; MARTINEZ, G.; VAZQUEZ, J. M. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. Journal of Cleaner Production 41- p. 1-6, 2013.

SABITA. Manual 32: Best practice guideline for warm mix asphalt. ISBN 978-1-8974968-55-1. South Africa, 2011.

SANTOS, C. R. G. Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas. São Carlos, 2005. 123 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

SANTUCCI, L. Rut Resistant Asphalt Pavements. University of California, Berkeley. Institute of Transportation Studies. Technology Transfer Program. 2001. Disponível em < http://www.techtransfer.berkeley.edu/techtopics/2001techtopics.pdf>. Acesso em 15 de abr. de 2013.

SEBAALY, P. E.; HAJJ, E. Y.; HITTI, E. Performance of recycled rubber modified binders in warm mix Asphalt mixtures. Asphalt Rubber Conference 2012 Munich. Munique, Alemanha, 2012.

SIEGEL, S.; CASTELLAN JUNIOR, J. Estatística Não Paramétrica para Ciências do Comportamento. Artmed-Bookman. São Paulo, 2006, reimpressão 2008.

SOUSA FILHO, A., C. Produção de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SOUZA, R., FERREIRA A., HIMENO, K. Avaliação de ligantes betume-borracha recuperados de misturas betuminosas densas. 7o. Congresso Rodoviário Português. Lisboa, 2013. Disponível em <http://www.crp.pt/docs/A45S121-135_Art_T5_7CRP_2013.pdf>. Acesso em: 17 de jul. de 2013.

THE ASPHALT ROOFING INDUSTRY SCIENCE & MEDICAL GROUP. The Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt Fumes - a review of the available scientific data and on-going industry and government research. [199?] Disponível em < http://www.owenscorning.com/NetworkShare/Asphalt/healtheffects.pdf> . Acesso em: jul. 2014.

THE NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATION SAFETY AND HEALTH – NIOSH 5042. Benzene-soluble fraction and total particulate (asphalt fume). Atlanta, 1998. Disponível em <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/5042.pdf>. Acesso em 18 de jul. 2013.

_____ NIOSH 1500: Hydrocarbons, BP 36o-126oC. Atlanta, 2003. Disponível em: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/1500.pdf>. Acesso em 11 de fev. de 2014.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. TRB - NCHRP 09-43. Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. Washington D. C., 2011.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. TRB - NCHRP 09-49A. Performance of WMA Technologies: Stage II--Long-Term Field Performance. Washington D. C., ca. 2014. Disponível em < http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=3013>. Acesso em: 18 de ago. de 2014.

VON DEVIVERE, M., BARTHEL, B., and MARCHAND, J.-P. “Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite,” Proceedings of the 22nd World Road Congress, PIARC, Durban South Africa, 2003.

XIAO, F.; ZHAO, W.; AMIRKHANIAN, S. N. Fatigue Behavior of Rubberized Asphalt Concrete Mixtures Containing Warm Asphalt Additives. Construction and Building Materials v. 23, Issue 10, p. 3144 – 3151, Out., 2009. Disponível em < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809001913>. Acesso em: 15 de out. 2011.

YODER; E. J. WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. Second edition. Widkey-Interscience Publication. New York, 1975.

WESS, J. A.; OLSEN, L. D; SWEENEY, M. H. Asphalt (bitumen). National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio, USA, 2004. Disponível em

<http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/cicad59_rev_1.pdf>. Acesso em 13 de fev. de 2014.

ANEXO I – CONTROLE DE TEMPERATURA DO TRECHO EXPERIMENTAL

VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NA PISTA DA MASSA ASFALTICA

OBRA:	RODOVIA:	TRECHO/SUBTRECHO:
Pavimento Asfaltica	SP 248 Oeste	

EQUIPAMENTO USADO NA COMPACTAÇÃO:	DATA DO ENSAIO:
RTD-901 / RTD-900	22/08/2012

Caminhão - Placa	Hora Descarga	Local Descarga (ESTACA/Km)	Temperatura de chegada (°C)	Temperatura de rolagem (°C)	Pista	Faixa	Observação
BXF-1532	10:05	1+566 a 1+656	174,0	160,0	Oeste	2	Camada Única
CPH-0929	10:25	1+656 a 1+756	174,0	162,0	Oeste	2	Camada Única
BXG-8815	10:50	1+756 a 1+866	174,0	162,0	Oeste	2	Camada Única
BZJ-1645	11:00	1+866 a 1+981	172,0	160,0	Oeste	2	Camada Única
MUD-7368	11:25	1+981 a 2+096	174,0	162,0	Oeste	2	Camada Única
BXB-3535	11:40	2+096 a 2+112	174,0	162,0	Oeste	2	Camada Única
BXB-3535	14:35	1+554 a 1+586	172,0	160,0	Oeste	1	Camada Única
ICK-0653	14:45	1+586 a 1+681	174,0	162,0	Oeste	1	Camada Única
BXC-5350	15:00	1+681 a 1+746	174,0	162,0	Oeste	1	Camada Única
CXV-7442	15:10	1+746 a 1+821	172,0	160,0	Oeste	1	Camada Única
GMQ-3082	15:20	1+821 a 1+906	172,0	160,0	Oeste	1	Camada Única
ETC-0150	15:35	1+906 a 1+976	174,0	160,0	Oeste	1	Camada Única
MBL-3968	15:45	1+976 a 2+046	174,0	162,0	Oeste	1	Camada Única
BSG-0382	15:55	2+046 a 2+112	172,0	162,0	Oeste	1	Camada Única

Wiliam	
LABORATORISTA	RESPONSÁVEL LABORATORIO

VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NA PISTA DA MASSA ASFALTICA

OBRA:	RODOVIA:	TRECHO/SUBTRECHO:
Pavimento Asfáltico Evotherm	SP 248 Oeste	

EQUIPAMENTO USADO NA COMPACTAÇÃO:	DATA DO ENSAIO:
RTD-900 / RTD-902	27/08/2012

Caminhão - Placa	Hora Descarga	Local Descarga (ESTACA/Km)	Temperatura de chegada (°C)	Temperatura de rolagem (°C)	Pista	Faixa	Observação
ETC-0150	13:45	5+705 a 5+635	152,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
BLG-0655	14:10	5+635 a 5+545	150,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
BPB-8073	14:25	5+545 a 5+465	138,0	124,0	Oeste	1	Camada Única
BZJ-1645	14:40	5+465 a 5+385	136,0	122,0	Oeste	1	Camada Única
BWB-1614	14:50	5+385 a 5+310	134,0	124,0	Oeste	1	Camada Única
CBS-4310	15:10	5+310 a 5+235	138,0	120,0	Oeste	1	Camada Única
BXF-1532	15:25	5+235 a 5+175	136,0	120,0	Oeste	1	Camada Única
BTO-8976	15:35	5+175 a 5+105	136,0	122,0	Oeste	1	Camada Única
CPH-0929	17:20	5+105 a 5+035	134,0	120,0	Oeste	1	Camada Única
BXG-8815	17:30	5+035 a 4+960	136,0	122,0	Oeste	1	Camada Única
MBL-3968	17:45	4+960 a 4+895	136,0	120,0	Oeste	1	Camada Única
MUD-7368	18:00	4+895 a 4+811	134,0	120,0	Oeste	1	Camada Única

Wiliam	
LABORATORISTA	RESPONSÁVEL LABORATORIO

VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NA PISTA DA MASSA ASFALTICA

OBRA:	RODOVIA:	TRECHO/SUBTRECHO:
Pavimento Asfáltico Evotherm	SP 248 Oeste	

EQUIPAMENTO USADO NA COMPACTAÇÃO:	DATA DO ENSAIO:
RTD-900 / RTD-902	28/08/2012

Caminhão - Placa	Hora Descarga	Local Descarga (ESTACA/Km)	Temperatura de chegada (°C)	Temperatura de rolagem (°C)	Pista	Faixa	Observação
BXC-5350	10:00	5+705 a 5+635	162,0	140,0	Oeste	2	Camada Única
ICK-0653	10:15	5+635 a 5+530	134,0	122,0	Oeste	2	Camada Única
CXV-7442	10:30	5+350 a 5+445	160,0	140,0	Oeste	2	Camada Única
BYA-5638	10:40	5+445 a 5+335	130,0	120,0	Oeste	2	Camada Única
CZC-3721	11:00	5+335 a 5+215	132,0	120,0	Oeste	2	Camada Única
KMA-9747	11:20	5+215 a 5+125	130,0	124,0	Oeste	2	Camada Única
HQG-0819	11:30	5+125 a 5+020	132,0	120,0	Oeste	2	Camada Única
CYN-5916	11:45	5+020 a 4+925	134,0	122,0	Oeste	2	Camada Única
BZJ-1645	12:05	4+925 a 4+811	132,0	120,0	Oeste	2	Camada Única
BPB-8073	13:05	5+705 a 5+580	134,0	124,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
BLG-0655	13:25	5+580 a 5+445	130,0	126,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
BWB-1614	13:45	5+445 a 5+345	134,0	122,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
CBS-4310	14:15	5+345 a 5+255	130,0	122,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
BTO-8976	14:30	5+255 a 5+185	132,0	120,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
GMQ-3082	14:45	5+185 a 5+075	130,0	122,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
BXF-1532	14:55	5+075 a 4+985	130,0	120,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
CPH-0929	15:05	4+985 a 4+905	132,0	120,0	Oeste	Acostamento	Camada Única
MBL-3968	15:15	4+905 a 4+811	134,0	122,0	Oeste	Acostamento	Camada Única

Wiliam	
LABORATORISTA	RESPONSÁVEL LABORATORIO

VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NA PISTA DA MASSA ASFALTICA

OBRA:	RODOVIA:	TRECHO/SUBTRECHO:
Pavimento Asfáltico Evotherm	SP 248 Oeste	

EQUIPAMENTO USADO NA COMPACTAÇÃO:	DATA DO ENSAIO:
RTD-900 / RTD-902	29/08/2012

Caminhão - Placa	Hora Descarga	Local Descarga (ESTACA/Km)	Temperatura de chegada (°C)	Temperatura de rolagem (°C)	Pista	Faixa	Observação
MUD-7368	11:05	4+811 a 4+731	160,0	145,0	Oeste	1	Camada Única
ETC-0150	11:20	4+731 a 4+651	134,0	123,0	Oeste	1	Camada Única
BSG-0382	11:35	4+651 a 4+581	163,0	125,0	Oeste	1	Camada Única
BXB-3535	11:50	4+581 a 4+511	130,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
BXC-5350	12:05	4+511 a 4+441	130,0	124,0	Oeste	1	Camada Única
ICK-0653	12:20	4+441 a 4+361	132,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
CXV-7442	12:35	4+361 a 4+281	130,0	124,0	Oeste	1	Camada Única
KIT-4936	12:45	4+281 a 4+201	132,0	124,0	Oeste	1	Camada Única
BYA-5638	13:00	4+201 a 4+131	132,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
CZC-3721	13:10	4+131 a 4+051	130,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
KMA-9747	13:40	4+051 a 3+971	130,0	124,0	Oeste	1	Camada Única
HQG-0819	14:00	3+971 a 3+886	132,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
CYN-5916	14:10	3+886 a 3+811	132,0	125,0	Oeste	1	Camada Única
BZJ-1645	14:25	3+811 a 3+736	130,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
BLG-0653	15:05	3+736 a 3+651	132,0	126,0	Oeste	1	Camada Única
BPB-8073	15:15	3+651 a 3+561	130,0	124,0	Oeste	1	Camada Única

Wiliam	
LABORATORISTA	RESPONSÁVEL LABORATORIO

VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NA PISTA DA MASSA ASFALTICA

