

	1. Relatório Número: CCR-ND-WMA- RTF-SET/2014	
	2. Data do Relatório: Setembro de 2014	3. Páginas: 133
4. Título da Pesquisa: “Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas”		
5. Responsável pela coordenação da pesquisa: Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária CCRNovaDutra	6. Relatório Elaborado para: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)	
7. Relatório preparado por: Luis Miguel Gutiérrez Klinsky (CPR) Valéria C. de Faria (CPR) Liedi Légi Bariani Bernucci (LTP-PTR-EPUSP) Rosângela Motta (LTP-PTR-EPUSP)		
8. Resumo: O emprego de aditivos chamados aditivos mornos, sejam químicos ou orgânicos, nas misturas asfálticas, permite a redução das temperaturas de usinagem e compactação usualmente empregadas. Os benefícios são vários, como a redução do consumo energético, redução de emissão de poluentes e melhoria nas condições de trabalho dos operadores. Neste estudo foram avaliadas as propriedades mecânicas das misturas asfálticas mornas, em relação à suscetibilidade à água, rigidez, fadiga e deformação permanente. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas mornas apresentam rigidez, resistência à umidade induzida e potencial para desenvolver deformação permanente similar à uma mistura asfáltica quente utilizada como referência. Com relação à vida de fadiga executada em laboratório no equipamento de flexão de viga apoiada em quatro pontos, notou-se uma maior vida de fadiga das misturas asfálticas mornas, quando preparadas em laboratório. Também foi estudada nesta pesquisa a redução de emissões de poluentes das misturas asfálticas mornas, em comparação com misturas asfálticas quentes convencionais, em laboratório, em usina asfáltica e na aplicação em campo. Em todas as situações constatou-se uma redução da emissão dos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs).		
9. Palavras Chave: Misturas asfálticas mornas, módulo de resiliência, resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo na flexão de viga apoiada em quatro pontos, emissão de poluentes.		

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	- 4 -
1.1. OBJETIVO	- 4 -
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 6 -
2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	- 6 -
2.1.1. Espumejo do asfalto	- 8 -
2.1.2. Aditivos orgânicos (ceras)	- 9 -
2.1.3. Aditivos surfactantes	- 9 -
2.1.4. Menor emissão de poluentes atmosféricos	- 12 -
2.1.5. Melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação	- 12 -
2.1.6. Diminuição do consumo energético	- 14 -
2.1.7. Uso de maiores quantidades de material fresado	- 14 -
2.1.8. Menor gradiente térmico na queda de temperatura	- 15 -
2.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS....	- 16 -
2.2.1. Rigidez das misturas asfálticas	- 16 -
2.2.1.1. Módulo de Resiliência	- 16 -
2.2.1.2. Módulo Dinâmico	- 18 -
2.2.1.3. Rigidez na flexão de viga apoiada em quatro pontos	- 23 -
2.2.2. Propriedades de fadiga	- 24 -
2.2.3. Susceptibilidade ao dano por umidade e adesividade	- 26 -
2.2.4. Deformação permanente	- 29 -
2.3. EMISSÕES DE POLUENTES NA PAVIMENTAÇÃO	- 32 -
2.3.1. Emissões de gases de efeito estufa	- 32 -
2.3.2. Emissões asfálticas	- 34 -
2.3.3. Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos - HPAs	- 37 -
3. MATERIAIS E MÉTODOS	- 41 -
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	- 41 -
3.1.1. Agregados	- 41 -
3.1.2. Ligantes Asfálticos	- 43 -
3.1.3. Aditivos Mornos	- 44 -
3.1.3.1. Evotherm® 3G	- 45 -
3.1.3.2. Gemul XT-15	- 45 -
3.1.3.3. CCBIt 113AD	- 46 -
3.2. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE EMISSÕES ASFÁLTICAS	- 46 -
3.2.1. Amostragem	- 47 -
3.2.2. Amostragem em laboratório	- 48 -
3.2.3. Amostragem em usina	- 49 -
3.2.4. Amostragem em pista	- 50 -
3.2.5. Análise química	- 50 -

3.2.6.	<i>Extração</i>	- 51 -
3.2.7.	<i>Fracionamento</i>	- 53 -
3.2.8.	<i>Análise das frações</i>	- 54 -
3.3.	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO MECÂNICA	- 55 -
3.3.1.	<i>Ensaio de deformação permanente por trilha de roda</i>	- 55 -
3.3.2.	<i>Ensaio de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos</i>	- 57 -
3.3.2.1.	<i>Descrição do Ensaio</i>	- 57 -
3.3.2.2.	<i>Preparação das amostras para moldagem dos corpos de prova</i>	- 61 -
3.3.3.	<i>Ensaio de módulo dinâmico</i>	- 64 -
3.3.3.1.	<i>Preparação dos corpos de prova para o ensaio</i>	- 64 -
3.3.3.2.	<i>Elaboração de curvas mestre</i>	- 66 -
3.3.4.	<i>Ensaio de módulo de resiliência</i>	- 66 -
3.3.5.	<i>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</i>	- 66 -
3.3.6.	<i>Ensaio de dano por umidade induzida</i>	- 66 -
4.	RESULTADOS	- 68 -
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS	- 68 -
4.2.	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	- 70 -
4.2.1.	<i>Misturas asfálticas mornas com aditivos químicos surfactantes</i>	- 70 -
4.2.2.	<i>Misturas asfálticas mornas com aditivos de ceras orgânicas</i>	- 75 -
4.2.3.	<i>Resumo da dosagem das misturas asfálticas</i>	- 78 -
4.3.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	- 80 -
4.4.	DANO POR UMIDADE INDUZIDA	- 82 -
4.5.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA	- 83 -
4.6.	ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO	- 84 -
4.7.	ENSAIO DE FLEXÃO DE VIGA APOIADA EM QUATRO PONTOS	- 91 -
4.7.1.	<i>Vida de fadiga</i>	- 91 -
4.7.2.	<i>Rigidez à flexão e módulo de elasticidade das misturas asfálticas</i>	- 93 -
4.7.3.	<i>Energia dissipada das misturas asfálticas</i>	- 96 -
4.8.	DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM TRILHA DE RODA	- 97 -
4.9.	AVALIAÇÃO DE EMISSÕES ASFÁLTICAS	- 99 -
4.9.1.	<i>Resultados da coleta de emissões asfálticas em laboratório</i>	- 100 -
4.9.2.	<i>Resultados da coleta de emissões asfálticas em usina de asfalto</i>	- 104 -
4.9.3.	<i>Resultados da coleta de emissões asfálticas em pista</i>	- 107 -
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	- 111 -
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 115 -
	ANEXO B-1: ENSAIO DE FADIGA	- 123 -
	ANEXO B-2: CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS EM USINA	- 129 -
	ANEXO B-3: EXECUÇÃO DE ATIVIDADES	- 133 -

1. INTRODUÇÃO

Na última década um novo desafio tem sido colocado para os órgãos gestores rodoviários e para os responsáveis por obras, questão complexa e imperativa nos dias atuais, a sustentabilidade no setor rodoviário. Neste sentido, houve um crescente interesse por novas tecnologias direcionadas a este tema em pavimentação, tendo sido introduzido várias inovações em materiais e produtos.

As misturas asfálticas mornas se referem a uma tecnologia relativamente recente, em que as temperaturas de usinagem e compactação são reduzidas em cerca de 30°C ou mais, em relação as misturas asfálticas quentes convencionais, para reduzir as emissões asfálticas e de consumo energético. Dessa forma, são consideradas na Europa e nos Estados Unidos misturas mais sustentáveis que poderiam reduzir os problemas ambientais e melhorar as condições de trabalho dos operadores envolvidos na cadeia produtiva de misturas asfálticas.

Para possibilitar a redução nas temperaturas de produção, são utilizados aditivos mornos que possibilitem obter misturas asfálticas com características similares às misturas asfálticas quentes convencionais. Nos dias de hoje existem diversas tecnologias que garantem a redução das temperaturas de usinagem e compactação, tais como: as ceras orgânicas, os químicos surfactantes, o espumejamento do ligante asfáltico, entre outros.

1.1. Objetivo

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um estudo laboratorial com diferentes tipos de técnicas de misturas mornas, em comparação com uma mistura a quente convencional, para avaliação do comportamento mecânico e do potencial de emissões. A pesquisa foi desenvolvida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária NovaDutra do Grupo CCR em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP.

A pesquisa compreendeu a realização de ensaios laboratoriais de comportamento mecânico em misturas asfálticas produzidas em laboratório e em usina asfáltica. Também foi realizada a medida de emissões poluentes, principalmente no que diz

“Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas”

respeito aos Hidrocarbonetos Cíclicos Aromáticos (HPAs). Essa medida e coleta de emissões foi realizada em laboratório e, complementarmente, em usina de asfalto e em pista.

Assim, neste relatório final são apresentados os resultados obtidos no Laboratório do CPR e da EPUSP, relacionados à mistura asfáltica convencional utilizada como referência e às três misturas asfálticas mornas, nas quais foram utilizados dois aditivos químicos surfactantes, Evotherm 3G e Gemul XT-15, e uma cera orgânica denominada CCBit 113AD.

Na seção 2 deste relatório é apresentada a revisão bibliográfica realizada para estudar o estado da arte das misturas asfálticas mornas. Nessa seção citam-se principalmente estudos relacionados às propriedades mecânicas destas misturas e no potencial de emissão de poluentes, principalmente no que diz respeito aos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs).

Na seção 3 são descritos os materiais utilizados neste estudo para desenvolvimento do programa laboratorial com as misturas asfálticas mornas. Também nessa seção são descritos os métodos de ensaio que foram utilizados e a metodologia utilizada para determinação do potencial de emissões de HPAs das misturas asfálticas mornas.

Na seção 4 apresentam-se os resultados dos ensaios mecânicos realizados em laboratório com as misturas asfálticas mornas e a mistura asfáltica quente de referência. A quantificação de emissões poluentes produzidas pelas misturas asfálticas também é apresentada nessa seção.

Finalmente na seção 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais com relação ao desempenho mecânico e ambiental das misturas asfálticas mornas em comparação com a mistura asfáltica quente de referência.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

A crescente preocupação ambiental impôs para os diversos setores produtivos a necessidade de estudos que visem atividades mais sustentáveis. No setor rodoviário, diversas pesquisas passaram a ser desenvolvidas na última década com o objetivo de diminuir a temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas, de forma que haja a redução de emissões asfálticas e de consumo energético, em comparação com as misturas asfálticas convencionais a quente (MOTTA, 2011). Assim, surgiram as misturas asfálticas mornas (em inglês, *warm mix asphalt - WMA*), cuja fabricação é realizada com redução de temperatura da ordem de 30°C ou mais em relação às misturas a quente. Estas últimas geralmente são usinadas em temperaturas de cerca de 150°C ou mais, dependendo do tipo de ligante asfáltico, sendo que no caso dos modificados com polímeros ou borracha de pneus moídos, por exemplo, temperaturas mais elevadas são requeridas (da ordem de 180°C).

Seguindo a tendência de diminuir a temperatura de usinagem, foi ainda desenvolvido na França um outro tipo de tecnologia, onde a redução de temperatura é ainda maior que no caso das misturas mornas, com as misturas sendo preparadas e aplicadas abaixo de 100°C (diminuição de 50°C ou mais em relação às misturas a quente). Neste caso, têm-se as chamadas misturas asfálticas semimornas (em inglês, *half-warm mix asphalt - HWMA*), (MOTTA, 2011).

Dentro deste contexto de temperatura, tem-se ainda outro tipo de mistura asfáltica já bastante estabelecido no meio da pavimentação, que é o das misturas a frio, cuja produção é feita à temperatura ambiente, com o uso de emulsões asfálticas.

Comparativamente, as misturas a quente são as mais empregadas (não só no Brasil, mas em inúmeros países), por se considerar que estas apresentam boa durabilidade. No entanto, por necessitarem de temperaturas elevadas, neste caso tem-se maior emissão de poluentes e gasto energético que as misturas a frio. Desta

maneira, com o uso de misturas mornas visa-se ter comportamento similar ou superior ao das misturas a quente, sem poluir e consumir combustível como estas últimas. A Figura 2.1 apresenta uma classificação esquemática dos diferentes tipos de misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem, onde se verifica que no caso das misturas mornas a temperatura varia entre 110 a 140°C (RUBIO *et al.*, 2012) e das misturas semimornas é abaixo de 100°C. Verifica-se ainda que há variação da energia consumida, de acordo com o nível de aquecimento do processo.

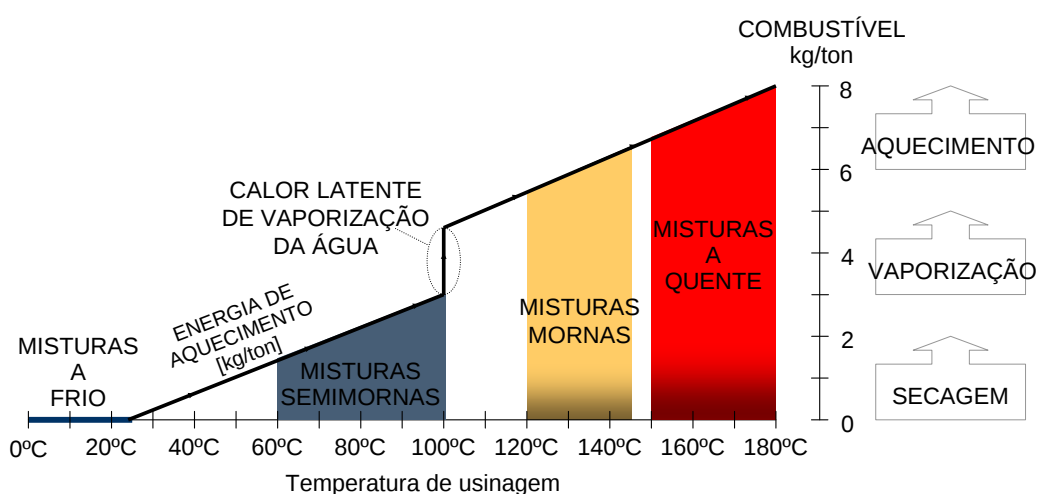


Figura 2.1: Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem

(MOTTA, 2011)

Atualmente, a produção de misturas asfálticas mornas e semimornas é possível a partir de: (i) espumejo do asfalto com água ou aditivos; (ii) introdução de aditivos orgânicos; ou (iii) aditivos surfactantes. Valendo-se destas técnicas, diversas tecnologias de misturas mornas e semimornas foram desenvolvidas desde a década de 90, quando começaram as primeiras iniciativas de se tentar produzir estes tipos de misturas asfálticas em temperaturas inferiores àquelas a quente convencionais. Geralmente, de maneira combinada a estas técnicas, procede-se à diminuição da temperatura dos agregados, para que a usinagem ocorra em temperatura reduzida, visto que o material pétreo compõe a maior parte de uma

mistura asfáltica (cerca de 95%) e isto já seria suficiente para baixar a temperatura de usinagem de maneira significativa.

A seguir, para melhor entendimento, tem-se uma breve descrição de cada forma de produção de misturas mornas e semimornas.

2.1.1. Espumejo do asfalto

Um grupo de tecnologias de misturas mornas e semimornas considera a adição de uma pequena quantidade de água na mistura para a formação de uma espuma com o asfalto quente. Neste procedimento, o asfalto quente em contato com a água em temperatura ambiente faz com que esta se torne vapor e expanda significativamente, a um fator de 1,673 (PROWELL e HURLEY, 2007). A propósito, esta é uma razão para que a temperatura de 100°C seja o limiar entre uma mistura morna e uma semimorna, já que este é o ponto de vaporização da água (MOTTA, 2011).

Nas tecnologias que fazem uso deste recurso, a água é introduzida no processo de usinagem por injeção direta, por agregado úmido ou na forma de material hidrofílico como as zeólitas. Quando esta água se dispersa no asfalto aquecido e se torna vapor há a expansão do ligante, resultando em diminuição da viscosidade da mistura (PROWELL e HURLEY, 2007).

As zeólitas são silicatos cristalinos alumino-hidratados (naturais ou sintéticos) que contêm alta porcentagem de água em sua estrutura (cerca de 20%). Como têm a capacidade de liberar a água de maneira gradativa na medida em que são aquecidas em temperaturas acima do ponto de vaporização da água, existem tecnologias de misturas mornas que se valem desta propriedade das zeólitas para produzir o efeito de espuma (RÜHL, 2008; D'ANGELO *et al.*, 2008).

Dentre alguns exemplos de técnicas de espumejo do asfalto têm-se: LEA (mistura semimorna com uso de agregados úmidos), WAM-Foam (mistura morna com uso de agregados úmidos), Double Barrel Green e WMA Terex (misturas mornas com injeção de água), Advera WMA e Aspha-Min (misturas mornas com uso de zeólitas).

2.1.2. Aditivos orgânicos (ceras)

Outro grupo de tecnologias de misturas mornas conta com a introdução de aditivos orgânicos/ceras para que haja redução da viscosidade do asfalto. Ao serem submetidos a temperaturas acima de seu ponto de amolecimento, estes aditivos agem nas propriedades do ligante, fazendo com que haja diminuição da viscosidade deste último. Assim, é possível realizar a usinagem com os agregados mesmo em temperaturas cerca de 30°C menores que as misturas a quente convencionais (PROWELL e HURLEY, 2007).

Dentre alguns exemplos de tecnologias de aditivos orgânicos/ceras têm-se: Sasobit e CCBit (misturas mornas).

Ainda nesta linha dos aditivos orgânicos para fabricação de mistura morna têm-se tecnologias interessantes como uma em que a cera é produzida a partir de plástico reciclável, denominada GreenMantra, e outra em que a cera é originária da planta de carnaúba, tendo sido desenvolvida em pesquisas da Universidade Federal do Ceará e aplicada em estudos como o de Wargha Filho (2013).

2.1.3. Aditivos surfactantes

Outro grupo de tecnologias se vale da introdução de aditivos surfactantes no asfalto para produzir as misturas mornas e semimornas. Geralmente, estes produtos agem na interface agregado/ligante e auxiliam no processo de recobrimento, podendo ainda atuar como melhoradores de adesividade. Cabe mencionar que estes produtos não alteram as propriedades de consistência do asfalto, muitas vezes observadas em ensaios de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento (PROWELL e HURLEY, 2007; MOTTA, 2011).

Geralmente é possível reduzir a temperatura de usinagem em cerca 30°C, podendo-se combinar esta tecnologia com aquelas de espumejo de asfalto (mencionada anteriormente).

Dentre alguns exemplos de tecnologias de aditivos surfactantes/melhoradores de adesividade têm-se: Gemul, Evotherm, Cecabase RT, Rediset WMX e Revix™ (misturas mornas).

Em termos históricos, o assunto foi primeiramente apresentado em 1997, dentro do *German Bitumen Forum* (uma parceria entre governo, indústria e trabalhadores da Alemanha), em resposta à consideração do Ministério alemão sobre a exposição ocupacional aos fumos de asfalto (PROWELL e HURLEY, 2007). Depois da criação deste fórum, a DAV (associação alemã de asfalto) iniciou um programa chamado *Low Temperature Asphalt* com o principal objetivo de investigar diversos métodos em que misturas asfálticas pudessem ser produzidas em temperaturas mais baixas que aquelas convencionais a quente (BARTHEL *et al.*, 2004).

Os primeiros pavimentos com misturas asfálticas mornas foram então construídos na Europa (mais especificamente na Alemanha e na Noruega), a partir de 1995, utilizando diferentes tecnologias e, posteriormente, o tema foi introduzido nos Estados Unidos em 2002 (PROWELL e HURLEY, 2007). Os norte-americanos, por meio do FHWA (*Federal Highway Administration*), em conjunto com a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e a NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*), ainda fizeram um *Scanning Tour* à Europa em 2007 com o propósito de coletar informações adicionais sobre as tecnologias de misturas mornas que pudessem auxiliar em sua implementação no país, com particular ênfase no desempenho em longo prazo (PROWELL e HURLEY, 2007; D'ANGELO, *et al.*, 2008). Após alguns anos, observou-se uma rápida expansão das experiências com misturas mornas nos Estados Unidos, conforme apresentado na Figura 2.1, entre os anos de 2007 e 2010 (MARTINEZ, 2012).

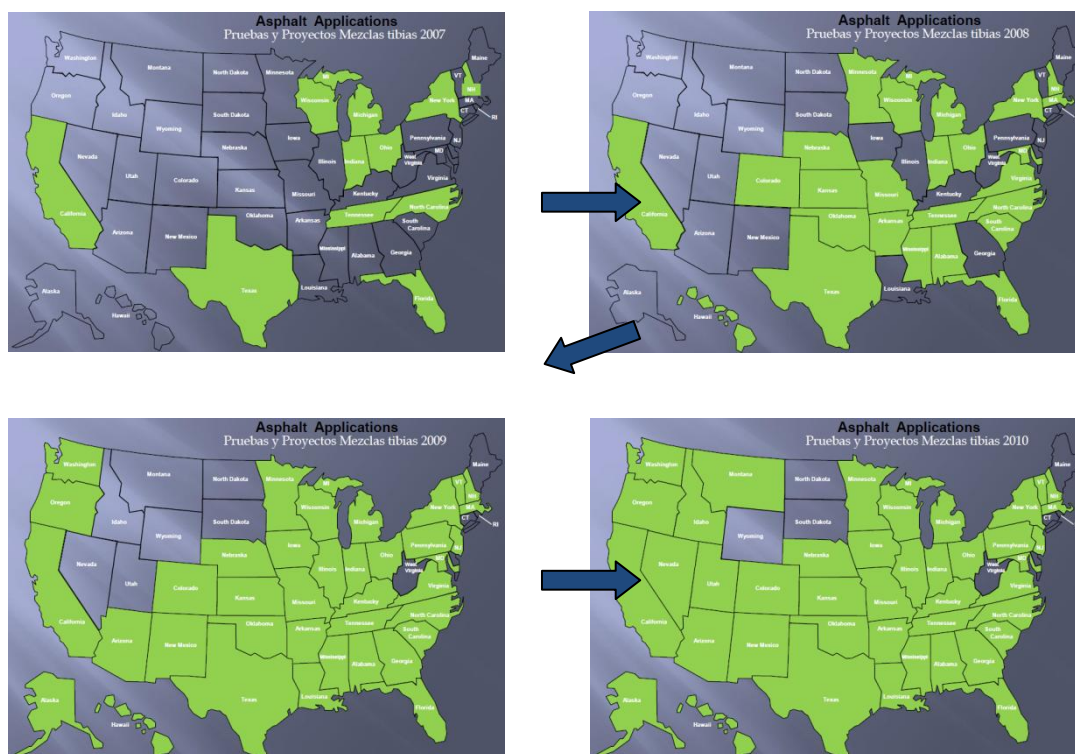


Figura 2.1: Expansão do uso de tecnologias de misturas mornas nos Estados Unidos, entre os anos de 2007 (primeiras experiências) e 2010
(retirado de MARTINEZ, 2012)

Seguindo a tendência mundial, no Brasil também já é possível observar pesquisas relativas ao comportamento de misturas mornas preparadas sob diferentes tecnologias. Pesquisas acadêmicas já foram desenvolvidas por pesquisadores como Sousa Filho na Universidade Federal do Ceará (2006), Rhode *et al.* na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2008), Otto na Universidade Federal de Santa Catarina (2009), Fritzen *et al.* e Cavalcanti na COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro (respectivamente 2009 e 2010), Motta na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2011) e Wargha Filho (2013) na Universidade Federal do Ceará, dentre outros.

Cabe mencionar que, particularmente no caso de Motta (2011), a tese de doutorado incluiu a avaliação de um trecho experimental com mistura morna, em parceria com a Concessionária NovaDutra. Neste estudo, uma mistura morna produzida com aditivo surfactante foi produzida e aplicada com sucesso na

Rodovia Presidente Dutra, ainda estando em boas condições atualmente, após quatro anos da obra sob tráfego muito intenso e pesado.

A literatura em geral indica que a diminuição das temperaturas de mistura e compactação com as misturas mornas e semimornas pode trazer importantes benefícios relacionados ao meio ambiente, à exposição ocupacional e à qualidade da pavimentação.

2.1.4. Menor emissão de poluentes atmosféricos

As temperaturas mais baixas empregadas na produção de misturas mornas e semimornas geram menores quantidades de poluentes lançados ao ar, não só porque são emitidos menos vapores e fumos de asfalto durante a mistura em usina e a aplicação em campo, mas também porque parte do combustível que seria utilizado na usinagem deixa de ser queimado (PROWELL e HURLEY, 2007).

De modo geral, D'Angelo *et al.* (2008) apontam alguns resultados obtidos em estudos na Europa em que se verificou uma queda da ordem de 30 a 40% de gás carbônico - CO₂ (relacionado aos GEE) e dióxido de enxofre - SO₂ (ligado às chuvas ácidas), 50% de compostos orgânicos voláteis - COVs (precursores do ozônio e associados aos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos - HPAs), 10 a 30% de monóxido de carbono - CO (indicadores de eficiência de queima), 60 a 70% de óxidos de nitrogênio - NO_x (precursores de ozônio) e 20 a 25% de materiais particulados.

Dentro deste contexto, a iniciativa de se diminuir as emissões de poluentes poderia então ser inserida em projetos para a obtenção de créditos de carbono, dentro dos mecanismos de flexibilização propostos no Protocolo de Quioto, em projetos inseridos no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Assim, a venda de excedentes de créditos de carbono passaria ser um atrativo competitivo para as misturas asfálticas mornas e semimornas (OLARD, 2008).

2.1.5. Melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação

O uso de misturas mornas e semimornas traz benefícios para os trabalhadores da área de pavimentação que são particularmente difíceis de mensurar. Primeiramente, tem-se o fato de que com esta nova técnica os operários ficam

menos expostos às emissões asfálticas, sendo este um fator positivo para a sua saúde (NEWCOMB, 2006; BARTHEL *et al.*, 2004; HASSAN, 2009; PROWELL e HURLEY, 2007). Apesar de os trabalhadores serem expostos a baixos níveis de concentração, existe uma possibilidade dos efeitos na saúde em longo prazo. (BINET *et al.*, 2002; CRAVO *et al.*, 2010).

A IARC (*International Regulatory Agency for Research on Cancer*), que avalia diversos estudos relativos ao câncer e a partir daí classifica produtos e atividades quanto ao seu potencial carcinogênico, elevou o nível de risco de exposição às emissões asfálticas. Esta era tida como não classificável por carcinogenicidade para humanos (Classe 3), mas a partir de 2011 passou a ser considerada como possivelmente carcinogênica para humanos (Classe 2B). Esta reavaliação foi baseada em inúmeros estudos recentes, na qual se concluiu que, embora não houvesse provas suficientes com humanos e também com animais em laboratório, têm-se estudos com trabalhadores expostos às emissões asfálticas em pavimentação que indicaram efeitos mutagênicos e genotóxicos/citogênicos nestes operários. Além disso, como foram observados efeitos similares em sistemas experimentais sob condições controladas, esta forte evidência mecanística levou a exposição ocupacional às emissões asfálticas passar a ser classificada em uma categoria de maior risco (IARC, 2011).

Na Itália, por exemplo, foi realizado um estudo de emissões em usina com uma mistura morna tipo WAM-Foam (120 a 125°C) em comparação com uma mistura a quente (180°C) e os resultados mostraram que durante a usinagem da mistura morna obteve-se uma redução de emissões da ordem de 35% de CO₂, 8% de CO, 60% de NO_x e 25 a 30% de SO₂ e de material particulado, conforme relatam Lecomte *et al.* (2007). Já na França observou-se que as emissões em usina com uma mistura morna tipo Aspha-Min (130°C) em comparação com uma mistura a quente (160°C) foram diminuídas em cerca de 23% de CO₂, 18% de NO₂ e SO₂, e 19% de COVs, segundo apontam Marchand *et al.* (2008).

Já um segundo benefício que as misturas mornas e semimornas podem proporcionar aos trabalhadores da pavimentação é a possibilidade de estes terem um ambiente de trabalho com temperatura mais amena e com redução de odores (NEWCOMB, 2006; BARTHEL *et al.*, 2004; PROWELL e HURLEY, 2007).

Segundo Newcomb (2006), boas condições de ambiente de trabalho na produção e na aplicação de misturas asfálticas são importantes para a indústria, uma vez que favorecem não só os empregados, mas também a qualidade do trabalho. Neste sentido, acredita-se que a melhoria do ambiente de trabalho tenha sido a responsável pelo aumento da produtividade em uma obra com mistura morna executada na Alemanha, segundo relatado pelo empreiteiro (PROWELL e HURLEY, 2007).

2.1.6. Diminuição do consumo energético

Além da questão ambiental, o setor rodoviário também tem sido obrigado a buscar tecnologias inovadoras que possam melhorar a eficiência energética nas operações de pavimentação devido à instabilidade dos preços do petróleo, embora isto também deva ser uma das metas para se alcançar uma melhor otimização dos recursos naturais (OLARD, 2008; HASSAN, 2009). Dentro deste contexto, um aspecto interessante associado às misturas mornas e semimornas é a diminuição do consumo de energia, em relação às misturas a quente convencionais; como a temperatura requerida na usinagem é mais baixa, há uma redução da quantidade de combustível necessário no processo de mistura (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007; RUBIO *et al.*, 2012).

De acordo com Olard (2008), a economia de energia na produção de misturas asfálticas semimornas, por exemplo, pode ser da ordem 35% a 60%, dependendo do processo, do tipo de usina e dos materiais empregados. Já Kristjánsdótti *et al.* (2007) vão ainda além e mencionam que a redução do consumo de combustível pode chegar a 75%, em comparação com a mistura a quente convencional.

2.1.7. Uso de maiores quantidades de material fresado

O uso de pavimentos asfálticos reciclados tem se elevado nos últimos anos, principalmente visando dar uma destinação aos resíduos provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos e minimizando os impactos causados aos recursos naturais para a obtenção de agregados virgens (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

Nos Estados Unidos, por exemplo, o desenvolvimento de novos métodos de reciclagem, a melhoria dos equipamentos de fresagem e novas tecnologias de incorporação dos fresados na mistura asfáltica tornaram a reciclagem um procedimento padrão, o que fez com que o pavimento asfáltico fosse hoje o produto mais reciclado no país (PROWELL e HURLEY, 2007). Além disso, os aumentos significativos dos preços do asfalto que ocorreram em 2006 e 2008, somados à diminuição das fontes de agregados com qualidade aceitável, também têm sido grandes incentivadores de tal prática (COPELAND *et al.*, 2010).

Embora mais de 60% dos departamentos de transporte norte-americanos permitam grandes quantidades de fresados nas misturas asfálticas recicladas a quente (acima de 25% em peso de agregados), a maioria dos projetos não usa rotineiramente tais percentuais elevados, principalmente se a aplicação se destinar a camadas de rolamento e camadas intermediárias (COPELAND *et al.*, 2010), porque podem resultar em uma mistura de baixa qualidade (BROWN *et al.*, 2009). Além disso, se o teor de fresados for elevado, pode-se ainda ter algumas dificuldades em função da homogeneização da temperatura da mistura (BROWN *et al.*, 2009). Dentro deste contexto, o emprego de misturas mornas e semimornas pode favorecer a adição de maiores quantidades de fresados na produção de misturas recicladas a quente (OLARD, 2008; BARTHEL *et al.*, 2004; PROWELL e HURLEY, 2007).

2.1.8. Menor gradiente térmico na queda de temperatura

O emprego de misturas mornas e semimornas pode ser favorável quando são executadas obras de pavimentação em épocas ou locais de clima muito frio ou quando há a necessidade de se percorrer longas distâncias entre a usina e a pista (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007; KRISTJÁNSDÓTTI *et al.*, 2007), por apresentar menor gradiente térmico na queda de temperatura. Nestas situações, a diminuição significativa de temperatura pode acarretar em dificuldades na compactação e em perda de material. Isto ocorre porque quanto maior a temperatura da mistura asfáltica, como no caso de misturas convencionais a quente, mais rápida ocorre a queda de temperatura, uma vez que a taxa de esfriamento é dada pela diferença de temperatura entre a mistura asfáltica e o

meio ambiente. Assim, a mistura produzida em temperatura mais baixa esfria sob uma taxa menor (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007).

As especificações do DNIT, DER-SP, dentre outros órgãos, relativas a concretos asfálticos convencionais a quente determinam que estes só podem ser fabricados, transportados e aplicados quando a temperatura ambiente for superior a 10°C. Neste sentido, considerando-se que em muitos locais as temperaturas podem ser baixas, particularmente em obras noturnas como é o caso na Rodovia Presidente Dutra, o uso de misturas mornas pode ser interessante, garantindo maior “janela” de tempo para a pavimentação.

Além disso, na ocorrência de chuva acidental ou ainda por outra razão qualquer, por exemplo, os caminhões carregados podem permanecer em modo de espera por algumas horas antes de carregar a acabadora, evitando gastos com ocasionais descartes (OLARD, 2008).

2.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

2.2.1. Rigidez das misturas asfálticas

2.2.1.1. Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência é bastante utilizado no meio rodoviário para relacionar a tensão (σ) com a deformação (ϵ) dos materiais utilizados na construção de pavimentos. No Brasil, usualmente, o ensaio de tração por compressão diametral cíclico é utilizado para determinação do módulo de resiliência (MR), de acordo com as recomendações da norma DNIT 135/2010-ME, Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência.

Diversos autores têm avaliado a rigidez das misturas asfálticas mornas utilizando o módulo de resiliência, principalmente para realizar comparativos com misturas asfálticas quentes convencionais. Tal é o caso de Hurley e Prowel (2006) que avaliaram misturas asfálticas mornas com o aditivo Evotherm® e observaram que o uso do aditivo morno produziu incrementos no módulo de resiliência. De acordo com esses autores, o aumento do valor de MR deve-se à maior densificação da

mistura asfáltica morna que por sua vez é atribuída à melhor lubrificação fornecida pelo aditivo na compactação. Contudo, os autores também relatam que é possível obter reduções no valor do MR em misturas asfálticas mornas, devido à redução de temperaturas de produção.

No âmbito nacional, Penz (2010) avaliou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas. A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a Faixa C do DNIT, com CAP 50/70 e adição de 0,3% de zeólitas em peso com relação à massa total da mistura asfáltica. Os resultados mostraram que o emprego da tecnologia morna reduziu o valor de módulo de resiliência em aproximadamente 55%, com relação à mistura asfáltica quente de referência, até valores em torno de 3.100MPa.

Cavalcanti (2010) desenvolveu um estudo para avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com diferentes aditivos, entre eles um de tecnologia morna, do tipo químico amínico da empresa *Akzo Nobel*. Esse aditivo foi incorporado em 2,0% em peso ao ligante asfáltico CAP 30/45. A faixa granulométrica escolhida para desenvolvimento do estudo foi a B do DNIT e a compactação dos corpos de prova foi realizada no compactador Marshall e no Giratório do SUPERPAVE. O autor utilizou diversas temperaturas para a compactação da mistura asfáltica morna: 110°C, 120°C e 130°C. O autor notou que as misturas asfálticas mornas compactadas no giratório com diversas temperaturas apresentaram valores de MR muito próximos, em torno de 9.000MPa.

No caso dos corpos de prova compactados no Marshall, Cavalcanti (2010) notou que houve uma redução do valor do MR conforme a temperatura de compactação foi reduzida nas misturas asfálticas mornas. Para 130°C foram obtidos valores próximos a 9.000MPa, enquanto que os CPs moldados com temperaturas de 120°C e 110°C apresentaram módulos de resiliência em torno de 7.500MPa. De acordo o autor, esse fenômeno pode ser atribuído a que o compactador Marshall é mais sensível às oscilações na temperatura da mistura no momento da compactação. Contudo, salienta-se que os projetos de dosagem com o compactador Marshall e o Giratório forneceram teores de ligante asfáltico de projeto diferentes, que também podem ter influenciado na redução do MR.

