



LAPAV
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS



**ESTUDO LABORATORIAL DE COMPORTAMENTO À
FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS**

RELATÓRIO FINAL

Porto Alegre
dezembro de 2008



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	4
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	6
2.1.1 Histórico de Misturas Mornas.....	6
2.1.2 Zeólitas.....	8
2.1.3 Tecnologias de Misturas Mornas	10
2.1.3.1 EVOTHERM™	12
2.1.3.2 LEA	13
2.1.3.3 SASOBIT®.....	15
2.1.3.4 WAM Foam	17
2.1.3.5 ZEÓLITA SINTÉTICA.....	19
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	20
3.1 INTRODUÇÃO	20
3.2 MATERIAIS	21
3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	21
3.3.1 Ensaio em amostras de ligantes.....	22
3.3.1.1 Penetração	22
3.3.1.2 Ponto de amolecimento	22
3.3.1.3 Densidade e massa específica	23
3.3.1.4 Viscosidade aparente.....	23
3.3.2 Ensaio em amostras de emulsão asfáltica	24
3.3.2.1 Densidade.....	24
3.3.2.2 Viscosidade Brookfield	25
3.3.2.3 Resíduo por evaporação	25
3.3.2.4 Peneiração.....	26
3.3.2.5 Sedimentação	27
3.3.2.6 Desemulsibilidade.....	28
3.3.2.7 Cobrimento	29



	3
3.3.2.8 Adesividade	30
3.3.3 Ensaio em amostras de concreto asfáltico.....	30
3.3.3.1 Dosagem Marshall	30
3.3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	32
3.3.3.3 Módulo de resiliência	34
3.3.3.4 Efeito deletério da água	35
3.3.3.5 Fadiga	36
3.3.3.6 Ensaio de fluência por compressão uniaxial com carregamento dinâmico	36
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	38
4.1.1 Agregados	38
4.1.2 Ligante asfáltico	40
4.1.3 Emulsão asfáltica.....	41
4.2 PROJETO DA MISTURA COM EMULSÃO	43
4.3 PROJETO DA MISTURA COM ZEÓLITA	46
4.4 AVALIAÇÃO DA VIDA DE FADIGA	49
4.5 RESISTÊNCIA ÀS DEFORMAÇÕES PERMANENTES.....	51
4.6 CONCLUSÕES	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53



1 INTRODUÇÃO

Em continuidade à pesquisa iniciada no ano de 2007, este relatório de acompanhamento apresenta os resultados obtidos na fase laboratorial do estudo de misturas asfálticas produzidas em temperaturas intermediárias. A partir dos resultados positivos obtidos com a técnica EBE, que baseia-se na produção de concreto asfáltico com secagem parcial dos agregados, é proposta a avaliação de duas novas técnicas para formulação de misturas asfálticas “mornas” utilizando:

- × emulsão asfáltica modificada por aditivo a base de enxofre e
- × a adição de zeólita sintética durante a produção da mistura para criar um efeito de espuma no ligante.

Optou-se por redirecionar a pesquisa – não realizando ensaios de fadiga e deformação permanente como previsto no plano de trabalho – tendo em vista as dificuldades referentes à adaptação da usina para produção de misturas asfálticas com a técnica EBE. Assim, buscou-se avaliar novas técnicas que garantissem menor necessidade de alterações na usina asfáltica utilizada pela concessionária. A técnica com emulsão asfáltica modificado não requer alteração na usina asfáltica uma vez que o ligante é modificado para apresentar baixa viscosidade e permitir a produção de misturas asfálticas em temperaturas reduzidas (em torno de 120°C). A técnica empregando zeólita requer apenas um dosador do material sendo possível a adição manual.

Para a produção de misturas asfálticas mornas empregando a técnica EBE seriam necessárias diversas modificações na usina asfáltica. A possibilidade de utilização de melhoradores de adesividade geraria a necessidade de adaptação de uma bomba para injetar o líquido no processo de mistura. Além disso, seria necessário criar uma nova entrada de agregados para permitir a adição da fração abaixo da peneira 10 umidecida e sem passar por aquecimento. Outra dificuldade é garantir que esta fração seja adicionada com teor de umidade adequado (definido durante o projeto



da mistura em laboratório). Para isto seria necessário um sistema de monitoramento para o teor de umidade.

Em função da produção contínua na usina asfáltica utilizada pela concessionária durante o ano de 2008 para execução dos serviços de conserva, manutenção e ampliação das rodovias concedidas, considerou-se de difícil realização as alterações necessárias na usina. Também é necessário considerar os custos envolvidos para a adaptação da mesma. Sendo assim, a análise de outras técnicas de mais fácil execução tornou-se mais interessante que a realização de ensaios de fadiga e deformações permanentes.



2 REVISÃO DA LITERATURA

Para que a mistura asfáltica tenha um adequado comportamento no sistema multicamadas do pavimento existem algumas propriedades desejáveis: habilidade de distribuir tensões (rigidez), capacidade de resistir a deformações permanentes excessivas, resistência à fissuração e durabilidade. Vários fatores influenciam no comportamento e desempenho das misturas betuminosas: características do ligante e dos agregados, aditivos, temperaturas, umidade, carregamentos, envelhecimento, estado de tensões e método de compactação (Specht, 2004).

Nas misturas asfálticas, o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso, antes da compressão. Conforme os seus respectivos processos construtivos, são adotadas ainda as seguintes designações: misturas asfálticas a frio (quando os tipos de agregados e de ligantes utilizados permitem que o espalhamento seja feito à temperatura ambiente) e misturas asfálticas a quente (quando o ligante e o agregado são misturados e espalhados na pista ainda quentes). Atualmente no Brasil, surgiu o conceito de misturas mornas, que são misturas produzidas em temperaturas inferiores às comumente utilizadas, incluindo usinagem e compactação, entretanto com produtividade e desempenho iguais ou superiores aos das misturas asfálticas quentes.