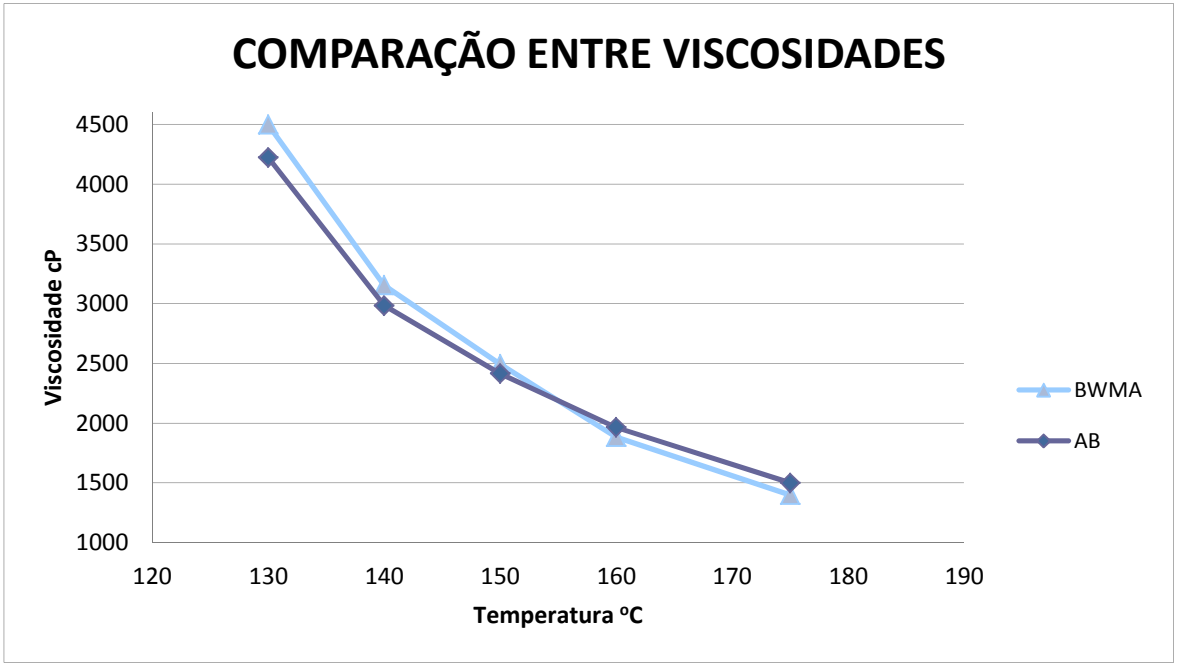
OBRA:	RODOVIA:	TRECHO/SUBTRECHO:
Pavimento Asfáltico Evotherm	SP 248 Oeste	

EQUIPAMENTO USADO NA COMPACTAÇÃO:	DATA DO ENSAIO:
RTD-900 / RTD-902	30/08/2012

Caminhão - Placa	Hora Descarga	Local Descarga (ESTACA/Km)	Temperatura de chegada (°C)	Temperatura de rolagem (°C)	Pista	Faixa	Observação
CCY-4602	10::50	4+811 a 4+731	160,0	145,0	Oeste	2	Camada Única
BWB-1614	11:15	4+731 a 4+646	132,0	126,0	Oeste	2	Camada Única
CBS-4310	11:35	4+646 a 4+561	130,0	124,0	Oeste	2	Camada Única
BTO-8976	11:50	4+561 a 4+491	132,0	122,0	Oeste	2	Camada Única
GMQ-3082	12:00	4+491 a 4+391	130,0	123,0	Oeste	2	Camada Única
BXF-1532	12:25	4+391 a 4+291	130,0	123,0	Oeste	2	Camada Única
CPH-0929	12:40	4+291 a 4+201	132,0	126,0	Oeste	2	Camada Única
BXG-8815	13:00	4+201 a 4+101	132,0	124,0	Oeste	2	Camada Única
MUD-7368	13:25	4+101 a 4+006	130,0	125,0	Oeste	2	Camada Única
ETC-0150	13:50	4+006 a 3+956	132,0	124,0	Oeste	2	Camada Única
BSG-0382	14:30	3+956 a 3+836	130,0	123,0	Oeste	2	Camada Única
MBL-3968	14:45	3+836 a 3+761	132,0	125,0	Oeste	2	Camada Única
BXB-3535	14:55	3+761 a 3+671	130,0	124,0	Oeste	2	Camada Única
KIT-4536	15:05	3+671 a 3+561	132,0	125,0	Oeste	2	Camada Única

Wiliam	
LABORATORISTA	RESPONSÁVEL LABORATORIO

ANEXO II – CURVA DE VISCOSIDADE X TEMPERATURA DAS MISTURAS AB E BWMA



BWMA	
Viscos. cP	Temp.ºC
4500	**130**
3155	**140**
2495	**150**
1885	**160**
1400	**175**
AB	
4225	**130**
2985	**140**
2415	**150**
1965	**160**
1500	**175**

SPINDLE 03	
TORQUE	RPM
67,0	10
75,1	20
49,9	20
37,7	20
26,0	20

ECOFLEX_B

ECOFLEX_B COM EVOTHERM.

ANEXO III – ENSAIOS DE VOLUMETRIA DAS MISTUAS AB E BWMA

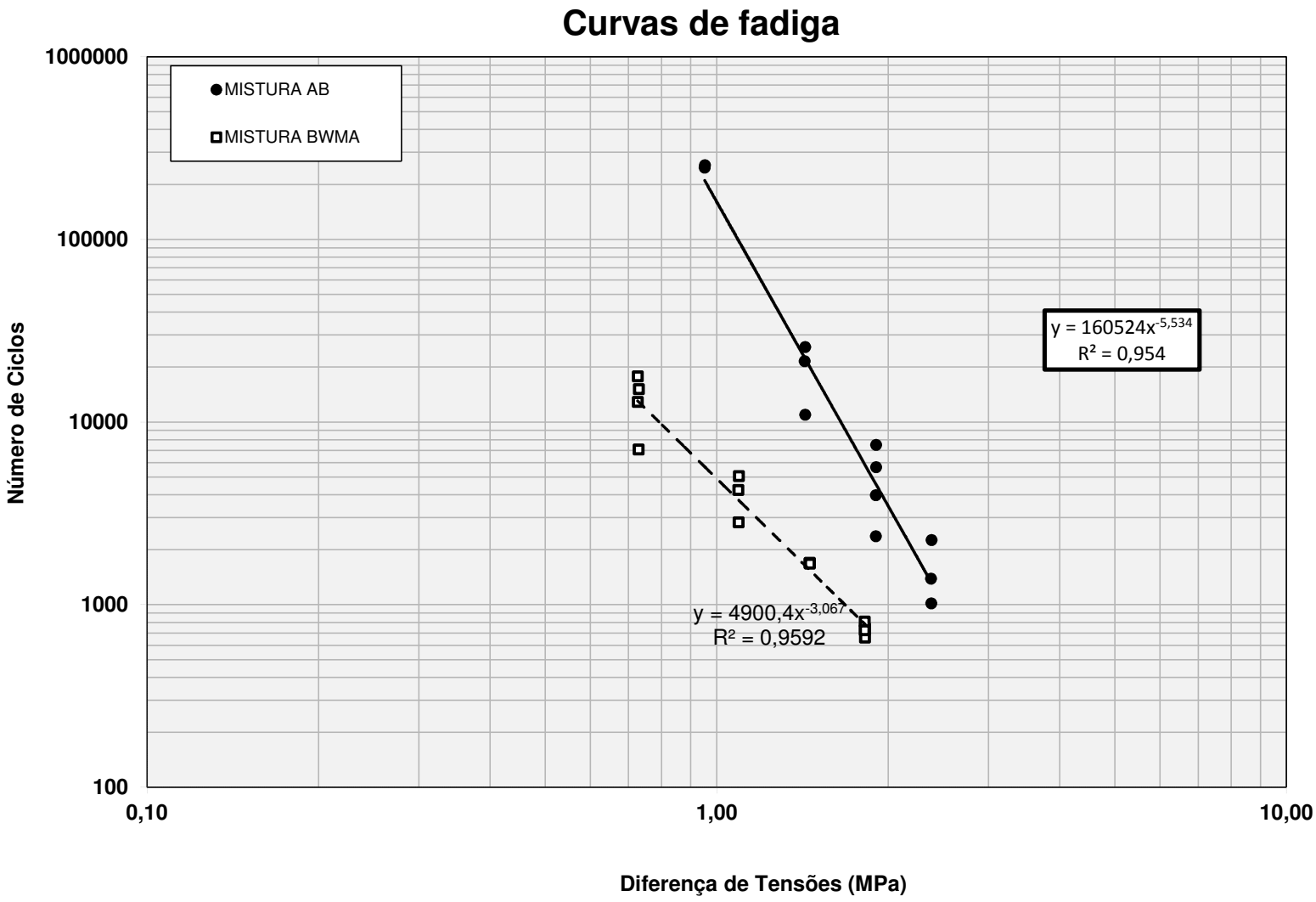
PARAMETROS VOLUMÉTRICOS CP's COMPACTADOS EM LABORATÓRIO, MISTURA RETRABALHADA - MISTURA AB

CP Nº	Teor de Ligante (%)	Massa ao Ar (g)	Massa Imersa (g)	Massa SSS	Absorção %	Temperatura Água ºC	Gmm (g/cm³)	Gmb (g/cm³)	GC(%)	Vazios Cheios de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Média VV	Desv Pad VV
9	5,80	1139,78	645,88	1.142,97	0,28	27,30	2,444	2,285	98,4	12,93	6,5	**6,43**	**0,66**
6	5,80	1140,84	649,67	1.141,94	0,10	27,00	2,444	2,309	99,5	13,07	5,5		
13	5,80	1139,84	644,82	1.141,77	0,17	27,00	2,444	2,286	98,4	12,93	6,5		
14	5,80	1139,47	647,60	1.141,34	0,16	26,40	2,444	2,300	99,1	13,02	5,9		
10	5,80	1140,39	645,79	1.143,26	0,25	27,00	2,444	2,284	98,4	12,93	6,5		
11	5,80	1139,35	641,50	1.144,94	0,49	27,00	2,444	2,255	97,1	12,76	7,7		
12	5,80	1138,54	648,24	1.142,31	0,33	27,10	2,444	2,296	98,9	12,99	6,0		
15	5,80	1134,07	641,44	1.137,28	0,28	27,20	2,444	2,279	98,2	12,90	6,7		

PARAMETROS VOLUMÉTRICOS CP's COMPACTADOS EM LABORATÓRIO, MISTURA RETRABALHADA - MISTURA BWMA

CP Nº	Teor de Ligante (%)	Massa ao Ar (g)	Massa Imersa (g)	Massa SSS	Absorção %	Temperatura Água ºC	Gmm (g/cm³)	Gmb (g/cm³)	GC(%)	Vazios Cheios de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Média VV	Desv Pad VV
3	5,80	1139,85	645,72	1.144,77	0,43	27,00	2,452	2,276	97,6	12,82	7,2		
6	5,80	1142,72	647,55	1.146,25	0,31	27,60	2,452	2,283	97,9	12,86	6,9		
9	5,80	1141,68	645,95	1.146,97	0,46	28,00	2,452	2,270	97,4	12,78	7,4		
12	5,80	1142,22	645,55	1.147,54	0,47	28,00	2,452	2,267	97,3	12,77	7,5		
11	5,80	1141,68	645,83	1.146,48	0,42	27,30	2,452	2,272	97,5	12,80	7,3		
13	5,80	1141,92	645,10	1.146,63	0,41	27,00	2,452	2,269	97,3	12,78	7,5	**7,35**	**0,19**
14	5,70	1143,73	646,74	1.149,39	0,49	27,30	2,452	2,267	97,3	12,55	7,5		
15	5,80	1142,09	646,77	1.148,18	0,53	27,30	2,452	2,270	97,4	12,78	7,4		
2	5,80	1145,05	645,48	1.148,15	0,27	26,60	2,452	2,270	97,4	12,78	7,4		
10	5,80	1142,88	646,48	1.147,02	0,36	28,00	2,452	2,275	97,6	12,81	7,2		
8	5,80	1140,98	645,78	1.146,85	0,51	28,00	2,452	2,269	97,3	12,77	7,5		

ANEXO IV – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA REALIZADO NA PRENSA MTS