Motta (2011) avaliou o emprego de um aditivo surfactante (Gemul XT-14) em uma mistura asfáltica com granulometria contínua Faixa C DNIT e com CAP 30-45 e também em uma mistura asfáltica com granulometria semidescontínua da CALTRANS (*Gap Graded*) e com ligante asfáltico modificado por borracha. Os ensaios de módulo de resiliência mostraram que as misturas asfálticas mornas apresentaram valores próximos aos observados nas misturas asfálticas quentes de referência, isto é, sem adição do aditivo surfactante. Para o caso do CAP 30-45 o MR oscilou entre 3.000MPa e 3.500MPa, enquanto que para a mistura asfáltica com ligante asfáltico modificado por borracha os valores de MR obtidos foram de 2.000MPa.

2.2.1.2. Módulo Dinâmico

O módulo dinâmico vem sendo investigado como substituto do ensaio de módulo de resiliência desde a década de 1960. A vantagem de incluir os efeitos da temperatura e do tempo de carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos faz com que este parâmetro venha sendo utilizado preferencialmente no exterior. Tanto as características elásticas quando as viscoelásticas podem ser obtidas por meio deste ensaio.

No ensaio de módulo dinâmico, de acordo com a norma AASHTO TP 62-07, aplica-se uma carga de compressão axial em corpos de prova cilíndricos de concreto asfáltico. Nesse ensaio é obtida a resposta viscoelástica do material devido ao carregamento do tipo sinusoidal, em termos de Módulo Dinâmico (E^*) e ângulo de fase (δ).

O Módulo Dinâmico (E^*) é um indicador da rigidez da mistura asfáltica e é o valor absoluto da relação entre o pico de tensão e o pico de deformação recuperável sob carregamento sinusoidal. Já o ângulo de fase (δ) descreve a defasagem entre os picos de tensão e os de deformação da mistura asfáltica. Um material puramente elástico apresenta ângulo de fase nulo, enquanto que os materiais puramente viscosos tem $\delta=90^\circ$. Assim, as misturas asfálticas apresentam valores de ângulo de fase entre 0° e 90° devido ao seu comportamento viscoelástico característico. O módulo dinâmico é calculado através da Equação 2.1.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

Equação 2.1

Onde: σ_0 = pico da tensão aplicada;

ε_0 = pico da deformação registrada.

Alavi et al. (2012) realizaram ensaios de Módulo Dinâmico em misturas asfálticas mornas com a tecnologia de zeólitas e de químicos surfactantes, para modificar um ligante asfáltico PG64-22 e também um ligante asfáltico modificado por polímero (SBS) caracterizado como PG76-22. Os resultados mostraram que, de modo geral, as misturas asfálticas mornas apresentaram valores de E^* inferiores aos observados nas misturas asfálticas quentes correspondentes.

Lavorato et al. (2011) também avaliaram a rigidez das misturas asfálticas mornas à luz do ensaio de módulo dinâmico. A mistura asfáltica quente de referência, com granulometria 12,5mm do SUPERPAVE e ligante asfáltico modificado por polímero PG64-28, apresentou valores de E^* em torno de 4.300MPa, na temperatura de 21°C e com frequência de 10Hz. Já a mistura asfáltica morna, com 0,2% de HyperTherm (em peso do ligante asfáltico) apresentou valores de E^* de 2.900MPa, na temperatura de 21°C e com frequência de 10Hz. Assim, os resultados indicaram que esse tipo de mistura apresenta valores de módulo dinâmico inferiores aos usualmente encontrados em misturas asfálticas quentes convencionais nas temperaturas elevadas de ensaio. Contudo, nas temperaturas baixas e intermediárias, a rigidez foi apenas levemente inferior quando comparada com a mistura de referência e, de acordo com os autores, essa tendência melhoraria as propriedades de resistência ao trincamento por fadiga nos pavimentos construídos com misturas asfálticas mornas.

Copeland et al. (2010) realizaram um estudo para avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas quentes e mornas, com tecnologia de espumejamento de asfalto, contendo diversas porcentagens de pavimento asfáltico reciclado (*RAP, Recycled Asphalt Pavement*). Os autores notaram que o módulo dinâmico das misturas asfálticas mornas foram muito similares às observadas na mistura asfáltica convencional, para baixos teores de RAP. Já a mistura asfáltica morna com elevado teor de RAP apresentou valores inferiores de E^* , principalmente para temperaturas intermediárias e elevadas do ensaio. Os valores

de E^* na frequência de 1Hz e na temperatura de ensaio de 21,1°C foram aproximadamente 9.000 MPa, considerando que a mistura tinha uma granulometria correspondente à faixa 12,5mm do SUPERPAVE (*Superior Pavement Design*), e ligante asfáltico caracterizado como PG 52-22.

You et al. (2011), avaliaram também o comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas com a tecnologia Aspha-min®, Advera®, Cecabase RT® e Sasobit®, por meio do ensaio de módulo dinâmico, em comparação com uma mistura asfáltica quente de referência com granulometria 12,5mm do SUPERPAVE. O ligante asfáltico caracterizado como PG64-28 foi utilizado para dosagem das misturas asfálticas no compactador giratório do SUPERPAVE.

No caso da mistura asfáltica morna com Aspha-min®, que é um tipo de zeólita hidratada, foram utilizados teores de 0,3% e 0,5% em peso com relação à massa total da mistura. Na caracterização do ligante asfáltico modificado com o aditivo morno, não foram notadas diferenças na caracterização, com relação ao ligante asfáltico sem modificação. A mistura asfáltica morna com 0,5% de Aspha-min®, apresentou valores de módulo dinâmico superiores aos obtidos na mistura asfáltica quente de controle, o que de acordo aos autores, indicaria maior resistência à deformação permanente.

O aditivo morno Advera® também é um tipo de zeólita hidratada e no estudo de You et al. (2011) foi empregado na proporção de 0,25% em peso com relação à massa da mistura asfáltica. O gráfico de curva mestre apresentado pelos pesquisadores mostra que as misturas asfálticas mornas com Advera® apresentam valores de E^* inferiores aos módulos obtidos na mistura asfáltica quente de referência.

O aditivo morno Sasobit® é uma tecnologia morna dentro do grupo das ceras orgânicas. No estudo de You et al. (2011), foram estudadas misturas asfálticas mornas com adição deste aditivo nos teores de 0,5%, 1,5% e 3,0% em peso com relação à massa do ligante asfáltico caracterizado como PG52-34. Os resultados de ensaio de módulo dinâmico mostraram que a mistura asfáltica morna com 3,0% de Sasobit®, foi a que apresentou maiores valores de E^* , inclusive em relação a mistura asfáltica quente de controle. Já as outras misturas com teores menores do

aditivo, apresentaram valores similares e inferiores, quando comparados com a mistura asfáltica quente de controle.

No caso do aditivo morno Cecabase RT®, que é um líquido químico patenteado, foi utilizado também um ligante asfáltico PG58-34 com incorporação de 0,20%, 0,35% e 0,50% do aditivo. O valor de módulo dinâmico obtido por You et al. (2011) nessas misturas asfálticas mornas foi 40% inferior ao valor de E^* observado na mistura asfáltica quente de controle.

Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo dos valores de E^* obtidos por You et al. (2011) para as diversas tecnologias mornas estudadas e para a mistura asfáltica de controle. Vale notar que as misturas asfálticas mornas nesse estudo foram misturadas e compactadas com redução de temperatura de 35°C.

Tabela 2.1: Valores de Módulo Dinâmico (E^*) na temperatura de 21°C e frequência de 10Hz. FONTE: YOU ET AL. (2011)

Mistura Asfáltica	E^* (MPa)
Controle	4.700
Sasobit (3%)	3.900
Advera (0,35%)	1.500
Cecabase (0,5%)	1.300
Espumejamento	1.400

Mogawer et al. (2012), avaliaram diversas propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas para seu emprego em camadas finas de pavimentos de alto desempenho.. A tecnologia morna utilizada nesse estudo foi do tipo cera orgânica com o produto chamado SonneWarmix, no teor de 1,0%. O ligante asfáltico empregado nas misturas asfálticas foi um PG70-22+7,5%SBS da Kraton. Nas misturas foi também incorporado 40% de RAP, para avaliar o potencial do reaproveitamento deste material nesse tipo de misturas asfálticas. De modo geral, os autores observaram que a adição da SonneWarmix reduziu o módulo dinâmico, tanto da mistura asfáltica de controle como na mistura asfáltica com RAP. Os autores salientam que a diminuição do valor do E^* é mais notório naquelas

misturas asfálticas que se apresentaram com maior valor de rigidez sem a adição do aditivo morno.

As tecnologias Advera®, Evotherm® e Sasobit®, foram testadas por Porras et al. (2012) no ensaio de módulo dinâmico. Os autores realizaram o ensaio em corpos de prova antes e depois de serem condicionados por ciclos de congelamento, para avaliar por meio deste parâmetro, a suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas mornas. Os valores do módulo dinâmico das misturas asfálticas mornas sem condicionamento oscilaram de 2.400 MPa até 3.300, na temperatura de 21,1°C com frequência de 10Hz. Após o primeiro ciclo de congelamento as misturas asfálticas mornas apresentaram reduções do E^* muito similares às reduções observadas na mistura asfáltica quente utilizada como referência naquele estudo, em torno de 17%. Já após o terceiro ciclo de congelamento, a redução do módulo dinâmico nas misturas asfálticas mornas e na mistura asfáltica quente oscilou de 27% até 47%, com relação aos valores de E^* obtidos antes do condicionamento.

Al-Qadi et al. (2012), avaliaram o emprego dos aditivos mornos Evotherm® e Sasobit® em misturas asfálticas do tipo SMA. O ligante asfáltico utilizado nesse estudo foi caracterizado como um PG64-22 modificado por borracha. Para avaliar a rigidez das misturas asfálticas mornas os autores utilizaram o módulo dinâmico, na temperatura de 25°C com frequência de carregamento de 10 Hz, executado nas misturas asfálticas após diversos tempos de cura. Aos 7 dias de cura na temperatura ambiente, a mistura asfáltica quente de referência apresentou valores em torno de 5.000MPa, enquanto que a mistura com Evotherm® teve um módulo dinâmico próximo a 4.800MPa e os corpos de prova com Sasobit® apresentaram valores de E^* em torno de 5.300MPa.

Vavrik et al. (2010) realizaram ensaios de módulo dinâmico em uma mistura asfáltica quente do tipo SMA e em uma mistura asfáltica morna com Evotherm® 3G. O ligante asfáltico empregado em todas as misturas asfálticas desse estudo foi caracterizado como PG76-28 modificado por borracha. Na temperatura do ensaio de 20oC e frequência de 10Hz os autores encontraram valores de E^* de 6.145 MPa para a mistura asfáltica quente de referência e de 7.735 MPa para a mistura asfáltica morna. Contudo, a curva mestre obtida para diferentes frequências das

duas misturas asfálticas testadas, mostram que não há diferença significativa no valor do módulo dinâmico.

2.2.1.3. Rigidez na flexão de viga apoiada em quatro pontos

Jones et al. (2010) estudaram misturas asfálticas mornas com granulometria do tipo Open-Graded Friction Course (OGFC), produzidas com a tecnologia Rediset®. Os autores realizaram ensaios de flexão de viga apoiada em quatro pontos em vigotas da forma convencional e também em vigotas condicionadas para avaliar o efeito do dano por umidade. Para isso, as vigotas foram submetidas à vácuo para preencher 70% dos vazios, e após esse procedimento, foram conservadas durante 24 horas em banho Maria na temperatura de 60°C. Seguidamente foram imersas durante 2 horas em banho Maria na temperatura de 20°C e finalmente foram retiradas do banho e conservadas em sacos plásticos durante 24 horas até execução do ensaio de flexão de viga.

Dois níveis de tensão foram fixados para execução do ensaio, 200 e 400 microstrains. A rigidez inicial observada, não foi dependente desse nível de tensão, tanto para os CPs condicionados como para aqueles testados na condição seca. Tampouco foi notada diferenças na rigidez entre a condição seca e a condição saturada dos corpos de prova, nas misturas asfálticas mornas com Rediset®. Essas misturas apresentaram valores de rigidez em torno de 4.500MPa nas duas condições, na temperatura de ensaio de 20°C. Jones et al. (2010), concluem que os valores de rigidez observados nas misturas asfálticas mornas são muito similares aos valores notados na mistura asfáltica quente de referência.

Vavrik et al (2010) também utilizaram o ensaio de flexão de viga para avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com Evotherm® e granulometria do tipo SMA. Nesse ensaio, os autores obtiveram valores do módulo de rigidez que oscilaram entre 3.900MPa e 4.300MPa.

No estudo de You et al. (2011), descrito anteriormente, também foi obtido o parâmetro rigidez na flexão de viga apoiada em quatro pontos. De modo geral, os autores notaram redução do valor da rigidez na flexão das misturas asfálticas mornas, com relação à mistura asfáltica quente de referência.

Jenkins et al. (2011), avaliaram as propriedades de fadiga e rigidez na flexão de misturas asfálticas mornas com diversas tecnologias. Para isso utilizaram faixas granulométricas usualmente utilizadas em revestimentos e bases de pavimentos da República da África do Sul. Usualmente, nos novos projetos daquele país, considera-se o reaproveitamento de 10% a 20% de pavimento asfáltico reciclado (RAP). Na Tabela 2.2, são apresentados alguns valores de rigidez obtidos na flexão de viga apoiada em quatro pontos obtidos nesse estudo, na temperatura de 20oC e frequência de 10Hz.

Tabela 2.2: Valores de rigidez na flexão de viga apoiada em quatro pontos, na temperatura de 20oC e frequência de 10Hz. FONTE: JENKINS ET AL. (2011)

Aditivo Morno	Rigidez Na Flexão (MPa) (MPa)	
	Ligante Asfáltico 60/70 +10% RAP	Ligante Asfáltico 80/100 com Plastômero + 20% RAP
Controle	10.850	8.036
Espumejamento	7.886	9.319
Sasobit®	6.641	5.820
Rediset™	4.910	7.798

2.2.2. Propriedades de fadiga

As propriedades de fadiga também têm sido estudadas nas misturas asfálticas mornas para prever o comportamento em campo dos materiais. Lavorato et al. (2011), por exemplo, utilizaram o ensaio de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos para verificar o comportamento de misturas asfálticas mornas. Os autores comprovaram que as misturas desse tipo apresentam uma melhora na previsão de vida de fadiga, quando comparadas com as misturas asfálticas quentes convencionais.

You et al. (2011) avaliaram a fadiga de misturas asfálticas mornas utilizando diversas tecnologias de aditivos mornos com o ensaio de flexão de viga apoiada em

quatro pontos. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas mornas com aditivos Advera® e Cecabase RT® tendem a ter uma vida de fadiga superior, quando comparadas com a mistura asfáltica quente de referência. Já as misturas asfálticas mornas com o aditivo Sasobit®, não mostraram diferenças na expectativa de vida de fadiga com relação à mistura asfáltica de controle.

Vavrik et al. (2010) realizaram um estudo em campo para avaliar o emprego do Evotherm® em misturas asfálticas do tipo SMA com um ligante asfáltico modificado por borracha, caracterizado como PG 76-28. As misturas asfálticas foram produzidas da seguinte maneira:

- SMA1: mistura asfáltica SMA quente de referência; com temperatura de usinagem de 165°C e temperatura de compactação de 150°C.
- SMA2: mistura asfáltica SMA com Evotherm produzida com as mesmas temperaturas utilizadas na SMA1.
- SMA3: Mistura asfáltica SMA com Evotherm; com temperatura de usinagem de 132°C e temperatura de compactação de 110°C.

As misturas asfálticas produzidas dessa forma foram coletadas em usina para moldagem de corpos de prova prismáticos utilizados no ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos. Os resultados desse ensaio mostraram uma previsão de vida de fadiga superior para as misturas SMA2 e SMA3, quando comparadas com a mistura SMA1. Vavrik et al. (2010) salientam que, apesar da fadiga não ser relevante para misturas do tipo SMA, este comportamento poderia ser traduzido como uma melhoria na resistência à reflexão de trincas. Contudo, os autores salientam que o comportamento à fadiga obtido em laboratório é apenas um indicativo.

As misturas asfálticas mornas, além dos benefícios econômicos e ambientais, permitem empregar maiores quantidades de pavimento asfáltico reciclado (RAP). Zhao et al. (2012), por exemplo, avaliaram a possibilidade de incrementar a porcentagem de RAP, e adicionaram em misturas asfálticas mornas teores de 30%, 40% e 50%. Nesse estudo, os autores empregaram o ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos para verificar as características de fadiga das misturas asfálticas mornas com RAP. O ligante asfáltico utilizado nesse estudo foi

caracterizado como PG64-22 e, vale salientar que, o teor utilizado nas misturas foi variável de acordo com a porcentagem de RAP adicionado.

Os resultados obtidos por Zhao et al. (2012) mostraram que teores elevados de RAP em misturas asfálticas quentes convencionais reduzem a vida de fadiga, contudo, o emprego de temperaturas inferiores para produção das misturas asfálticas mornas incrementa a previsão de fadiga. Segundo os autores, as misturas asfálticas mornas com altos teores de RAP poderiam apresentar um melhor desempenho de fadiga nos casos em que se garanta a interação entre o novo ligante asfáltico adicionado e o ligante asfáltico do RAP.

Jones et al. (2010) avaliaram em laboratório as propriedades mecânicas em misturas asfálticas mornas com o emprego da tecnologia morna AkzoNobel Rediset™. O ensaio de flexão de viga foi também utilizado nesse estudo para investigar as propriedades de fadiga dessas misturas com granulometria do tipo *Open-Graded Friction Course (OGFC)*. O aditivo morno foi adicionado no teor de 2,0% em peso no ligante asfáltico caracterizado como PG64-10. Os resultados do ensaio mostraram que não há diferença significativa na previsão de vida de fadiga entre a mistura asfáltica quente de controle e a mistura asfáltica morna com Rediset™.

2.2.3. Susceptibilidade ao dano por umidade e adesividade

O dano por umidade nas misturas asfálticas pode ser causado tanto pela perda de adesividade do ligante asfáltico com a superfície dos agregados como pela perda de coesão do mastique asfáltico devido à interação com a umidade. A produção de misturas asfálticas mornas com temperaturas inferiores às convencionais denotou algumas preocupações do desempenho, relacionadas à deformação permanente e susceptibilidade ao dano por umidade induzida destas misturas. Vale salientar que a magnitude dos danos por umidade induzida são dependentes das condições do meio ambiente e das condições de carregamento do tráfego veicular.

A redução de resistência à deformação permanente, segundo diversos estudos, deve-se à redução da oxidação do ligante asfáltico durante a produção. Já com relação aos mecanismos que aumentam a suscetibilidade ao dano por umidade das misturas asfálticas mornas, não existem muitos relatos que descrevam os motivos

exatos. Atribui-se, por exemplo, que a redução de temperaturas pode afetar a secagem dos agregados antes da mistura, prejudicando a adesão do ligante asfáltico nos agregados e, portanto, a rigidez da mistura asfáltica.

A susceptibilidade ao dano por umidade nas misturas asfálticas é estudado principalmente através do ensaio de ruptura à tração indireta por compressão diametral, de acordo a norma *AASHTO T 283-03*. O Centro Nacional para a Tecnologia do Asfalto (*NCAT, National Center for Asphalt Technology*), estudou várias tecnologias de misturas asfálticas mornas e observou que essas misturas apresentaram valores inferiores de resistência à tração, quando comparadas com a mistura asfáltica quente de referência, (HURLEY E PROWEL, 2005a; HURLEY E PROWEL, 2005b). Contudo, nesses estudos verificou-se que o emprego de melhoradores de adesividade incrementou a resistência ao dano por umidade das misturas asfálticas mornas.

Mogawer et al. (2011) avaliaram a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas mornas por meio do equipamento de trilha de roda Hamburgo (*Hamburg wheel-tracking device*). Os autores avaliaram as misturas asfálticas mornas com diversos níveis de envelhecimento, em função das temperaturas de usinagem e compactação. Os resultados dos ensaios mostraram que a resistência ao dano por umidade das misturas asfálticas mornas aumentou conforme foi incrementada a temperatura de produção.

You et al. (2011) estudaram também a suscetibilidade ao dano por umidade de misturas asfálticas mornas com diferentes aditivos, conforme descrito anteriormente, por meio do ensaio de dano por umidade induzida (DUI). De modo geral esses autores verificaram que as misturas asfálticas mornas apresentam uma boa razão de resistência à tração (RRT), mas os valores absolutos de resistência à tração (RT) tendem a serem inferiores aos obtidos em misturas asfálticas quentes convencionais.

Alavi et al. (2012) investigaram a influência das baixas temperaturas de produção das misturas asfálticas mornas nas propriedades de adesividade do ligante asfáltico e a suscetibilidade ao dano por umidade. Para isso, os pesquisadores utilizaram um novo método experimental chamado *Bitumen Bond Strength – BBS* (tradução livre: resistência de adesividade do ligante asfáltico). As análises

estatísticas realizadas nos resultados mostraram que esse ensaio pode ser efetivo para avaliar as características de adesividade do ligante asfáltico nos agregados. De modo geral, os autores concluíram que o emprego de baixas temperaturas de produção das misturas asfálticas mornas reduziu o potencial de resistência ao dano por umidade. Contudo, os autores afirmam que o emprego de aditivos melhoradores de adesividade pode solucionar os efeitos prejudiciais de temperaturas menores de produção.

Porras et al. (2012) também realizaram ensaios relacionados à suscetibilidade de dano por umidade em misturas asfálticas mornas com tecnologias Advera®, Evotherm® e Sasobit®. Para isso, os autores realizaram ensaios de resistência à tração em corpos de prova condicionados a vários ciclos de congelamento e descongelamento. Os resultados mostraram que a razão de resistência à tração (RRT) foi superior a 80% nas misturas asfálticas mornas preparadas com as três tecnologias empregadas, isto é, em nenhum caso foi necessário o uso de melhoradores de adesividade.

Sabe-se muito bem que, o dano por umidade nas misturas asfálticas altera as propriedades mecânicas. Assim, Xu (2011) investigou a influência da suscetibilidade à umidade no módulo dinâmico de misturas asfálticas mornas. A mistura asfáltica nesse estudo teve graduação densa e um ligante asfáltico caracterizado como PG64-28. O aditivo morno empregado foi o Sasobit®, adicionado em 1,5% em peso no ligante asfáltico na temperatura de 125°C. Para avaliar o efeito da umidade, os agregados usados na compactação dos CPs foram condicionados para obter a condição seca e saturada. Os corpos de prova utilizados para o ensaio de módulo dinâmico também foram saturados antes de serem submetidos ao ensaio. De modo geral, as curvas mestre para os diversos tipos de condicionamento utilizados mostraram que o módulo dinâmico tende a ser menor nos casos em que foram utilizados agregados úmidos assim como nos casos em que os corpos de prova foram saturados previamente ao ensaio.

Zhao et al. (2012) também avaliaram a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas mornas com pavimento asfáltico reciclado (RAP). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) foi utilizado para realizar esta avaliação. Nos resultados de razão de resistência à tração (RRT), os autores notaram que, a

incorporação do RAP nas misturas asfálticas mornas melhora a suscetibilidade à umidade, quando comparada com os resultados de RRT obtidos nas mesmas misturas sem RAP.

2.2.4. Deformação permanente

A deformação permanente se caracteriza pelo surgimento de depressões longitudinais devido às solicitações de carga, podendo ou não ocorrer elevações laterais ao longo das trilhas de roda. A deformação permanente é um fenômeno importante a ser estudado, uma vez que pode trazer desconforto aos motoristas e ainda causar sérios riscos à segurança dos usuários das vias devido ao acúmulo de água de chuva e a hidroplanagem sobre a pista.

A camada de revestimento asfáltico pode contribuir de maneira expressiva para este fenômeno, seja decorrente de uma densificação complementar (ocasionada pelo carregamento repetido), seja por cisalhamento, associada à deformação que ocorre por fluência das misturas asfálticas devido à presença do ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De maneira geral, a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas depende de muitos fatores, que podem estar associados a:

- (i) Agregados: principalmente com relação a sua granulometria (devido ao intertravamento ou capacidade de transmitir a carga pelo esqueleto sólido), forma e textura dos grãos;
- (ii) Ligantes asfálticos: relacionado à sua composição ou natureza, reologia, viscosidade, e susceptibilidade térmica;
- (iii) Misturas asfálticas: em função do teor de ligante, volume de vazios, grau de compactação, espessura do revestimento, entre outros.

Devido à viscoelasticidade do ligante asfáltico, a temperatura também é um fator que influi significativamente no que se refere à deformação permanente das misturas asfálticas, além do tipo, frequência e magnitude dos carregamentos. De maneira geral, no caso dos concretos asfálticos densos, a deformação permanente cresce de forma praticamente exponencial com o aumento da temperatura. O clima tropical brasileiro, normalmente com altas temperaturas, pode potencializar estas

ocorrências, principalmente se o revestimento foi executado com ligante asfáltico em excesso ou se este ligante tem alta susceptibilidade térmica, ou ainda se sua consistência nessas temperaturas elevadas for baixa (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Com a redução de temperatura de usinagem na produção de misturas mornas acredita-se que possa ocorrer menor envelhecimento/enrijecimento do ligante asfáltico, refletindo em menor trincamento no futuro. Por outro lado, neste caso poderia haver menor estabilidade da mistura asfáltica, levando a uma maior propensão à formação de afundamentos plásticos (NEWCOMB, 2006; WARGHA FILHO, 2013). Dentro deste contexto, verifica-se a importância de se avaliar também o potencial à deformação permanente em pesquisas com misturas mornas e semimornas.

Flow Number

O NCHRP Report 465, dos Estados Unidos, recomenda o emprego do ensaio de *Flow Number* para avaliar o potencial de deformação permanente de misturas asfálticas. No ensaio é aplicado um carregamento do tipo *haversine* e a deformação acumulada é registrada em função do número de ciclos (WITCZAK *et al.* 2002). Um ciclo no ensaio consiste na aplicação do carregamento durante 0,1 segundo com um tempo de descanso de 0,9 segundo. A curva de deformação permanente cíclica é geralmente definida por três estágios: primário, secundário e terciário. A taxa de deformação permanente decresce no primeiro estágio e aumenta novamente, de forma muito rápida, no terceiro estágio. O valor de *Flow Number* é definido como o número de carregamentos necessários para dar início ao terceiro estágio. O ensaio de *Flow Number* usualmente é concluído quando o corpo de prova acumula 5% de deformação ou quando são aplicados mais que 10.000 ciclos de carregamento.

De acordo com NCHRP 691, *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*, o ensaio de *Flow Number* também é recomendado para avaliar o potencial de deformação permanente das misturas asfálticas mornas. Nesse relatório descreve-se que as misturas asfálticas mornas apresentam usualmente valores de *Flow Number* inferiores aos obtidos em misturas asfálticas quentes, para a mesma granulometria e ligante asfáltico, em função da redução do envelhecimento do ligante asfáltico devido ao emprego de temperaturas inferiores. Ainda nesse relatório recomenda-

se simular o envelhecimento da mistura asfáltica morna durante quatro horas em estufa na temperatura de 135°C, para preparação dos corpos de prova do ensaio.

Os resultados obtidos no estudo realizado por Copeland et al. (2010) também indicam que as misturas asfálticas quentes convencionais apresentam, de modo geral, melhor resistência à deformação permanente do que a mistura asfáltica morna, à luz dos resultados obtidos no ensaio de *Flow Number*.

Jones et al. (2011) realizaram uma avaliação em campo para comparar os resultados obtidos da construção de um trecho com uma mistura asfáltica quente convencional e uma mistura asfáltica morna com AquaBlack™, que é um sistema de espumejamento de asfalto desenvolvido pela *Maxam Equipment*. O ensaio de *Flow Number* nesse estudo foi utilizado tanto da forma confinada como não confinada. Em ambos os casos, os resultados do ensaios mostraram não haver diferenças estatísticas entre as misturas asfálticas testadas. Isto é, o potencial de deformação permanente das misturas asfálticas mornas seria o mesmo do que das misturas asfálticas quentes convencionais.

No estudo de Williams et al. (2011) foram estudadas as misturas asfálticas mornas com tecnologia Evotherm® 3G, Sasobit® e Double Barrel® (espumejamento de asfalto). Nesse estudo, os corpos de prova, tanto de mistura asfáltica quente como morna, utilizados no ensaio, foram preparados da seguinte maneira:

- MS1: Massa asfáltica da usina compactada em laboratório seca,
- MS2: Massa asfáltica da usina compactada na usina seca,
- MW1: Massa asfáltica da usina compactada em laboratório úmida,
- MW2: Massa asfáltica da usina compactada na usina úmida.

A preparação dos corpos de prova na condição úmida seguiu o procedimento recomendado pela AASHTO T283. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas quentes apresentam maior valor de *Flow Number* que as misturas asfálticas mornas, com exceção da mistura MS2 com Sasobit®, que apresentou valores levemente superiores à mistura asfáltica quente de referência. Os autores notaram que a tecnologia com Double Barrel® foi a que apresentou maiores valores de *Flow Number*. Já com relação ao efeito de condicionamento úmido,

notou-se um incremento do valor deste parâmetro devido ao processo de saturação dos vazios.

Al-Qadi et al. (2012), também utilizaram o ensaio de *Flow Number* para avaliar o emprego de Evotherm® e Sasobit® em misturas asfálticas do tipo SMA. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas mornas com Evotherm® apresentam potencial de deformação permanente muito parecida ao observado na mistura asfáltica quente usada como referência. Já a mistura asfáltica morna com Sasobit® apresentou resistência consideravelmente maior ao desenvolvimento de deformação permanente.

Porras et al. (2012) observaram que as misturas asfálticas mornas produzidas com a tecnologia Evotherm® foram as que apresentaram o menor número de *Flow Number*, seguidas pela tecnologia Advera® e Sasobit®. Vale lembrar que um número elevado desse parâmetro é um indicativo de que a mistura asfáltica apresentará maior resistência à deformação permanente no campo. Contudo os autores salientam que essa ordem pode ser facilmente alterada em função das diversas variáveis na produção dos corpos de prova.

2.3. EMISSÕES DE POLUENTES NA PAVIMENTAÇÃO

2.3.1. Emissões de gases de efeito estufa

Nos últimos anos a preocupação com o meio ambiente tem sido cada vez mais evidente. Com a adoção do Protocolo de Quioto em 1997, diversos segmentos da sociedade vêm buscando fomentar atividades que contribuam com a redução de emissões de gases de efeito estufa. O setor rodoviário tem procurado seguir esta mesma tendência, desenvolvendo novas tecnologias no âmbito da pavimentação com o objetivo de contribuir com as questões ambientais. A preocupação com as emissões de gases de efeito estufa se deve ao fato de que se acredita que o aumento da temperatura média global do planeta desde meados do século XX seja uma consequência do crescimento da concentração destes elementos na atmosfera por origem antropogênica (CGEE, 2008).

O dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás de efeito estufa antropogênico, quando em 2004 representava 77% do total das emissões dos gases de efeito estufa deste tipo. A propósito, entre 1970 e 2004, as emissões de GEE em todo o mundo aumentaram cerca de 80%, passando de 21 para 38 gigatoneladas de CO₂ equivalente (IPCC, 2007). No Brasil, as emissões de GEE cresceram aproximadamente 60% entre 1990 e 2005, ano em que o país emitiu 2,2 gigatoneladas de CO₂ equivalente. Todavia, em 2009, o Brasil registrou uma queda de 33,6% em relação a 2004, ano com o maior nível de emissões desde 1990 (2,6 gigatoneladas), sobretudo devido à redução do desmatamento na Amazônia (FBMC, 2010).

Como se sabe que a geração de energia pela queima de combustíveis fósseis (como petróleo, gás natural e carvão mineral) está entre as principais atividades humanas que emitem gases de efeito estufa, especialmente CO₂ (CGEE, 2008; COOPER *et al.*, 2000), as temperaturas mais baixas das misturas mornas e semimornas podem reduzir a emissão de tais poluentes, já que parte do combustível que seria utilizado no processo de mistura deixa de ser queimado. A propósito, a maior parte das emissões gasosas é resultado da combustão durante o processo de secagem e aquecimento dos agregados na usinagem (PROWELL e HURLEY, 2007).

Devido à diminuição das emissões de CO₂ com as misturas mornas e semimornas, a pavimentação com estes materiais poderia ser inserida em projetos para a obtenção de créditos de carbono.

A literatura aponta alguns números que estariam relacionados à redução das emissões de CO₂ quando da opção por misturas mornas ou semimornas. Rühl (2008), por exemplo, calcula que se na Alemanha são produzidas 60 milhões de toneladas de misturas asfálticas convencionais por ano, que por sua vez geram 1,5 milhão de toneladas de CO₂, as misturas asfálticas mornas poderiam levar a uma diminuição de aproximadamente 10% dos níveis de CO₂ por ano no país.

Já Olard (2008) comenta que na França a produção anual de misturas a quente é da ordem de 45 milhões de toneladas, sendo realizada em usinas movidas a gás natural (40%) e a diesel (60%). Assim, sabendo-se que as emissões de CO₂ em usinas a gás natural são de cerca de 200 kg/MWh e em usinas a diesel são de aproximadamente 270 kg/MWh, no caso da tecnologia semimorna LEA, por

“Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas”

exemplo, que permite reduzir estes níveis em cerca de 9,7 kg/t, as emissões de CO₂ seriam diminuídas em cerca de 450.000 toneladas por ano.

Hassan (2009) estudou o ciclo de vida de uma mistura morna WAM-Foam, em comparação com uma mistura a quente, e chegou à conclusão de que a primeira mostrou menores impactos ambientais no que se refere à poluição do ar, esgotamento de combustíveis fósseis e formação de *smog*, pois foram observados decréscimos de 24%, 18% e 10%, respectivamente. No geral, verificou-se que a utilização da mistura morna implicou em uma redução de 15% nos impactos ambientais em relação à mistura a quente.

Entretanto, cabe mencionar que, além da temperatura, o tipo e o nível de emissão de poluentes em usina também dependem de outros fatores, como combustível utilizado, tipo de usina, teor de umidade dos agregados e utilização ou não de material asfáltico fresado (PROWELL e HURLEY, 2007).

2.3.2. Emissões asfálticas

O processo de pavimentação asfáltica ainda envolve um outro tipo de emissão que é de importante consideração, e no qual será dado enfoque na presente pesquisa: as emissões asfálticas. Ao serem aquecidos os produtos asfálticos emitem vapores (visivelmente percebidos em temperaturas de cerca de 150°C, segundo Bernucci *et al.*, 2008) que, em contato com o ar mais frio se condensam, sendo então denominados fumos de asfalto (RUBIO *et al.*, 2012). A composição química dos vapores e fumos de asfalto é variável e depende de alguns fatores como origem do petróleo, tipo de ligante, tempo/velocidade de usinagem e nível de temperatura (NIOSH, 2000), mas sabe-se que estes elementos contêm poluentes na forma de material particulado e de gases (GAUDEFRY *et al.*, 2008; LA ROCHE *et al.*, 2008).

De acordo com Baird (1999), o material particulado engloba um conjunto de poluentes sólidos e líquidos, que se mantém suspenso na atmosfera devido à sua pequena dimensão, com diâmetros que variam entre cerca de 0,002 µm a 100 µm (para se ter uma ideia, moléculas gasosas tipicamente tem dimensão de 0,0001 a 0,001 µm). No todo, as partículas sólidas ou líquidas dispersas ao ar e com diâmetro menor que 100 µm são denominadas aerossóis (BAIRD, 1999).

Nos monitoramentos da qualidade do ar, a concentração de particulados pode ser apresentada como partículas totais em suspensão (PTS), congregando todos os aerossóis. No caso das partículas grossas (diâmetro entre 2,5 e 10 μm) de PTS, quando estas são inaladas, o nariz e a garganta ainda são capazes de filtrá-las de maneira eficiente, geralmente não permitindo que cheguem aos pulmões. Mas quando se trata de partículas finas (diâmetro até 2,5 μm), normalmente estas conseguem chegar aos pulmões, podendo ser adsorvidas nas superfícies celulares e causando danos à saúde (BAIRD, 1999).

Por outro lado, na fase gasosa dos poluentes advindos das emissões asfálticas têm-se os compostos orgânicos voláteis (COVs), como citam Gaudefroy *et al.* (2008). A propósito, sabe-se que os derivados de petróleo são responsáveis pela emissão de quantidades significativas destes elementos (COOPER *et al.* 2000).

Os COVs são compostos que se volatilizam facilmente à pressão atmosférica, pois possuem ponto de ebulição de até 130°C, e contribuem na formação de oxidantes fotoquímicos, pois reagem com os NOx na atmosfera e levam à formação de ozônio (BAIRD, 1999; CONAMA, 2006). Além disso, alguns COVs são ainda considerados tóxicos ou carcinogênicos (COOPER *et al.* 2000).

Os COVs somados aos aerossóis orgânicos (particulados) formam o grupo dos chamados compostos orgânicos totais (COTs). O nível de emissões asfálticas de COTs pode ser influenciado pela agitação a que o material asfáltico é submetido. Isto pôde ser verificado em um estudo laboratorial desenvolvido por La Roche *et al.* (2008), onde se notou que a intensidade das emissões de COTs aumentou à medida que a velocidade de mistura também foi incrementada. Os autores atribuem esta ocorrência ao fato de que o processo de agitação leva à uma movimentação interna do asfalto, fazendo com que haja trocas entre o ar e o ligante quente na interface destes, que seria o local onde a volatilização dos COTs ocorre. Com o tempo, o montante de COTs emitidos se exaure sob as altas temperaturas, mas quanto mais rápida for a agitação do asfalto, mais rápido isto ocorrerá.

Com relação a limites recomendáveis de exposição às emissões asfálticas, pode haver variações, especialmente por não se saber exatamente quais são os reais efeitos dos poluentes em humanos e, assim, as legislações podem ser mais

restritivas em um local em relação a outro. Em 1977, nos Estados Unidos, o NIOSH fez uma revisão dos dados disponíveis na época sobre a exposição ocupacional ao asfalto e aos seus fumos e verificou que os principais efeitos adversos à saúde eram irritação das membranas do revestimento ocular e das mucosas do trato respiratório. Além disso, embora algumas evidências obtidas em estudos com animais tivessem indicado que o asfalto mantido sobre a pele por longos períodos de tempo poderia resultar em carcinomas localizados, não havia relatos comparáveis de tais efeitos, advindos dos asfaltos e de seus fumos, em humanos. Com isto, o NIOSH recomendou que a exposição ocupacional a estes elementos fosse controlada, de forma que os operários não ficassem sujeitos às PTS em uma concentração maior do que 5 mg/m^3 de ar (chamado de REL – em inglês, *recommended exposure limit*), amostrada em um período de 15 min. Cabe mencionar que a definição do REL se baseou somente nas PTS pelo fato de não haverem mais dados até então (NIOSH, 2000).

Mas nos Estados Unidos tem-se ainda um outro limite de exposição aos fumos de asfalto, que foi definido pela ACGIH (*United States American Conference of Government Industrial Hygienists*). Esta organização limita a $0,5 \text{ mg/m}^3$ o tempo médio ponderado de exposição, particularmente das frações inaláveis que são solúveis em benzeno (SCHREINER, 2011). Segundo Ekström *et al.* (2001), os fumos de asfalto são completamente solúveis em benzeno, enquanto as PTS incluem todo material particulado coletado em filtros, como as poeiras da atmosfera, as partículas emitidas por queima de combustível em veículos, os próprios fumos de asfalto na fase aerossol, etc. O material solúvel em benzeno pode compor entre 10 a 100% das PTS, dependendo do tipo de aplicação do asfalto e das condições do local, mas a maioria das obras de pavimentação produz níveis de emissão menores que $0,3 \text{ mg/m}^3$.

Já na Alemanha, em 2000, foi estabelecido que 10 mg/m^3 seria o limite aceitável de emissões de aerossóis e de gases advindos dos asfaltos. Entretanto, cabe salientar que enquanto o limite alemão considera aerossóis e gases, sem qualquer tolerância de variação destes dois componentes com a temperatura, o limite norte-americano se refere somente à fração de aerossóis (RÜHL, 2008).

O que se sabe é que ainda não existe um protocolo internacional para amostragem e análise dos fumos provenientes de asfalto aquecido e, assim, regiões/países/companhias acabam usando diferentes procedimentos, o que dificulta a comparação de resultados. A Figura 2.2 ilustra diferentes métodos de avaliação de fumos asfálticos.

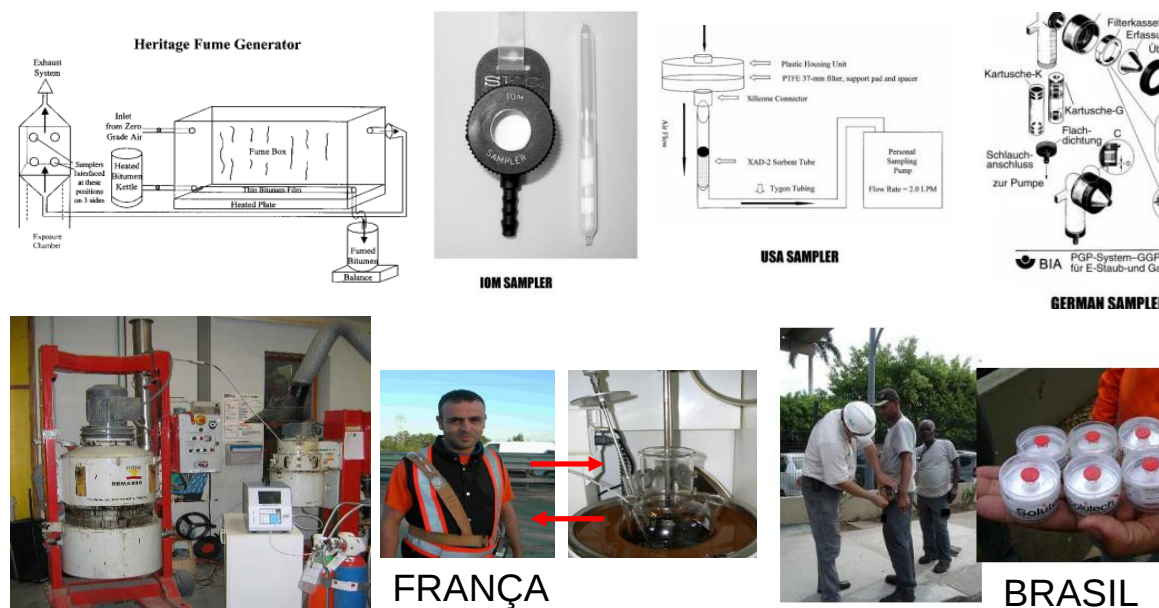


Figura 2.2: Exemplos de métodos de avaliação de fumos asfálticos em laboratório e em campo

(retirado de EKSTRÖM *et al.*, 2001; VIRANAICKEN, 2009; CRAVO *et al.*, 2010)

Ainda que a ACGIH, por exemplo, limite a fração particulada inalável dos fumos de asfalto somente com base no material captado em filtros, muitas vezes as análises laboratoriais também empregam material adsorvente para coletar os compostos voláteis que passam ou são removidos do filtro, já que a quantificação dos COTs é importante na avaliação dos compostos hidrocarbonetos presentes nos fumos de asfalto que causam irritação (EKSTRÖM *et al.*, 2001).

2.3.3. Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos - HPAs

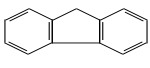
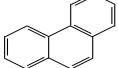
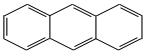
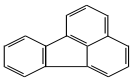
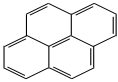
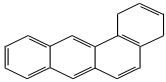
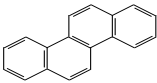
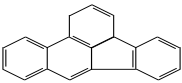
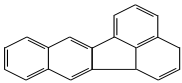
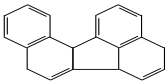
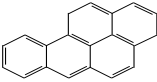
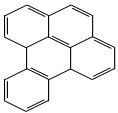
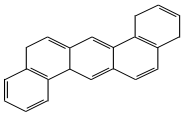
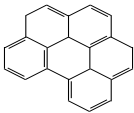
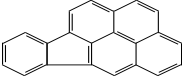
Sabe-se que os produtos asfálticos submetidos a elevadas temperaturas emitem elementos como os HPAs, cujos alguns tipos são suspeitos de serem mutagênicos

“Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas”

e/ou carcinogênicos (NIOSH, 2000; RAVINDRA *et al.*, 2008; YASSAA *et al.*, 2001; FERNANDES *et al.*, 2009). Os HPAs são resultado da combustão incompleta ou pirólise de materiais que contêm carbono e hidrogênio, possuindo ativa participação na formação de smog (BAIRD, 1999). Estes compostos estão amplamente distribuídos no ar (ainda que constituam apenas cerca de 0,1% do material particulado atmosférico), mas sua concentração em áreas urbanas é tipicamente da ordem de alguns nanogramas por metro cúbico, embora essa quantidade possa chegar a ser dez vezes maior em ambientes muito poluídos (BAIRD, 1999).

Os HPAs são compostos orgânicos que possuem dois ou mais anéis de benzeno fundidos, e constituem um dos primeiros poluentes atmosféricos identificados como possíveis carcinogênicos. Considerando-se sua estrutura física, à medida que o peso molecular aumenta (maior número de anéis aromáticos), a carcinogenicidade dos HPAs também cresce (RAVINDRA *et al.*, 2008). Segundo Fernandes *et al.* (2009), a IARC considera que os HPAs com mais de quatro anéis benzênicos possuem maior poder carcinogênico, enquanto que os compostos com menos anéis possuem características tóxicas.

Como existem preocupações com os efeitos negativos que os HPAs podem ter em humanos, a ATSDR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*) dos Estados Unidos listou 17 HPAs (Figura 2.3) com base em seu perfil toxicológico, que foram classificados como prioritários, embora os efeitos de cada HPA na saúde não sejam exatamente iguais. Com exceção do benzo[j]fluoranteno, a USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) também considera tais HPAs como prioritários. No mais, o benzo[a]pireno é o mais notório HPA, conhecido como cancerígeno (BAIRD, 1999; RAVINDRA *et al.*, 2008).

			
acenaftaleno*	acenafteno	fluoreno*	fenantreno*
$C_{12}H_8$	$C_{12}H_{10}$	$C_{13}H_{10}$	$C_{14}H_{10}$
			
antraceno*	fluoranteno*	pireno*	benzo[a]antraceno**
$C_{14}H_{10}$	$C_{16}H_{10}$	$C_{16}H_{10}$	$C_{18}H_{12}$
			
criseno**	benzo[b]fluoranteno**	benzo[k]fluoranteno	benzo[j]fluoranteno
$C_{18}H_{12}$	$C_{20}H_{12}$	$C_{20}H_{12}$	$C_{20}H_{12}$
			
benzo[a]pireno**	benzo[e]pireno	dibenzo[a,h]antraceno**	benzo[g,h,i]perileno*
$C_{20}H_{12}$	$C_{20}H_{12}$	$C_{22}H_{14}$	$C_{22}H_{12}$
			
indeno[1,2,3-c,d]pireno**			
$C_{22}H_{12}$			

* Não listado como carcinogênico humano

** Provável carcinogênico humano

Figura 2.3: HPAs prioritários, segundo ATSDR e USEPA (retirado e adaptado de Ravindra *et al.*, 2008)

Os HPAs podem se apresentar como gases ou adsorvidos em material particulado. Em geral, os HPAs mais pesados possuem baixa pressão de vapor e é por isso que estes compostos costumam não resistir por muito tempo na atmosfera como moléculas gasosas, pois acabam se condensando e sendo adsorvidos nas superfícies de material particulado sólido (BAIRD, 1999).

Dentro deste contexto, a temperatura é um fator crucial no controle das emissões asfálticas (GASTHAUER *et al.*, 2008), pois a temperatura em que os fumos são gerados afeta a proporção relativa de cada HPA nestes fumos, bem como a quantidade de vapores emitidos, e estes são fatores que influenciam nos níveis de exposição e no potencial toxicológico destes elementos (SCHREINER, 2011). Sendo assim, o potencial toxicológico dos ligantes asfálticos tem sido atribuído aos HPAs presentes em sua composição (CRAVO *et al.* 2010).

Desta forma, as misturas mornas podem contribuir para a redução da exposição ocupacional às emissões de compostos como estes, principalmente porque se acredita que os fumos asfálticos gerados em altas temperaturas sejam mais suscetíveis à formação de HPAs carcinogênicos do que os fumos produzidos em temperaturas mais amenas (NIOSH, 2000). Neste sentido, experimentos realizados por Cravo *et al.* (2010) demonstraram que asfaltos submetidos a temperaturas mais altas e em maior tempo resultaram na formação de um maior número de HPAs.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do relatório são apresentados os materiais que foram selecionados para execução dos ensaios de acordo com o interesse da Concessionária CCRNovaDutra e à disponibilidade do mercado nacional. Também são descritos os métodos de ensaios utilizados em laboratório para avaliar as misturas asfálticas estudadas.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.1.1. Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram de origem granítica e foram coletados da pedreira Riúma, no Estado de São Paulo, nas suas frações pedrisco, pó de pedra e filtro de manga interna. As granulometrias dessas frações foram realizadas de acordo com a norma AASHTO T 27 e AASHTO T11 e os resultados são apresentadas na Tabela 3.1.

Foi selecionada uma faixa granulométrica comumente utilizada pela Concessionária CCRNovaDutra denominada Gap Graded 6,0mm. As especificações dessa faixa descontínua delgada são descritas na Seção 39 do Guia de Concreto Asfáltico do Departamento de Transportes do Estado de Califórnia (Caltrans) dos Estados Unidos e estão apresentadas na Tabela 3.1.

Para atender a faixa Gap Graded selecionada, os agregados foram compostos nas proporções apresentadas na Tabela 3.1:

- Pedrisco: 67,0%
- Pó de Pedra: 30,5%
- Filtro de Manga: 1,0%
- Cal Hidratada CH-1: 1,5%

Tabela 3.1: Descrição da faixa granulométrica Gap Graded 6,0mm e granulometria dos agregados utilizados

Abertura da Peneira		FAIXA GAP RHMA 6mm		MATERIAIS				OBTIDO
No.	mm	MIN	MAX	Pedrisco	Pó de Pedra	Filtro de Manga	CAL CH I	
1/2"	12,9	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3/8"	9,52	95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4	4,8	42%	55%	11%	100%	100%	100%	42%
8	2,4	19%	32%	3%	80%	100%	100%	31%
16	1,2	16%	22%	2%	56%	100%	100%	22%
30	0,6	10%	18%	2%	39%	99%	100%	16%
50	0,3	8%	13%	1%	26%	93%	98%	12%
100	0,15	6%	10%	1%	16%	78%	98%	8%
200	0,074	4%	7%	1%	10%	39%	90%	5%
COMPOSIÇÃO				67,0%	30,5%	1,0%	1,5%	100%

Vale notar que todas as misturas asfálticas especificadas pela Concessionária CCRNovaDutra requerem o emprego de 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1. Dessa forma, a faixa granulométricas do Gap Graded 6,0mm e a curva granulométrica resultante da mistura são apresentadas na Figura 3.1.

O ensaio de desgaste por abrasão na máquina Los Angeles foi realizado na fração pedrisco dos agregados, de acordo com a norma ABNT NBR-6465. Os resultados mostraram que os agregados apresentam 28% de desgaste por abrasão, inferior a 40% que é o valor máximo recomendado para seu emprego em concreto asfáltico.

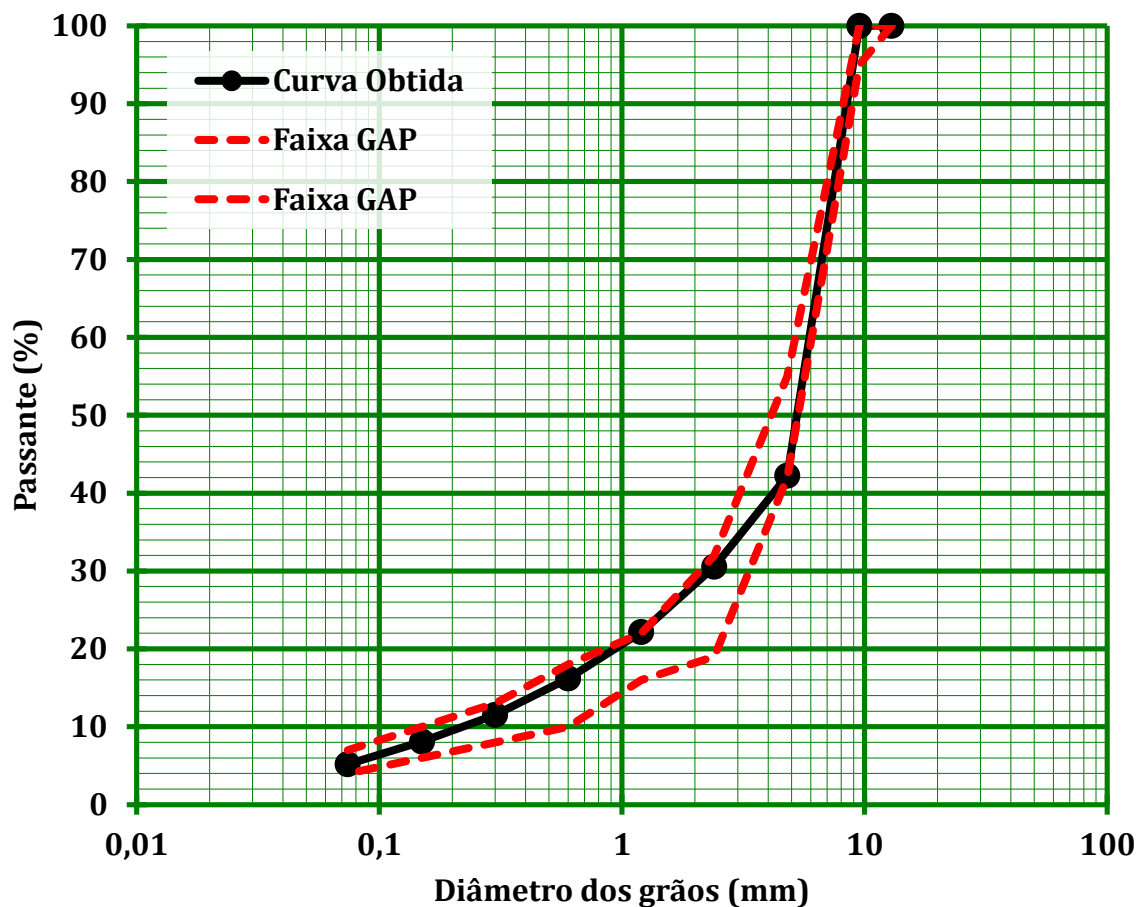


Figura 3.1: Faixa granulométrica Gap Graded 6,0mm e curva granulométrica obtida

3.1.2. Ligantes Asfálticos

A faixa granulométrica Gap Graded 6,0mm foi idealizada para ser utilizada com ligantes asfálticos modificados com borracha de pneus. Assim, neste estudo para as misturas nas quais são empregados os aditivos mornos do tipo químicos surfactantes, foi utilizado ligante asfáltico modificado com borracha (CAP-Borr) da distribuidora Greca Asfaltos (Ecoflex Pav B), com características apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Principais características do ligante asfáltico modificado por borracha (CAP-Borr)

Características	Unidades	Resultados	Método de Ensaio
Penetração 100g, 5s, 25°C	0,1mm	48	NBR 6576
Ponto de amolecimento	°C	57	NBR 6560
Viscosidade Brookfield 160°C, 20rpm, spindle3	cP	2200	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 175°C, 20rpm, spindle3	cP	1845	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 185°C, 20rpm, spindle3	cP	980	NBR 15529
Recuperação elástica Torciômetro 25°C, 30min	%	68	NLT 329/91
Densidade Relativa, 25°C	g/cm ³	1,031	NBR 6296

Nos casos em que foram utilizados os aditivos mornos do tipo ceras orgânicas (CCBit 113AD) foi estabelecido, neste estudo, utilizar um ligante asfáltico convencional do tipo CAP 30/45 da Petrobras produzido na Refinaria de Paulínia, (BR-REPLAN), com características apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Principais características do ligante asfáltico CAP 30/45 (REPLAN)

Características	Unidades	Resultados	Método de Ensaio
Densidade	g/cm ³	1,016	DNIT ME-193
Penetração 100g, 5s, 25oC	0,1mm	37	NBR 6576
Ponto de amolecimento	°C	53	NBR 6560
Viscosidade Brookfield 135°C, 20rpm, spindle3	cP	422	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 150°C, 20rpm, spindle3	cP	205	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 177°C, 20rpm, spindle3	cP	74	NBR 15529
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-1,2	ANP-R19
Espuma a 177 °C	-	NEGATIVO	ANP-R19

3.1.3. Aditivos Mornos

Para desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados três aditivos mornos, sendo dois deles do tipo químico surfactante e um do tipo cera orgânica. Na continuação cada um dos aditivos é descrito com maior detalhe, de acordo com a informação fornecida pelos dos fornecedores dos produtos no mercado nacional.

3.1.3.1. Evotherm® 3G

O Evotherm® 3G é um aditivo químico do tipo surfactante, fabricado pela *MeadWestvaco Corporation* (MWV), com tecnologia específica para misturas asfálticas mornas sem adição de água. Este aditivo permite reduzir a temperatura de mistura e de compactação das misturas asfálticas convencionais de 10°C até 30°C. De acordo com os fornecedores, a adição deste produto garante o recobrimento completo dos agregados pelo ligante asfáltico e inclusive melhora a trabalhabilidade da mistura devido ao ganho na “lubrificação” que o aditivo proporciona. Também é especificado que seu uso melhora a adesividade entre os agregados e o ligante asfáltico, incrementado a resistência ao dano da água na mistura asfáltica.

Este aditivo é especialmente formulado pelos fabricantes para ser compatível com cada tipo de ligante asfáltico que deseja ser modificado, seja convencional, modificado por polímero, modificado por borracha ou modificado por ácido polifosfórico (PPA, *Poliphosphoric Acid*).

O aditivo tem consistência líquida e a modificação do ligante asfáltico pode ser realizada nos tanques das distribuidoras ou nos tanques da usina de mistura asfáltica. Usualmente é recomendado adicionar o Evotherm® 3G de 0,25% até 0,75% em peso no ligante asfáltico.

A adição de Evotherm® 3G não modifica as propriedades de caracterização do ligante asfáltico, assim, o teor de ligante asfáltico de projeto determinado na mistura asfáltica convencional a quente é o mesmo valor que deve ser utilizado na mistura asfáltica morna.

3.1.3.2. Gemul XT-15

O Gemul XT-15 é um composto químico com base em amidas sintéticas, fabricado pela Divisão Química da Quimigel Indústria e Comércio Ltda. Na temperatura de 25°C apresenta um aspecto líquido viscoso âmbar, com densidade de 0,94 (g/cm³) e ponto de fulgor de 179°C.

O Gemul XT-15 é utilizado como agente tensoativo no ligante asfáltico durante operações de produção de misturas asfálticas em usinas dos tipos gravimétrica e

contínua e possui maior estabilidade térmica, permitindo a estocagem da mistura por maior período de tempo. Sua utilização permite melhorar a trabalhabilidade das misturas asfálticas, viabilizando a redução da temperatura de usinagem em até 30°C, nas dosagens mínimas de 1,5 a 2,0 kg por tonelada de asfalto, sem alteração ou modificação dos equipamentos usualmente empregados.

De acordo com os fornecedores, o Gemul XT-15 aliado a algumas modificações do local de entrada e do teor de umidade dos agregados finos, permite reduzir o consumo energético do processo de usinagem de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) em até 56%, reduzindo-se as temperaturas de mistura e de aplicação em até 50°C.

3.1.3.3. CCBit 113AD

O aditivo CCBit 113AD, fabricado na Alemanha, enquadra-se nos aditivos mornos da família das ceras orgânicas. A adição deste produto altera algumas propriedades do ligante asfáltico, como ponto de amolecimento e penetração.

De acordo com os fornecedores do CCBit 113AD, o ligante asfáltico é modificado com teores de 2,0% a 3,0% do aditivo. Usualmente, o ensaio de ponto de amolecimento do ligante asfáltico é empregado para determinar o teor ideal do aditivo; a temperatura de 90°C é sugerida para fixar o teor ótimo do aditivo no ligante asfáltico.

3.2. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE EMISSÕES ASFÁLTICAS

A avaliação das emissões asfálticas nesta pesquisa foi focada na análise dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), cuja descrição foi realizada na seção 2 deste relatório. Neste caso, devem ser analisados os HPAs prioritários que são considerados prováveis carcinogênicos humanos, tanto na fase particulada quanto gasosa.

As amostragens realizadas nesta pesquisa compreendem as condições de laboratório, usina e pista. Até o presente momento, todas as amostragens já foram feitas, porém a análise química encontra-se em andamento e os resultados apresentados a seguir são parciais. Cabe mencionar que a amostragem de cada

uma das misturas asfálticas, em cada uma das condições, foi executada em dias diferentes.

3.2.1. Amostragem

As amostragens das emissões foram realizadas em três diferentes situações:

- (i) durante o processo de usinagem da mistura asfáltica em laboratório, captando diretamente do local de misturação;
- (ii) no momento do carregamento do caminhão em usina; e
- (iii) no momento da aplicação da mistura na pista, nas proximidades da acabadora.

Cabe mencionar que para cada tipo de mistura asfáltica foram coletadas 3 amostras, tendo-se, portanto, um total de 27 amostras para esta pesquisa.

Para captação das emissões, foi utilizada uma bomba de vácuo convencional (Figura 3.2) com vazão de 34 L/min, acoplada a um filtro de fibra de quartzo (47 mm de diâmetro) para coleta de material particulado (Figura 3.3), seguido de um tubo adsorvente de resina XAD para captura dos compostos voláteis (Figura 3.4a), ambos acoplados a um *holder*, conforme ilustrado na Figura 3.5b.



Figura 3.2: Bomba de vácuo



Figura 3.3: Filtro de fibra de quartzo e *holder* para material particulado



(a)



(b)

Figura 3.4: (a) Tubo adsorvente tipo XAD (b) acoplado ao *holder* para compostos voláteis

3.2.2. Amostragem em laboratório

Em laboratório, a amostragem foi realizada durante o processo de usinagem das misturas asfálticas. Para tanto, o equipamento tipo *pugmill* do LTP-PTR-EPUSP conta com um sistema lateral que permite a coleta dos fumos de asfalto durante o processo de mistura. O equipamento, que é fechado, possui uma saída lateral para o encaixe do *holder*, conforme observado em destaque na Figura 3.5.



Figura 3.5: Misturadora do LTP-PTR-EPUSP (destaque para a saída lateral e para o *holder* acoplado)

3.2.3. Amostragem em usina

A usina de asfalto na qual foi feita a coleta de emissões foi a USICITY, localizada em São Paulo (SP). A amostragem foi realizada no momento do carregamento do caminhão, contando-se 5 minutos a partir do início da carga. Durante este período, o *holder* era mantido posicionado próximo à caçamba do caminhão. A Figura 3.6 ilustra um exemplo de amostragem realizada na usina de asfalto.



(a)



(b)

Figura 3.6: Exemplos em usina de asfalto de (a) fumos asfálticos liberados durante o carregamento do caminhão e (b) amostragem próximo à caçamba do caminhão

3.2.4. Amostragem em pista

Complementarmente, foi efetuada a amostragem de emissões durante lançamento da mistura asfáltica em pista. Para tanto, o local definido para o teste foi a Rodovia Anhanguera, cuja concessão também pertence ao Grupo CCR.

Neste caso, o *holder* era mantido posicionado próximo à parte traseira da vibroacabadora, contando-se 5 minutos a partir do início do descarregamento de um caminhão na acabadora. A Figura 3.7 ilustra um exemplo de amostragem realizada na pista.



Figura 3.7: Exemplo de amostragem de emissões na pista, próximo à traseira da vibroacabadora

3.2.5. Análise química

Após a amostragem, os filtros e tubos adsorventes foram analisados quimicamente, permitindo a identificação e quantificação dos HPAs em cada situação. O processo para análise dos HPAs resultantes das emissões asfálticas compõe-se das etapas de extração, fracionamento e análise da amostra por cromatografia gasosa. Os ensaios foram realizados no laboratório *do Grupo de Estudos em Química Atmosférica* do IQ-USP (Instituto de Química da USP), com o qual o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica mantém parceria de pesquisa.

A seguir será apresentada a descrição dos procedimentos efetuados para a avaliação dos filtros de fibra de quartzo (fase gasosa).

3.2.6. Extração

A extração é a primeira etapa na qual as três amostras contidas nos filtros de fibra de quartzo, coletadas em situações similares (mesmo ligante, local e temperatura) (Figura 3.8), são depositadas em um béquer (Figura 3.9).

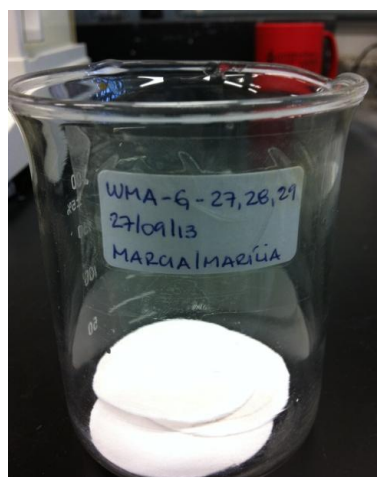


Figura 3.8: Filtros de fibra de quartzo contendo amostras de emissões

Para a extração são realizados três ciclos de 20 minutos no banho de ultrassom. A cada ciclo, adiciona-se 80 ml de diclorometano (Figura 3.9). É importante mencionar que alguns cuidados, como a utilização de luvas durante todo o processo, a lavagem de toda vidraria com diclorometano e a proteção dos fracos com papel alumínio, são importantes para não ocorrerem alterações nos resultados. Todos os EPIs são empregados para a segurança da equipe técnica responsável pelos ensaios.



(a)



(b)

Figura 3.9: (a) Adição de diclorometano para o segundo ciclo e (b) Amostra no banho de ultrassom

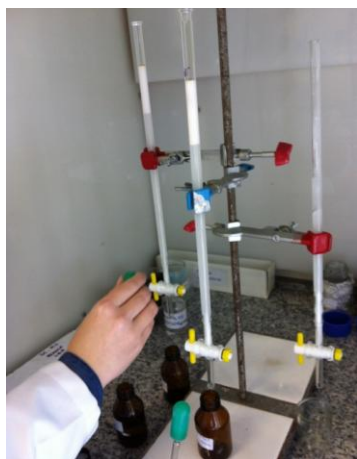
Após os ciclos no banho de ultrassom, o conteúdo do béquer é passado para um balão para que o solvente seja evaporado e a amostra seja reduzida. O balão é acoplado a um evaporador rotativo (Figura 3.10), o qual deve ser mantido a uma temperatura de 40°C (temperatura de ebulição do diclorometano) até que a solução restante fique em torno de 2 ml. A solução do balão é filtrada através de um filtro descartável e despejada em um frasco âmbar, sendo então secadas para serem fracionadas posteriormente.



Figura 3.10: Redução da amostra após extração em evaporador rotativo

3.2.7. Fracionamento

O fracionamento é realizado em uma coluna composta por sílica e alumina que passam por ativação em mufla a 400°C por 4 h. Para a montagem da coluna de fracionamento a sílica e a alumina são diluídas em *n*-hexano e transferidas para a coluna, sendo a primeira suspensão de sílica seguida pela suspensão de alumina (Figura 3.11a). Primeiramente, a coluna com sílica e alumina é lavada por uma solução de 20 ml de *n*-hexano e, em seguida, a amostra também é diluída com *n*-hexano, sendo depositada sobre a coluna, conforme ilustrado na Figura 3.11b.



(a)



(b)

Figura 3.11: (a) Preparação da coluna com sílica e alumina e (b) Detalhe da amostra no topo da coluna

Durante o fracionamento são utilizadas duas soluções (Solução I de 40 ml de *n*-hexano e Solução II de 50 ml de diclorometano + 50 ml de *n*-hexano), sendo que essas soluções passam pelo tubo de fracionamento – Figura 3.12, resultando em duas frações finais. As frações obtidas são secadas para posteriormente serem analisadas.

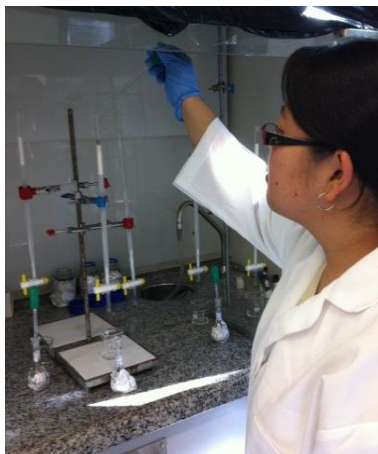


Figura 3.12: Fracionamento das amostras

3.2.8. Análise das frações

A análise de quantificação dos HPAs foi realizada utilizando-se cromatografia gasosa com detector por ionização em chama. A amostra fracionada é diluída em *n*-hexano e 1 μ L da desta é injetada no cromatógrafo (GC-FID, Varian 3800), conforme ilustrado na Figura 3.13.



(a)



(b)

Figura 3.13: (a) Aparelho de cromatografia gasosa e (b) Injeção da amostra para análise

3.3. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO MECÂNICA

3.3.1. Ensaio de deformação permanente por trilha de roda

Segundo Bernucci *et al.* (2010), dentre os ensaios laboratoriais existentes para estudar a deformação permanente existem no Brasil, por exemplo, aqueles que utilizam o equipamento norte-americano APA (*Asphalt Pavement Analyzer*), e ainda o francês desenvolvido pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*). O LTP-PTR-EPUSP possui este último, o qual será empregado nesta pesquisa.

Para este ensaio, primeiramente a mistura asfáltica é submetida ao processo de compactação em uma mesa compactadora também desenvolvida pelo LCPC. Neste equipamento são produzidos corpos de prova na forma de placas, com dimensões de 5 cm de espessura x 18 cm de largura x 50 cm de comprimento (na França a altura das placas varia em função do tipo de mistura asfáltica e da espessura a ser aplicada em campo; no Brasil, onde os revestimentos geralmente são delgados, mesmo os de granulometria contínua, o LTP-PTR-EPUSP geralmente trabalha com placas de 5 cm de espessura, desde que o equipamento foi instalado na década de 90).

A compactação das placas é feita por rolagem (Figura 3.14), utilizando uma sequência de passagens de um pneu padronizado, com pressão variando entre 0,3 e 0,6 MPa (3 e 6 bar), segundo especificação europeia EN 12697-33 (2004a).



Figura 3.14: Mesa compactadora tipo LCPC do LTP-PTR-EPUSP

Usualmente são preparadas duas placas para o ensaio no qual se verifica o potencial à deformação permanente pelo equipamento LCPC, segundo a norma europeia EN 12697-22 (2004b). A máquina é composta de um eixo com dois pneus (um para cada placa), com pressão regulável normalizada em 6 bar para este ensaio, e carga regulável normalizada em 5.000 N. Estes pneus passam em contato direto sobre as placas em ciclos (cada um correspondente a uma ida e uma volta), a uma frequência de 1 Hz, gerando afundamentos progressivos. Este teste é levado até 30.000 ciclos normalmente e, a fim de impor a condição mais desfavorável e acelerar a obtenção dos resultados, o mesmo é realizado a 60°C. Assim, sob estas condições é possível prever uma situação de potencial à formação de deformação permanente que ocorreria após cerca de alguns anos em campo, dependendo das condições de tráfego, do número de solicitações e do clima a que estará sujeito o pavimento.

Antes de ser iniciada a simulação de tráfego é lida a condição inicial (ciclo zero) e, posteriormente ao longo do ensaio vão sendo medidos os afundamentos progressivamente (Figura 3.15).



Figura 3.15: Medida de afundamento no simulador de tráfego LCPC do LTP-PTR-EPUSP

Em termos de limites recomendáveis, dependendo do tipo de mistura asfáltica têm-se recomendações diferentes. No caso, por exemplo, de misturas do tipo densas (denominadas de BBSG) a serem empregadas sob tráfego pesado, a norma europeia EN 13108-2 (2006) indica que o afundamento em trilha de roda seja no máximo 5% após 30.000 ciclos no simulador de tráfego (em placas de 10 cm de

espessura). Já para misturas delgadas descontínuas (denominadas BBTM), a recomendação é de afundamento máximo de 15% após 3.000 ciclos (em placas de 5 cm).