Curvas de fadiga
MISTURA AB
MISTURA BWMA
y = 160524x^-5,534
R² = 0,954
y = 4900,4x^-3,067
R² = 0,9592
1000000
100000
10000
1000
100
0,10
1,00
10,00
Número de Ciclos
Diferença de Tensões (MPa)

Tipo de Mistura	Tempo	N do CP	Força Aplicada (KN)	Nìvel de Tensão Aplicado (KN)	Dimensões		Tensão de Tração Média Aplicada	Diferença de Tensão	N. Ciclos (segundos MTS)	N. Ciclos	Grubbs		Média	Desvio	CV
					Altura (mm)	Diâmetro (mm)	(σ_t) MPa	($\Delta\sigma$) MPa			T	T critico (1%)			
MISTURA AB	T = 0M	10	2,45	20	64,20	101,97	0,24	0,95	254502	254502	0,71	-	**250.584**	**5.541**	**2,2**
		16	2,46	20	64,75	101,55	0,24	0,95	246666	246666	0,71	-			
		7	3,69	30	64,70	101,60	0,36	1,43	25724	25724	0,83	1,15	**19.420**	**7.607**	**39,2**
		13	3,68	30	64,54	101,79	0,36	1,43	21565	21565	0,28				
		14	3,65	30	64,10	101,46	0,36	1,43	10971	10971	1,11				
		5	4,81	40	63,81	100,89	0,48	1,90	2369	2369	1,14	1,49	**4.877**	**2.203**	**45,2**
		6	4,81	40	63,47	101,44	0,48	1,90	3981	3981	0,41				
		9	4,90	40	64,53	101,57	0,48	1,90	7493	7493	1,19				
		15	4,92	40	64,76	101,60	0,48	1,90	5664	5664	0,36				
		1	6,10	50	64,42	101,40	0,59	2,38	1389	1389	0,26	1,15	**1.554**	**636**	**40,9**
		2	6,04	50	63,87	101,14	0,60	2,38	1017	1017	0,84				
		8	6,18	50	65,12	101,40	0,60	2,38	2256	2256	1,10				
MISTURA BWMA	T = 0M	8	1,88	20	64,85	101,60	0,18	0,73	12865	12865	0,07	1,49	**13.203**	**4.552**	**34,5**
		10	1,89	20	65,23	101,53	0,18	0,73	17754	17754	1,00				
		11	1,88	20	64,51	101,78	0,18	0,73	7068	7068	1,35				
		12	1,90	20	65,31	101,50	0,18	0,73	15126	15126	0,42				
		7	2,84	30	65,18	101,47	0,27	1,09	5058	5058	0,90	1,15	**4.044**	**1.130**	**27,9**
		9	2,84	30	65,12	101,71	0,27	1,09	2826	2826	1,08				
		15	2,82	30	64,69	101,71	0,27	1,09	4247	4247	0,18				
		4	3,77	40	65,15	101,25	0,36	1,46	1691	1691	0,43	1,15	**1.687**	**8**	**0,5**
		5	3,76	40	64,76	101,49	0,36	1,46	1693	1693	0,71				
		6	3,76	40	64,75	101,55	0,36	1,46	1677	1677	1,14				
		1	4,70	50	64,90	101,25	0,46	1,82	660	660	1,21	1,49	**734**	**61**	**8,3**
		2	4,72	50	65,03	101,54	0,46	1,82	742	742	0,13				
		3	4,70	50	64,94	101,31	0,45	1,82	808	808	1,23				
		16	4,69	50	64,70	101,50	0,45	1,82	724	724	0,15				

ANEXO V – LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO DE 2013

Dynatest

CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD

RODOVIA	TRECHO	SENTIDO	PISTA	FAIXA	REVESTIMENTO
SPA-248/055	Bertioga > Santos	Decrescente	Dupla	02	

INÍCIO	FIM	EQUIPAMENTO	RAIO DE APLICAÇÃO
km 8,000	km 1,200	Falling Weight Deflectometer Dyantest 8000	15 cm

km	Força (kgf)	Deflexões (0,01 mm)							Temp.		Data	Hora	Observações
		D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Ar (ºC)	Pav. (ºC)			
6,000	4.255	12,3	10,0	9,2	7,7	6,7	5,1	4,0	21	26	23/09/2013	13:19:00	km 6 = H. 5,916
5,800	4.291	7,8	6,1	5,5	4,8	4,1	3,5	2,8	21	26	23/09/2013	13:21:00	
5,600	4.333	9,5	7,2	6,6	5,8	4,9	4,0	3,2	21	26	23/09/2013	13:22:00	
5,400	4.347	8,2	6,8	6,3	5,6	4,9	4,0	3,4	21	26	23/09/2013	13:23:00	
5,200	4.347	16,9	11,2	8,5	5,8	4,4	3,7	3,1	22	26	23/09/2013	13:24:00	
5,000	4.291	26,2	20,3	16,3	11,9	8,9	5,6	3,7	22	26	23/09/2013	13:25:00	km 5 = H. 4,986
4,800	4.284	20,7	16,2	13,3	10,2	7,7	5,0	3,5	22	26	23/09/2013	13:26:00	
4,600	4.269	24,5	19,1	16,2	12,0	9,0	5,7	4,2	22	26	23/09/2013	13:27:00	
4,400	4.326	21,6	17,0	14,3	11,2	8,4	5,6	4,0	22	26	23/09/2013	13:28:00	
4,200	4.291	19,5	14,6	12,2	9,0	6,6	4,1	2,8	22	26	23/09/2013	13:28:00	
4,000	4.312	17,5	13,3	10,8	8,0	6,1	4,0	2,9	22	26	23/09/2013	13:29:00	km 4 = H. 3,948
3,800	4.340	16,3	12,9	10,9	8,5	6,6	4,4	3,2	22	26	23/09/2013	13:31:00	
3,600	4.291	9,2	6,9	6,1	5,3	4,1	3,4	3,0	22	26	23/09/2013	13:32:00	
3,400	4.361	9,2	7,3	6,2	5,2	4,6	4,0	3,4	22	26	23/09/2013	13:32:00	
3,200	4.312	15,8	12,3	10,5	8,4	6,4	4,4	3,0	22	26	23/09/2013	13:33:00	
3,000	4.312	20,8	16,2	13,3	9,8	7,1	4,4	3,2	22	26	23/09/2013	13:34:00	km 3 = H.2,921
2,800	4.326	8,0	6,7	6,2	5,6	5,1	4,4	3,8	22	26	23/09/2013	13:35:00	
2,600	4.347	8,0	5,9	5,5	5,5	5,4	5,1	5,0	22	26	23/09/2013	13:36:00	
2,400	4.326	9,6	8,0	7,5	6,7	6,0	5,2	4,1	22	26	23/09/2013	13:37:00	
2,200	4.340	10,1	8,3	7,6	7,1	6,5	5,7	5,1	22	26	23/09/2013	13:38:00	
2,000	4.284	24,3	19,3	15,9	11,9	8,7	5,2	3,5	22	26	23/09/2013	13:39:00	km 2 = H. 1,910
1,800	4.326	20,9	16,0	13,2	10,0	7,5	5,4	4,1	22	26	23/09/2013	13:40:00	
1,600	4.262	23,7	18,3	14,8	10,7	7,9	4,9	3,8	22	27	23/09/2013	13:41:00	
1,400	4.326	24,0	19,1	16,0	12,3	9,2	5,5	3,7	22	26	23/09/2013	13:41:00	OAE H. 1,012 a 0,099
1,200	4.375	11,3	8,6	8,3	6,5	5,5	4,6	3,6	22	26	23/09/2013	13:42:00	km 1 = H. 0,917

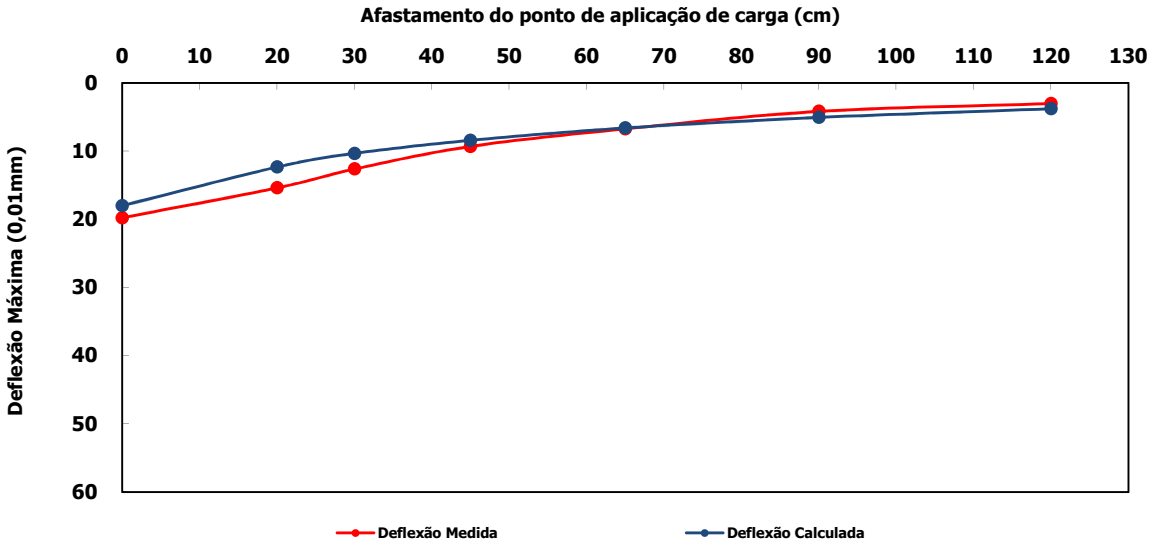
ANEXO VI – RETROANÁLISE – LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO 2013

Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	20.000	20.000	18.000	22.000				
MR_2		20.000	20.000	18.000	18.000				
MR_3		3.000	3.000	3.000	3.000				
MR_4		10.000	10.000	10.000	10.000				
MR_5		2.000	2.300	2.300	2.500				
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	19,8	18,8	17,9	18,8	18,0				
20	15,4	13,4	12,6	12,9	12,4				
30	12,6	11,6	10,7	10,9	10,4				
45	9,3	9,7	8,9	8,9	8,4				
65	6,8	7,8	7,0	7,1	6,6				
90	4,2	6,2	5,5	5,5	5,1				
120	3,0	4,8	4,2	4,2	3,8				
RMSE		1,4	1,6	1,39	1,69				

Comparativo das Bacias de Deflexão

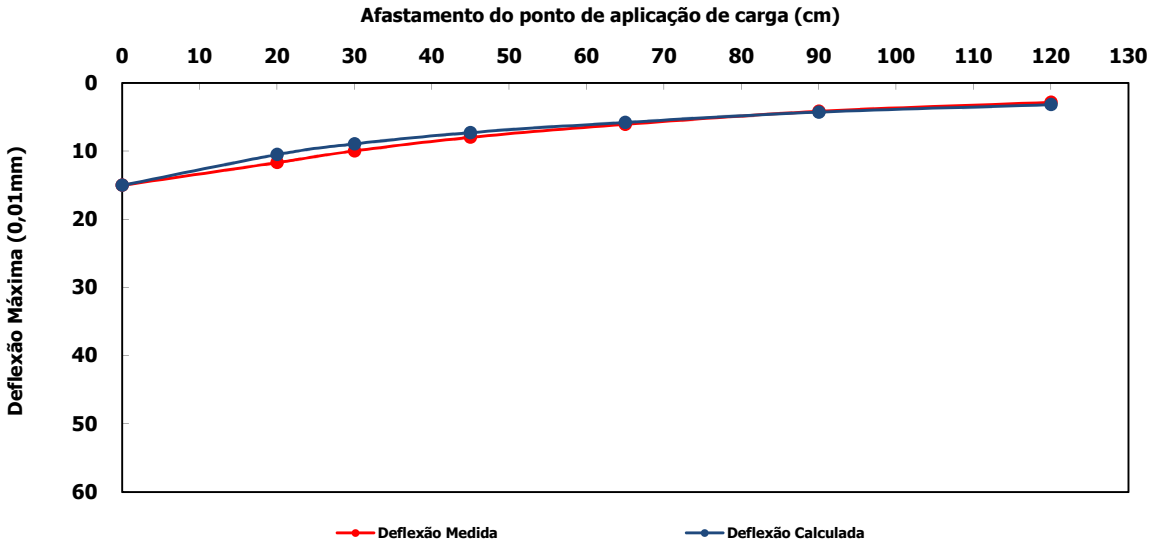


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	22.000	22.000	22.000	22.000				
MR_2		30.000	30.000	30.000	25.000				
MR_3		3.000	3.000	3.000	3.000				
MR_4		10.000	10.000	10.000	10.000				
MR_5		2.000	2.300	2.500	3.000				
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	15,0	16,1	15,2	14,8	15,0				
20	11,7	12,2	11,4	10,9	10,5				
30	10,0	10,8	10,0	9,5	9,0				
45	8,0	9,3	8,5	8,1	7,3				
65	6,1	7,7	6,9	6,5	5,8				
90	4,2	6,1	5,4	5,1	4,3				
120	2,9	4,8	4,2	3,9	3,2				
RMSE		1,4	0,8	0,65	0,67				