No Brasil se tem procurado estabelecer valores máximos em torno de 5% aos 30.000 ciclos, devido às condições prevaletentes no país, já que o clima é desfavorável quanto à deformação permanente. Este limite vem sendo utilizado desde os anos 90 no LTP-PTR-EPUSP, quando ocorreram os primeiros testes com este simulador no país.

3.3.2. Ensaio de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos

3.3.2.1. Descrição do Ensaio

O ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos tem sido muito utilizado na engenharia de materiais para se estimar a vida de fadiga. Neste ensaio, a aplicação do carregamento no centro da viga e os quatro apoios da viga garantem que no terço central da viga seja desenvolvida flexão pura, isto é, momento constante e esforço cortante nulo, como é ilustrado no diagrama de esforços apresentado na Figura 3.16. Este estado de carregamento é de interesse já que a resistência à fadiga da mistura asfáltica é essencialmente definida como sua capacidade de resistir à flexão sem fratura. Portanto, este ensaio é eficiente para caracterizar as propriedades de fadiga de misturas asfálticas (WU et al. 2009).

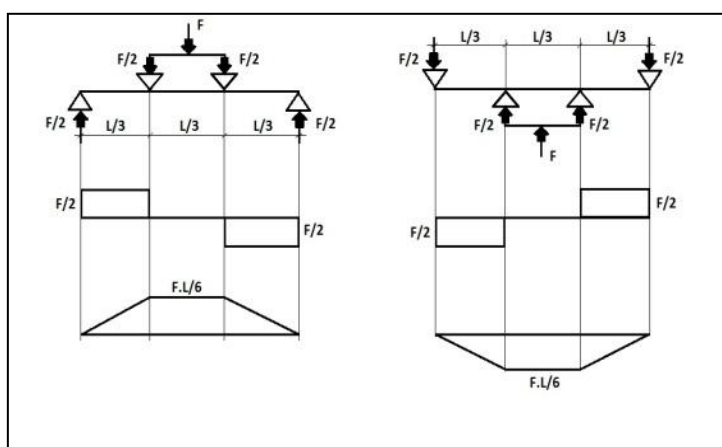


Figura 3.16: Diagramas de esforços desenvolvidos na viga apoiada em quatro pontos

Na atualidade, a norma da *American Association of State Highways and Transportation Officials* (AASHTO T321-07) e a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM D 7560-08) descrevem o ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos para avaliar a fadiga de misturas asfálticas. Essas normas definem o parâmetro de rigidez à flexão da viga como sendo a relação entre a tensão máxima de tração (Equação 3.1) e a deformação máxima da viga (Equação 3.2), conforme a Equação 3.3.

$$\sigma_t = \frac{S_w \cdot P \cdot 1000000}{wh^2} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta \cdot h \cdot 1000000}{(3S_w^2 - 4L_w^2)} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde: S = rigidez à flexão da viga;

σ_t = tensão aplicada;

ε_t = deformação;

S_w = espaçamento do vão de apoio (tipicamente 355,5mm)

P = força pico (kN)

w = largura média da vigota (mm)

h = altura média da vigota (mm)

δ = deflexão pico no centro da viga (mm)

h = altura média da vigota (mm)

S_w = espaçamento do vão de apoio (tipicamente 355,5mm)

L_w = espaçamento do vão de carregamento (tipicamente 118,5mm)

O ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos pode ser executado por tensão controlada ou por deformação controlada. Neste estudo optou-se pela opção de realizar o ensaio por deformação controlada, para os níveis de deformação de 300, 450 e 600 microstrains ($\mu\varepsilon$).

A rigidez é o parâmetro utilizado para se definir a condição de fadiga da viga. A norma da AASHTO define o fim do ensaio quando a rigidez da viga se reduz até 50% da rigidez inicial, enquanto que a ASTM recomenda o valor de 40%. Esta redução de rigidez é atribuída às microfissuras que evoluem durante o processo de aplicação de ciclos de cargas (Adhikari e You, 2010). Neste estudo os ensaios foram realizados até 50% de redução da rigidez, com relação à rigidez inicial determinada no ciclo de número 50.

Outra forma de avaliar a vida de fadiga das misturas asfálticas é por meio do módulo normalizado ou NM (*normalized modulus*), calculado com a Equação 3.4. Nesse caso, a norma da ASTM recomenda considerar a ruptura da vigota por fadiga no pico da curva do módulo normalizado (NM) em função do número de ciclos contabilizado no ensaio, como é mostrado na Figura 3.17.

$$NM = \frac{S_i \times N_i}{S_o \times N_o} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde: NM = módulo normalizado x ciclos

S_i = rigidez na flexão no ciclo i (Pa);

N_i = ciclo i ;

S_o = rigidez na flexão inicial (Pa), estimada aos 50 ciclos aproximadamente;

N_o = ciclo no qual foi estimada a rigidez na flexão inicial.

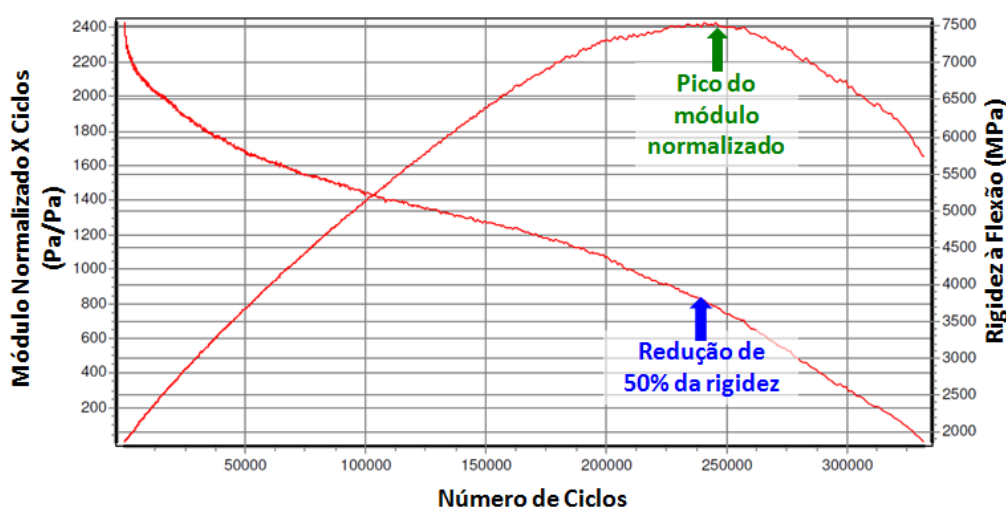


Figura 3.17: Exemplo da redução da rigidez e aumento do módulo normalizado da mistura asfáltica em função do número de ciclos

As frequências de aplicações de cargas estabelecida nas normas da AASHTO e da ASTM para o ensaio são de 5Hz a 10Hz e a temperatura recomendada é de 20°C, entretanto os equipamentos permitem a variação destes parâmetros, facilitando uma análise mais aprofundada dos materiais e permitindo a avaliação em situações bem diferentes de clima e tráfego. Nos ensaios realizados para este estudo foi fixada a frequência de 10Hz e a temperatura de 20°C.

Há vários modelos para se estimar a vida de fadiga de uma amostra de mistura asfáltica. O mais simples é baseado apenas na deformação ou na tensão, conforme Equações 3.5 e 3.6, respectivamente. Neste estudo, já que os ensaios foram executados por deformação controlada, optou-se pelo modelo da Equação 3.5.

$$N_f = K_1 \cdot \frac{1}{\varepsilon_t^{K_2}} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$N_f = K_1 \cdot \frac{1}{\sigma_t^{K_2}} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde: N_f = Vida de fadiga – Números de ciclos até 50% ou 40% da rigidez inicial;

ε_t = Deformação;

σ_t = Tensão aplicada;

K_1 e K_2 = Coeficientes

O software utilizado neste estudo para aquisição de dados do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos fornece também outros parâmetros que podem ser obtidos desse ensaio. Assim por exemplo, o módulo de elasticidade (E) da viga pode ser obtido da Equação 3.7.

$$E = \left[\frac{PL}{\delta \cdot w \cdot h} \right] \times \left[\frac{3S_w^2 - 4L_w^2}{4h^2 + k(1+\nu)} \right] \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde: P = força pico (kN)

L_w = espaçamento do vão de carregamento (tipicamente 118,5mm)

δ = deflexão pico no centro da viga (mm)

w = largura média da vigota (mm)

h = altura média da vigota (mm)

S_w = espaçamento do vão de apoio (tipicamente 355,5mm)

k = tensão cortante atual dividida pela tensão cortante (assumida 1,5)

ν = Módulo de Poisson

O ângulo de fase, que é definido como o atraso entre o pico da tensão aplicada e o pico da deformação registrada do corpo de prova, também é obtido durante o ensaio, e pode ser calculado com a Equação 3.8.

$$\phi = 360 f \cdot s \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde: s = tempo defasado entre a P (média) e a δ (média), em segundos

f = frequência de carregamento (Hz)

A energia dissipada pode ser definida como a perda de energia por ciclo em qualquer ensaio dinâmico (Van Dijk, 1975; SHRP, 1995). No ensaio de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos esse parâmetro pode ser determinado a cada ciclo por meio da Equação 3.9 e a energia dissipada acumulada no final do ensaio é calculada com a Equação 3.10:

$$w_i = \pi \varepsilon_i^2 S_i \sin \phi_i \quad \text{Equação 3.9}$$

$$W_N = \sum_i^{N_f} w_i \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde: w_i = energia dissipada no ciclo i ;

ε_i = amplitude da deformação no ciclo i ;

S_i = rigidez da mistura no ciclo i ;

ϕ_i = ângulo de fase entre a tensão e a deformação no ciclo i ;

W_N é a energia dissipada acumulada durante N ciclos.

3.3.2.2. Preparação das amostras para moldagem dos corpos de prova

Para preparação dos corpos de prova foram coletadas amostras produzidas em usina, tanto para a mistura asfáltica quente convencional (Q-1), como para as duas misturas asfálticas mornas, uma com aditivo Evotherm® 3G e a outra com aditivo Gemul XT-15. Após coleta na usina, as amostras foram quarteadas em frações de 25 kg e conservadas em laboratório a temperatura ambiente até execução dos

ensaios. Vale notar que está programado para esta pesquisa, preparar as misturas em laboratório para comparar os resultados com os obtidos nas misturas de usina.

A mistura asfáltica quente convencional e as misturas asfálticas mornas foram reaquecidas em estufa durante 4 horas nas temperaturas de compactação de $170 \pm 5^\circ\text{C}$ e $130 \pm 5^\circ\text{C}$, respectivamente. Após reaquecimento, as misturas foram compactadas no equipamento chamado PResBOX, da marca IPC Global, apresentado na Figura 3.18. Esse compactador utiliza o princípio de amassamento, similar ao aplicado no compactador giratório do SUPERPAVE, para moldar corpos de prova prismáticos com comprimento de 450mm, largura de 150mm e altura variável de 145mm até 185mm. O volume de vazios alvo utilizado neste estudo foi de 5%, característico das misturas asfálticas do tipo Gap Graded.



Figura 3.18: Compactador tipo PResBOX utilizado para moldar os corpos de prova

Após a compactação o corpo de prova prismático é sacado do molde no qual foi compactado e é resfriado à temperatura ambiente por pelo menos 12 horas. Após esse período, o corpo de prova prismático é serrado no equipamento AutoSaw apresentado na Figura 3.19, para obter as vigotas nas dimensões adequadas para execução do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos. Usualmente, de cada prisma são obtidas quatro vigotas com 50mm de altura, 63mm de largura e 380mm de comprimento. Vale notar que nessas vigotas é realizado o controle de volume de vazios, previamente à execução do ensaio.



Figura 3.19: AutoSaw utilizada para serragem dos corpos de prova prismáticos e obtenção das vigotas para o ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos

Salienta-se que, apesar de utilizar equipamentos sofisticados e manter todos os cuidados durante a produção dos corpos de prova, é muito difícil obter valores de V_v de $5,0 \pm 0,5\%$. Assim, optou-se por incluir também no estudo os corpos de prova que se enquadram na faixa de V_v de $5,0 \pm 1,0\%$.

Após determinação das propriedades volumétricas, as vigotas foram conservadas em câmara ambiental na temperatura de 20°C durante 4 horas no mínimo, antes de início do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos, como mostra a Figura 3.20.

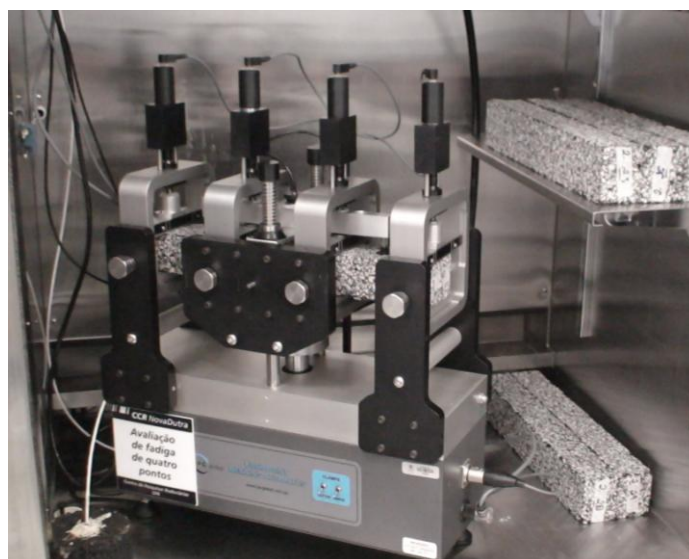


Figura 3.20: Detalhe da câmara ambiental com prateleiras para condicionamento das vigotas

3.3.3. Ensaio de módulo dinâmico

O módulo dinâmico vem sendo muito utilizado, principalmente no estrangeiro, para avaliar as misturas asfálticas quentes convencionais e também as misturas asfálticas mornas. Esse ensaio apresenta a vantagem de incluir os efeitos da temperatura e do tempo de carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos. Tanto as características elásticas quanto as viscoelásticas podem ser obtidas por meio deste ensaio.

3.3.3.1. Preparação dos corpos de prova para o ensaio

O ensaio de módulo dinâmico foi executado de acordo com as recomendações da norma AASHTO T 342-11 *“Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures”*. Nessa norma recomenda-se a compactação dos corpos de prova com diâmetro de 15cm no compactador giratório do *SUPERPAVE* (CGS); na Figura 3.21 apresenta-se uma imagem dessa compactação realizada no laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária CCRNovaDutra.



Figura 3.21: Compactação dos corpos de prova de 15cm de diâmetro no compactador giratório SUPERPAVE (CGS) para execução do ensaio de módulo dinâmico

Após a compactação dos corpos de prova, a norma AASHTO T 342-11 indica extrair os núcleos com diâmetro de 10cm, como é ilustrado na imagem da Figura 3.22. Vale ressaltar que nos núcleos é verificado o volume de vazios (V_v), sendo que o critério de aceitação do CP para a execução do ensaio é de $6,0\% < V_v < 8,0\%$, de acordo com a norma utilizada. Na Figura 3.23 é apresentado o equipamento utilizado para execução do ensaio de módulo dinâmico.



Figura3.22: Extração dos núcleos com 10cm de diâmetro dos corpos de prova



Figura 3.23: Equipamento utilizado para execução do ensaio de módulo dinâmico

3.3.3.2. Elaboração de curvas mestre

O ensaio de módulo dinâmico foi executado nas temperaturas de 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4°C, sendo que em cada temperatura são utilizadas as frequências de 25; 10; 5,0; 1,0; 0,5 e 0,1Hz. Os dados obtidos durante o ensaio são utilizados comumente para traçar a curva mestre usando uma função sigmoidal de ajuste conhecida como o modelo de Hirsch, dada pela Equação 3.11.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(\xi)}} \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde: $|E^*|$ = módulo dinâmico

ξ = frequência reduzida

δ = valor de módulo mínimo

α = diferença dos valores de módulo

β, γ = parâmetros de forma

3.3.4. Ensaio de módulo de resiliência

O ensaio de módulo de resiliência foi executado de acordo com as recomendações da norma DNIT ME 135/2010, Método de Ensaio, Pavimentação Asfáltica, Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência, na temperatura de 25°C.

3.3.5. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) foi executado de acordo com as recomendações da norma DNIT 136/2010 – ME “Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio”. Os corpos de prova foram condicionados no mínimo durante 12 horas na temperatura de 25°C previamente à execução do ensaio.

3.3.6. Ensaio de dano por umidade induzida

O ensaio de dano por umidade induzida (DUI) foi executado nas misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa. Esse ensaio foi realizado de acordo com as

recomendações da AASHTO T 283-03 (*Standard Method of Test for REsistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*). Vale notar que os corpos de prova foram moldados com as massas asfálticas coletadas na usina e também com massa asfáltica produzida em laboratório.

No ensaio de dano por umidade induzida é obtido o parâmetro de razão da resistência à tração, sendo que valores acima de 90% são considerados satisfatórios, valores entre 75% e 90% são razoáveis e abaixo de 75%, insatisfatórios.

4. RESULTADOS

Nesta seção do relatório são apresentados os resultados dos ensaios executados em laboratório nas misturas asfálticas mornas e na mistura asfáltica quente de referência. Vale salientar que, durante execução deste estudo, foi possível acompanhar algumas usinas que estavam produzindo misturas asfálticas mornas e, para incrementar este estudo, foi possível coletar amostras de misturas asfálticas de usina para execução de ensaios complementares em laboratório.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ensaios de caracterização usualmente realizados nos ligantes asfálticos foram executados também nos ligantes asfálticos após adição dos aditivos mornos. No caso dos aditivos químicos surfactantes Evotherm® 3G e Gemul XT-15, foi fixado o teor de 0,4% em peso para ser adicionado ao CAP-Borr, de acordo com as recomendações dos fornecedores desses aditivos. Os resultados dos ensaios de caracterização realizados nesses materiais são apresentados na Tabela 4.1.

Nota-se na Tabela 4.1, que a adição dos aditivos mornos no CAP-Borr praticamente não modificaram o ponto de amolecimento, a recuperação elástica e a densidade relativa. Já a penetração foi incrementada no caso da adição de 0,4% de Gemul XT-15 e a Viscosidade Brookfield a 175°C foi reduzida no ligante asfáltico com ambos os aditivos. O ligante asfáltico CAP-Borr foi selecionado para compor a mistura asfáltica a quente (Q-1), o CAP-Borr +0,4% de Evotherm 3G utilizou-se na mistura asfáltica morna M-1 e o CAP-Borr +0,4% de Gemul XT-5 foi empregado na mistura asfáltica morna M-2.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados das características do ligante asfáltico CAP 30/45 com adição de 2,5%, 3,0% e 3,5% de CCBit 113AD. Observa-se nessa tabela que, a única característica que sofreu modificação notória foi o ponto de amolecimento, alcançando o valor de 97°C, com a incorporação de 3,5% do aditivo.

Tabela 4.1: Características do CAP-Borr, antes e após adição do Evothorm 3G e Gemul XT-15

Características	Unidades	CAP-Borr	CAP-Borr + 0,4% Evothorm 3G	CAP-Borr + 0,4% Gemul XT-15	Método de Ensaio
Penetração 100g, 5s, 25°C	0,1mm	48	45	57	NBR 6576
Ponto de amolecimento	oC	57	60	58	NBR 6560
Viscosidade Brookfield 175°C, 20rpm, spindle3	cP	1845	1600	1410	NBR 15529
Recuperação elástica Torciômetro 25oC, 30min	%	68	67	71	NLT 329/91
Densidade Relativa, 25oC	g/cm ³	1,031	1,034	1,035	NBR 6296

Tabela 4.2: Características do CAP 30/45, antes e após adição do aditivo morno CCBit 113AD

Características	Unidades	CAP 30/45	CAP 30/45 + 2,5% CCBit 113AD	CAP 30/45 + 3,0% CCBit 113AD	CAP 30/45 + 3,5% CCBit 113AD	Método de Ensaio
Densidade	g/cm ³	1,016	1,012	1,012	1,01	DNIT ME-193
Penetração 100g, 5s, 25°C	0,1mm	37	25	27	30	NBR 6576
Ponto de amolecimento	oC	53	60	72	97	NBR 6560
Viscosidade Brookfield 135°C, 20rpm, spindle3	cP	422	380	360	332	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 150°C, 20rpm, spindle3	cP	205	186	180	166	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 177°C, 20rpm, spindle3	cP	76	68	65	62	NBR 15529

De acordo com o fornecedor de CCBIt, a completa modificação do ligante asfáltico utilizando esse aditivo é garantida quando o ponto de amolecimento (PA) é superior a 75°C. Na Tabela 4.2 nota-se que a incorporação 3,0% do aditivo no CAP 30/45 elevou o PA até 72°C, insuficiente para atender o critério recomendado; já o emprego de 3,5% de CCBIt incrementou o PA excessivamente, até 97°C. Assim, optou-se por utilizar um teor intermediário de 3,2% deste aditivo morno para modificar o CAP 30/45 e, como mostrado na Tabela 4.3, esse teor atendeu a recomendação de obter PA superior a 75°C. Esse ligante asfáltico modificado com 3,2% de CCBIt foi selecionado para compor a mistura asfáltica morna M-3.

Tabela 4.3: Características do CAP 30/45 e o ligante asfáltico modificado com 3,2% de CCBIt 113AD

Características	Unidades	CAP 30/45	CAP 30/45 + 3,2% CCBit 113AD	Método de Ensaio
Densidade	g/dm ³	1,016	1,005	DNIT ME-193
Penetração 100g, 5s, 25°C	0,1mm	37	29	NBR 6576
Ponto de amolecimento	°C	53	82	NBR 6560
Viscosidade Brookfield 135°C, 20rpm, spindle3	cP	422	360	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 150°C, 20rpm, spindle3	cP	205	180	NBR 15529
Viscosidade Brookfield 177°C, 20rpm, spindle3	cP	76	66	NBR 15529

4.2. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.2.1. Misturas asfálticas mornas com aditivos químicos surfactantes

Segundo o relatório da NCHRP-691 para Projetos de Misturas Asfálticas Mornas (*Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*), a determinação do teor de ligante asfáltico deve ser realizada assim como nas misturas quentes convencionais. No

relatório ressalta-se que, para que as misturas asfálticas mornas alcancem desempenhos similares aos das misturas asfálticas quentes convencionas, devem ser conservados os mesmos critérios volumétricos de dosagem utilizados nessas misturas.

De acordo com as recomendações dos fornecedores dos aditivos mornos Evotherm® 3G e Gemul XT-15, o teor de ligante asfáltico de projeto da mistura asfáltica morna é o mesmo determinado na mistura asfáltica quente convencional. Assim, na dosagem pode ser utilizado o ligante asfáltico sem ou com adição do aditivo morno, mas empregando as temperaturas de usinagem e compactação determinadas no Viscosímetro Brookfield para o ligante asfáltico sem o aditivo morno.

Neste estudo, adotou-se o seguinte procedimento para avaliar a dosagem das misturas asfálticas mornas com aditivos químicos surfactantes:

- a) **Dosagem no Compactador Marshall da Mistura Quente:** Inicialmente, foi utilizado o ligante asfáltico CAP-Borr para dosagem da mistura asfáltica quente no compactador Marshall com 75 golpes por face, para determinação do teor de ligante asfáltico de projeto para volume de vazios (Vv) de 5%, de acordo com as especificações da faixa granulométrica Gap Graded. Foram utilizadas as temperaturas de usinagem e compactação determinadas no Viscosímetro Brookfield para o CAP-Borr. Essa mistura foi denominada Q-1 e está descrita na Tabela 4.4;
- b) **Dosagem no Compactador Marshall da Mistura Morna:** O ligante asfáltico com 0,4% de Evotherm® 3G foi utilizado para realizar a dosagem de igual forma como foi descrito acima no inciso (a); essa mistura foi nomeada como Q-E-1. O mesmo processo foi repetido utilizando o ligante asfáltico com Gemul XT-15; essa mistura foi identificada como Q-G-1. Vale notar que para usinagem e compactação das misturas Q-E-1 e Q-G-1, foram utilizadas as mesmas temperaturas determinadas no Viscosímetro Brookfield para o CAP-borr sem adição de aditivos mornos, como está especificado na Tabela 4.4.

- c) **Dosagem no Compactador Giratório da Mistura Morna:** o ligante asfáltico com 0,4% de Evotherm 3G foi empregado para efetuar a dosagem da mistura no compactador giratório com energia de 100 giros, essa mistura recebeu a nomenclatura M-E-1. Da mesma forma foi realizada a dosagem da mistura com ligante asfáltico modificado por 0,4% de Gemul XT-15, originando a mistura denominada M-G-1. Salienta-se que, para usinagem das misturas, os ligantes asfálticos CAP-Borr+0,4%Evotherm 3G e o CAP-Borr+0,4Gemul XT-15, foram aquecidos na temperatura de usinagem determinada no Viscosímetro Brookfield para o CAP-Borr sem aditivos. A redução de temperatura na usinagem das temperaturas atribui-se à redução do aquecimento dos agregados, isto é, diminuição de aproximadamente 40°C, como pode ser verificado na Tabela 4.4.

Nota-se na Tabela 4.4 que, as misturas com CAP-Borr foram dosadas no compactador giratório com temperaturas 40°C a menos, quando comparadas com as temperaturas utilizadas no compactador Marshall. Vale salientar que essas reduções de temperaturas foram efetuadas no aquecimento dos agregados, já que o ligante asfáltico modificado pelos aditivos mornos, foi aquecido em estufa na temperatura determinada no Viscosímetro Brookfield no CAP-Borr sem incorporação dos aditivos mornos.

Tabela 4.4: Esquematização das dosagens realizadas na mistura asfáltica quente convencional e nas misturas asfálticas mornas

ID Mistura	Q-1	Q-E-1	M-E-1	Q-G-1	M-G-1
Ligante Asfáltico	CAP-Borr	CAP-Borr	CAP-Borr	CAP-Borr	CAP-Borr
Aditivo Morno	-	+0,4% Evotherm 3G	+0,4% Evotherm 3G	+0,4% Gemul XT-15	+0,4% Gemul XT-15
Compactador	Marshall (75 golpes)	Marshall (75 golpes)	Giratório (100giros)	Marshall (75 golpes)	Giratório (100giros)
Temperatura do Ligante Asfáltico para Usinagem (°C)	175	175	175	175	175
Temperatura dos Agregados para Usinagem (°C)	180	180	140	180	140
Temperatura de Usinagem (°C)	175±5	175±5	135±5	175±5	135±5
Temperatura de Compactação (°C)	170±5	170±5	130±5	170±5	130±5

Na Figura 4.1 é apresentada a variação do volume de vazios (V_v) na mistura asfáltica Gap Graded em função do teor de ligante asfáltico, para a mistura quente com CAP-Borr (Q-1) e as misturas com ligante asfáltico com 0,4% de Evotherm® 3G (Q-E-1 e M-E-1). Nota-se que nas três misturas foram obtidos valores de V_v muito próximos, sendo que o teor de ligante asfáltico de projeto escolhido foi de 6,3%.

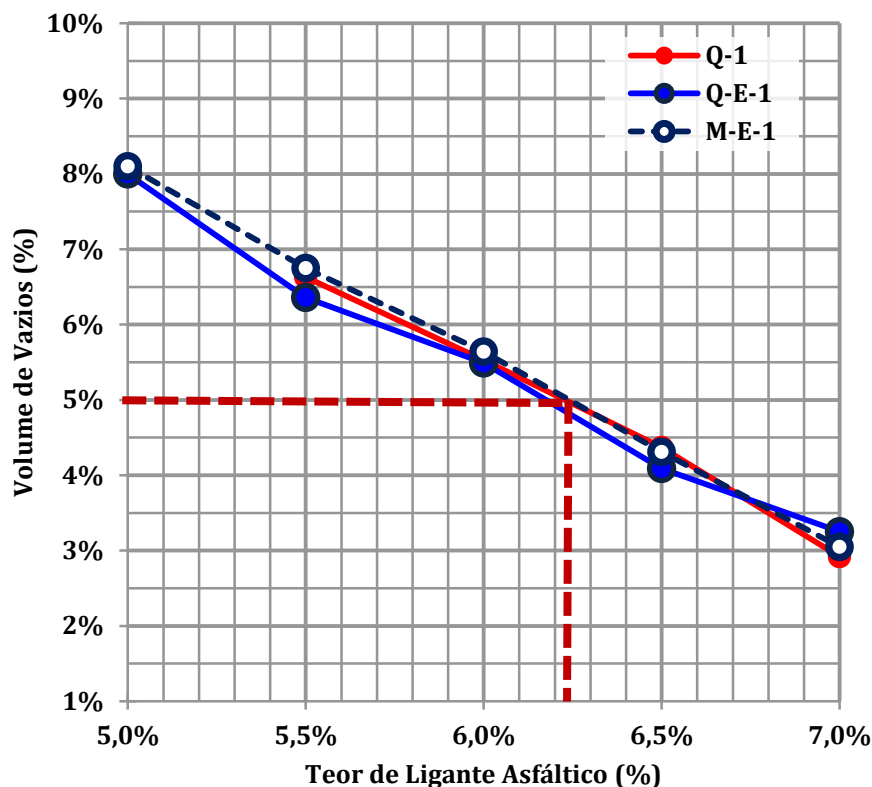


Figura 4.1: Teor de ligante asfáltico versus o volume de vazios da mistura quente Q-1 e das misturas com aditivo morno Evotharm® 3G

Na Figura 4.2 é apresentada também a variação do Vv em função do teor de ligante asfáltico, para a mistura quente com CAP-Borr (Q-1) e as misturas com ligante asfáltico com 0,4% de Gemul XT-15 (Q-G-1 e M-G-1). Nota-se nessa figura que, as misturas com o ligante asfáltico com 0,4% de Gemul XT-15 apresentaram menores valores de Vv, quando comparadas com a mistura asfáltica quente Q-1. Dessa forma, verifica-se que o teor de ligante asfáltico de projeto nas misturas Q-G-1 e M-G-1 seria de aproximadamente 5,8% e não 6,3%, como determinado na mistura Q-1. Contudo, seguindo as recomendações da NCHRP-691, o teor de 6,3%, determinado na mistura asfáltica quente, foi mantido para as misturas asfálticas mornas.

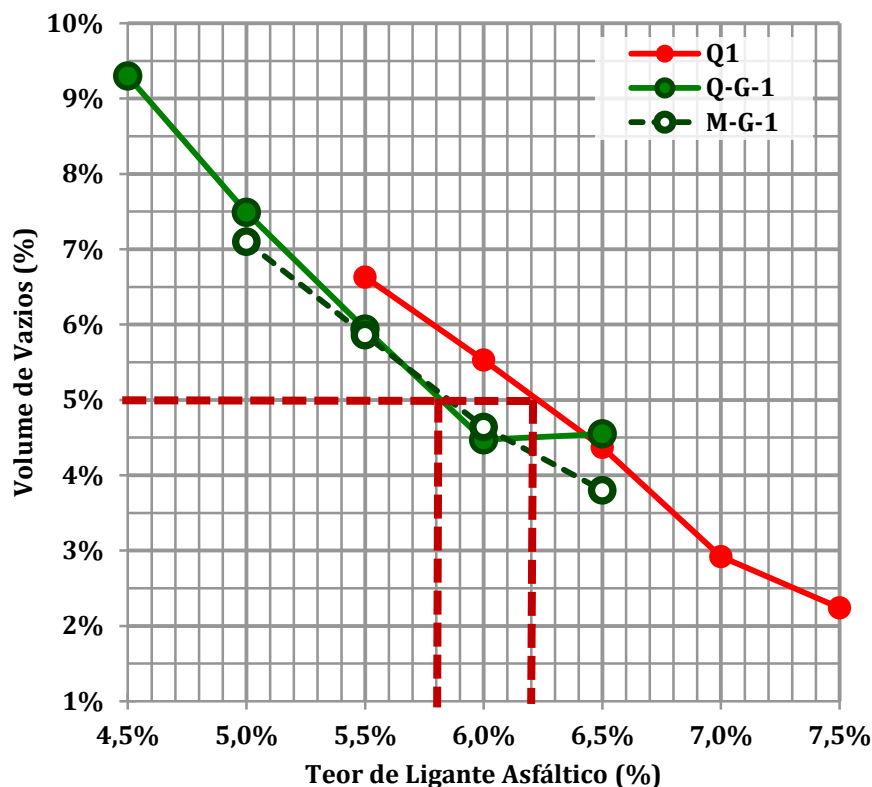


Figura 4.2: Teor de ligante asfáltico versus o volume de vazios da mistura quente Q-1 e das misturas com aditivo morno Gemul XT-15

4.2.2. Misturas asfálticas mornas com aditivos de ceras orgânicas

A cera orgânica utilizada neste estudo é denominada comercialmente CCBit 113AD, como foi descrito anteriormente. Da mesma maneira como foi realizado nas misturas com aditivos mornos químicos surfactantes, foi desenvolvido um procedimento de dosagens para avaliar as misturas mornas com este aditivo. O procedimento é descrito na continuação:

- Dosagem no compactador Marshall da Mistura Quente:** inicialmente, foi executada a dosagem da mistura a quente com CAP 30/45, para Vv de 5%, nas temperaturas de usinagem e compactação determinadas no Viscosímetro Brookfield. O compactador utilizado na dosagem foi o Marshall com energia de 75 golpes por face do corpo de prova. Essa mistura foi denominada Q-2, como apresenta-se a Tabela 4.5.
- Dosagem no Compactador Marshall da Mistura Morna:** o ligante asfáltico CAP30/45 com 2,0% de CCBit 113AD foi utilizado para realizar

novamente a dosagem no compactador Marshall com 75 golpes por face, com as mesmas temperaturas determinadas no Viscosímetro Brookfield para o ligante asfáltico CAP30/45 sem incorporação do aditivo morno. Essa mistura foi identificada como Q-C-2, como é mostrado na Tabela 4.5.

- c) **Verificação do teor de projeto Marshall no compactador giratório e no compactador Marshall:** o ligante asfáltico CAP 30/45 modificado com 2,0% de CCBIt 113AD foi utilizado para moldar corpos de prova no compactador Giratório (100 giros) e no compactador Marshall (75 golpes), mas com temperaturas de usinagem e compactação inferiores às determinadas para o CAP 30/45. O teor de ligante utilizado foi o teor de projeto determinado na dosagem Marshall descrita no inciso (a) e (b) acima. Essas misturas preparadas dessa forma, foram identificadas como M-C-2-10, para redução de 10°C e como M-C-2-20 para redução de 20°C, como é identificado na Tabela 4.5.

Na Figura 4.3 apresenta-se a variação do Vv em função do teor de ligante asfáltico adicionado, para a mistura quente com CAP 30/45 (Q-2) e para a mistura quente com CAP 30/45+2%CCBit 113AD (Q-C-1). Nota-se que, para volume de vazios de projeto de 5,0%, o teor de ligante asfáltico de projeto para ambas as misturas foi de 5,4%.