Comparativo das Bacias de Deflexão

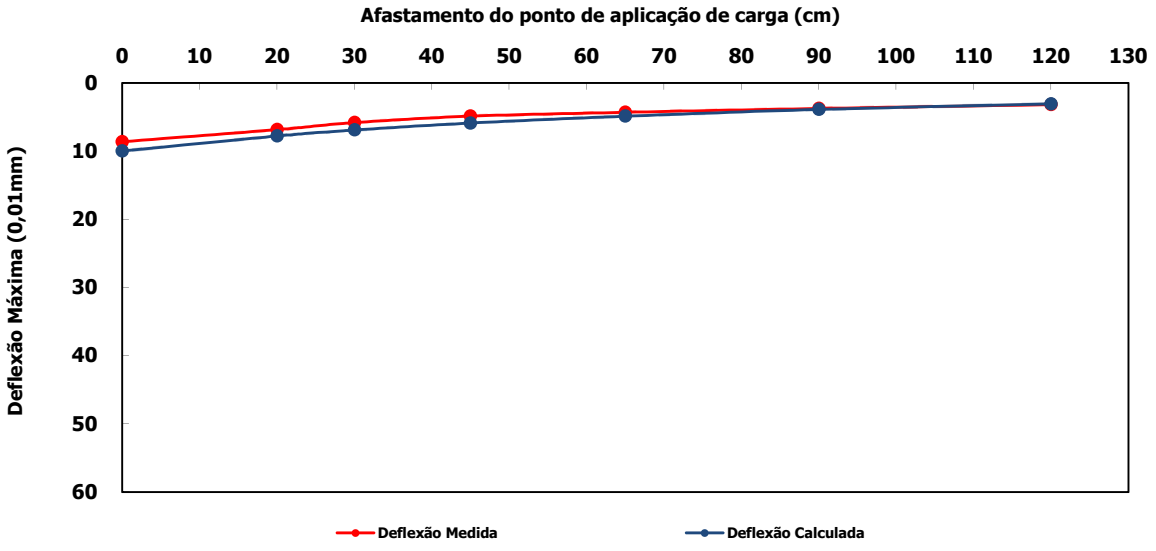


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	22.000	25.000	45.000	45.000				
MR_2		30.000	35.000	45.000	50.000				
MR_3		3.000	3.000	3.500	4.000				
MR_4		10.000	10.000	35.000	40.000				
MR_5		2.500	2.500	3.000	3.000				
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	8,6	14,8	13,8	10,8	10,0				
20	6,9	10,9	10,5	8,2	7,8				
30	5,8	9,5	9,3	7,3	6,9				
45	4,9	8,1	7,9	6,3	5,9				
65	4,3	6,5	6,5	5,2	4,9				
90	3,8	5,1	5,1	4,1	3,9				
120	3,2	3,9	3,9	3,2	3,1				
RMS		3,5	3,1	1,27	0,87				

Comparativo das Bacias de Deflexão

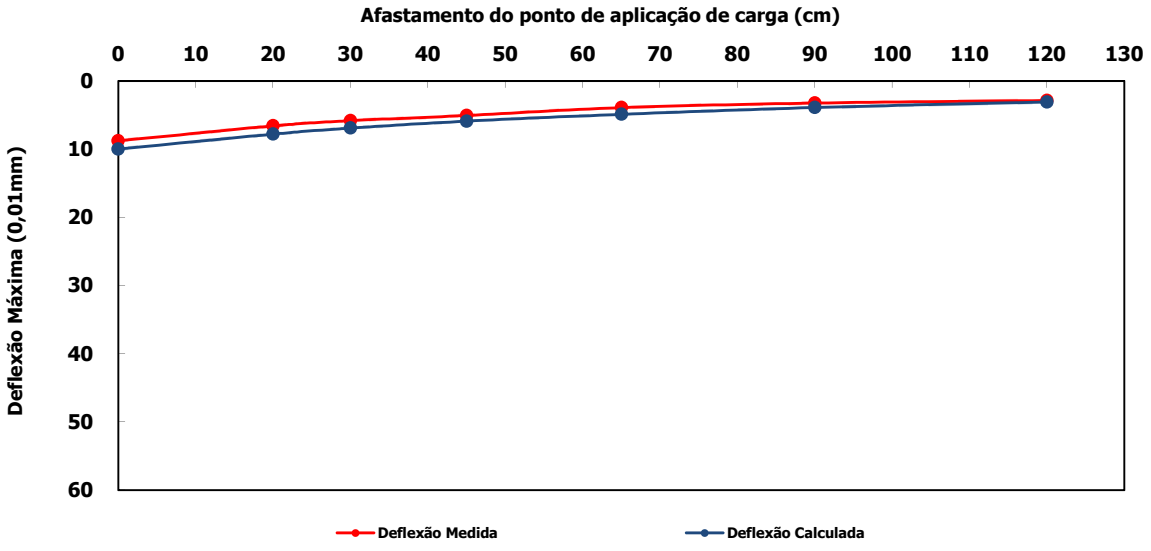


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000	45.000	45.000					
MR_2		45.000	45.000	50.000					
MR_3		3.000	3.500	4.000					
MR_4		10.000	35.000	40.000					
MR_5		3.000	3.000	3.000					
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	8,8	11,3	10,8	10,0					
20	6,6	8,8	8,2	7,8					
30	5,8	7,8	7,3	6,9					
45	5,1	6,7	6,3	5,9					
65	3,9	5,5	5,2	4,9					
90	3,2	4,3	4,1	3,9					
120	2,9	3,3	3,2	3,1					
RMSE		1,8	1,3	0,94					

Comparativo das Bacias de Deflexão

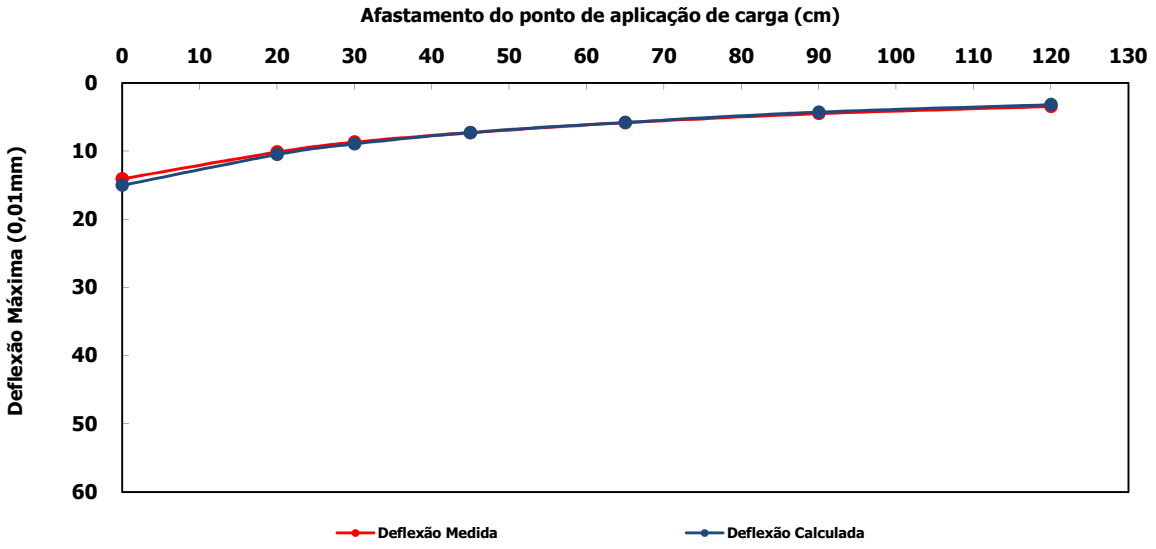


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	22.000	22.000	22.000					
MR_2		30.000	30.000	25.000					
MR_3		3.000	3.000	3.000					
MR_4		10.000	20.000	10.000					
MR_5		2.500	2.800	3.000					
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	15,4	14,8	14,1	15,0					
20	12,2	10,9	10,2	10,5					
30	10,3	9,5	8,7	9,0					
45	8,0	8,1	7,3	7,3					
65	6,2	6,5	5,9	5,8					
90	4,2	5,1	4,5	4,3					
120	3,0	3,9	3,5	3,2					
RMSE		0,8	1,2	0,89					

Comparativo das Bacias de Deflexão

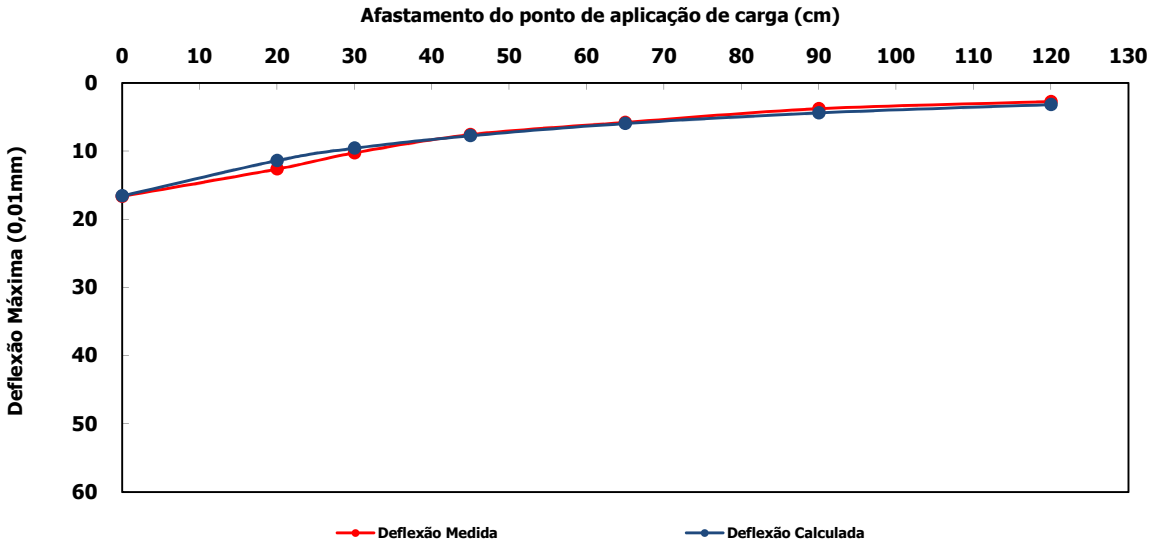


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	22.000	22.000	18.000					
MR_2		30.000	25.000	22.000					
MR_3		3.000	3.000	2.500					
MR_4		10.000	10.000	10.000					
MR_5		2.500	3.000	3.000					
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	16,6	14,8	15,0	16,6					
20	12,6	10,9	10,5	11,4					
30	10,3	9,5	9,0	9,6					
45	7,6	8,1	7,3	7,8					
65	5,8	6,5	5,8	6,0					
90	3,8	5,1	4,3	4,4					
120	2,8	3,9	3,2	3,2					
RMSE		1,2	1,2	0,61					