Tabela 4.5: Esquematização das dosagens realizadas na mistura asfáltica quente convencional com CAP 30/45e nas misturas asfálticas mornas com CCBit 113AD

ID Mistura	Q-2	Q-C-2	M-C-2-10	M-C-2-20
Ligante Asfáltico	CAP 30/45	CAP 30/45	CAP 30/45	CAP 30/45
Aditivo Morno	-	+2,0% CCBit 113AD	+2,0% CCBit 113AD	+2,0% CCBit 113AD
Compactador	Marshall (75 golpes)	Marshall (75 golpes)	Giratório (100 giros)	Giratório (100 giros)
Temperatura do Ligante Asfáltico para Usinagem (°C)	158	158	158	158
Temperatura dos Agregados para Usinagem (°C)	168	168	168	168
Temperatura de Usinagem (°C)	158±5	158±5	148±5	138±5
Temperatura de Compactação (°C)	146±5	146±5	136±5	126±5

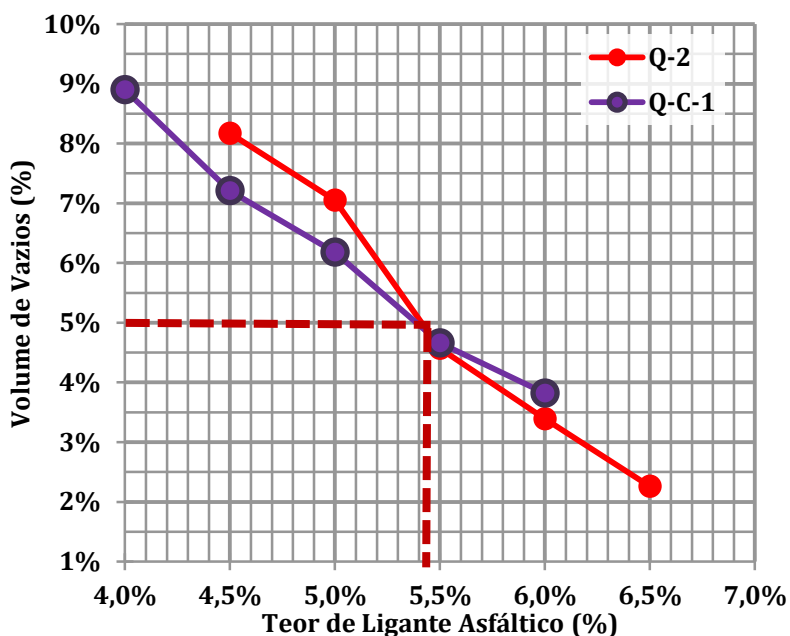


Figura 4.3: Teor de ligante asfáltico versus o volume de vazios da mistura quente Q-2 e da mistura com 2,0% de CCBit 113AD

A Figura 4.4 apresenta os resultados médios do Vv obtidos na moldagem dos corpos de prova no compactador giratório e no Marshall, com o teor de projeto de 5,4% de ligante asfáltico CAP 30/45+2%CCBit 113AD. Nota-se que, a mistura morna M-C-2-10 apresentou Vv de 5,8% no compactador Marshall e 5,0% no compactador giratório. Já na mistura asfáltica morna M-C-2-20 foram obtidos Vv de 6,2% no compactador Marshall e 4,9% no compactador giratório. Assim, verifica-se que nas misturas asfálticas mornas compactadas no compactador giratório, pode ser alcançado o volume de vazios de projeto com o teor de ligante asfáltico determinado na mistura asfáltica quente, apesar da redução das temperaturas. Vale salientar que, diversos autores (ANGUAS et al. 2005; BARRAL et al. 2011; EL-HAGE, 2012) afirmam que a energia de compactação de 100 giros no compactador giratório é superior aos 75 golpes por face no compactador Marshall, o que poderia ter influenciado nos resultados das misturas asfálticas mornas aqui estudadas.

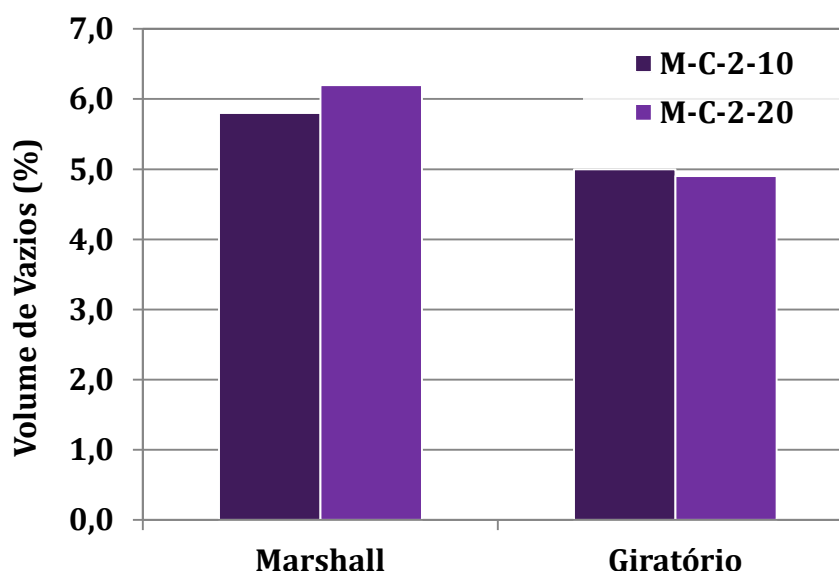


Figura 4.4: Volume de vazios obtido na compactação das misturas mornas com redução de temperatura no compactador Marshall e no compactador Giratório

4.2.3. Resumo da dosagem das misturas asfálticas

Foi citado anteriormente que o relatório da NCHRP-691 para Projetos de Misturas Asfálticas Mornas (*Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*) recomenda que

para que as misturas asfálticas mornas alcancem desempenhos similares aos das misturas asfálticas quentes convencionas, devem ser conservados os mesmos critérios volumétricos de dosagem utilizados nessas misturas.

Dessa forma, para produção dos corpos de prova produzidos em laboratório, foi mantido o teor de ligante asfáltico de projeto determinado para a mistura asfáltica quente de referência. Na Tabela 4.6 são apresentados esses teores de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas mornas (M-1, M-2 e M-3) e da mistura asfáltica quente de referência (Q-1). Também nessa tabela apresenta-se um as temperaturas utilizadas para mistura e compactação dos corpos de prova.

Tabela 4.6: Descrição das misturas asfálticas avaliadas, materiais utilizados e temperaturas de produção

ID Mistura	Q1	M-1	M-2	M-3
Faixa Granulométrica	GAP No.4	GAP No.4	GAP No.4	GAP No.4
Agregados	Ped. Riuma	Ped. Riuma	Ped. Riuma	Ped. Riuma
Ligante Asfáltico	CAP-Borr	CAP-Borr	CAP-Borr	CAP 30/45
Teor de Ligante Asfáltico	6,2	6,2	6,2	5,3
Aditivo Morno	-	+0,4% Evotherm 3G	+0,4% Gemul XT-15	+3,2% CCBIt 113AD
Temperatura do Ligante Asfáltico para Usinagem (°C)	175	175	175	158
Temperatura dos Agregados para Usinagem (°C)	180	140	140	140
Temperatura de Usinagem (°C)	175±5	135±5	135±5	135±5
Temperatura de Compactação (°C)	170±5	130±5	130±5	130±5

4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Na Tabela 4.7 e na Figura 4.5 é apresentado um resumo da resistência à tração das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa. Vale notar que os dados apresentados foram obtidos de corpos de prova compactados com massa asfáltica produzida em laboratório, e também com massa asfáltica produzida em uma usina. Na Figura 4.6 é apresentada uma ilustração do equipamento utilizado no CPR para a produção de misturas asfálticas em laboratório.

Tabela 4.7: Resistência à tração das misturas asfálticas estudadas

Mistura	Ligante Asfáltico	Local de Produção da Massa Asfáltica	RT (MPa)
Q-1	CAP-Borr	Laboratório	1,24
M-1	CAP-Borr+0,4%Evotherm 3G	Laboratório	0,98
M-2	CAP-Borr+0,4%Gemul XT-15	Laboratório	0,96
M-3	CAP30/45+3,2% CCBIt 113AD	Laboratório	1,17
Q-1	CAP-Borr	Usina	1,22
M-1	CAP-Borr+0,4%Evotherm 3G	Usina	1,28
M-2	CAP-Borr+0,4%Gemul XT-15	Usina	1,24
M-3	CAP30/45+3,2% CCBIt 113AD	Usina	-

Com relação às misturas asfálticas produzidas em laboratório, nota-se que o valor da mistura asfáltica quente de referência (Q-1) com ligante asfáltico modificado por borracha, apresentou um valor de RT de 1,24MPa. As misturas asfálticas mornas M-1 e M-2 apresentaram valores de RT levemente inferiores, de 0,98 e 0,96MPa, respectivamente. Contudo, essa redução não foi observada nos corpos de prova produzidos com massa asfáltica coletada na usina, nesse caso, observa-se que o valor de RT foi praticamente o mesmo para as três misturas Q-1, M-1 e M-2.

Com relação à mistura asfáltica morna M-3, produzida apenas em laboratório com CAP30/45+3,2% de CCBIt, nota-se que apresentou resistência à tração similar às

misturas Q-1, M-1 e M-2 produzidas em usina, apesar de estar constituída por um ligante asfáltico diferente.

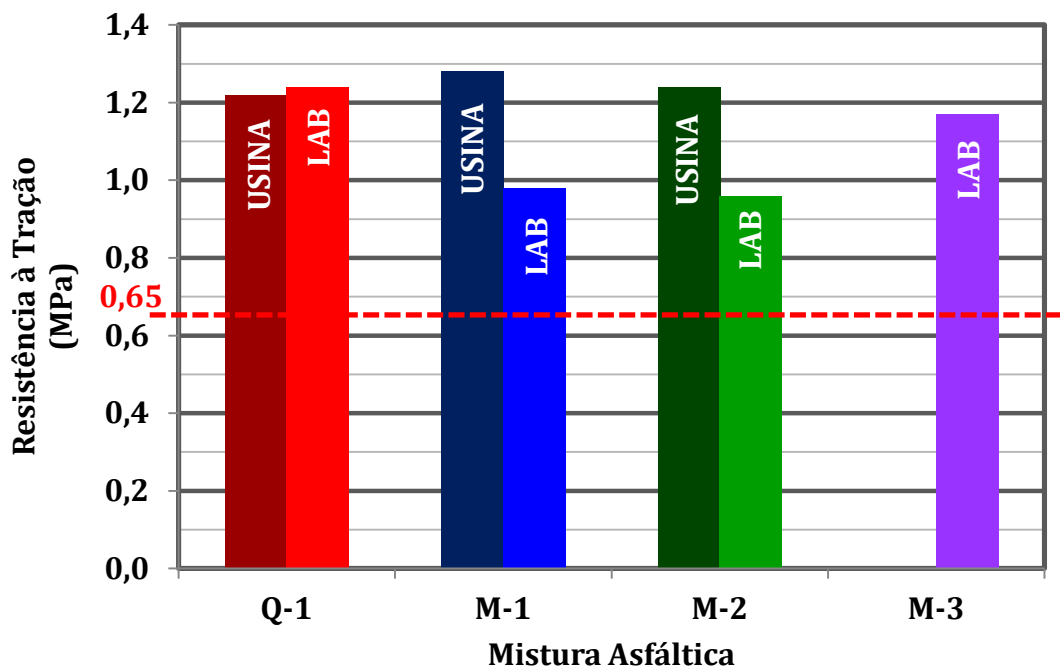


Figura 4.5: Resistência à tração das misturas asfálticas estudadas



Figura 4.6: Equipamento utilizado para produção de misturas asfálticas em laboratório do CPR

4.4. DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Na Tabela 4.8 e na Figura 4.7 são apresentados os resultados de DUI da mistura asfáltica quente de referência (Q-1) e das misturas asfálticas mornas M-1, M-2 e M-3, produzidas em laboratório e coletadas em usina.

Tabela 4.8: Resultados de Dano por Umidade Induzida (DUI) das misturas asfálticas estudadas

Mistura	Ligante Asfáltico	Local de Produção da Massa Asfáltica	DUI (%)
Q-1	CAP-Borr	Laboratório	93
M-1	CAP-Borr+0,4%Evotherm 3G	Laboratório	93
M-2	CAP-Borr+0,4%Gemul XT-15	Laboratório	94
M-3	CAP30/45+3,2% CCBIt 113AD	Laboratório	90
Q-1	CAP-Borr	Usina	88
M-1	CAP-Borr+0,4%Evotherm 3G	Usina	98
M-2	CAP-Borr+0,4%Gemul XT-15	Usina	93

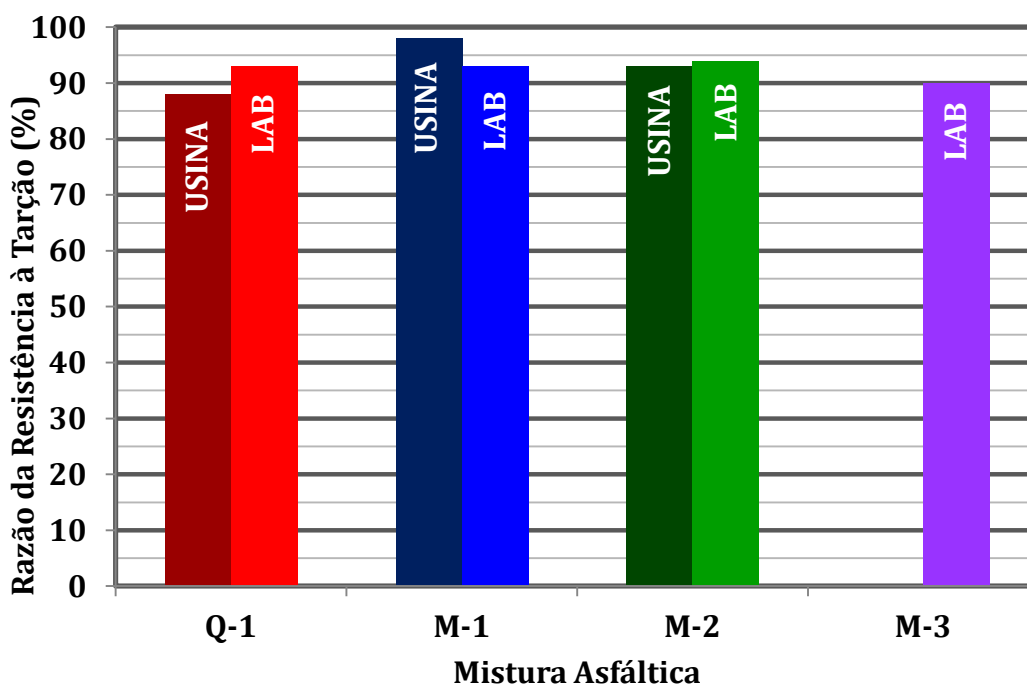


Figura 4.7: Razão de resistência à tração ou dano por umidade induzida das misturas asfálticas estudadas

Os resultados do ensaio mostram que todas as misturas asfálticas estudadas apresentaram excelentes valores de razão de resistência à tração, superiores a

90%, com exceção da mistura asfáltica quente de referência Q-1, produzida em usina. Vale ressaltar que em todas as misturas asfálticas estudadas foi utilizado 1,5% de cal hidratada CH-1 como melhorador de adesividade, para atender as especificações internas do Grupo CCR.

Verifica-se, portanto, que as misturas asfálticas mornas apresentam boa resistência à ação deletéria da água, de forma similar e até superior, quando comparada com a mistura asfáltica quente de referência. Esse fenômeno pode ser atribuído à incorporação de melhoradores de adesividade na formulação química dos aditivos mornos utilizados neste estudo.

4.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados de módulo de resiliência das misturas asfálticas estudadas estão apresentados na Tabela 4.9 e na Figura 4.8. Vale notar que os dados apresentados foram obtidos de corpos de prova compactados com massa asfáltica produzida em laboratório, e também com massa asfáltica coletada em uma usina.

Tabela 4.9: Módulo de Resiliência das misturas asfálticas estudadas

Mistura	Ligante Asfáltico	Local de Produção da Massa Asfáltica	MR (MPa)
Q-1	CAP-Borr	Laboratório	5.382
M-1	CAP-Borr+0,4%Evotherm 3G	Laboratório	3.503
M-2	CAP-Borr+0,4%Gemul XT-15	Laboratório	4.505
M-3	CAP30/45+3,2% CCBit 113AD	Laboratório	4.954
Q-1	CAP-Borr	Usina	4.477
M-1	CAP-Borr+0,4%Evotherm 3G	Usina	4.523
M-2	CAP-Borr+0,4%Gemul XT-15	Usina	4.503

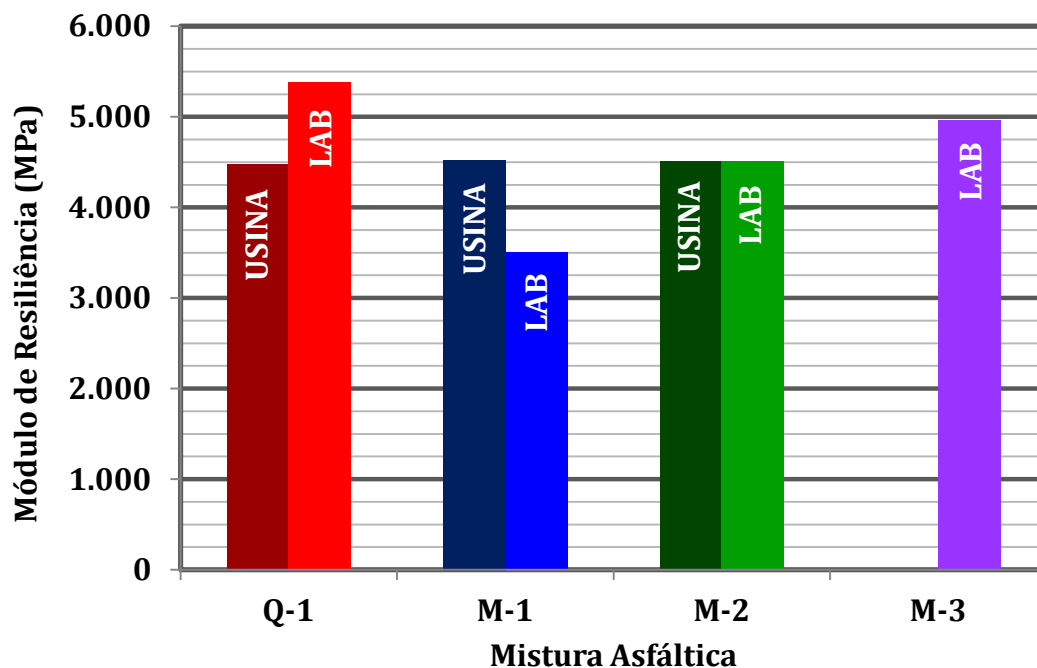


Figura 4.8: Resultados de módulo de resiliência das misturas asfálticas estudadas

De modo geral, nota-se que as misturas asfálticas mornas M-1 e M-2 coletadas de usina, apresentaram valores de MR similares à mistura asfáltica quente de referência (Q-1), de aproximadamente 4.500MPa.

Com relação ao MR das misturas asfálticas produzidas em laboratório, nota-se que as misturas asfálticas mornas apresentaram uma pequena redução de rigidez, principalmente a mistura M-1 (Evotherm). Já a mistura morna M-3, apesar de ser produzida com um ligante asfáltico diferente, apresentou valor de MR próximo à mistura asfáltica quente de referência.

4.6. ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO

Na Tabela 4.10 é apresentado um resumo dos resultados obtidos durante o ensaio de módulo dinâmico nas misturas asfálticas Q-1, M-1 e M-2, em corpos de prova produzidos com massa asfáltica coletada em usina. Salienta-se que os valores apresentados são uma média de três corpos de prova testados para cada mistura asfáltica estudada.

Vale notar que neste estudo o ensaio de módulo dinâmico não foi executado na temperatura de -10°C, já que essa temperatura não é representativa para a

Rodovia Presidente Dutra. Além disso, Bonaquist e Christensen (2005) afirmam que o ensaio de módulo dinâmico pode ser executado satisfatoriamente com temperaturas iguais e/ou superiores a 4,4°C, sem afetar os resultados obtidos.

Tabela 4.10: Resultados do ensaio de módulo dinâmico obtido em corpos de prova produzidos com mistura asfáltica coletada em usina

Mistura Asfáltica		Q-1		M-1		M-2	
Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)
4,4	25,0	19.078	6,67	20.779	8,98	17.969	7,33
4,4	10,0	21.566	6,48	17.601	12,03	16.606	8,56
4,4	5,0	18.266	8,72	15.614	13,85	15.486	9,54
4,4	1,0	17.007	9,30	11.860	15,12	12.912	12,10
4,4	0,5	14.207	11,51	10.603	15,82	11.755	13,36
4,4	0,1	12.943	12,59	8.074	19,35	9.205	16,69
21,1	25,0	10.287	15,33	8.888	18,67	9.466	16,98
21,1	10,0	10.635	14,82	7.309	21,46	7.880	19,56
21,1	5,0	9.060	16,69	6.217	23,28	6.802	21,34
21,1	1,0	7.982	17,97	4.030	28,11	4.573	26,03
21,1	0,5	5.783	21,27	3.267	29,41	3.790	27,54
21,1	0,1	4.982	22,28	1.872	32,57	2.245	31,31
37,8	25,0	3.398	25,21	3.287	29,47	3.436	30,37
37,8	10,0	4.419	23,24	2.339	31,70	2.459	32,78
37,8	5,0	3.489	27,19	1.771	32,75	1.871	34,16
37,8	1,0	2.854	28,06	884	34,11	907	36,24
37,8	0,5	1.702	30,46	668	33,17	685	36,05
37,8	0,1	1.393	30,17	354	30,63	345	32,75
54,4	25,0	834	30,43	792	30,23	933	33,10
54,4	10,0	1.734	30,11	417	32,80	547	34,10
54,4	5,0	1.233	30,65	285	32,28	382	33,52
54,4	1,0	951	30,48	145	28,06	176	31,49
54,4	0,5	510	30,08	119	25,19	140	28,62
54,4	0,1	422	28,17	85	20,17	90	24,02

Na Tabela 4.11, apresenta-se também um resumo dos resultados de módulo dinâmico obtidos em corpos de prova produzidos com massa asfáltica de laboratório, para todas as misturas asfálticas estudadas, Q-1 (quente de referência), M-1 (Evotherm), M-2 (Gemul) e M-3 (CCBit).

Tabela 4.11: Resultados do ensaio de módulo dinâmico obtido em corpos de prova produzidos com mistura asfáltica de laboratório

Mistura Asfáltica		Q-1		M-1		M-2		M-3	
Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)
4,4	25,0	19.078	6,67	14.378	9,11	14.210	8,82	18.245	6,96
4,4	10,0	21.566	6,48	13.054	10,72	12.899	10,36	16.930	7,99
4,4	5,0	18.266	8,72	11.983	11,97	11.884	11,50	15.901	8,93
4,4	1,0	17.007	9,30	9.546	15,18	9.542	14,65	13.331	11,52
4,4	0,5	14.207	11,51	8.532	16,70	8.548	16,06	12.159	12,82
4,4	0,1	12.943	12,59	6.269	20,91	6.363	19,97	9.455	16,49
21,1	25,0	10.287	15,33	6.764	20,90	6.934	20,23	8.161	19,73
21,1	10,0	10.635	14,82	5.465	23,90	5.619	23,03	6.636	22,83
21,1	5,0	9.060	16,69	4.571	25,80	4.726	24,90	5.539	25,07
21,1	1,0	7.982	17,97	2.789	30,68	2.946	29,53	3.418	30,72
21,1	0,5	5.783	21,27	2.227	31,79	2.360	30,74	2.717	32,43
21,1	0,1	4.982	22,28	1.209	34,28	1.282	33,48	1.448	36,27
37,8	25,0	3.398	25,21	1.936	32,85	2.066	31,39	2.332	34,75
37,8	10,0	4.419	23,24	1.273	34,41	1.368	33,24	1.553	37,31
37,8	5,0	3.489	27,19	899	34,47	967	34,29	1.070	38,26
37,8	1,0	2.854	28,06	392	38,39	428	34,92	449	38,35
37,8	0,5	1.702	30,46	295	35,68	322	32,93	316	36,30
37,8	0,1	1.393	30,17	155	29,82	171	28,76	152	30,63
54,4	25,0	834	30,43	586	30,64	627	32,37	572	36,54
54,4	10,0	1.734	30,11	308	31,73	378	30,37	325	33,05
54,4	5,0	1.233	30,65	205	30,87	248	30,44	203	32,86
54,4	1,0	951	30,48	89	30,00	122	27,91	87	27,95
54,4	0,5	510	30,08	75	25,13	104	24,91	71	23,89
54,4	0,1	422	28,17	64	20,01	75	20,88	50	17,29

Na Figura 4.9 são apresentados os valores de módulo dinâmico na frequência de 1Hz para as temperaturas de ensaio de 4,4°C, 21,1°C, 37,8°C e 54,4°C. Nota-se claramente que, o incremento da temperatura de ensaio reduz a rigidez das misturas asfálticas, tanto da quente de referência (Q-1), como as misturas asfálticas mornas M-1, M-2 e M-3, com Evotherm 3G, Gemul XT-15 e CCBIT 113AD, respectivamente. Pode-se verificar também nessa figura que os corpos de prova preparados com massa asfáltica coletada em usina apresentaram maior rigidez do que aqueles moldados com massa asfáltica produzida no laboratório. Esse fenômeno pode ser atribuído ao enrijecimento do ligante asfáltico das massas coletadas em usina, devido ao reaquecimento realizado em laboratório para possibilitar a compactação dos corpos de prova para o ensaio.

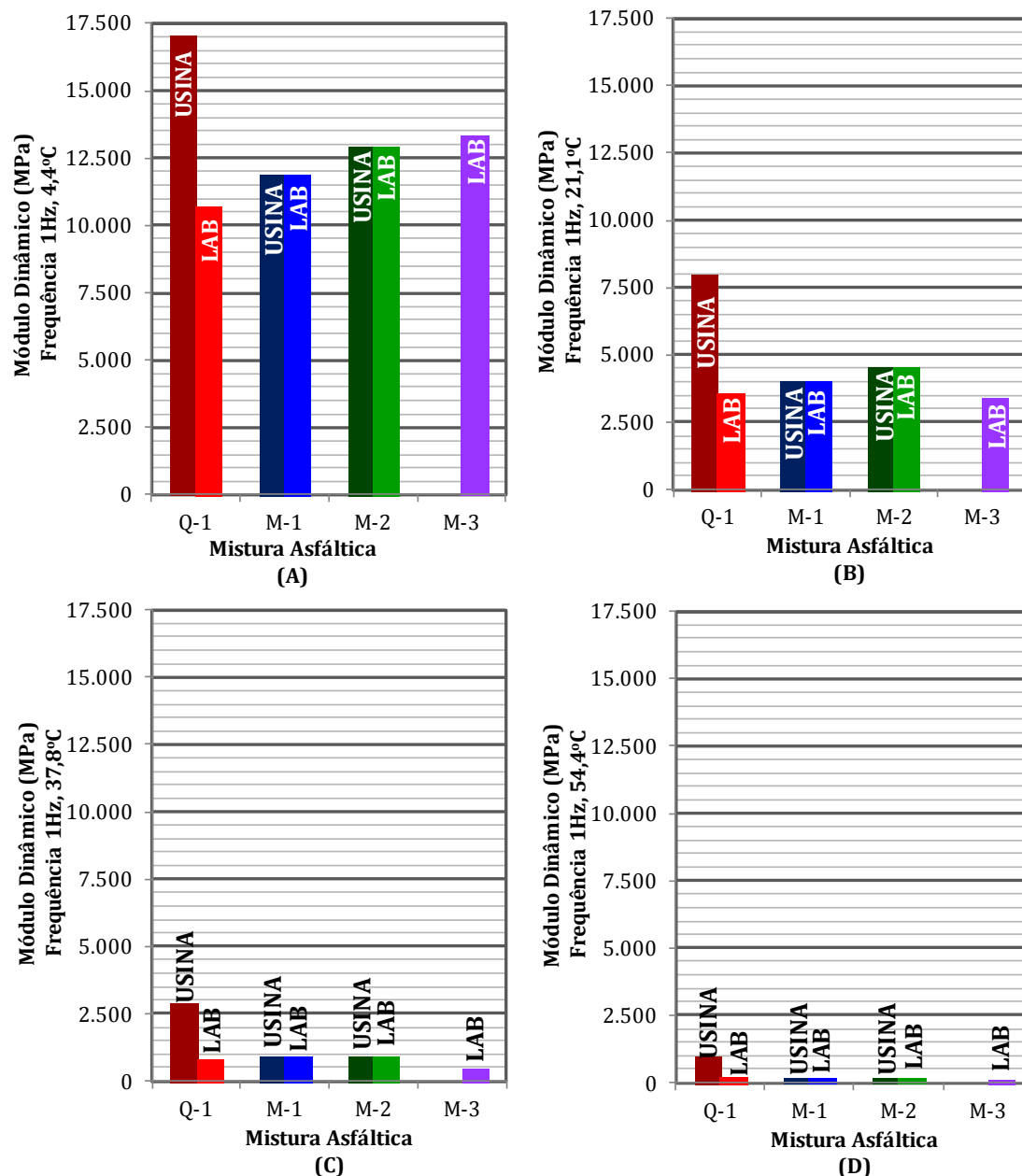


Figura 4.9: Resultados de módulo dinâmico na frequência de 1Hz para: (A) 4,4°C; (B) 21,1°C; (C) 37,8°C e (D) 54,4°C

A Tabela 4.10 foi empregada para construir as curvas mestres das misturas asfálticas Q-1, M-1 e M-2 coletadas em usina, apresentadas na Figura 4.10. Sabe-se que, pelo princípio de superposição, baixa frequência é equivalente a elevadas temperaturas e que, elevadas frequências equivalem a baixas frequências. Assim, da Figura 4.10 pode se afirmar que o incremento de temperatura ou a redução da frequência de aplicação do carregamento reduz o valor de módulo dinâmico (E^*). Essa afirmação é válida para a mistura quente de referência (Q-1) como para as

misturas asfálticas mornas (M-1 e M-2). Contudo, nota-se que as misturas asfálticas mornas apresentaram maior redução do módulo dinâmico, quando comparadas com a mistura asfáltica quente de referência.

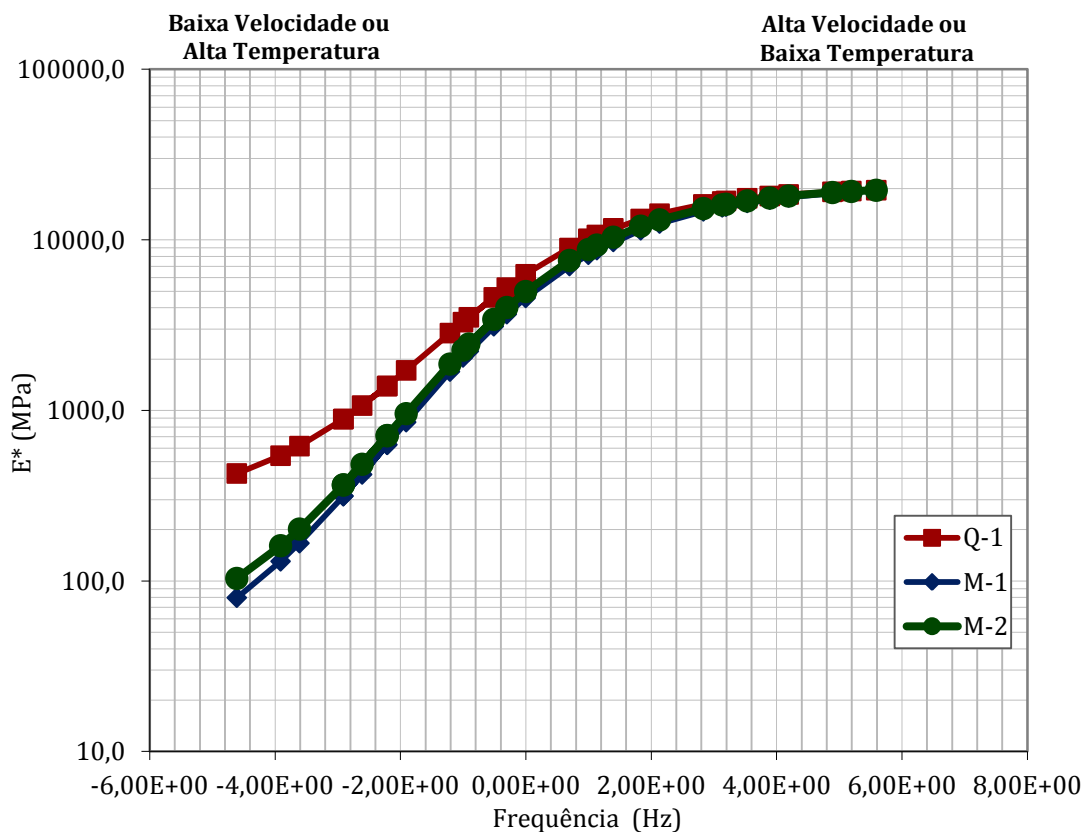


Figura 4.10: Curvas mestres das misturas asfálticas coletadas em usina

Da Tabela 4.11 foi possível obter os dados necessários para a construção das curvas mestres das misturas asfálticas Q-1, M-1, M-2 e M-3, preparadas em laboratório, que são apresentadas na Figura 4.11. Nessa Figura observa-se a mesma tendência observada na Figura 4.10, conforme a frequência diminui, ou a temperatura se incrementa, o módulo dinâmico nas misturas asfálticas é reduzido. Contudo, observa-se que o (E^*) das misturas asfálticas mornas produzidas em laboratório foi mais próximo ao módulo dinâmico da mistura asfáltica quente de referência, quando comparada com os resultados obtidos com as massas asfálticas coletadas em usina.

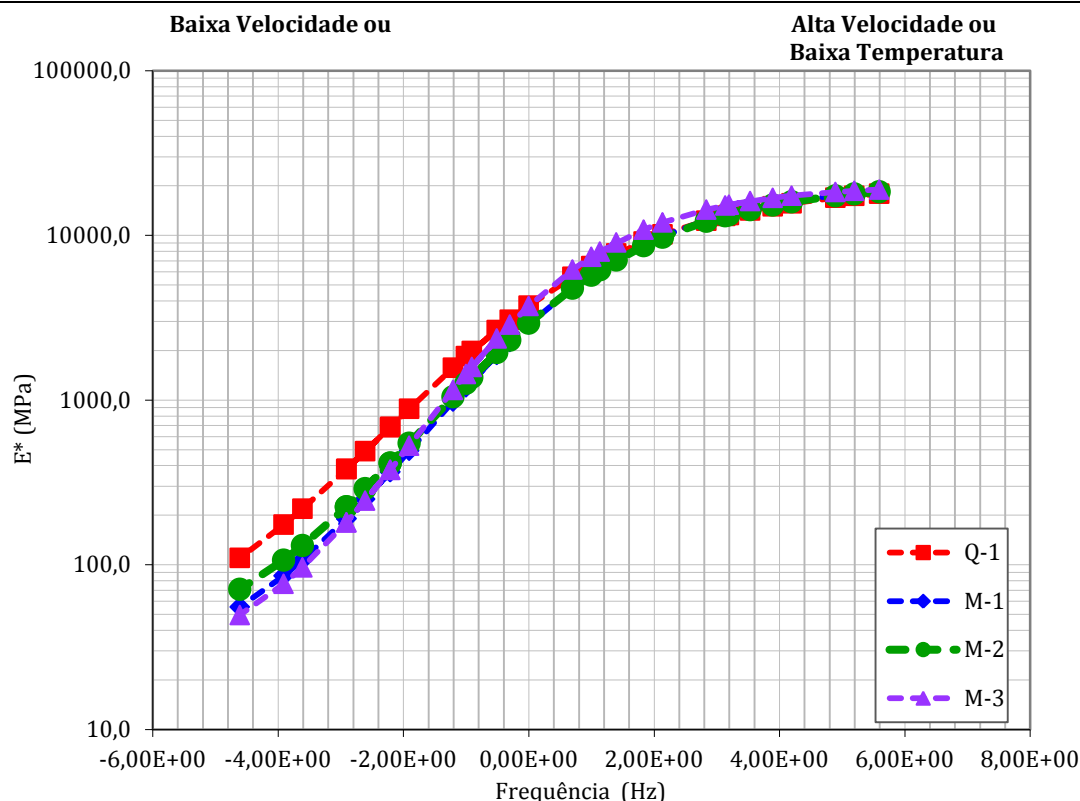


Figura 4.11: Curvas mestres das misturas asfálticas preparadas em laboratório

Nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 são apresentadas as curvas mestres das misturas asfálticas Q-1, M-1 e M-2, respectivamente, obtidas com as massas asfálticas coletadas em usina e com as massas asfálticas preparadas em laboratório. De modo geral, observa-se que, principalmente para temperaturas elevadas ou frequências baixas de carregamento, o E^* das misturas asfálticas produzidas em laboratório é inferior, quando comparado aos módulos dinâmicos obtidos nas misturas asfálticas coletadas em usina. Isto é, as misturas asfálticas coletadas em usina apresentaram-se mais rígidas.

Como foi citado anteriormente, a maior rigidez das misturas asfálticas coletadas em usina pode ser atribuído ao reaquecimento que essas misturas sofreram em laboratório para possibilitar a moldagem dos corpos de prova do ensaio de módulo dinâmico. Sabe-se que o reaquecimento do ligante asfáltico representa o enrijecimento do mesmo, impactando também na rigidez da mistura asfáltica e que é refletida no valor do módulo dinâmico (E^*).