Comparativo das Bacias de Deflexão

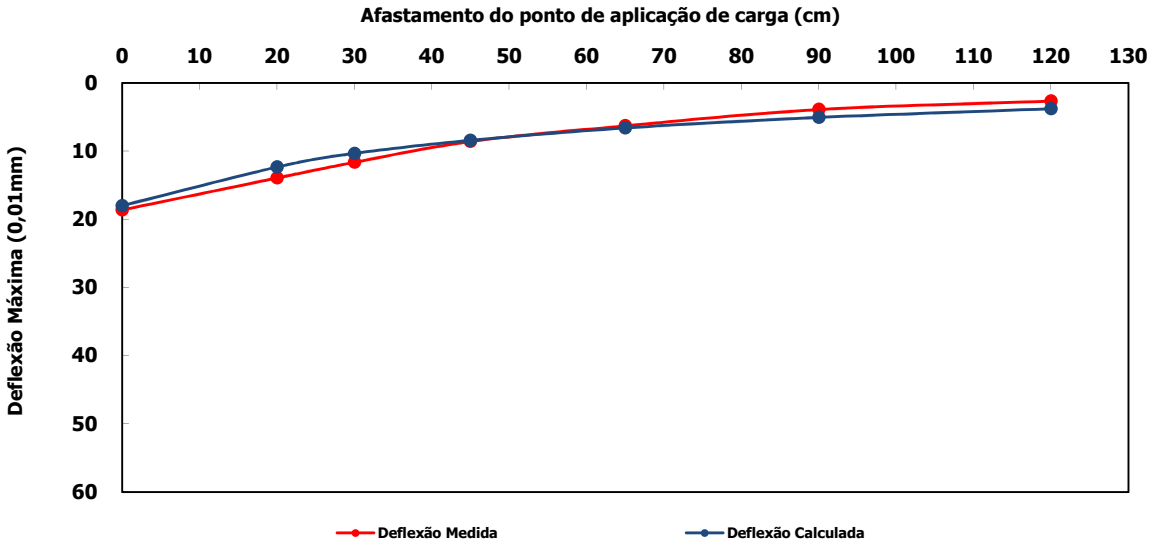


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	20.000	22.000						
MR_2		22.000	18.000						
MR_3		3.000	3.000						
MR_4		10.000	10.000						
MR_5		2.500	2.500						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	18,6	16,9	18,0						
20	14,0	11,9	12,4						
30	11,7	10,1	10,4						
45	8,6	8,3	8,4						
65	6,3	6,6	6,6						
90	3,9	5,1	5,1						
120	2,7	3,8	3,8						
RMSE		1,3	1,0						

Comparativo das Bacias de Deflexão

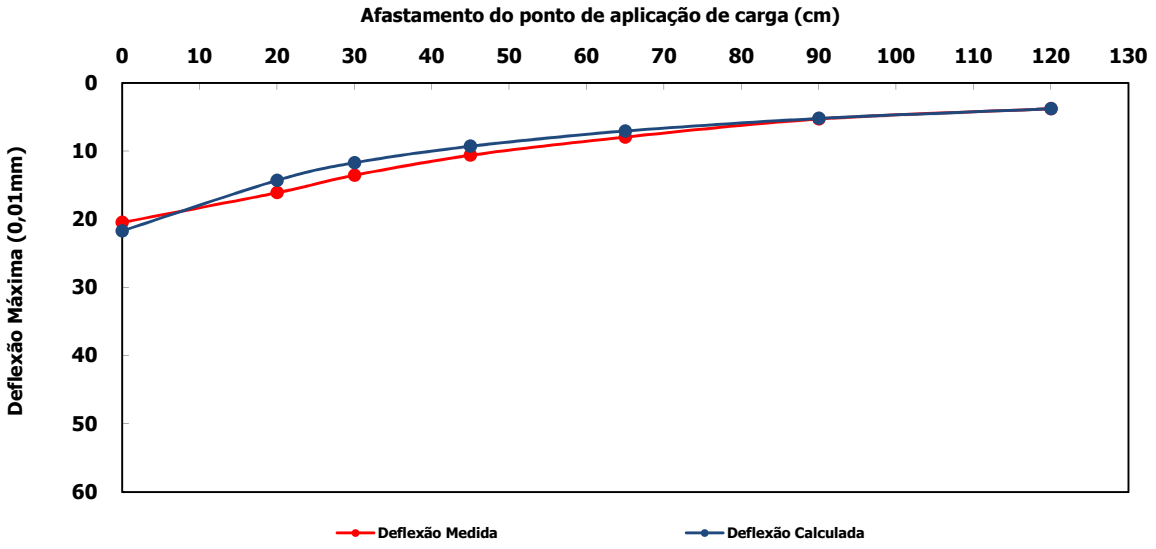


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	22.000	22.000	18.000	18.000	17.000	17.000		
MR_2		30.000	30.000	18.000	18.000	15.000	14.000		
MR_3		3.000	3.000	3.000	3.000	2.500	2.300		
MR_4		10.000	10.000	10.000	9.000	8.000	8.000		
MR_5		2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500		
Afast.	**Bacias de Deflexões (x 0,01mm)**								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	20,5	14,8	15,0	18,5	19,1	20,8	21,7		
20	16,1	10,9	11,0	12,5	13,1	13,8	14,3		
30	13,6	9,5	9,6	10,4	11,0	11,4	11,7		
45	10,6	8,1	8,1	8,5	8,9	9,1	9,3		
65	8,0	6,5	6,5	6,6	6,9	6,9	7,1		
90	5,3	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2		
120	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8		
RMSE		3,5	3,4	2,18	1,77	1,40	1,24		

Comparativo das Bacias de Deflexão

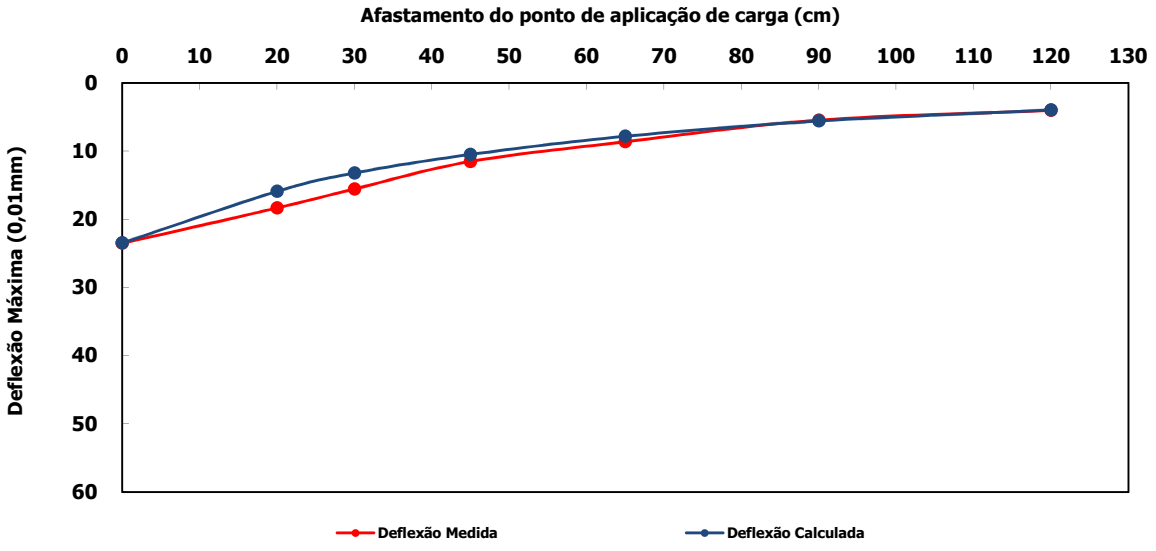


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	18.000	18.000	15.000	13.000				
MR_2		18.000	18.000	18.000	15.000				
MR_3		3.000	2.000	1.500	1.500				
MR_4		9.000	6.000	6.000	6.000				
MR_5		2.500	2.500	2.500	2.500				
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	23,5	19,1	20,1	21,5	23,5				
20	18,3	13,1	13,9	15,1	15,9				
30	15,6	11,0	11,7	12,7	13,2				
45	11,5	8,9	9,5	10,3	10,5				
65	8,6	6,9	7,3	7,8	7,8				
90	5,5	5,2	5,4	5,7	5,6				
120	4,0	3,9	3,9	4,0	4,0				
RMSE		3,4	2,7	1,91	1,37				

Comparativo das Bacias de Deflexão

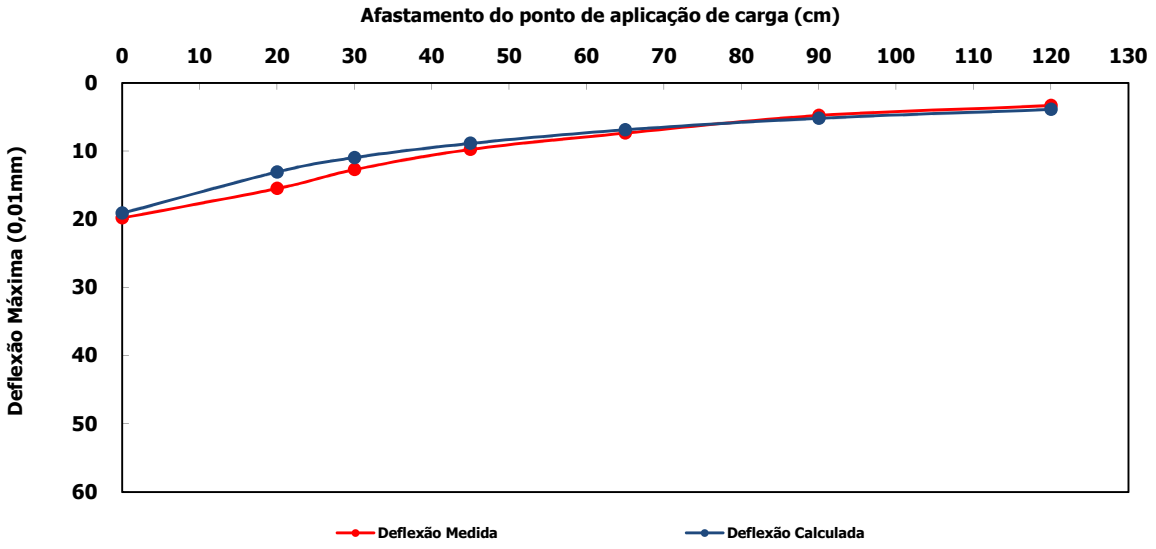


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	18.000							
MR_2		18.000							
MR_3		3.000							
MR_4		9.000							
MR_5		2.500							
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	19,8	19,1							
20	15,5	13,1							
30	12,7	11,0							
45	9,8	8,9							
65	7,4	6,9							
90	4,8	5,2							
120	3,4	3,9							
RMSE		1,3							

Comparativo das Bacias de Deflexão

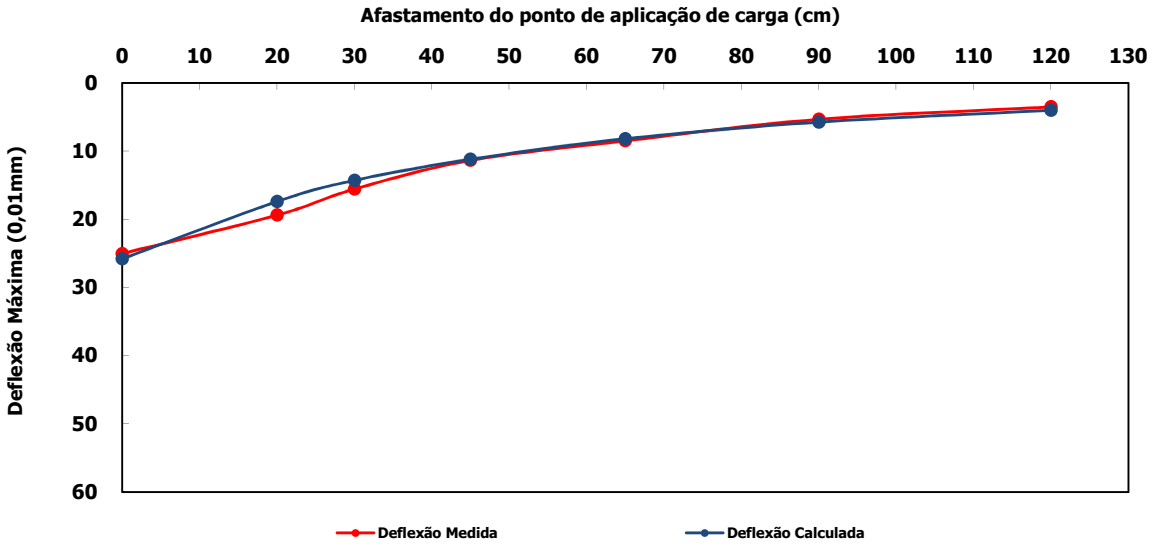


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	15.000	13.000	13.000	14.000				
MR_2		15.000	15.000	14.000	13.000				
MR_3		1.500	1.500	1.500	1.200				
MR_4		9.000	9.000	9.000	9.000				
MR_5		2.000	2.500	2.500	2.500				
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	25,0	24,6	23,3	24,0	25,8				
20	19,4	17,2	15,8	16,1	17,4				
30	15,6	14,5	13,1	13,2	14,3				
45	11,4	11,7	13,1	10,4	11,2				
65	8,5	6,1	7,8	7,8	8,2				
90	5,4	6,7	5,5	5,5	5,8				
120	3,5	4,9	3,9	3,9	4,0				
RMSE		1,5	1,9	1,66	0,98				

Comparativo das Bacias de Deflexão

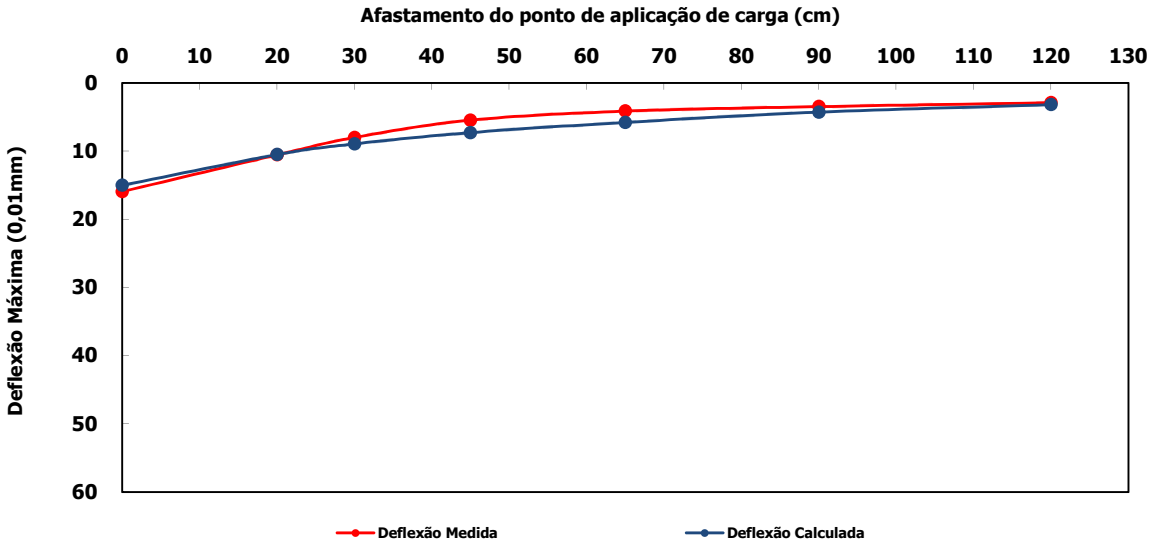


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	22.000	22.000	22.000	22.000				
MR_2		30.000	30.000	30.000	25.000				
MR_3		3.000	3.000	3.500	3.000				
MR_4		10.000	10.000	15.000	10.000				
MR_5		2.500	2.500	2.500	3.000				
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	15,9	16,2	14,8	14,4	15,0				
20	10,6	12,3	10,9	10,5	10,5				
30	8,0	10,9	9,5	9,1	9,0				
45	5,5	9,3	8,1	7,7	7,3				
65	4,1	7,7	6,5	6,3	5,8				
90	3,5	6,1	5,1	4,9	4,3				
120	2,9	4,8	3,9	3,9	3,2				
RMSE		2,6	1,7	1,51	1,10				

Comparativo das Bacias de Deflexão

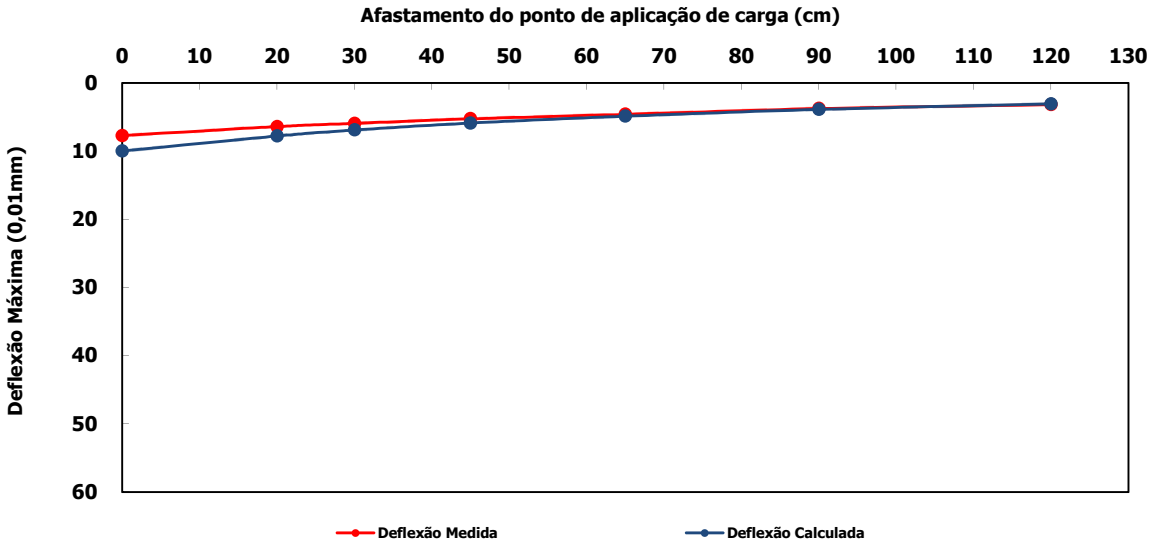


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000	45.000						
MR_2		45.000	50.000						
MR_3		3.500	4.000						
MR_4		35.000	40.000						
MR_5		3.000	3.000						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	7,7	10,8	10,0						
20	6,4	8,2	7,8						
30	5,9	7,3	6,9						
45	5,3	6,3	5,9						
65	4,6	5,2	4,9						
90	3,8	4,1	3,9						
120	3,2	3,2	3,1						
RMSE		1,5	1,1						

Comparativo das Bacias de Deflexão

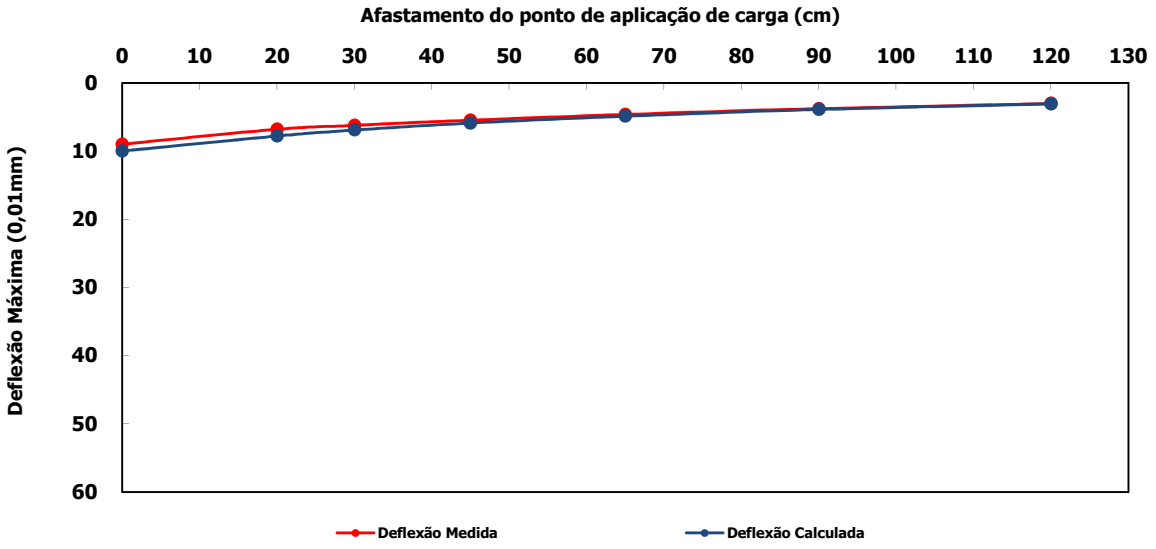


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000	45.000						
MR_2		45.000	50.000						
MR_3		3.500	4.000						
MR_4		35.000	40.000						
MR_5		3.000	3.000						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	9,0	10,8	10,0						
20	6,8	8,2	7,8						
30	6,2	7,3	6,9						
45	5,5	6,3	5,9						
65	4,6	5,2	4,9						
90	3,8	4,1	3,9						
120	3,0	3,2	3,1						
RMSE		1,0	0,6						

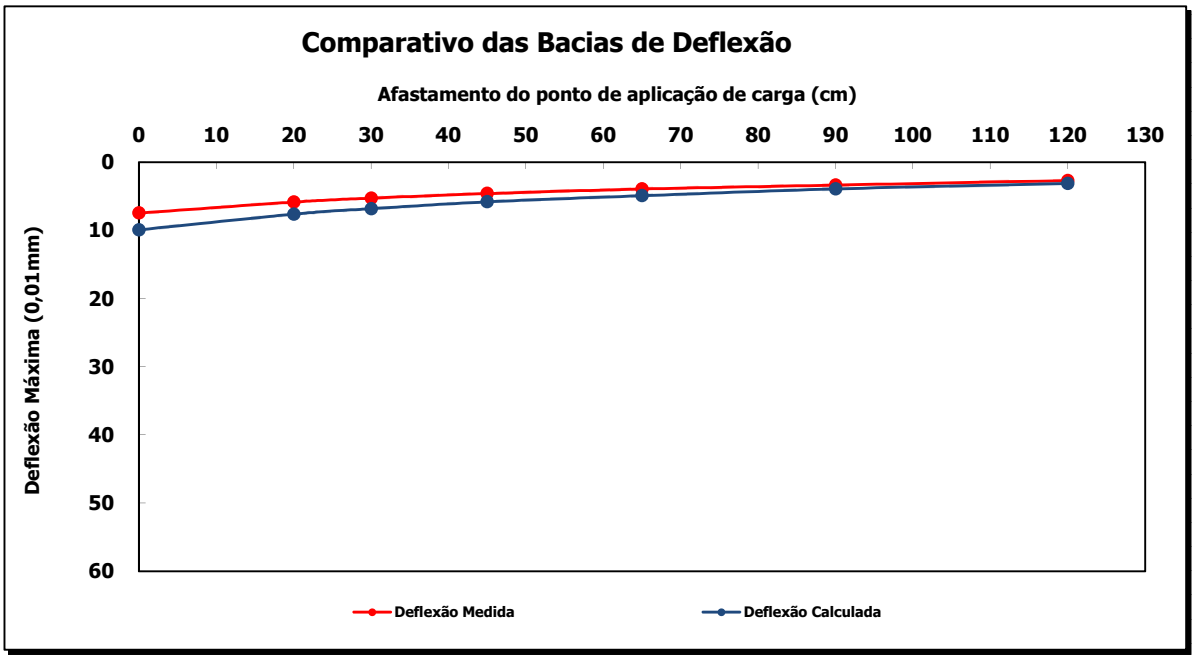
Comparativo das Bacias de Deflexão



Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000	45.000	45.000					
MR_2		45.000	50.000	50.000					
MR_3		3.500	4.000	4.300					
MR_4		35.000	40.000	40.000					
MR_5		3.000	3.000	3.000					
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	7,5	10,8	10,0	9,9					
20	5,8	8,2	7,8	7,6					
30	5,3	7,3	6,9	6,8					
45	4,6	6,3	5,9	5,8					
65	3,9	5,2	4,9	4,9					
90	3,3	4,1	3,9	3,9					
120	2,7	3,2	3,1	3,1					
RMSE		1,9	1,5	1,44					