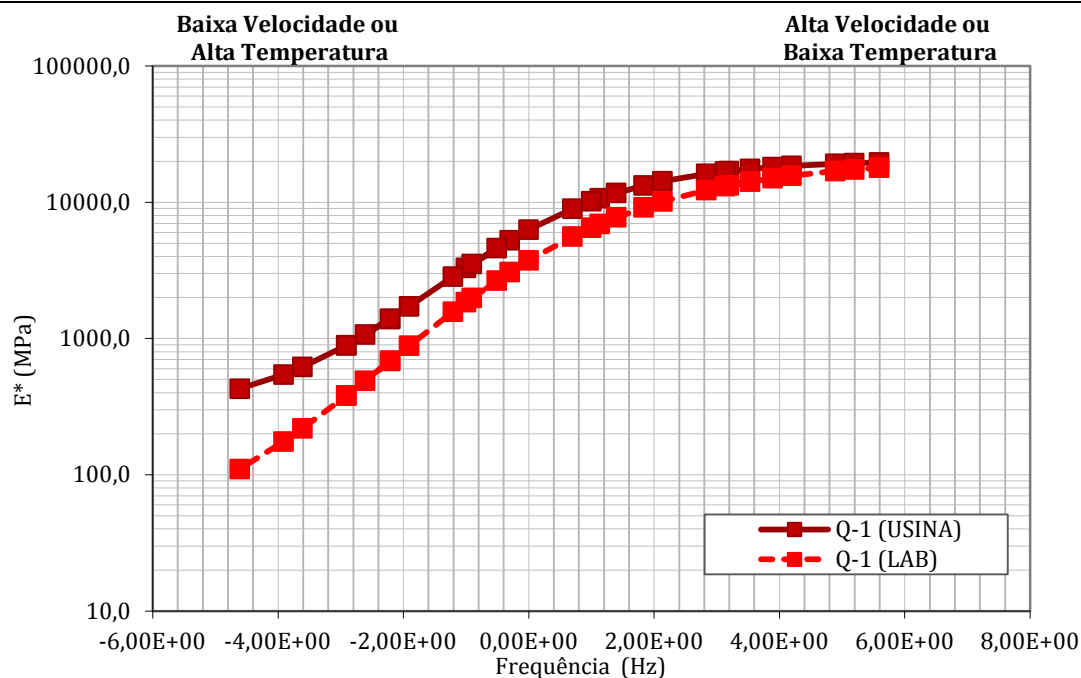


Figura 4.12: Módulo Dinâmico da mistura asfáltica quente de referência (Q-1) obtido em corpos de prova moldados com massa asfáltica coletada em usina e preparada em laboratório

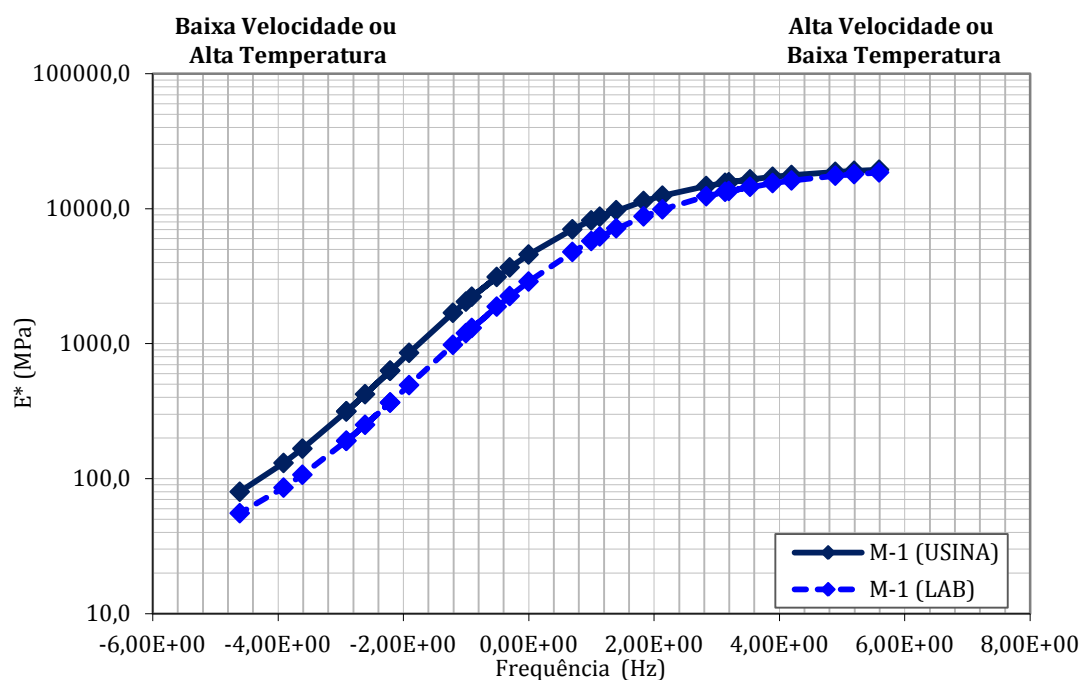


Figura 4.13: Módulo Dinâmico da mistura asfáltica morna M-1 (Evotherm 3G) obtido em corpos de prova moldados com massa asfáltica coletada em usina e preparada em laboratório

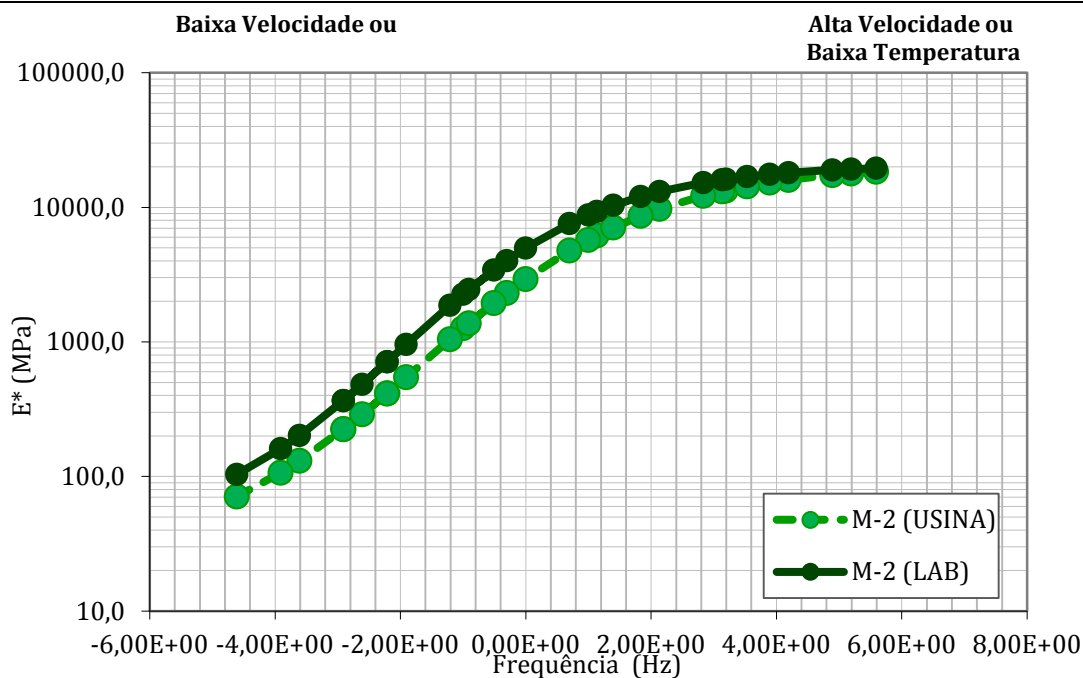


Figura 4.14: Módulo Dinâmico da mistura asfáltica morna M-2 (Gemul XT-15) obtido em corpos de prova moldados com massa asfáltica coletada em usina e preparada em laboratório

4.7. ENSAIO DE FLEXÃO DE VIGA APOIADA EM QUATRO PONTOS

4.7.1. Vida de fadiga

O ensaio de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos não estava programada no início desta pesquisa, contudo, considerou-se interessante complementar o estudo com este ensaio, para verificar as citações da bibliografia consultada (XIAO et al. 2009, ADHIKARI E YOU 2010, JENKINS et al. 2011), que afirmam que as misturas asfálticas mornas apresentam vida de fadiga maior do que as misturas asfálticas quentes convencionais.

Assim, as misturas asfálticas Q-1, M-1 e M-2 foram selecionadas para execução do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos. Na Figura 4.15 são apresentados os resultados de vida de fadiga dessas misturas asfálticas, para corpos de prova produzidos com massa asfáltica coletada em usina.

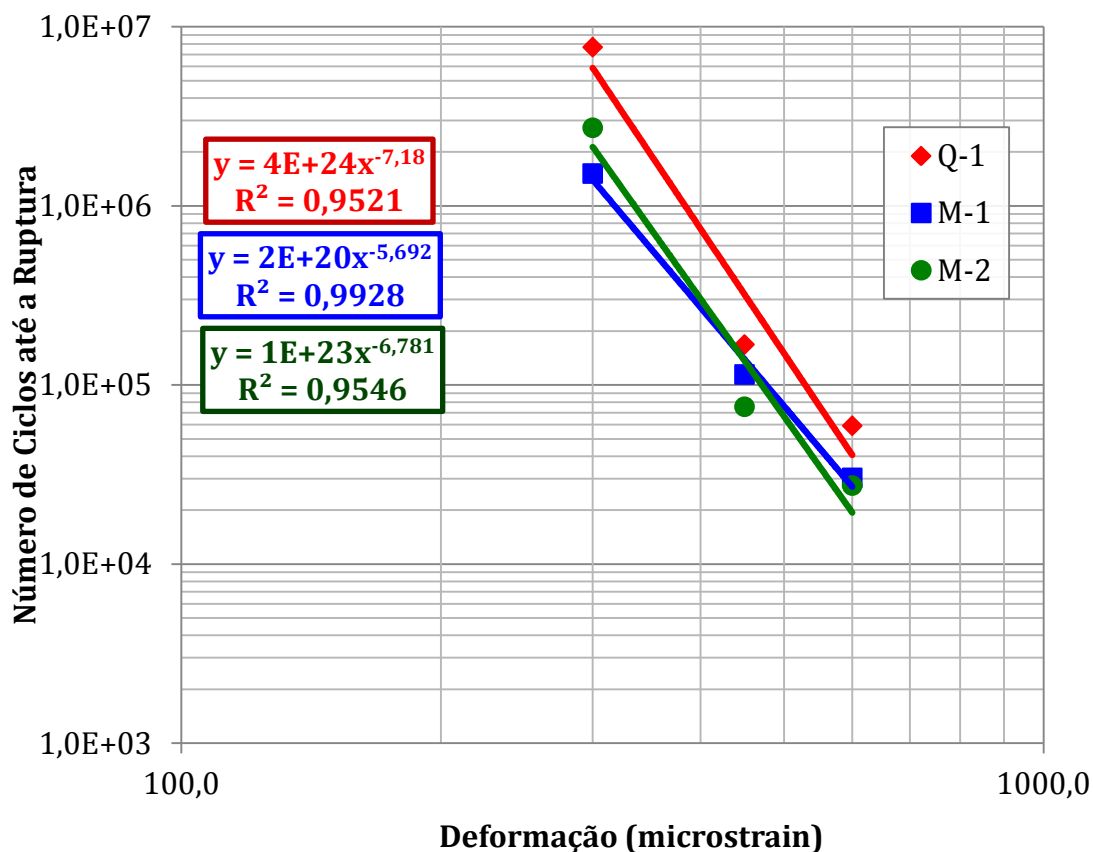


Figura 4.15: Vida de fadiga da mistura asfáltica quente de referência (Q-1) e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica coletada em usina

Notou-se na Figura 4.15 que, a vida de fadiga das misturas asfálticas mornas foi inferior à mistura asfáltica quente de referência Q-1, contradizendo o relatado em diversos estudos internacionais. Assim, os ensaios de fadiga foram novamente executados, mas, em corpos de prova moldados com massa asfáltica preparada em laboratório. Os resultados desses novos ensaios são apresentados na Figura 4.16.

Na Figura 4.16 nota-se que a vida de fadiga das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com Evotherm 3G e Gemul XT-15, respectivamente, foi superior quando comparada com a mistura asfáltica quente de referência Q-1, concordando com as afirmações de outros estudos (XIAO et al. 2009, ADHIKARI E YOU 2010, JENKINS et al. 2011).

A vida de fadiga inferior observada nas misturas asfálticas mornas, quando coletadas em usina, pode ser atribuída a pequenas oscilações em alguns fatores como, a granulometria e teor de ligante asfáltico. Também, o reaquecimento das

misturas asfálticas em laboratório pode ter alterado o comportamento à fadiga das misturas asfálticas, em função do envelhecimento do ligante asfáltico da mistura.

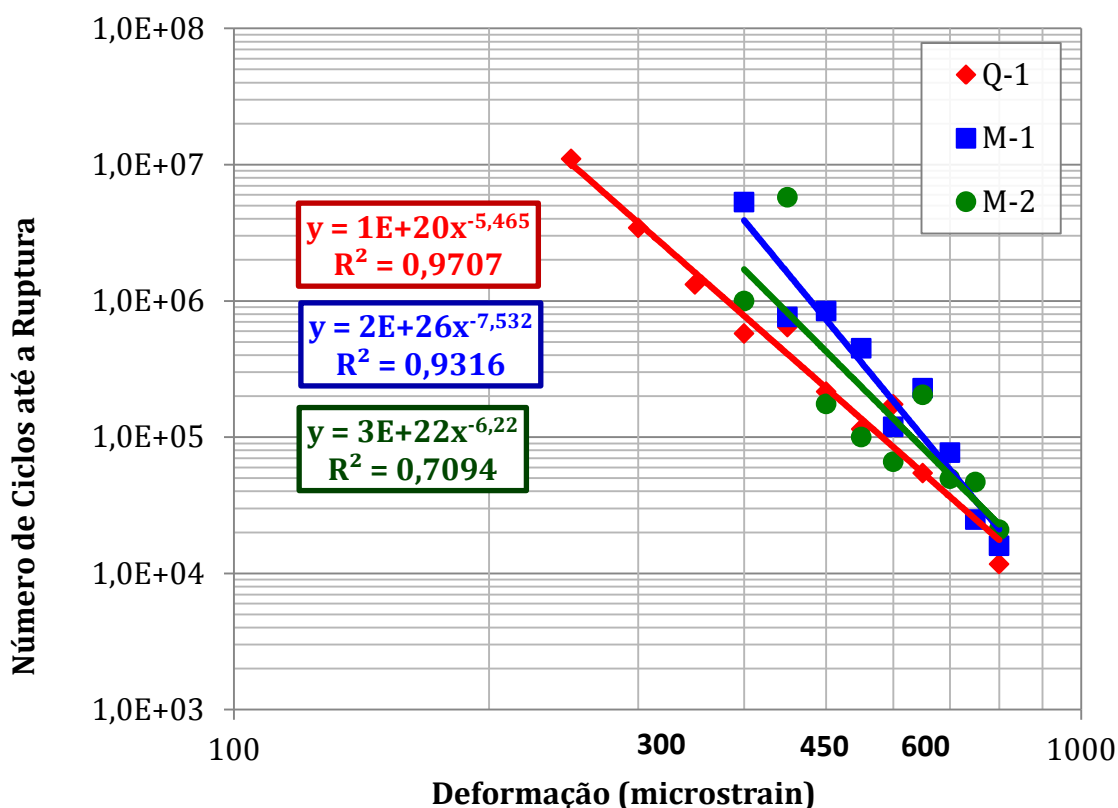


Figura 4.16: Vida de fadiga da mistura asfáltica quente de referência (Q-1) e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica preparada em laboratório

4.7.2. Rigidez à flexão e módulo de elasticidade das misturas asfálticas

Os resultados do parâmetro rigidez à flexão (S), em função do nível de deformação aplicado nos CPs moldados com massa asfáltica coletada em usina, são apresentados na Figura 4.17. De modo geral, nota-se que o incremento do nível de deformação tende a reduzir o valor da rigidez à flexão (S). Também verifica-se que a mistura asfáltica quente apresentou os maiores valores de S , com exceção no nível de deformação de 600 microstrains. Para todos os níveis de deformação a mistura asfáltica morna com Evotherrm® 3G (M- 1) foi a que apresentou o menor valor de rigidez à flexão.

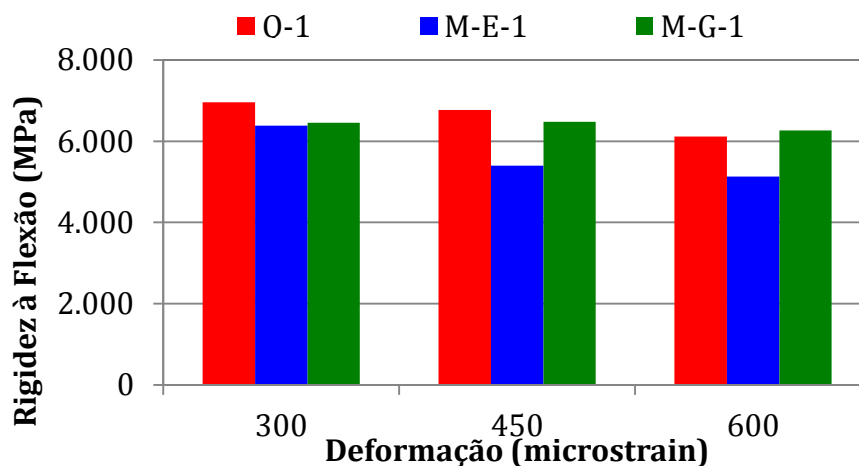


Figura 4.17: Rigidez à flexão da mistura asfáltica quente de referência Q-1 e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica coletada em usina

Na Figura 4.18 é apresentada também a rigidez à flexão das misturas asfálticas estudadas, obtida em corpos de prova moldados com massa asfáltica preparada em laboratório. Vale notar que nesse caso o ensaio de fadiga foi executado em diversos níveis de deformação, de 400 a 800microstrain. Nota-se que não há uma tendência clara de influência de nível de tensão na rigidez das misturas asfálticas, como foi observado na Figura 4.17.

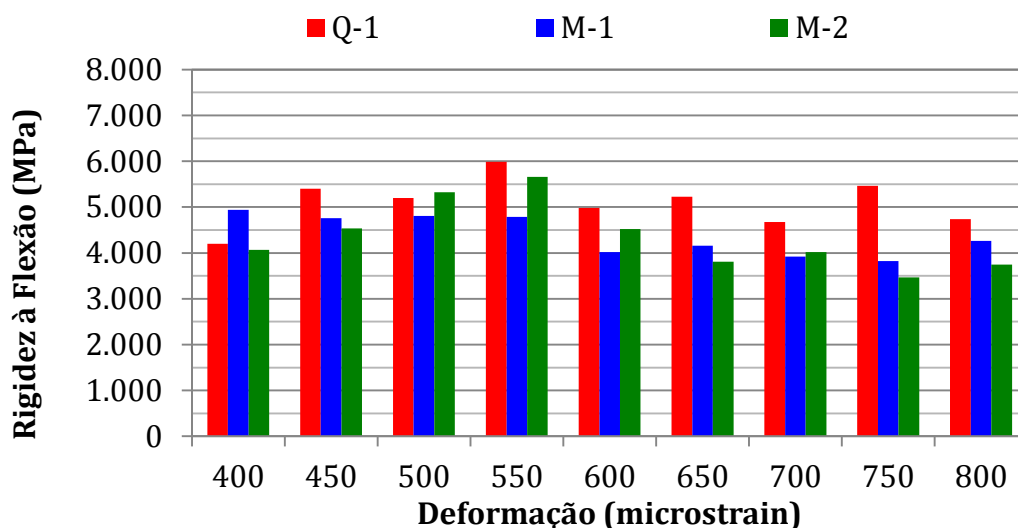


Figura 4.18: Rigidez à flexão da mistura asfáltica quente de referência Q-1 e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica preparada em laboratório

Ainda na Figura 4.18 pode-se verificar que as misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com Evotherm e Gemul, respectivamente, apresentam menor rigidez do que a mistura asfáltica quente de referência Q-1, com exceção dos resultados nos níveis de deformação de 400 e 500 microstrain.

Na Figura 4.19 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade (E) em função do nível de deformação, obtidos no software de aquisição de dados do ensaio, para as misturas asfálticas coletadas em usina. Nota-se que as mesmas tendências observadas no parâmetro rigidez à flexão (S) são observadas também no parâmetro módulo de elasticidade (E).

Nas misturas asfálticas preparadas em laboratório obteve-se também o módulo de elasticidade, apresentado na Figura 4.20. Nota-se também que o E não apresenta uma tendência muito clara com relação ao nível de deformação aplicada durante o ensaio. De modo geral, a misturas asfáltica quente Q-1 apresenta um maior valor de módulo de elasticidade do que as misturas asfálticas mornas M-1 e M-2.

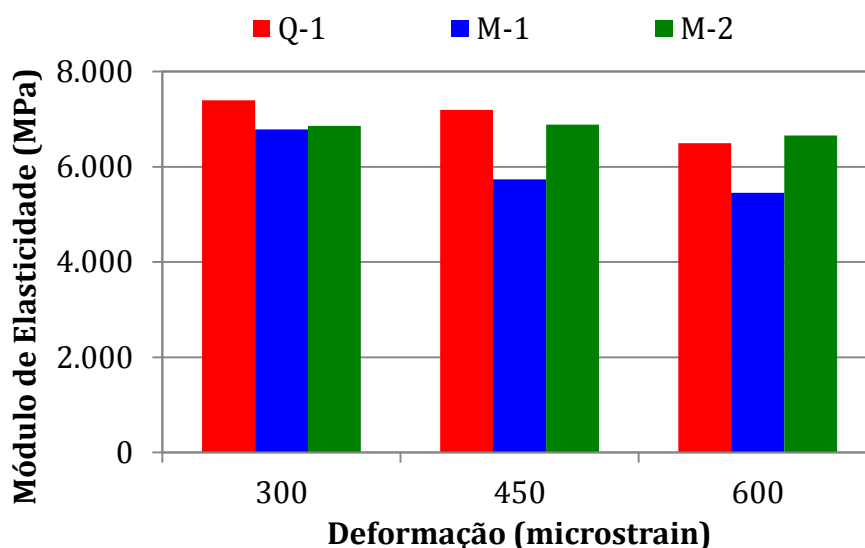


Figura 4.19: Módulo de Elasticidade da mistura asfáltica quente de referência Q-1 e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica coletada em usina

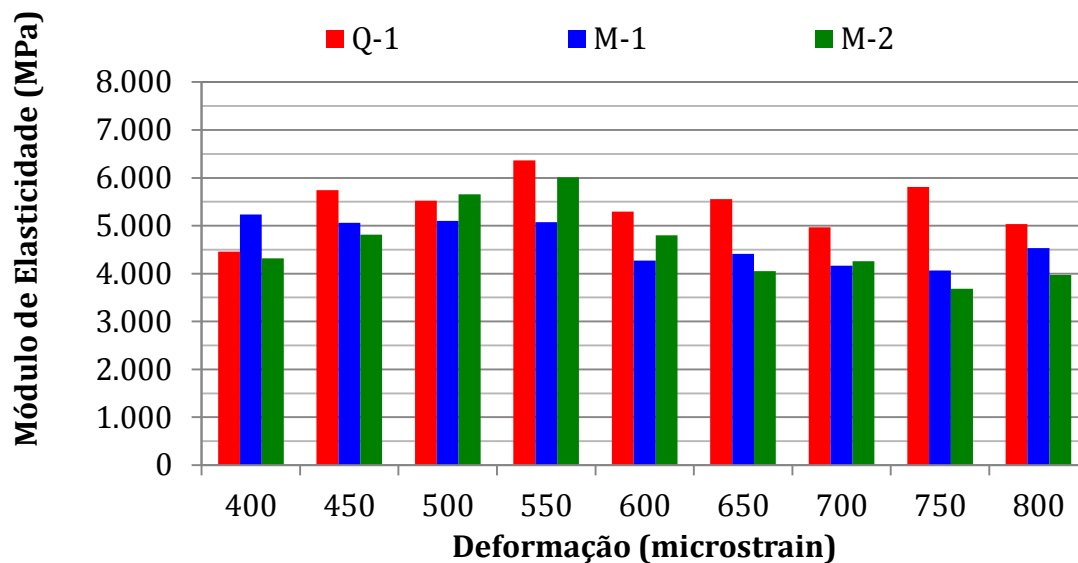


Figura 4.20: Módulo de Elasticidade da mistura asfáltica quente de referência Q-1 e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica preparada em laboratório

4.7.3. Energia dissipada das misturas asfálticas

A energia dissipada por ciclo também é fornecida pelo software de aquisição de dados no ensaio de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos. Na Figura 4.21 e 4.22 são apresentados os resultados de energia dissipada por ciclo em função do nível de deformação, para as misturas asfálticas coletadas em usina e preparadas em laboratório, respectivamente. Nota-se que, em ambas as condições de preparação da mistura asfáltica, conforme aumenta o nível de deformação, a energia dissipada por ciclo também é incrementada, em todas as misturas avaliadas.

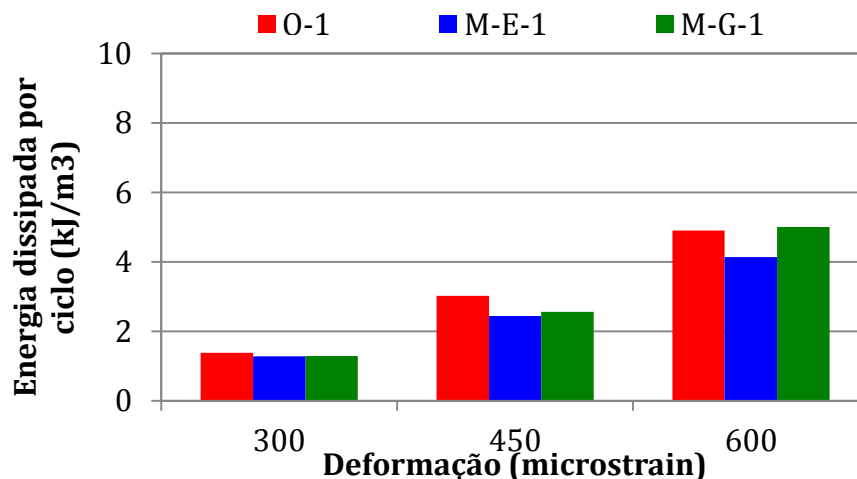


Figura 4.21: Energia dissipada nos ciclos iniciais da mistura asfáltica quente de referência Q-1 e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica coletada em usina

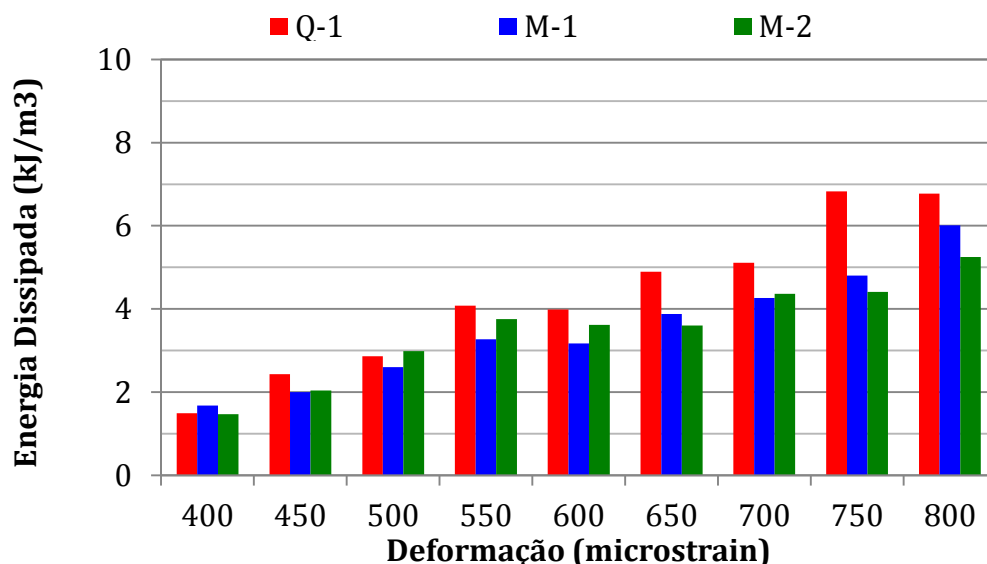


Figura 4.22: Energia dissipada nos ciclos iniciais da mistura asfáltica quente de referência Q-1 e das misturas asfálticas mornas M-1 e M-2, com massa asfáltica preparada em laboratório

4.8. DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM TRILHA DE RODA

Os ensaios de deformação permanente em trilha de roda foram executados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-PTR-EPUSP). A Figura 4.23 e a Figura 4.24 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos

“Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas”

para as misturas asfálticas coletadas em usina de asfalto e as preparadas em laboratório.

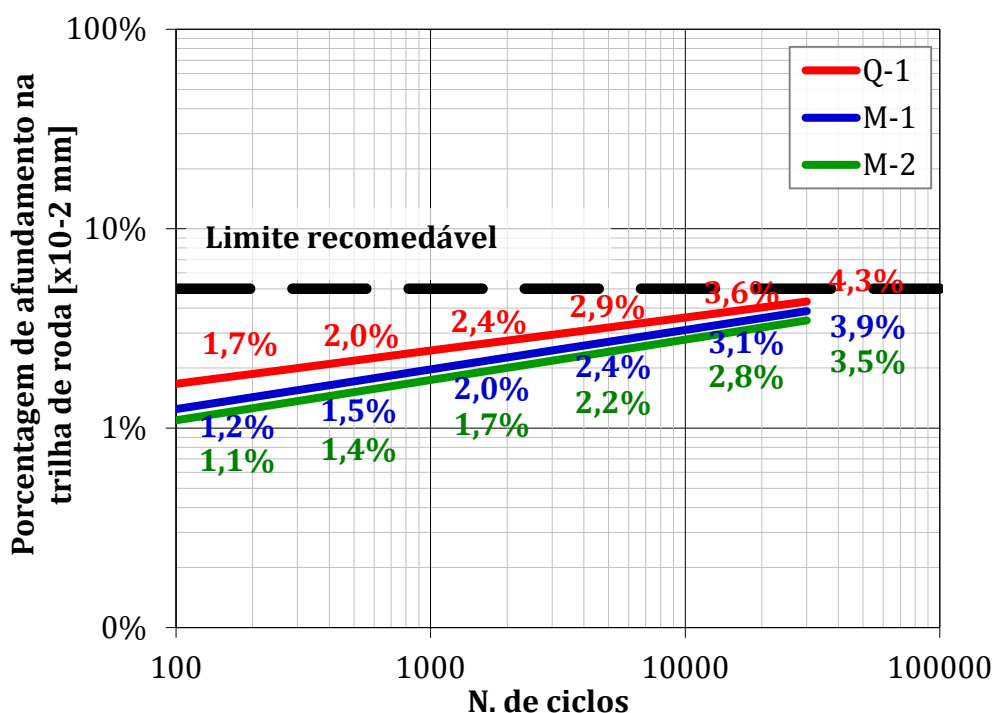


Figura 4.23: Resultados de deformação permanente dos corpos de prova moldados com massas asfálticas coletadas em usina

Na avaliação visual das Figuras 4.23 e 4.24 verifica-se que todas as misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa (Q-1, M-1, M-2 e M-3) não possuem potencial para apresentar deformação permanente por afundamento em trilha de roda. Além disso, observa-se que as misturas mornas demonstraram comportamento muito similar ao da mistura a quente, em ambos os casos, inclusive a mistura M-3 que foi produzida com um ligante asfáltico convencional CAP 30/45 modificado com 3,2% de CCBIt.

Pode-se notar ainda nas Figuras 4.23 e 4.24 que as misturas de usina apresentaram deformação permanente ligeiramente inferior àquelas de laboratório, o que pode ser decorrência do maior envelhecimento sofrido pelo material pelo reaquecimento posteriormente realizado em laboratório, assim como foi notado nos resultados do ensaio de fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos e no módulo dinâmico.

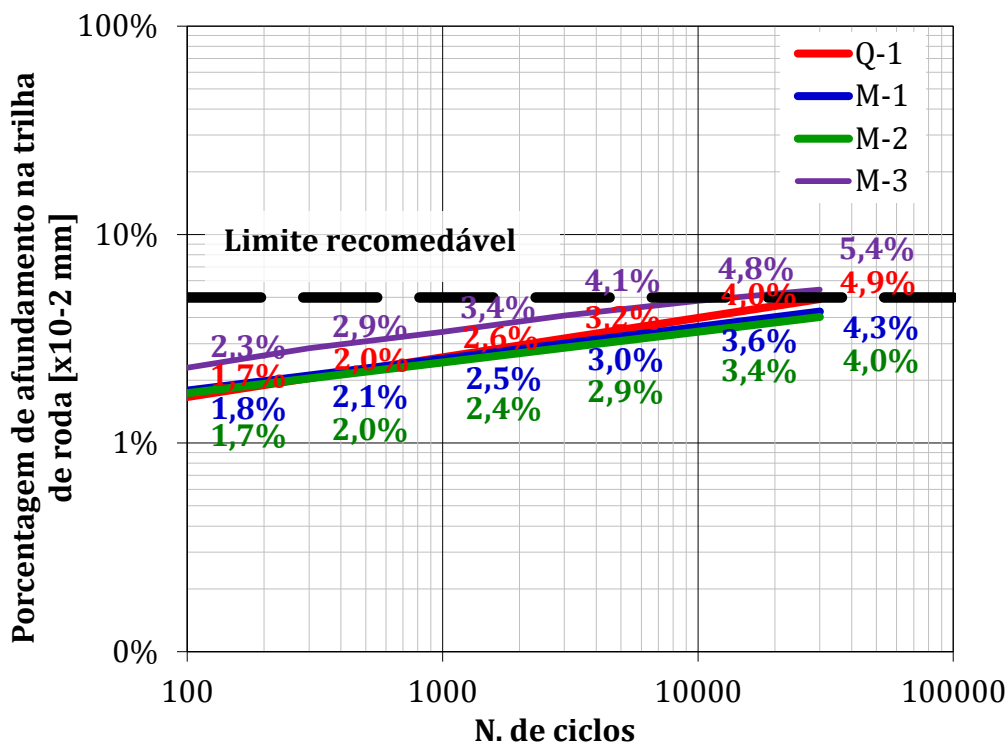


Figura 4.24: Resultados de deformação permanente dos corpos de prova moldados com massas asfálticas preparadas no laboratório

Por fim, comparando-se as três tecnologias de misturas mornas (Evotherm® 3G, Gemul XT-15 e CCBIt 113AD), verifica-se que todas mostraram comportamento muito semelhante neste ensaio. De maneira geral, pode-se dizer que as misturas mornas demonstraram comportamento satisfatório quanto à resistência à deformação permanente.

4.9. AVALIAÇÃO DE EMISSÕES ASFÁLTICAS

A avaliação das emissões asfálticas nesta pesquisa foi focada na análise dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e foi realizada em parceria com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação LTP-EPUSP. Neste caso, foram analisados os HPAs prioritários que são considerados prováveis carcinogênicos humanos, tanto na fase particulada quanto gasosa.

As amostragens realizadas nesta pesquisa compreendem as condições de laboratório, usina e pista. Cabe mencionar que a amostragem de cada uma das misturas asfálticas, em cada uma das condições, foi executada em dias diferentes.

4.9.1. Resultados da coleta de emissões asfálticas em laboratório

Na Figura 4.25 são apresentados os resultados obtidos na análise química das emissões das misturas asfálticas na fase particulada, durante a usinagem em laboratório. Em seguida, a Tabela 4.12 mostra a somatória dos HPAs (HPAs totais encontrados), onde se notam dois aspectos: (i) ambas as misturas mornas tiveram resultados semelhantes entre si; (ii) a mistura a quente Q-1 produziu cerca de 35% de HPAs prioritários a mais que as misturas asfálticas mornas M-1 (Evotherm) e M-2 (Gemul).