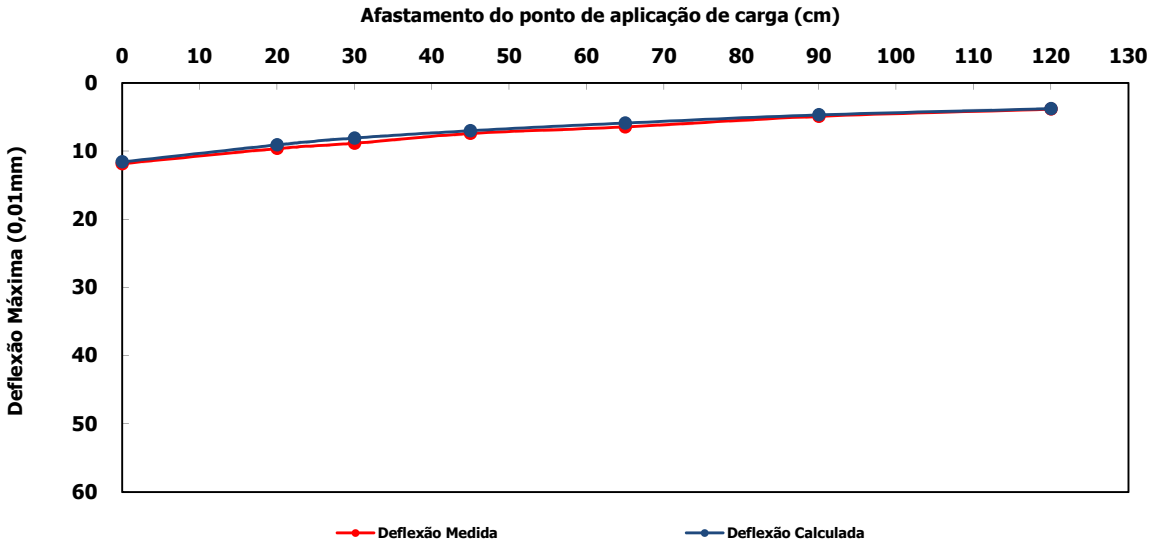


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Morno	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000	45.000						
MR_2		45.000	45.000						
MR_3		3.500	3.500						
MR_4		35.000	35.000						
MR_5		3.000	2.500						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	11,9	10,8	11,6						
20	9,6	8,2	9,1						
30	8,9	7,3	8,1						
45	7,4	6,3	7,0						
65	6,5	5,2	5,9						
90	4,9	4,1	4,7						
120	3,9	3,2	3,8						
RMSE		1,2	0,5						

Comparativo das Bacias de Deflexão

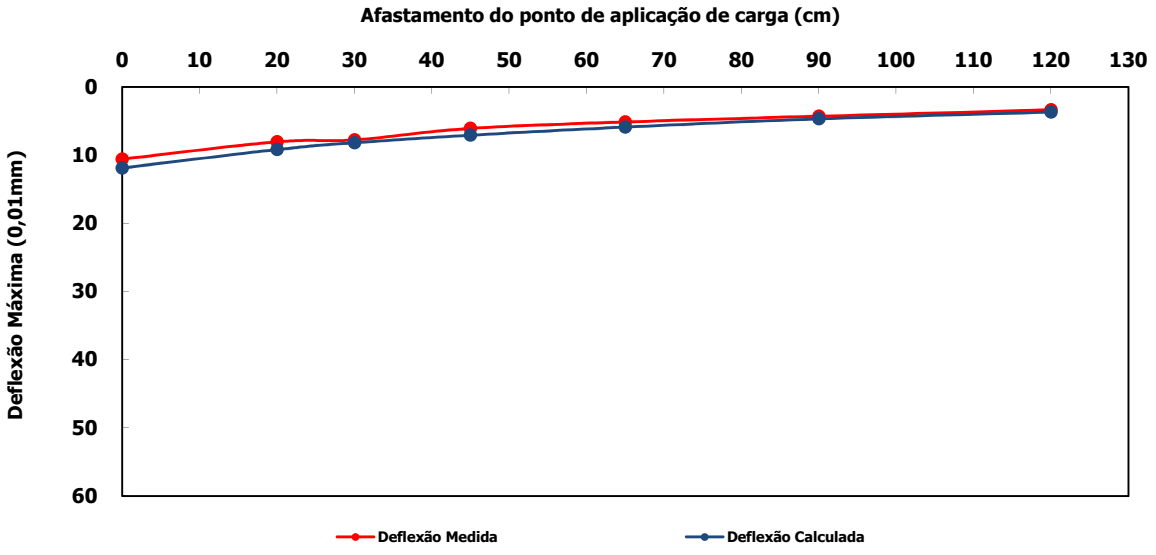


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	30.000	30.000						
MR_2		45.000	45.000						
MR_3		3.500	3.500						
MR_4		35.000	35.000						
MR_5		2.000	2.500						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	10,6	13,1	11,9						
20	8,1	10,3	9,2						
30	7,8	9,3	8,2						
45	6,1	8,2	7,1						
65	5,2	6,9	5,9						
90	4,3	5,7	4,7						
120	3,4	4,6	3,7						
RMSE		1,9	0,8						

Comparativo das Bacias de Deflexão

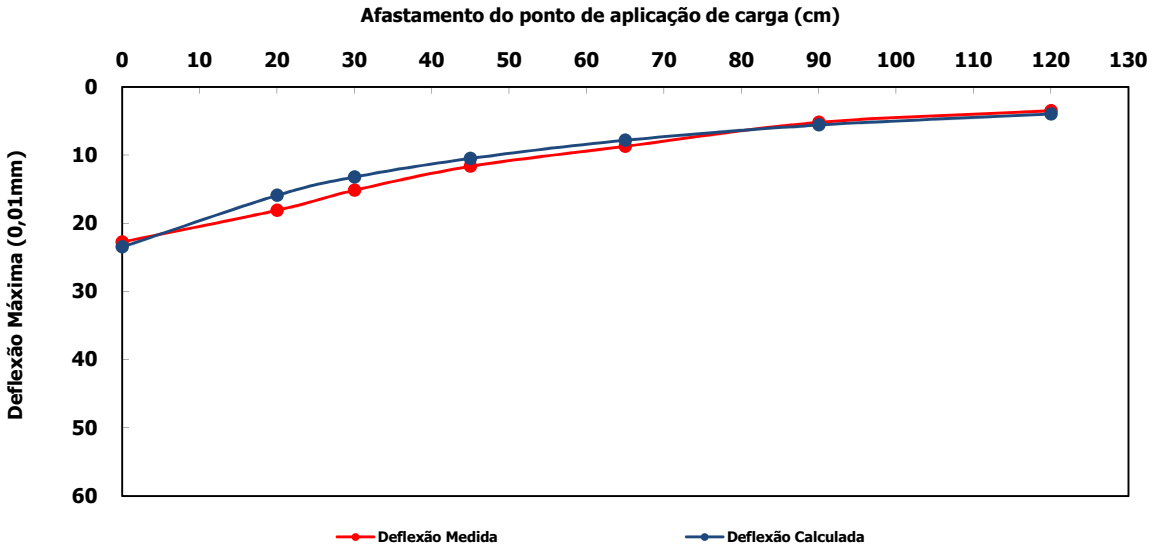


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	17.000	13.000						
MR_2		14.000	15.000						
MR_3		2.300	1.500						
MR_4		8.000	6.000						
MR_5		2.500	2.500						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	22,7	21,7	23,5						
20	18,1	14,3	15,9						
30	15,2	11,7	13,2						
45	11,7	9,3	10,5						
65	8,7	7,1	7,8						
90	5,2	5,2	5,6						
120	3,5	3,8	4,0						
RMSE		2,3	1,3						

Comparativo das Bacias de Deflexão

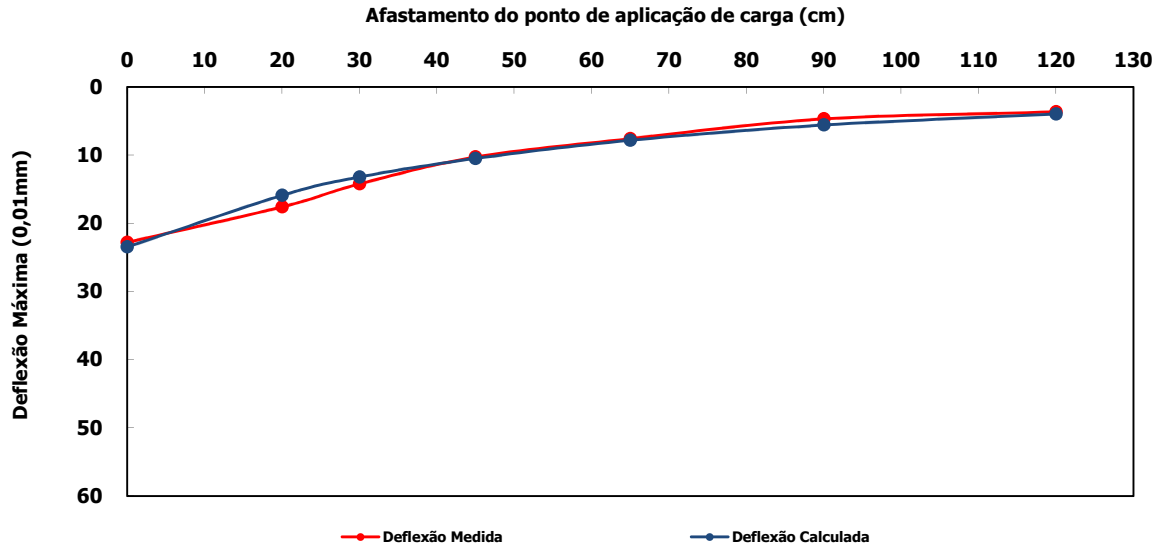


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	30.000	13.000						
MR_2		45.000	15.000						
MR_3		3.500	1.500						
MR_4		35.000	6.000						
MR_5		2.500	2.500						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	22,8	21,5	23,5						
20	17,6	15,1	15,9						
30	14,2	12,7	13,2						
45	10,3	10,3	10,5						
65	7,6	7,8	7,8						
90	4,7	5,7	5,6						
120	3,7	4,0	4,0						
RMSE		1,3	0,9						

Comparativo das Bacias de Deflexão

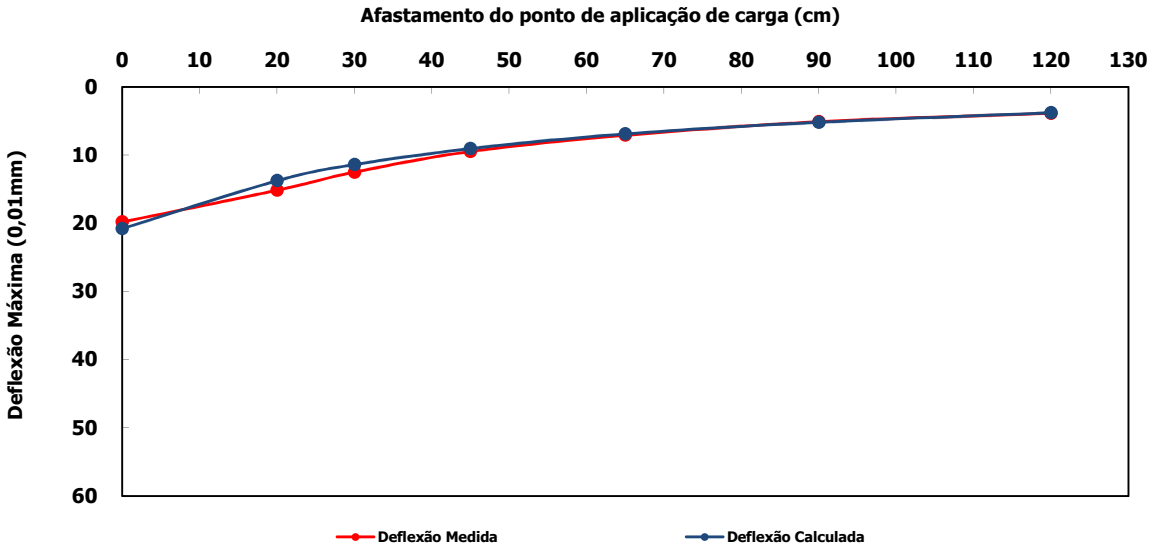


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	20.000	18.000	17.000					
MR_2		20.000	18.000	15.000					
MR_3		3.000	3.000	2.500					
MR_4		10.000	9.000	8.000					
MR_5		2.000	2.500	2.500					
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	19,8	18,8	19,1	20,8					
20	15,2	13,4	13,1	13,8					
30	12,5	11,6	11,0	11,4					
45	9,5	9,7	8,9	9,1					
65	7,1	7,8	6,9	6,9					
90	5,1	6,2	5,2	5,2					
120	3,9	4,8	3,9	3,8					
RMSE		1,0	1,0	0,8					

Comparativo das Bacias de Deflexão

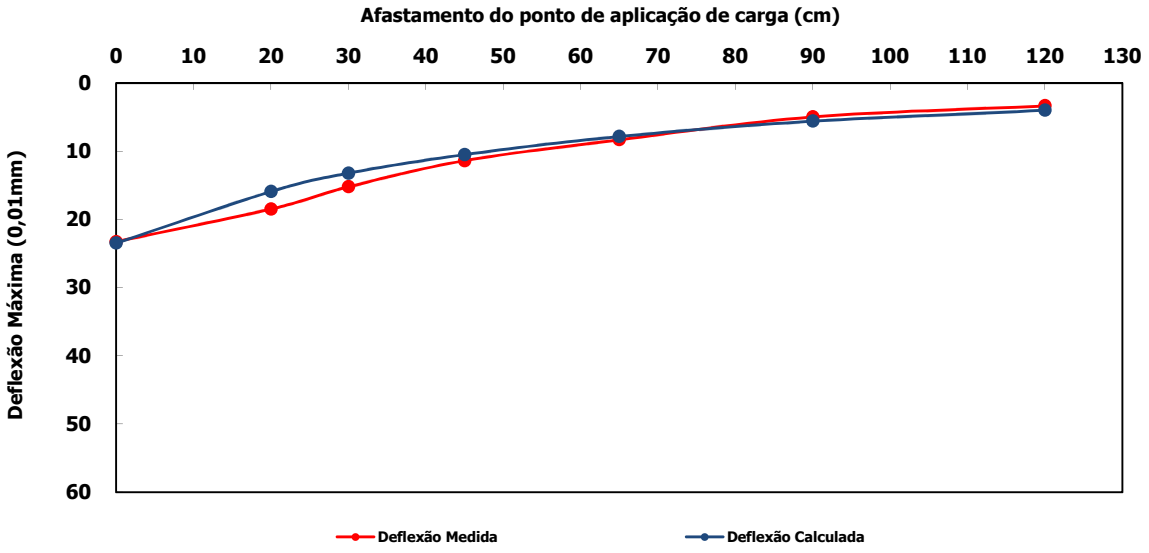


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	15.000	13.000						
MR_2		18.000	15.000						
MR_3		1.500	1.500						
MR_4		6.000	6.000						
MR_5		2.500	2.500						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	23,3	21,5	23,5						
20	18,5	15,1	15,9						
30	15,2	12,7	13,2						
45	11,4	10,3	10,5						
65	8,3	7,8	7,8						
90	5,0	5,7	5,6						
120	3,4	4,0	4,0						
RMSE		1,8	1,3						

Comparativo das Bacias de Deflexão

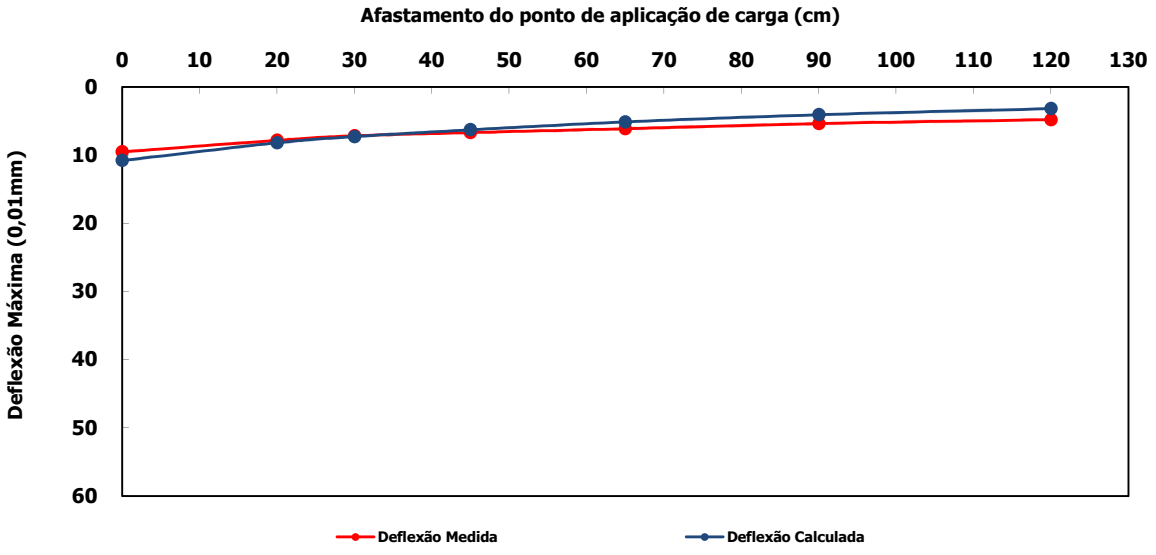


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000							
MR_2		45.000							
MR_3		3.500							
MR_4		35.000							
MR_5		3.000							
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	9,5	10,8							
20	7,8	8,2							
30	7,2	7,3							
45	6,7	6,3							
65	6,1	5,2							
90	5,4	4,1							
120	4,8	3,2							
RMSE		1,0							

Comparativo das Bacias de Deflexão

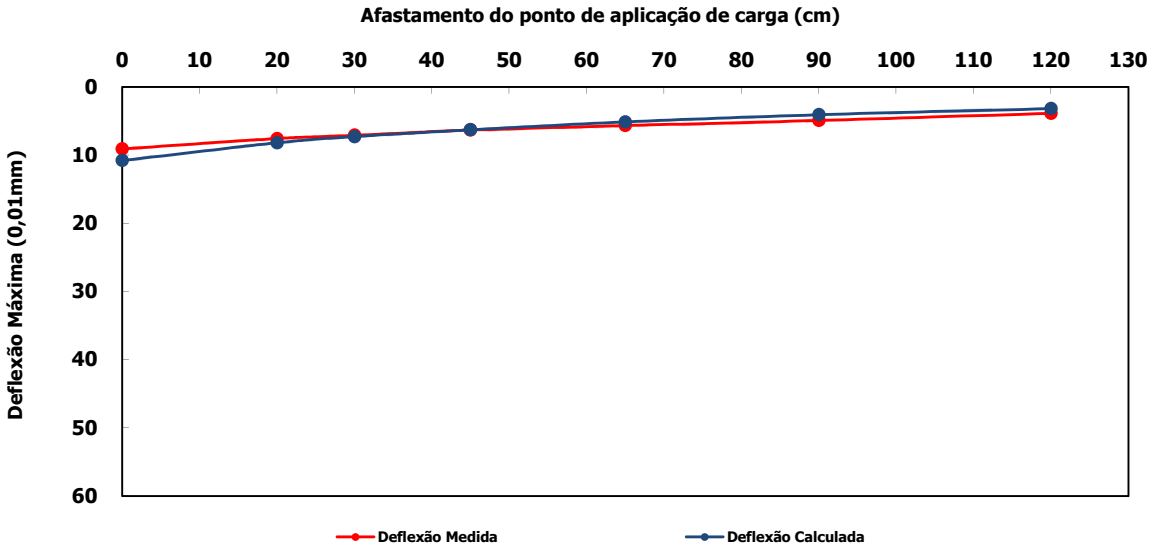


Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

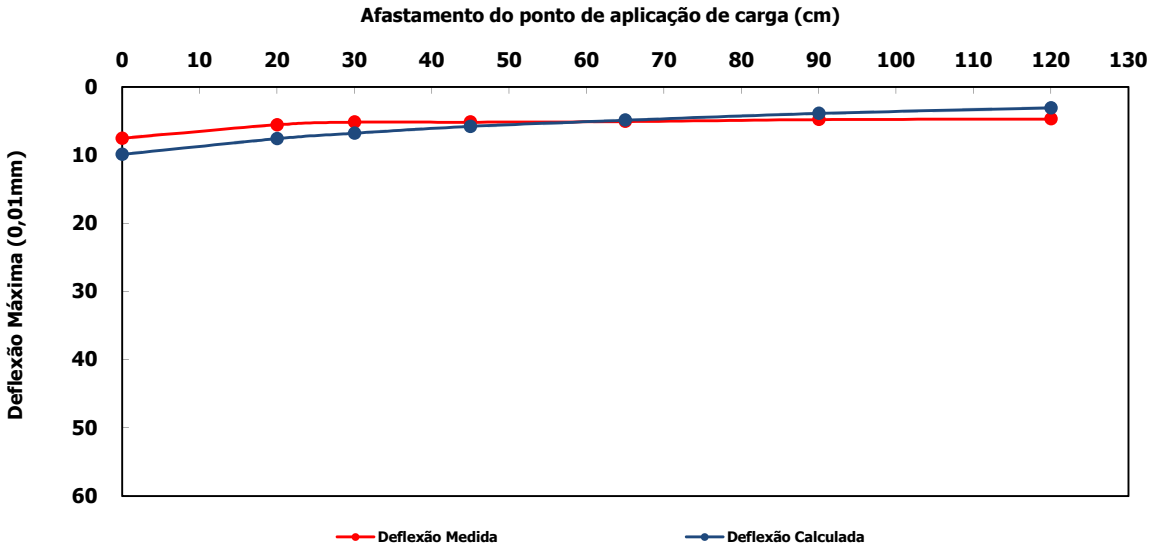
Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000							
MR_2		45.000							
MR_3		3.500							
MR_4		35.000							
MR_5		3.000							
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	9,1	10,8							
20	7,6	8,2							
30	7,1	7,3							
45	6,4	6,3							
65	5,7	5,2							
90	4,9	4,1							
120	3,9	3,2							
RMSE		0,8							

Comparativo das Bacias de Deflexão



Retroanálise da Bacia de Deformações

Estrutura	Material	Esp. (cm)
Camada 1	CBUQ - Asfalto Borracha	3
Camada 2	CBUQ	30
Camada 3	BGS	30
Camada 4	CBUQ	10
Camada 5	Subleito	-

Tentativa		1	2	3	4	5	6	7	8
MR_1	Kgf/cm²	45.000	45.000						
MR_2		45.000	50.000						
MR_3		3.500	4.300						
MR_4		35.000	40.000						
MR_5		3.000	3.000						
Afast.	Bacias de Deflexões (x 0,01mm)								
(cm)	D_{FWD}	$D_{calculada}$							
0	7,5	10,8	9,9						
20	5,6	8,2	7,6						
30	5,2	7,3	6,8						
45	5,2	6,3	5,8						
65	5,1	5,2	4,9						
90	4,8	4,1	3,9						
120	4,7	3,2	3,1						
RMSE		1,9	1,5						

Comparativo das Bacias de Deflexão