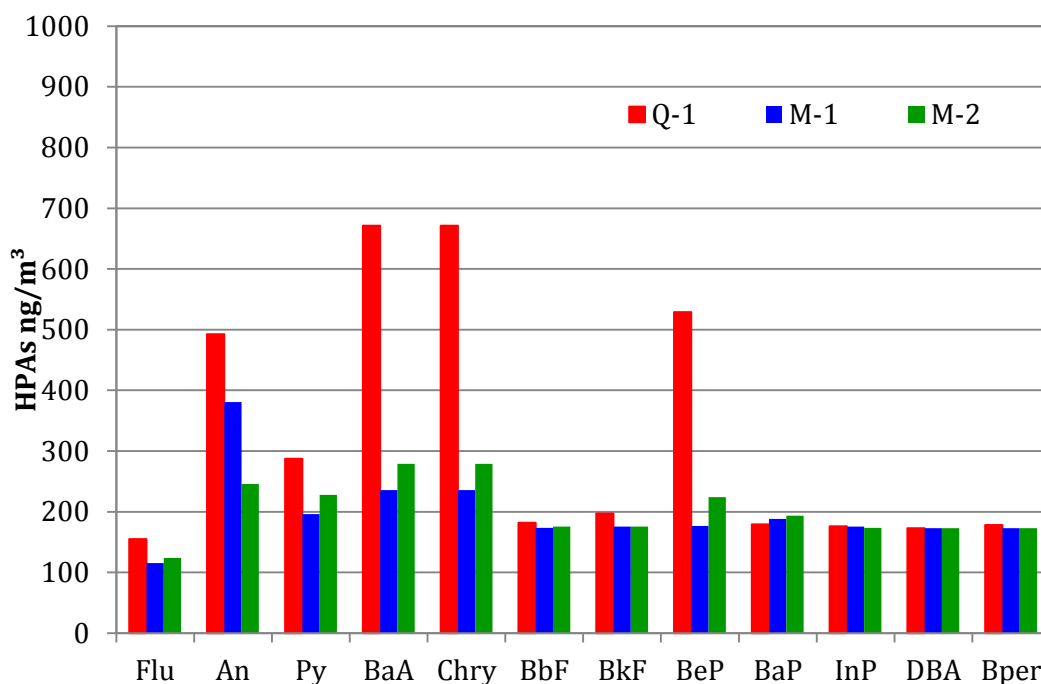


Figura 4.25: HPAs prioritários na fase particulada coletados durante preparação de massa asfáltica em laboratório

Tabela 4.12: Somatória de HPAs prioritários na fase particulada, em amostragem em laboratório

Mistura asfáltica	HPAs (Somatória) [ng/m ³]
Q-1	3892
M-1 (Evotherm)	2398
M-2 (Gemul)	2443

Os resultados da análise química das emissões na fase gasosa das misturas asfálticas usinadas em laboratório são apresentados na Figura 4.26. Infelizmente ocorreu algum problema durante a amostragem e/ou análise química da mistura morna M-2 com aditivo Gemul, não sendo possível a obtenção do resultado neste caso. Cabe ainda mencionar que alguns compostos não puderam ser quantificados por estarem fora do limite de detecção do equipamento. Na Tabela 4.13 são apresentadas as somatórias dos HPAs (HPAs totais encontrados) e, assim como na fase particulada, a mistura a quente produziu cerca de 34% de HPAs prioritários a mais que as misturas mornas na fase gasosa.

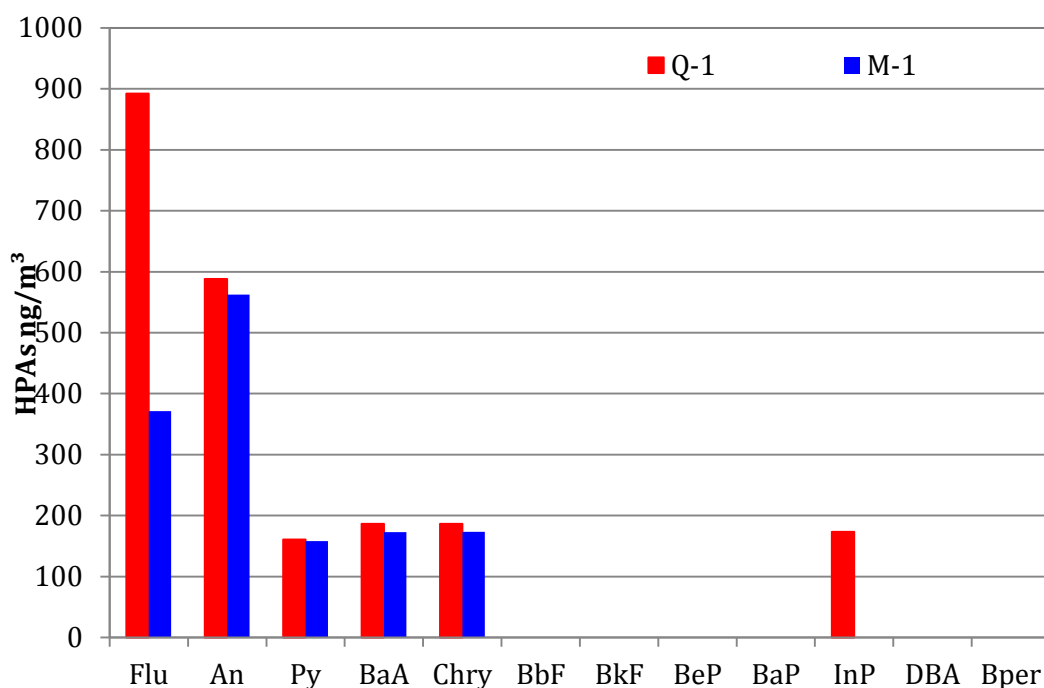


Figura 4.26: HPAs prioritários na fase gasosa, em amostragem em laboratório

Tabela 4.13: Somatória de HPAs prioritários na fase gasosa, em amostragem em laboratório

Mistura asfáltica	HPAs (Somatória) [ng/m ³]
Q-1	2188
M-1 (Evotherm)	1439

Na Figura 4.27 é apresentada a somatória do total de HPAs encontrados para cada tipo de mistura asfáltica, na qual é possível verificar a influência de cada fase (particulada e gasosa) nas emissões asfálticas. Nota-se que tanto na mistura a quente quanto na mistura morna a fase particulada tem maior influência na emissão de HPAs sendo cerca de 60% do total em cada caso.

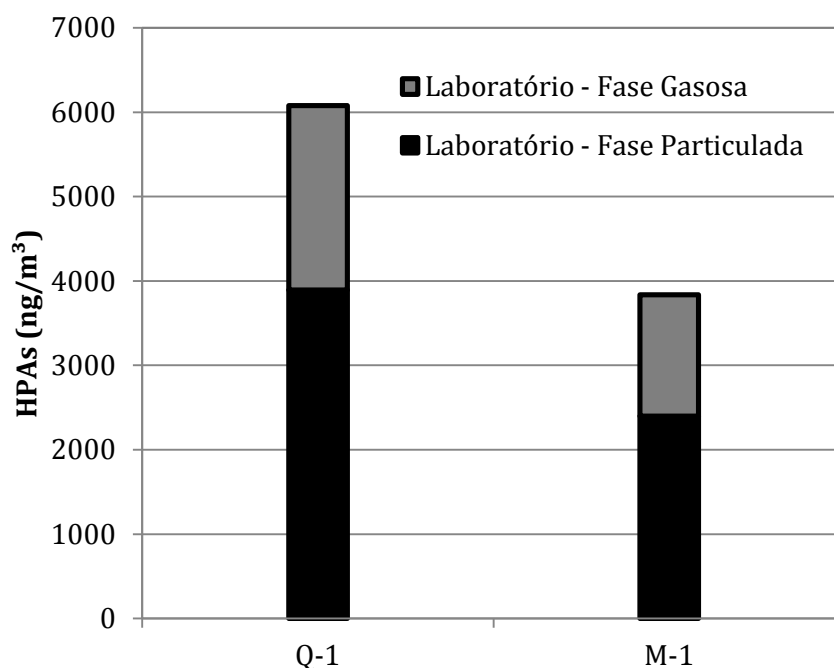


Figura 4.27: HPAs prioritários totais (fase particulada e gasosa), em amostragem em laboratório

A Figura 4.28 apresenta os resultados obtidos na análise de compostos HPAs

prioritários na fase particulada da mistura asfáltica morna M-3 contendo aditivo CCBIt, cuja amostragem foi feita em laboratório. Nota-se que neste caso somente 5 (dos 12) compostos prioritários foram passíveis de quantificação (dentro do limite de detecção do equipamento), sendo que na somatória dos HPAs (HPAs totais encontrados) obteve-se valor de 795 ng/m³.

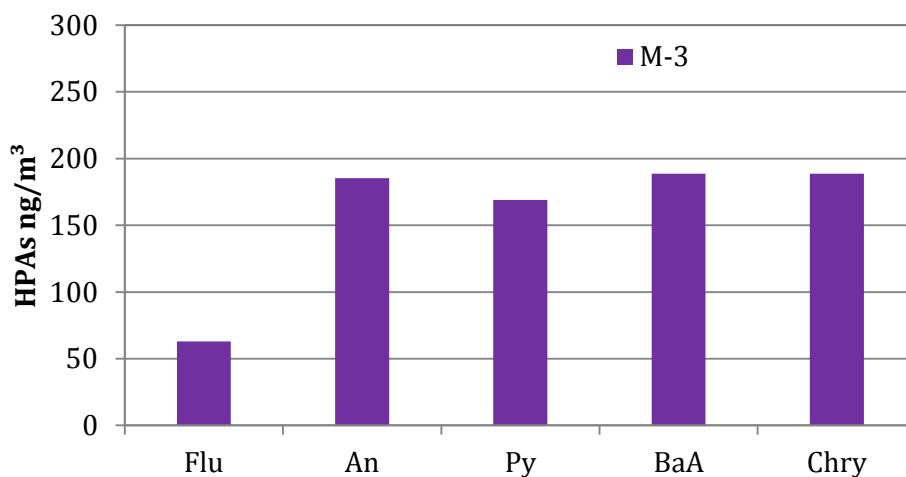


Figura 4.28: HPAs prioritários na fase particulada, da amostragem em laboratório da mistura morna M-3 com CCBIt

Já a Figura 4.29 indica os resultados obtidos na análise de compostos HPAs prioritários na fase gasosa da mistura asfáltica morna M-3 contendo aditivo CCBIt, cuja amostragem foi feita em laboratório. Percebe-se que neste caso somente 2 (dos 12) compostos prioritários foram quantificados, sendo que na somatória dos HPAs (HPAs totais encontrados) obteve-se valor de 630 ng/m³.

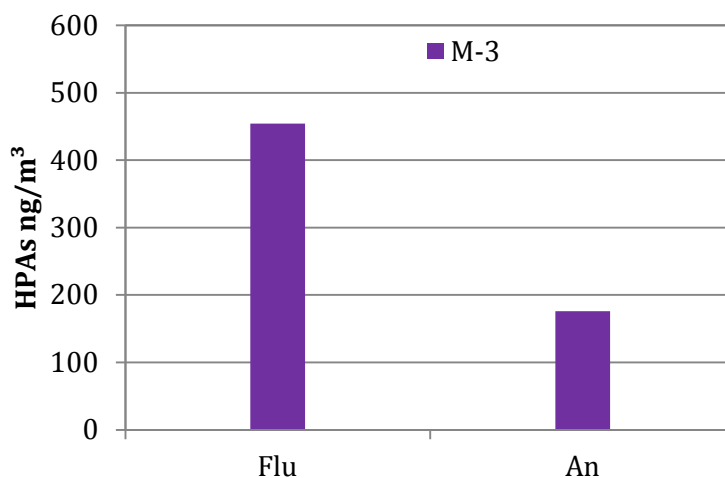


Figura 4.29: HPAs prioritários na fase gasosa, em amostragem em laboratório –

Por fim, na proporção particulada/gasosa verificou-se que a maior parte das emissões de HPAs neste caso ocorreu na fase particulada, correspondendo a 56% na somatória total.

4.9.2. Resultados da coleta de emissões asfálticas em usina de asfalto

Na Figura 4.30 são apresentados os resultados da análise de compostos HPAs prioritários na fase particulada, cuja amostragem foi feita em usina de asfalto. Em seguida, a Tabela 4.14 mostra a somatória dos HPAs (HPAs totais encontrados) onde, seguindo a mesma tendência do laboratório, de maneira geral, a mistura a quente Q-1 produziu cerca de 20% de HPAs prioritários a mais que as misturas mornas M-1 e M-2. É importante ressaltar que a concentração de HPAs em ambiente externo também pode ser influenciada pela queima de combustível dos equipamentos da própria usina e dos caminhões, além da existência de vento no momento da amostragem, da temperatura ambiente, umidade relativa, entre outros fatores.

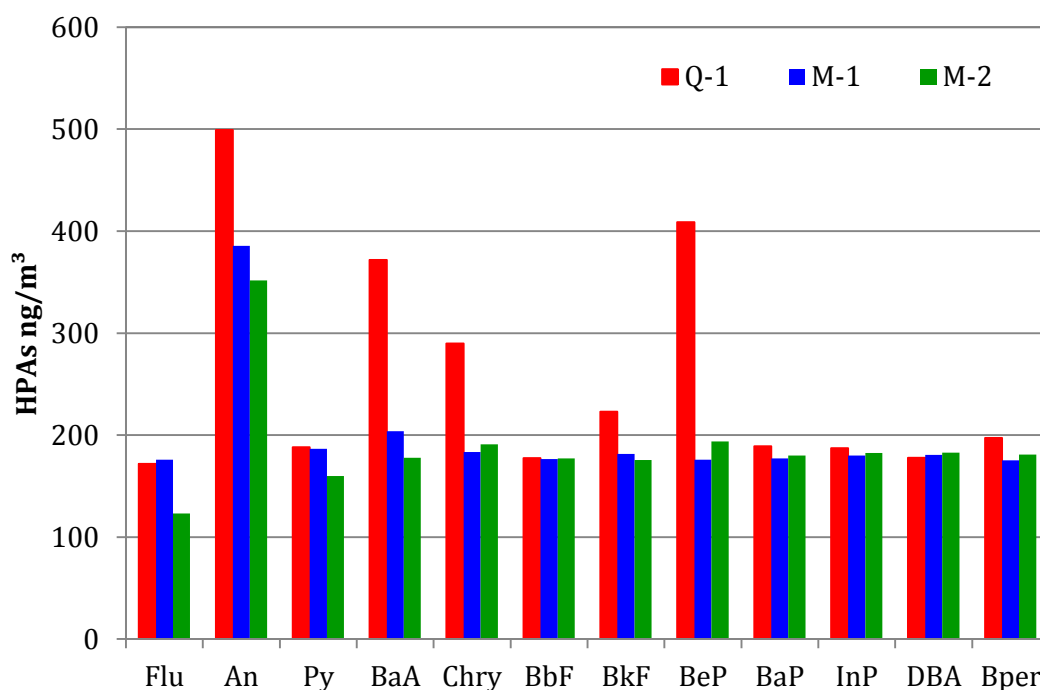


Figura 4.30: HPAs prioritários na fase particulada, para amostragem em usina

Tabela 4.14: Somatória de HPAs prioritários na fase particulada, em amostragem em usina

Mistura asfáltica	HPAs (Somatória) [ng/m ³]
Q-1	3081
M-1 (Evotherm)	2383
M-2 (Gemul)	2277

Na 4.31 são apresentados os resultados da análise química das emissões na fase gasosa das misturas asfálticas de usina de asfalto. Assim como nas amostras coletadas em laboratório, alguns compostos não puderam ser quantificados por estarem fora do limite de detecção do equipamento. Na Tabela 4.15 são apresentadas as somatórias dos HPAs totais encontrados na fase gasosa, verificou-se que as misturas asfálticas a quente produziu cerca de 58% de HPAs prioritários a mais que a mistura morna.

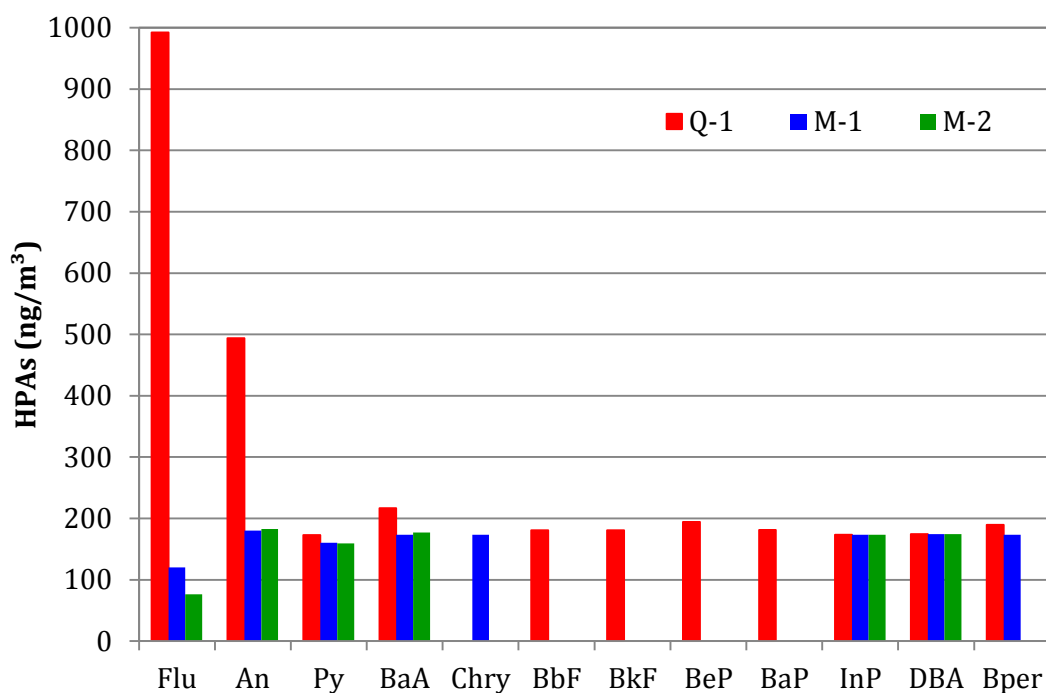


Figura 4.31: HPAs prioritários na fase gasosa, em amostragem em usina

Tabela 4.15: Somatória de HPAs prioritários na fase gasosa, em amostragem em usina

Mistura asfáltica	HPAs (Somatória) [ng/m³]
Q-1	3149
M-1(Evotherm)	1329
M-2 (Gemul)	944

A somatória total dos HPAs encontrados para cada tipo de mistura asfáltica é apresentada também na Figura 4.32, onde nota-se que ambas as misturas mornas tiveram resultados semelhantes e que a mistura a quente produziu cerca de 40% de HPAs prioritários as mornas, sendo praticamente iguais as proporções entre as fases particulada e gasosa.

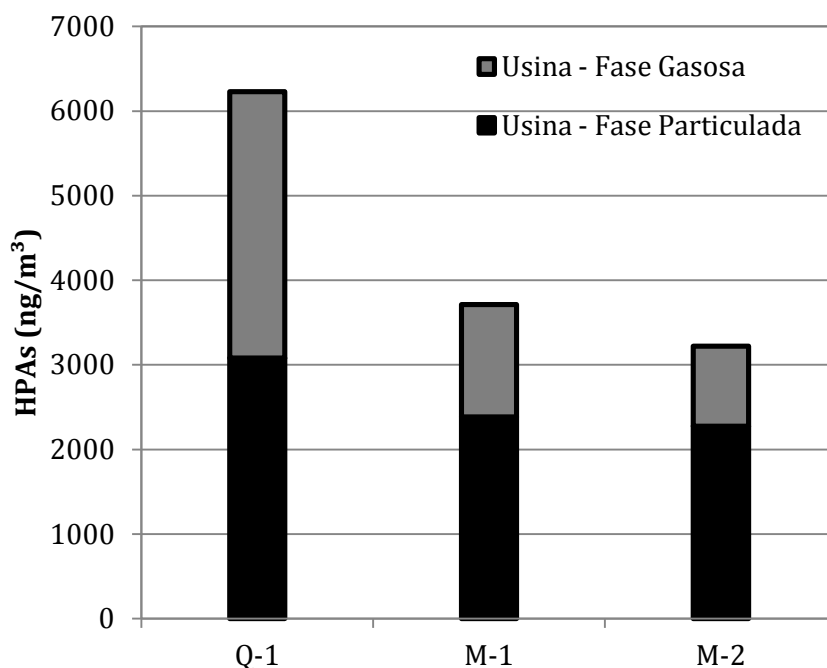


Figura 4.32: HPAs prioritários totais (fase particulada e gasosa), para amostragem de emissões realizada em usina

4.9.3. Resultados da coleta de emissões asfálticas em pista

Na Figura 4.33 são apresentados os resultados da análise de compostos HPAs prioritários na fase particulada, cuja amostragem foi realizada em pista. Em seguida, a Tabela 4.16 mostra a somatória dos HPAs (HPAs totais encontrados). Da mesma forma relatada nos itens anteriores, no geral, a mistura a quente produziu cerca de 11% de HPAs prioritários a mais que as misturas mornas. Neste caso, que ressalta que a concentração de HPAs no ambiente também pode ser influenciada por outros fatores externos no momento da amostragem.

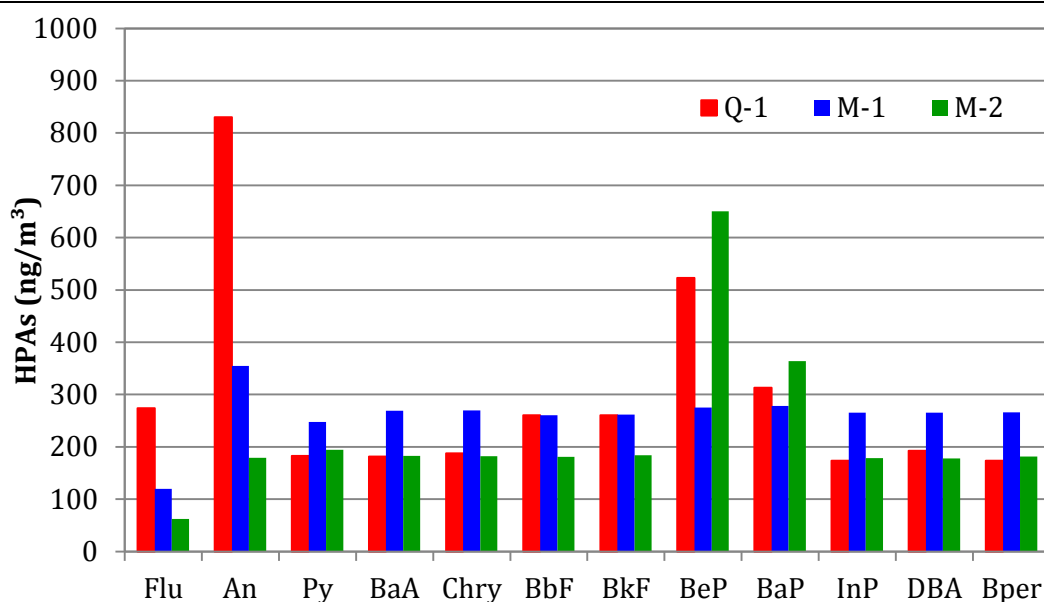


Figura 4.33: HPAs prioritários na fase particulada, em amostragem em pista

Tabela 4.16: Somatória de HPAs prioritários na fase particulada, para amostragem realizada em pista

Mistura asfáltica	HPAs (Somatória) [ng/m³]
Quente	3553
Morna (Evotherm)	3135
Morna (Gemul)	2718

Na Figura 4.34 são apresentados os resultados da análise química das emissões na fase gasosa das misturas asfálticas em pista. Assim como no item 4.9.1, infelizmente ocorreu algum problema durante a amostragem e/ou análise química da mistura morna M-1, agora com aditivo Evotherm, não sendo possível a obtenção do resultado neste caso. Igualmente a situações anteriormente citadas, alguns compostos não puderam ser quantificados por estarem fora do limite de detecção do equipamento. Na Tabela 4.17 são apresentadas as somatórias dos HPAs (HPAs totais encontrados), onde pode-se verificar que as emissões dos HPAs com a mistura morna foram diminuídas em 60% em relação a mistura convencional a quente.

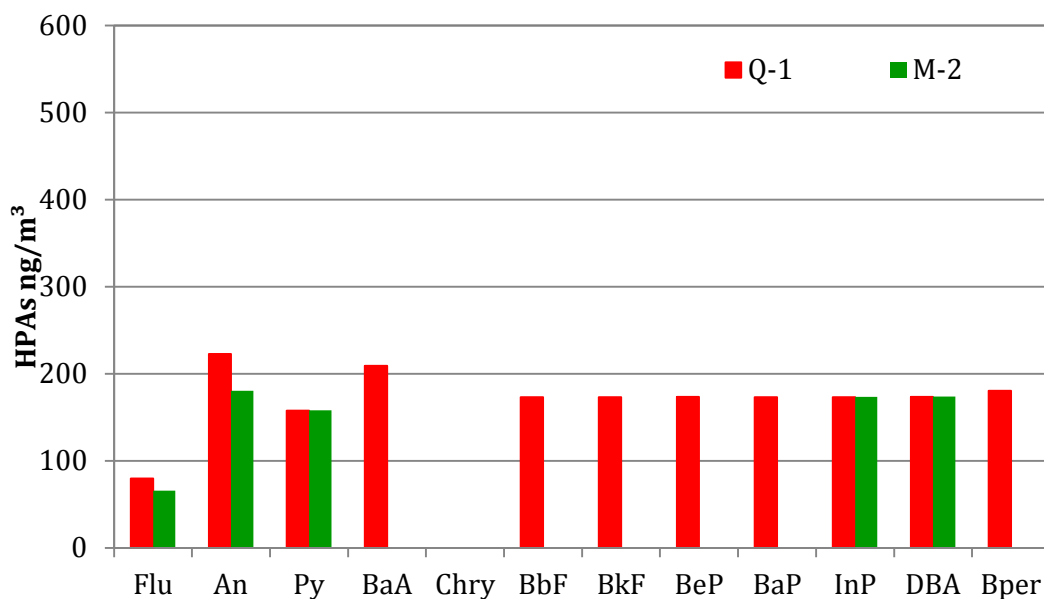


Figura 4.34: HPAs prioritários na fase gasosa, para amostragem realizada em pista

Tabela 4.17: Somatória de HPAs prioritários na fase particulada, para amostragem realizada em pista

Mistura asfáltica	HPAs (Somatória) [ng/m³]
Quente	1889
Morna (Gemul)	751

A comparação da somatória do total dos HPAs apresentada na Figura 4.35 mostra uma redução de cerca de 35% do total na produção de HPAs pela mistura asfáltica morna M-2 em relação a convencional a quente Q-1, sendo maior a emissão na fase particulada para ambas as misturas, assim como observado na condição de laboratório.

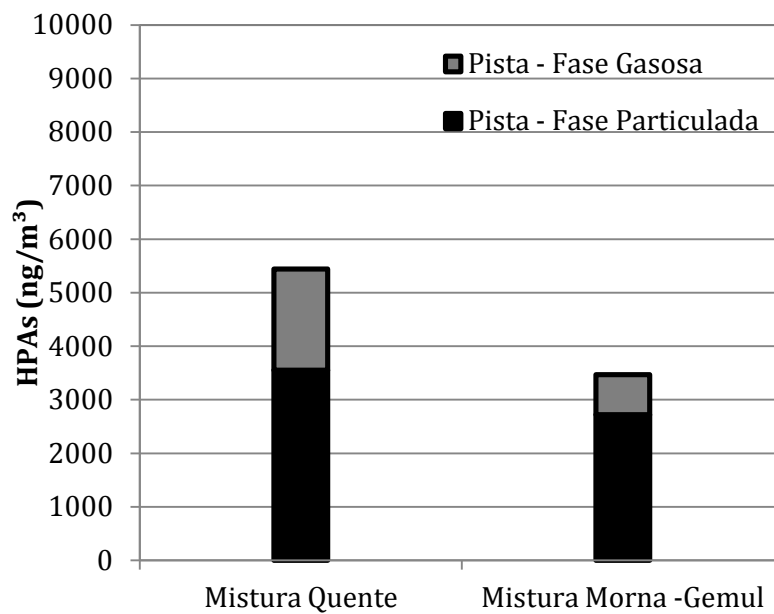


Figura 4.35: Porcentagem de HPAs prioritários totais (fase particulada e gasosa), para amostragem realizada em pista

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foram estudadas três tecnologias de aditivos mornos disponíveis no mercado nacional para produção de misturas asfálticas mornas, duas do tipo químico surfactantes (Evotherm® 3G e Gemul XT-15) e uma do tipo cera orgânica (CCBit 113AD).

Esses aditivos foram usados para compor três misturas asfálticas mornas, sendo que para as misturas asfálticas mornas com Evotherm® 3G e Gemul XT-15, foi utilizado um ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moído. Já na mistura asfáltica morna com CCBit 113AD foi utilizado um ligante asfáltico do tipo CAP 30/45. Para efeitos comparativos foi executada uma mistura asfáltica quente de referência com ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moído.

Os ensaios mecânicos de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, fadiga por flexão de viga apoiada em quatro pontos e deformação permanente por trilha de roda foram executados nas misturas asfálticas. Os corpos de prova utilizados para execução desses ensaios foram produzidos com massa asfáltica produzida em laboratório e também com massa asfáltica coletada em usina.

Os resultados desses ensaios mecânicos permitem realizar as seguintes conclusões com relação às misturas asfálticas mornas:

- Com relação ao ensaio de resistência à tração, notou-se que as misturas asfálticas mornas coletadas em usina apresentaram resistência similar à mistura asfáltica quente de referência. As misturas mornas com Evotherm 3G e Gemul XT-15 produzidas em laboratório apresentaram RT inferior à mistura de referência, contudo todos os valores de resistência foram superiores a 0,65MPa, que é o valor mínimo usualmente recomendado para misturas asfálticas. Vale salientar que a mistura morna com CCBit 113AD preparada com CAP 30/45 apresentou valores de RT similares à mistura asfáltica quente com ligante asfáltico modificado por borracha.

- O ensaio de dano por umidade induzida (DUI) mostrou que as misturas asfálticas mornas apresentam boa resistência à ação deletéria da água, similar e até superior à mistura asfáltica quente de referência. Salienta-se que todas as misturas asfálticas foram compostas com 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1.
- No ensaio de módulo de resiliência verificou-se que, para o caso das massas coletadas em usina, as misturas asfálticas mornas apresentaram comportamento similar ao observado na mistura asfáltica quente. No caso dos corpos de prova produzidos com massa asfáltica de laboratório, as misturas asfálticas mornas apresentaram rigidez levemente inferior à mistura asfáltica quente.
- As curvas mestres das misturas asfálticas mornas mostraram também uma tendência de redução de rigidez das misturas asfálticas mornas, de forma mais notória no caso em que os corpos de prova foram produzidos em laboratório. De modo geral, as misturas produzidas em laboratório apresentaram valores de módulo dinâmico inferiores aos obtidos nas misturas coletadas em usina. A maior rigidez das misturas asfálticas coletadas em usina pode ser atribuído ao reaquecimento que essas misturas sofreram em laboratório para possibilitar a moldagem dos corpos de prova do ensaio de módulo dinâmico. Sabe-se que o reaquecimento do ligante asfáltico representa o enrijecimento do mesmo, impactando também na rigidez da mistura asfáltica e que é refletida no valor do módulo dinâmico.
- Embora as misturas asfálticas mornas tenham apresentado rigidez levemente inferior à mistura asfáltica quente de referência, constatou-se no ensaio de deformação permanente por trilha de roda que, as misturas asfálticas mornas não possuem potencial para apresentar esse tipo de defeito. Os ensaios realizados no simulador de tráfego francês tipo LCPC mostraram que as misturas asfálticas mornas com Evotherm 3G, Gemul XT-15 e CCBit 113AD apresentam valores de afundamento de trilha de roda muito similares à mistura asfáltica quente de referência, em todos os casos inferior a limite máximo aceitável.
- Com relação à vida de fadiga obtido no ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos, notou-se que as misturas asfálticas mornas coletadas em

usina tenderiam a apresentar uma menor vida de fadiga, quando comparadas com a mistura asfáltica quente de referência. Contudo, os ensaios realizados em corpos de prova produzidos com massa asfáltica preparada em laboratório mostraram que as misturas asfálticas mornas com Gemul XT-14 e Evotherm 3G têm expectativa de vida de fadiga muito superior à mistura asfáltica quente.

No que se refere às emissões asfálticas, verificou-se que:

- A redução de temperatura de usinagem nas misturas mornas levou a diminuições bastante expressivas das emissões de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) prioritários, tanto na fase particulada quanto na fase gasosa, em comparação com a mistura asfáltica quente de referência, em todos os ambientes observados (laboratório, usina de asfalto e aplicação em pista).
- Os HPAs estão presentes não só na fase particulada, mas também na gasosa, sendo neste caso parte dos compostos orgânicos voláteis (COVs). Especificamente, se constatou que a fase particulada foi mais preponderante em todos os casos analisados.
- As emissões produzidas pelas misturas asfálticas em pista são reduzidas em relação às emissões asfálticas de usina, de forma mais pronunciada na mistura asfáltica quente de referência por esta perder mais energia térmica durante o transporte do que a mistura asfáltica morna. As emissões de HPAs nas misturas asfálticas mornas em pista e em usina são mais próximas entre si, mostrando que as misturas mornas tendem a perder menos temperatura durante o transporte, o que é um benefício. Comparativamente, as misturas asfálticas mornas sempre apresentam redução de HPAs em relação às quentes, seja em usina, como na pista, em torno de 20%.

De maneira geral, as misturas asfálticas mornas não apresentaram dificuldades para atender os critérios volumétricos de dosagem, já que o volume de vazios na compactação das misturas foi atingido mesmo reduzindo as temperaturas de usinagem e compactação.

Conclui-se que as misturas asfálticas mornas estudadas, com Evotherm 3G, Gemul XT-15 e CCBit 113AD, apresentam um comportamento mecânico bastante similar à mistura asfáltica quente de referência. As misturas apresentam boa resistência à ação deletéria da água e, apesar de exibirem rigidez levemente inferior do que a mistura asfáltica quente, não apresentam riscos de desenvolver deformação permanente, à luz dos resultados obtidos no ensaio de trilha de roda executado em laboratório.

Os resultados da coleta de emissões asfálticas em laboratório, usina e pista demonstraram que as misturas asfálticas mornas apresentam menor potencial de poluição do meio ambiente e representam a criação de um melhor ambiente de trabalho para os trabalhadores relacionados à pavimentação asfáltica, tanto na etapa produtiva na usina de asfalto como na etapa construtiva em pista.

De forma complementar, neste estudo também foi possível acompanhar uma usina asfáltica que produziu durante quatro meses uma mistura asfáltica morna. Durante esse tempo a usina verificou uma redução aproximada de 20% no consumo de combustível para produzir a mistura asfáltica morna, quando comparada com o consumo médio utilizado para produzir uma mistura asfáltica quente convencional.

Finalmente, conclui-se que as misturas asfálticas mornas poderiam ser utilizadas em atividades de conservação e restauração da Rodovia Presidente Dutra sem comprometer o desempenho mecânico em pista. O emprego dessas misturas representaria, ainda, redução do consumo energético nas usinas de asfalto e diminuição de emissões poluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 15529:2007. Asfalto borracha – Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT NBR 6296:2004. Produtos betuminosos semi-sólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT NBR 6560:2008. Materiais Betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT NBR 6576:1998. Determinação da penetração de materiais betuminosos. Rio de Janeiro, RJ.
- ADHIKARI, S.; YOU, Z. (2010). Fatigue Evaluation of Asphalt Pavement using Beam Fatigue Apparatus, The Technology Interface Journal, Volume 10, Nº3, ISSN # 1523-9926, Spring.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES & DISEASE REGISTRY. 2008. Case studies in environmental medicine (CSEM): Toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): What health effects are associated with PAH exposure? Disponível em: <<http://www.atsdr.cdc.gov>>. Acesso em: 30. abr. 2011.
- ALAVI, M.Z.; HAJJ, E.Y.; Hanz, A.; BAHIA, H.U. (2012). Evaluating Adhesion Properties and Moisture Damage Susceptibility of Warm-Mix Asphalts. Bitumen Bond Strength and Dynamic Modulus Ratio Tests. Em: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2295. pp. 44-53. DOI: 10.3141/2295-06. Washington D.C. Estados Unidos da América.
- AL-QUADI, I.L.; BAEK, J.; LENG, Z.; WANG, H.; DOYEN, M.; KERN, J.; GILLEN, S.L. (2012). Short-term performance of modified stone matrix asphalt (SMA) produced with warm mix additives. Report ICT-12-001. 57pp. Illinois Center for Transportation. University of Illinois at Urbana-Champaign. Estados Unidos da América.
- American Association of State Highways Officials. (2011). AASHTO T 321-07. Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. Washington, D. C., Estados Unidos da América.
- American Association of State Highways Officials. (2011). AASHTO T 27. Sieve analysis of fine and coarse aggregates. Washington, D. C., Estados Unidos da América.
- American Association of State Highways Officials. (2011). AASHTO T 11. Materials finer than No. 200 (75µm) sieve in mineral aggregates by washing. Washington, D. C., Estados Unidos da América.

- American Association of State Highways Officials. (2011). AASHTO T 283-03. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Washington, D. C., Estados Unidos da América.
- American Association of State Highways Officials. (2011). AASHTO TP 62-07. Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Provisional Standard. Washington, D. C., Estados Unidos da América.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 7460 -08. Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending. West Conshohocken, PA, Estados Unidos da América.
- ANGUAS, P. G.; ALAMILLA, H. D.; SANDOVAL, C. D. S. (2005). Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Publicación Técnica No. 271. Sanfadilla, Qro. México.
- ASPHALT INSTITUTE. The Asphalt Handbook. MS-4. 7th edit. Asphalt Institute, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 51:2001: Agregados Determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, RJ.
- BAIRD, C. Environmental chemistry. New York W.H. Freeman. 2nd ed. 1999.
- BARRAL, M.; BRAVO, L. M.; FELIPO, J.B.J.; IZQUIERDO, M.C.S.; SUÁREZ, S.G.J.; LOMA, R.C.J.; POTTI, J.J. (2011). Estudio comparativo de la metodología de compactación giratoria-impacto – Parte II. Em: IV Jornada Nacional ASEFMA. Espanha.
- BARTHEL, W.; MARCHAND, J.-P.; von DEVIVERE, M. Warm asphalt mixes by adding a synthetic zeolite. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 3., 2004, Vienna.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 3ª reimp., 2010.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOURA, E.; LEITE, F. C.; MOTTA, R. S.; FARIA, V. C. Avaliação comparativa da deformação permanente em misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos convencionais e modificados por borracha In: CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 23., 2008, Fortaleza. Anais. ANPET, 2008.
- BINET, S.; PFOHL-LESZKOWICZ, A.; BRANDT, H.; LAFONTAINE, M.; CASTEGNARO, M. Bitumen fumes: review of work on the potential risk to workers and the present knowledge on its origin. The Science of the Total Environment, 300, 37-49, 2002,
- BOAQUIST, R.; CHRISTENSEN, D.W. (2005). "A practical Procedure for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Pavement Structural Design". 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper No.05-0389, Washington D.C.

- BROWN, E. R., KANDHAL, P. S., ROBERTS, F. L., KIM, Y.R., LEE, D.-Y., KENNEDY, T. W. Hot mix asphalt: Materials, mixture design, and construction. Lanham: NCAT at Auburn University, 3rd ed., 2009.
- CALTRANS. California Department of Transportation. Section 39 – Asphalt Concrete. Disponível em: <http://www.dot.ca.gov/dist1/d1lab/SECTION%2039%20%20HMA.pdf>
- CAVALCANTI, L. S.; MOTTA, L. M. G.; ODA, S. Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas tipo warm-mix com uso de aditivo surfactante. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 20., 2010, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2010.
- CAVALCANTI, L.S. (2010). Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- 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: 13 fev. 2009.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 13108-2: Mélanges bitumineux: Spécifications des matériaux: Partie 2: Bétons bitumineux très minces. Version française. Bruxelles, 2006.
- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 382 de 26.12.2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 30 abr. 2011.
- COOPER, C. D.; DIETZ, J. D.; REINHART, D. R. Foundations of environmental engineering. Prospect Heights, Ill: Waveland, 2000.
- COPELAND, A.; D'ANGELO, J.; DONGRÉ, R.; BELAGUTTI, S.; SHOLAR, G. (2010). Field Evaluation of High REclaimed Asphalt Pavement-Warm-Mix Asphalt Project in Florida. Em: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2179. pp. 93-101. DOI: 10.3141/2179-11. Washington D.C. Estados Unidos da América.
- CRAVO, M. C. C. C.; LEITE, L. M. F.; MARTINS, A. T.; MONTEIRO, R. J. C.; AZEVEDO, R. A.; BOHRER, D.; NASCIMENTO, P. Estudo toxicológico dos CAPs brasileiros. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 18., 2010, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2010.
- 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. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 193/96. Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade. Rio de Janeiro, RJ.

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 136/2010 – ME. Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT ME 135/2010. Método de Ensaio. Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, RJ.
- EKSTRÖM, L-G.; KRIECH, A.; BOWEN, C.; JOHNSON, S.; BREUER, D. International studies to compare methods for personal sampling of bitumen fumes. *Journal of Environmental Monitoring*, 3, 439–445, 2001.
- EL-HAGE, R. B. (2012). Estudo de misturas asfálticas tipo stone matrix asphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- EN-12697-22: Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 22: Essai d'orniérage. Version française. Bruxelles, 2004a.
- EN-12697-33: Mélange bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque. Version française. Bruxelles, 2004b.
- European Standards. EN 12697-22. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel Tracking. (2003). European Committee for Standardization.
- European Standards. EN 12697-33. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt Part 33: Specimen prepared by roller compactor. (2003). European Committee for Standardization.
- FERNANDES, P. R. N. Caracterização de Ligante Asfáltico Brasileiro e Avaliação da Presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs). Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2007.
- FERNANDES, P. R. N.; SOARES, . A.; NASCIMENTO, R. F.; SOARES, J. B.; CAVALCANTE, R. M. Evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in asphalt binder using matrix solid-phase dispersion and gas chromatography. *Journal of Chromatography Science*, v. 47, 789-793, 2009.
- FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Reunião Anual com Presidente da República. 2010. Disponível em: <<http://www.forumclima.org.br>>. Acesso em: 30 abr. 2011.
- FRITZEN, M. A.; MOTTA, L. M. G.; NASCIMENTO, L. A.H.; CHACUR, M. Comportamento de misturas asfálticas mornas submetidas a ensaios acelerados por simulador de tráfego móvel. In: Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, 4., 2009, Fortaleza. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, 2009.
- GASTHAUER, E.; MAZÉ, M.; MARCHAND, J. P.; AMOUROUX, J. Characterization of asphalt fume composition by GC/MS and effect of temperature. *Fuel*, 87, 1428-1434, 2008.

- GAUDEFROY, V.; DEYGOUT, F.; VIRANAICKEN, V.; LE COUTALLER, P.; PARANHOS, R., LA ROCHE, C. Laboratory identification of fumes during manufacturing of hydrocarbons mixtures. In: International Society for Asphalt Pavements, Zürich. Anais. 2008.
- HANZ, A. J.; FAHEEM, A.; MAHMOUD, E.; BAHIA, H. U. Measuring effects of warm mix additives using a newly developed asphalt binder lubricity test for the DSR. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 89., 2010, Washington. Anais. Washington: TRB, 2010.
- HURLEY, G. C., AND B. D. PROWELL. (2005a). Evaluation of Sasobit® for Use in Warm Mix Asphalt. NCAT Report 05-06. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Ala. Estados Unidos da América.
- HURLEY, G. C., AND B. D. PROWELL. (2005b). Evaluation of Aspha-min Zeolite for Use in Warm Asphalt Mixes. NCAT Report 05-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Ala. Estados Unidos da América.
- HURLEY, G.C. E PROWELL, B.D. (2006). Evaluation of Evotherm for use in Warm Mix Asphalt. NCAT Report 06-02. 49pp. Auburn, Georgia, Estados Unidos da América.
- INTERNATIONAL REGULATORY AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. Occupational exposures to bitumens and their emissions. Disponível em: <www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/IARC_Bitumen_Eng.pdf>. World Health Organization, 2011. Acesso em: 11 jul 2013.
- JENKINS, K.J.; MBARAGA, A.N.; VAN DEN HEEVER, J.; VAN DER WALT, S. (2011). Flexural stiffness and fatigue properties of warm mix asphalt. Em: 10th Conference on Asphalt Pavement of Southern Africa. KwaZulu-Natal, África do Sul.
- JONES, C.; WEST, R.; JULIAN, G.; TAYLOR, A.; KVASNAK, A. (2011). Evaluation of WMA in Walla Walla, Washington. NCAT Report 11-06. pp.51. Estados Unidos da América.
- JONES, D.; TSAI, B.W.; SIGNORE, J. (2010). Warm-Mix Asphalt Study: Laboratory Test Results for AkzoNobel Rediset™ WMX. Report: UCPRC-CR-2010-01. University of California, Pavement Research Center. Berkeley, Califórnia, Estados Unidos da América.
- KRISTJÁNSDÓTTIR, O.; MUENCH, S. T.; MICHAEL, L.; BURKE, G. Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 88., 2007, Washington. Anais. Washington: TRB, 2007.
- LA ROCHE, C.; GAUDEFROY, V.; VIRANAICKEN, V.; PARANHOS, R. A new experimental trial protocol for laboratory investigations of bitumen fumes: Influence of stirring and steamed water on emissions. In: International Society for Asphalt Pavements, Zürich. Anais. 2008.
- LARSEN, O.R.; MOEN, O.; ROBERTUS, C.; KOENDERS, B.G. Wam-Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, 2004.

- LAVORATO, S.; MANOLIS, S.; PAHALAN, A.; REID, R. (2011). Asphalt mix performance testing and emissions evaluation for warm mix asphalt field project on Ministry of Transportation Ontario Highway 10. Em: Proceedings of the Fifty-Sixth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTTA). Quebec, Canada.
- LECOMTE, M.; DEYGOUT, F.; MENETTI, A. Emission and occupational exposure of lower asphalt production and laying temperatures. Apresentado a 23 World Road Congress, 23., Paris, 2007.
- MARCHAND, J. P.; SOLIMAN, S.; VON DEVIVERE, M.; SAUGET, A.; HARNISCHFEGGER, S.; BARTHEL, W. Performance and environmental assessment of the warm bituminous mixes with Aspha-Min®. In: Euroasphalt & Eurobitume CONGRESS, 4., Copenhagen. Anais. 2008.
- MARTINEZ, M. Rediset® Aditivo para mesclas tóbias. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 18., São Luis do Maranhão, 2012.
- MOGAWER, W. S., A. J. AUSTERMAN, E. KASSEM; E. MASAD. (2011). Moisture Damage Characteristics of Warm Mix Asphalt Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 80, pp. 491-526. Estados Unidos da América.
- MOGAWER, W.S.; AUSTERMAN, A.J.; KLUTZZ, R.; ROUSSEL, M. (2012). High performance thin-lift overlays with high reclaimed asphalt pavement content and warm-mix asphalt technology. Em: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2293. pp. 18-28. DOI: 10.3141/2293-03. Washington D.C. Estados Unidos da América.
- MOTTA, R.S. (2011). Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. Health effects of occupational exposure to asphalt: Hazard review. 2000. Disponível em: <www.cdc.gov/niosh>. Acesso em: 25 jun. 2009.
- NCHRP-691. (2011). Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. National Cooperative Highway Research Program. Washington D.C. Estados Unidos da América.
- NEWCOMB, D. An introduction to warm-mix asphalt. 2006. National Asphalt Pavement Association, Lanham. Disponível em: <<http://fs1.hotmix.org>>. Acesso em: 10 jul. 2009.
- NLT 329/91. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX. Recuperación Elástica por Torsión de Betunes Asfálticos Modificados. Espanha.
- OLARD, F. Low energy asphalts. Routes Roads, n. 336-337, p. 131-145, 2008. Apresentado a 23 World Road Congress: General Report and Conclusions: PIARC Prizes, 23., Paris, 2008.
- OTTO, G. G. Misturas asfálticas mornas: Verificação da fadiga e do módulo complexo. 179 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

- PORRAS, J. D.; HAJJ, E.Y.; SEBAALY, P.E.; KASS, S.; LISKE, T. (2012). Performance evaluation of field produced warm-mix asphalt mixtures in Manitoba, Canada. Em: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2294. pp. 64-73. DOI: 10.3141/2294-07. Washington D.C. Estados Unidos da América.
- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007.
- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; CREWS, E. Field performance of warm mix asphalt at the NCAT test track. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 86., 2007, Washington. Anais. Washington: TRB, 2007.
- RAVINDRA, K.; SOKHI, R.; VAN GRIEKEN, R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. Atmospheric Environment, 42, 2895-2921, 2008.
- RHODE, L.; CERATTI, J. A. P.; TREICHEL, D. Estudo laboratorial de misturas asfálticas “mornas”. In: 39ª Reunião Anual de Pavimentação e 13º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2008, Recife. AnaisRio de Janeiro: ABPv, 2008.
- RUBIO, M. C.; MARTÍNEZ, G.; BAENA, L. MORENO, F. Warm mix asphalt: an overview. Journal of Cleaner Production, 24, 76-84, 2012.
- RÜHL, R. Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4., 2008, Copenhagen. Anais. 2008.
- SCHREINER, C. A. Review of mechanistic studies relevant to the potential carcinogenicity of asphalts. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 59, 270-284, 2011.
- SHRP-A-404 Report. (1995). Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, D. C., USA.
- SOUSA FILHO, A. C. Produção de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- VAN DIJK, W. Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 44: 38-72. 1975.
- VAVRIK, W. R.; GILLEN, S.; CARPENTER, S.H.; BEHNKE, J.; GARROT, F. (2010). Evaluation of Field-Produced Warm Mix Stone Matrix Asphalt (WMA-SMA) Mixtures. Report for the Illinois State Toll Highway Authority. Estados Unidos da América.
- VIRANAICKEN, V. Etude des émissions de fumées des mélanges hydrocarbonés. LCPC, 2009.
- WARGHA FILHO, N. Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas

asfálticas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

- WILLIAMS, C.; BUSS, A.; RASHWAN, M. (2011). Investigation of Warm-Mix Asphalt Using Iowa Aggregates. Institute for Transportation. Iowa State University, Ames Iowa. Estados Unidos da América.
- WITCZAK, M.W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M.; VON QUINTUS, H. (2002). Simple performance Test for Superpave Mix Design. Transportation Research Board. National REsearch Council. Washington D.C. Estados Unidos da América.
- WU, R.; TSAI, B. W.; HARVE, J.; ULLIDTZ, P.; BASHEER, I.; HOLLAND, J. (2009). Using Four-Point Bending Tests in Calibration of the California Mechanistic-Empirical Pavements Design System. 2º Workshop on Four Bending Point, University of Minho, ISBN 978-972-8692-42-1.
- XIAO, F.; ZHAO, P.E.W.; AMIRKHANIAN, S.N. (2009). Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives. Em: Construction and Building Materials. Volume 21, Issue 10. pp 3144-3151.
- XU, Y. (2011). Investigation of Effects of Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt (WMA) Mixes on Dynamic Modulus and Field Performance. Dissertação de Mestrado. Worcester Polytechnic Institute. Massachusetts. Estados Unidos da América.
- YASSAA, N.; MEKLATI, B. Y.; CECINATO, A.; MARINO, F. Chemical characteristics of organic aerosol in Bab-Ezzouar (Algiers): Contribution of bituminous product manufacture. Chemosphere, 45, 315-322, 2001.
- YOU, Z.; GOH, S. W.; DAI, Q. (2011). Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt. Final Report submitted to Michigan Department Of Transportation. 119pp. Estados Unidos da América.
- ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; JIA, X.; WOODS, M. (2012). Laboratory Performance Evaluation of Warm-Mix Asphalt Containing High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement. Em: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2294. pp. 98-105. DOI: 10.3141/2294-11. Washington D.C. Estados Unidos da América.

ANEXO B-1: ENSAIO DE FADIGA

B.1-1 Resultados do Ensaio de Fadiga por Flexão de Viga apoiada em quatro pontos para a massa asfáltica coletada em usina

Tabela B.1-1: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica quente de referência Q-1, com massa asfáltica coletada em usina

No. CP	Ligante Asfáltico	Volume de Vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Nf	Ângulo de Fase (graus)	Rigidez à flexão (MPa)
1-13	CAP-Borr	6,1	300	5.097.020	38,5	6.195
1-15	CAP-Borr	5,9	300	3.536.240	21,3	6.805
1-23	CAP-Borr	4,2	300	10.974.890	20,4	7.350
1-24	CAP-Borr	4,8	300	11.148.640	20,9	7.491
1-16	CAP-Borr	5,4	450	214.370	27,7	6.886
1-17	CAP-Borr	4,2	450	174.520	20,9	6.958
1-18	CAP-Borr	5,9	450	115.580	22,4	6.475
1-19	CAP-Borr	6,1	600	48.640	24,9	5.995
1-20	CAP-Borr	4,2	600	55.530	28	6.743
1-21	CAP-Borr	5,5	600	73.350	29	5.608

Tabela B.1-2: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica quente de referência Q-1, com massa asfáltica coletada em usina

No. CP	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia Dissipada (kJ/m ³)	Energia Dissipada Acumulada (kJ/m ³)	Módulo Normalizado (Pa/Pa)
1-13	6.585	1,241	3413,817	14868,15
1-15	7.233	1,322	2521,68	35349,77
1-23	7.818	1,467	8408,83	109739,2
1-24	7.961	1,488	9008,97	117795
1-16	7.319	3,064	368,121	2140,8
1-17	7.395	3,106	316,08	1735
1-18	6.882	2,898	188,06	1154,3
1-19	6.372	4,795	127,786	485,767
1-20	7.166	5,382	167,69	554,952
1-21	5.960	4,523	175,725	727,231

Tabela B.1-3: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-1 com Evotherm 3G, com massa asfáltica coletada em usina

No. CP	Ligante Asfáltico	Volume de Vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Nf	Ângulo de Fase (graus)	Rigidez à flexão (MPa)
3-37	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	5,8	300	1.454.970	24,1	6.287
3-38	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	4,9	300	1.516.000	24,5	6.799
3-39	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	5,9	300	1.572.290	25,1	6.070
3-40	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	4,2	450	100.470	24,7	7.257
3-41	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	4,8	450	164.860	33,8	3.999
3-42	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	4,8	450	39.090	30,9	4.958
3-43	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	5,9	450	153.040	35,1	5.378
3-45	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	4,1	600	39.420	29,3	5.669
3-47	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	4,4	600	22.150	28,8	4.894
3-48	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	5,1	600	29.240	35,1	4.823

Tabela B.1-4: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-1 com Evotherm 3G, com massa asfáltica coletada em usina

No. CP	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia Dissipada (kJ/m ³)	Energia Dissipada Acumulada (kJ/m ³)	Módulo Normalizado (Pa/Pa)
3-37	6.682	1,259	973,34	14509
3-38	7.226	1,356	1079,21	15151
3-39	6.452	1,205	1011,45	15705
3-40	7.712	3,264	177,22	1001,8
3-41	4.251	1,815	170,77	1644,9
3-42	5.269	2,244	48,9	389,076
3-43	5.716	2,451	204,52	1527,4
3-45	6.025	4,602	99,354	393,68
3-47	5.202	3,921	48,887	221,486
3-48	5.126	3,889	62,836	290,803

Tabela B.1-5: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-2 com Gemul XT-15, com massa asfáltica coletada em usina

No. CP	Ligante Asfáltico	Volume de Vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Nf	Ângulo de Fase (graus)	Rigidez à flexão (MPa)
2-25	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	4,4	300	2.347.670	22,1	8.090
2-26	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,9	300	2.960.200	24,6	5.491
2-34	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,8	300	2.871.890	23,4	5.788
2-27	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5	450	64.210	22,6	6.865
2-28	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,5	450	46.670	27,1	6.133
2-29	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,9	450	95.870	28,2	6.014
2-30	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	4,5	450	95.400	26,2	6.914
2-31	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	4,4	600	43.240	26	7.045
2-32	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,9	600	15.200	23,6	5.797
2-33	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	4,9	600	24.170	25,6	6.538
2-35	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,4	600	27.080	34,7	5.688

Tabela B.1-6: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-2 com Gemul XT-15, com massa asfáltica coletada em usina

No. CP	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia Dissipada (kJ/m ³)	Energia Dissipada Acumulada (kJ/m ³)	Módulo Normalizado (Pa/Pa)
2-25	8.598	1,614	2055,26	23465
2-26	5.836	1,099	1837,6	29600
2-34	6.152	1,133	1982,98	28697
2-27	7.296	3,093	112,379	641,867
2-28	6.518	2,717	75,84	465,987
2-29	6.392	1,358	149,206	956,295
2-30	7.349	3,064	168,12	953,83
2-31	7.488	5,632	134,597	430,906
2-32	6.161	4,62	41,83	151,21
2-33	6.949	5,194	72,518	241,109
2-35	6.045	4,548	71,789	269,641

B.1-2. Resultados do Ensaio de Fadiga por Flexão de Viga apoiada em quatro pontos para a massa asfáltica preparada em laboratório

Tabela B.1-2.1: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica quente de referência Q-1, com massa asfáltica preparada em laboratório

No. CP	Ligante Asfáltico	Volume de Vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Nf	Ângulo de Fase (graus)	Rigidez à flexão (MPa)
76	ECOFLEX PAVE (GRECA)	6,1	250	11.006.940	25,1	5.043
75	ECOFLEX PAVE (GRECA)	4,5	300	3.432.060	25	6.716
82	ECOFLEX PAVE (GRECA)	6,1	350	1.318.250	-134,4	4.858
83	ECOFLEX PAVE (GRECA)	5,7	400	575.430	-142,8	4.196
81	ECOFLEX PAVE (GRECA)	4,6	450	640.710	-148,9	5.401
80	ECOFLEX PAVE (GRECA)	4,6	500	215.440	-147	5.197
79	ECOFLEX PAVE (GRECA)	4,9	550	114.370	-150,8	5.987
77	ECOFLEX PAVE (GRECA)	6,1	600	173.770	-149,1	4.981
72	ECOFLEX PAVE (GRECA)	5,6	650	54.390	-148,9	5.227
78	ECOFLEX PAVE (GRECA)	6,2	800	11.680	-155,5	4.737
74	ECOFLEX PAVE (GRECA)	6,1	700	564.005	-155,9	4.677
73	ECOFLEX PAVE (GRECA)	4,1	750	420.603	-148,1	5.463

Tabela B.1-2.2: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica quente de referência Q-1, com massa asfáltica preparada em laboratório

No. CP	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia Dissipada (kJ/m ³)	Energia Dissipada Acumulada (kJ/m ³)	Módulo Normalizado (Pa/Pa)
76	5.360	0,689	4654,115	133545,5
75	7.138	1,345	3114,683	43442,52
82	5.163	1,315	1306,301	9839,255
83	4.459	1,497	537,865	5605,879
81	5.740	2,435	875,269	4556,203
80	5.524	2,864	372,643	1491,81
79	6.363	4,078	270,674	787,642
77	5.293	3,991	383,412	1443,589
72	5.555	4,895	161,6	237
78	5.035	6,773	71,981	62,092
74	4.970	5,111	209,08	480,869
73	5.807	6,829	198,684	368,979

Tabela B.1-2.3: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-1 com Evotherm 3G, com massa asfáltica preparada em laboratório

No. CP	Ligante Asfáltico	Volume de Vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Nf	Ângulo de Fase (graus)	Rigidez à flexão (MPa)
56	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	6,4	400	5.302.050	-121,3	4.939
51	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	4,8	450	761.490	-137,5	4.759
58	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	6	500	841.390	-144,7	4.804
52	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	6,5	550	448.400	-150,9	4.785
57	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	5,2	600	118.840	-149,9	4.018
59	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	6	650	228.200	-148,9	4.154
53	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	5,9	700	76.830	-150,7	3.921
50	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	5,8	750	24.790	-144,3	3.824
48	CAP-Borr+0,4% EVOTHERM 3G	6,1	800	15.920	-151,9	4.264

Tabela B.1-2.4: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-1 com Evotherm 3G, com massa asfáltica preparada em laboratório

No. CP	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia Dissipada (kJ/m ³)	Energia Dissipada Acumulada (kJ/m ³)	Módulo Normalizado (Pa/Pa)
56	5.237	1,679	4284,014	38845,32
51	5.058	2,002	919,867	5270,8
58	5.104	2,6	901,328	4281,979
52	5.073	3,274	704,94	2468,908
57	4.271	3,171	228,145	708,346
59	4.415	3,878	395,312	1234,452
53	4.168	4,267	194,627	512,848
50	4.064	4,8	72,196	153,309
48	4.531	6,015	60,742	99,724

Tabela B.1-2.5: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-2 com Gemul XT-15, com massa asfáltica preparada em laboratório

No. CP	Ligante Asfáltico	Volume de Vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Nf	Ângulo de Fase (graus)	Rigidez à flexão (MPa)
67	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,9	400	996.160	-134,4	4.066
63	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,2	450	5.754.390	-140,8	4.531
68	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	4,8	500	175.110	-149,9	5.324
70	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	5,6	550	100.010	-146,9	5.657
66	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	4,6	600	65.890	-139,5	4.518
65	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	6,9	650	204.170	-135,4	3.811
64	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	6,9	700	49.480	-143	4.015
61	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	6,4	750	46.770	-146,1	3.464
60	CAP-Borr+0,4% GEMUL XT-15	6,7	800	20.890	-134,1	3.743

Tabela B.1-2.6: Resultados do ensaio de fadiga na mistura asfáltica morna M-2 com Gemul XT-15, com massa asfáltica preparada em laboratório

No. CP	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia Dissipada (kJ/m ³)	Energia Dissipada Acumulada (kJ/m ³)	Módulo Normalizado (Pa/Pa)
67	4.322	1,475	932,626	11399,58
63	4.816	2,039	4639,562	30727,85
68	5.658	2,991	405,085	1171,921
70	6.013	3,76	228,697	592,96
66	4.802	3,618	155,131	492,946
65	4.050	3,601	404,517	1231,053
64	4.257	4,368	124,937	297,756
61	3.682	4,41	125,234	290,164
60	3.969	5,251	72,415	139,422

ANEXO B-2: CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS EM USINA

Durante os meses de Janeiro a Abril de 2014 a Usina da SPL Base Engenharia produziu uma mistura asfáltica morna com faixa granulométrica *Gap Graded* e ligante asfáltico modificado por pneu de borracha moída. De forma complementar, foi possível monitorar o consumo de combustível utilizado para produção dessa mistura asfáltica morna, descrito na continuação.

Durante o mês de Janeiro/2014, o objetivo foi reduzir a temperatura em torno de 35°C. A mistura asfáltica quente com ligante asfáltico modificado por SBS foi usinada na temperatura de 175°C, enquanto que a mistura asfáltica morna com borracha foi usinada na temperatura de 145°C. Nesta aplicação a redução de temperatura na mistura foi obtida pela diminuição da temperatura de secagem dos agregados. O aquecimento do ligante asfáltico foi mantido na temperatura convencional de 175°C. Assim, a temperatura de aplicação em pista da mistura asfáltica morna foi de aproximadamente 125°C.

Em vista dos bons resultados obtidos em pista durante o mês de Janeiro/2014, decidiu-se incrementar a ousadia e a temperatura de usinagem das misturas asfálticas mornas foi reduzida gradativamente em Fevereiro, Março e Abril. Na Figura A.1 são apresentadas as temperaturas de usinagem da mistura asfáltica morna durante os quatro meses estudados, e em comparação apresenta-se também a temperatura de usinagem da mistura quente tipo *Gap Graded* usinada com ligante asfáltico modificado por polímero SBS. Nota-se que a mistura asfáltica morna com ligante asfáltico modificado por borracha foi produzida com temperatura inferior em até 50°C com relação à mistura asfáltica quente utilizada como referência. A redução de temperatura média foi em torno de 43°C.

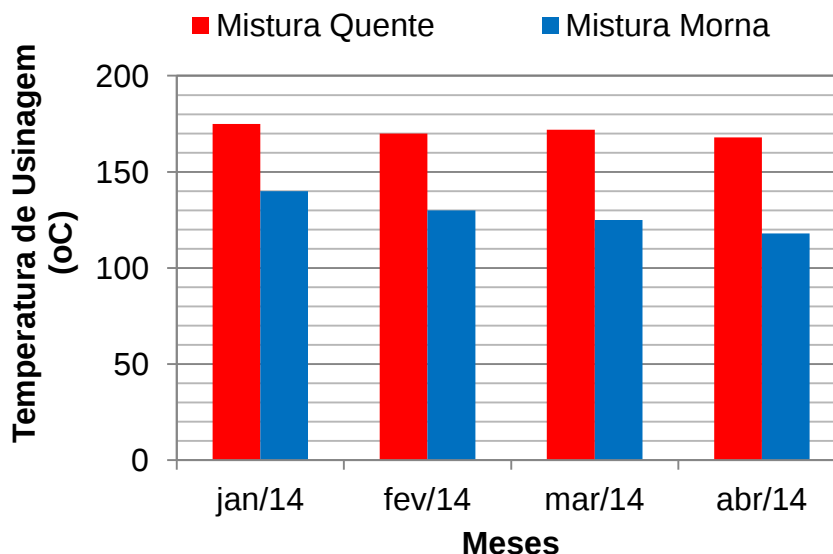


Figura A.1: Redução média de temperatura de usinagem da mistura asfáltica morna e da mistura asfáltica quente utilizada como referência

Durante os quatro meses de produção da mistura asfáltica morna e da mistura asfáltica quente utilizada como referência, a SPL Base Engenharia executou 23km de revestimento asfáltico. Os resultados do controle tecnológico desse trecho, com relação ao volume de vazios, são apresentados na Figura A.2. Pode-se observar nessa figura que, em todos os meses o volume de vazios de campo foi aceitável para as duas misturas asfálticas, e não houve diferenças notórias entre a mistura quente e a mistura morna. Pode-se afirmar, portanto, que a mistura asfáltica morna apresentou boas características de compactação, similares às da mistura asfáltica quente utilizada como referência.

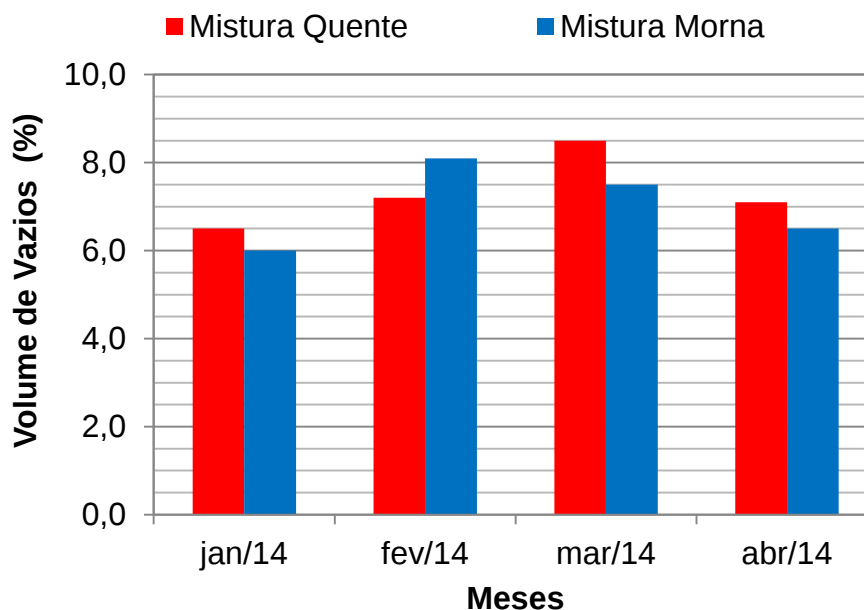


Figura A.2: Volume de vazios da mistura asfáltica morna e da mistura asfáltica quente utilizada como referência

Foi realizado também o monitoramento de consumo de combustível de forma diária durante os quatro meses de acompanhamento daquela obra. Vale notar que essa usina de asfalto utiliza como combustível óleo Diesel. Assim, foi possível realizar um comparativo do consumo energético entre a mistura asfáltica morna e a mistura asfáltica quente de referência. Esses resultados são apresentados na Figura A.3, na qual pode se notar que a mistura asfáltica morna demandou a queima de aproximadamente 4,3kg de combustível para a produção de 1tonelada de massa asfáltica, enquanto que a mistura asfáltica quente foi produzida consumindo de 5,5kg a 6,0kg de combustível para 1tonelada de massa asfáltica. Dessa forma, pode se constatar ainda que a economia de combustível, atribuída ao emprego da mistura asfáltica morna, variou de 20 até 27%, com um valor médio em torno de 23%.

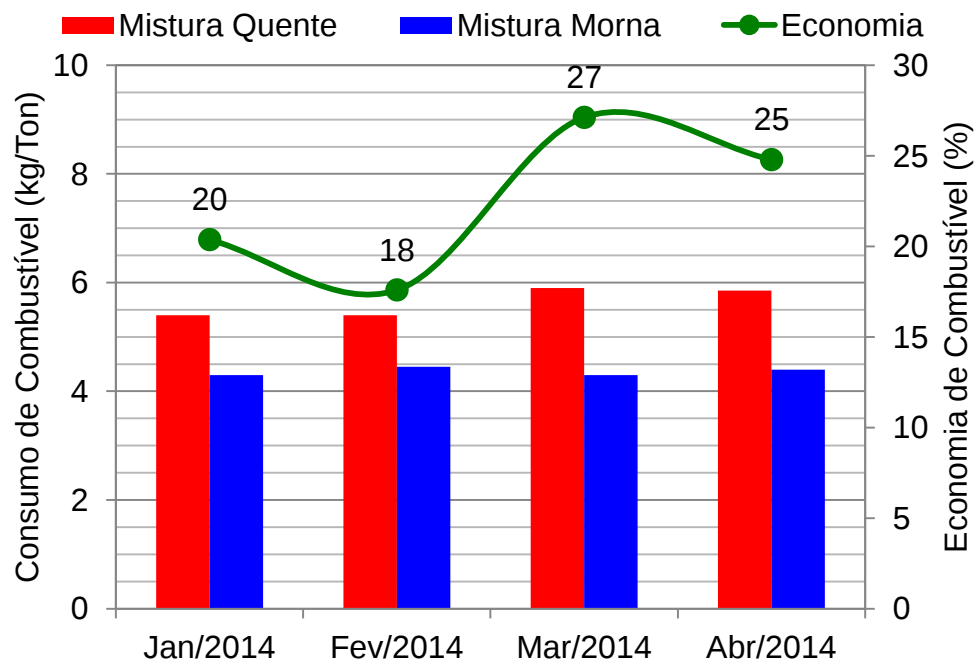


Figura A.3: Consumo de combustível médio para a produção de 1tonelada de mistura asfáltica morna e 1tonelada de mistura asfáltica quente de referência, e economia de combustível durante os quatro meses de produção

ANEXO B-3: EXECUÇÃO DE ATIVIDADES

Esta pesquisa foi aprovada mediante Ofício No. 726/2013/SUINF e o seu cronograma foi modificado e aprovado mediante Ofício No. 1604/2013/SUINF.

No projeto de pesquisa foi estabelecido que para desenvolvimento deste estudo seriam executadas as seguintes atividades:

- a) Pesquisas bibliográficas
- b) Seleção de materiais
- c) Ensaaios laboratoriais
- d) Avaliação de emissões asfálticas
- e) Análise de dados
- f) Elaboração do relatório

Neste relatório final abrange-se o desenvolvimento completo dessas atividades. Na Tabela B-1.2 é apresentado um resumo que indica a localização de cada atividade nas cinco seções deste relatório.

Tabela B-1.2: Atividades desenvolvidas durante a pesquisa e apresentadas neste relatório final

ATIVIDADE	CAP. 1	CAP. 2	CAP. 3	CAP. 4	CAP. 5
a) Pesquisas bibliográficas		X			
b) Seleção de materiais			X		
c) Ensaaios laboratoriais			X	X	
d) Avaliação de emissões asfálticas				X	
e) Análise de dados				X	X
F) Elaboração do relatório	X	X	X	X	X