2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS (Warm Mix Asphalt)

2.1.1 Histórico de Misturas Mornas

Segundo Nascimento et al (2008), na Alemanha, em 1996, o então Ministro do Trabalho e Relações Sociais começou a questionar os limites de exposição dos trabalhadores aos fumos dos asfalto, diante dessa pressão do governo, foi criado o

Forúm de Asfalto da Alemanha , cujo foco foi procurar respostas a este questionamento. Naquela ocasião foram realizados estudos e debates sobre: Constituintes do asfalto; Emissões de fumo; Uso de equipamento individual de proteção (EPI) na indústria do asfalto e misturas asfálticas; Epidemiologia: Incidência de câncer nos operários do setor; Diversos estudos ocupacionais; Tecnologias que permitissem baixar a temperatura do processo de usinagem, espalhamento e compactação e por fim desenvolver processos visando atender à redução das emissões.

Um pouco antes do Fórum, em 1995, na Alemanha, seguindo a mesma linha de preocupações, devido ao fato de que o Protocolo de Kyoto estava sendo concebido, foi feito o primeiro teste com o que é hoje denominada Mistura Asfáltica Morna (Warm Mix Asphalt – WMA) com a adição de zeólita sintética, no caso registrado com a marca Aspha-Min®. Em 1996, numa parceria entre a Shell Bitumem e a empreiteira Kolo Weidekke, foram feitos os primeiros testes na Noruega com a tecnologia denominada Warm Mix Asphalt Foam Emulsion (WAM Foam). Em 1997, na Alemanha foi feita uma pista experimental utilizando o ligante asfáltico modificado por parafina sintética tipo Fischer-Tropsch Sasobit ®.

Em 1999, o primeiro trecho em rodovias públicas na Alemanha com Aspha-Min® foi realizado. Nos EUA os primeiros pavimentos experimentais utilizando WMA foram construídos em 2004 na Flórida e na Carolina do Norte (NAPA, 2007). Os estudos sobre misturas mornas se intensificaram partir de então, em 2002, uma missão técnica especial dos Estados Unidos, coordenadas pela National Asphalt Pavement Association (NAPA), fizeram uma viagem de estudo para aprender sobre essa nova tecnologia chamada “misturas mornas”. A pesquisa no National Center for Asphalt Technology (NCAT) determinou previamente que a diminuição da temperatura de mistura em até 6°C pode resultar em redução da produção de gases e fumaça (NAPA, 2007).

As “misturas mornas” representam um grupo de tecnologias que permitem a redução nas temperaturas de produção e aplicação de misturas asfálticas. Estas tecnologias levam a redução da viscosidade do asfalto e garantem a cobertura completa do

agregado a temperatura reduzidas. São produzidas a temperatura de 20 a 55°C inferiores em comparação a misturas a quente.

2.1.2 Zeólitas

Com a descoberta da stilbita, as zeólitas foram reconhecidas pela primeira vez em 1756 pelo mineralogista sueco Baron Axel Frederick Consted. Em 1845, Way descobriu que determinados tipos de solos tinham a propriedade de reter sais de amônia, e Breck constatou que os silicatos hidratados de alumínio no solo eram os responsáveis pela troca iônica. Em 1925, Weigel e Steinholf foram os primeiros a constatar que a zeólita chabazita absorvia seletivamente moléculas orgânicas menores e rejeitava as maiores (Luz, 1995).

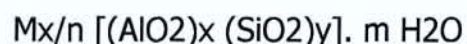
Em 1932, McBain denominou esse fenômeno de peneiramento molecular, e já nas décadas de 40 e 50, as pesquisas sobre as propriedades das zeólitas tomaram um impulso muito grande. A partir de então, ficou claro o potencial de utilização das zeólitas em processos industriais. Em 1862, a síntese da primeira zeólita foi relatada por St. Clair Deville, que produziu a zeólita levynita através do aquecimento em tubo de vidro, a 170°C, de uma solução aquosa de silicato de potássio e aluminato de sódio.

É creditado a Barrer (1951) a primeira síntese da zeólita analcima, caracterizada através de difração de raios-X, com reprodutibilidade de resultados, o que não havia sido até então obtido, devido à falta de técnicas adequadas. Em 1980 já haviam sido identificadas 40 zeólitas naturais. No final da década de 80, já se conheciam mais de 10.000 patentes relacionadas com a síntese de zeólitas.

O termo zeólita (zein + lithos) vem do grego e significa "pedra que ferve". São aluminosilicatos hidratados altamente cristalino contendo metais alcalinos ou alcalinos terrosos, são compostos de uma rede tridimensional de tetraedros de AlO_4 e SiO_4 ligados entre si nos vértices pelo átomos de oxigênio, originando assim uma

estrutura microporosa do tipo TO4 (T = Si, Al, etc), compensada eletronicamente por outros cátions como por exemplo, Na, K, Ca, Mg.

A fórmula química por célula unitária é:



onde:

M: cátion de valência n;

m: número de moléculas de água;

x + y: número de tetraedros por célula unitária.

Por possuir cavidades e canais regulares de tamanho molecular, permite a acomodação e movimentação de cátions e de moléculas de água em seu interior. A água dos canais desprende-se de maneira contínua empregando apenas aquecimento. Este processo é seletivo e depende da estrutura particular da zeólita (tamanho do poro) e do tamanho das moléculas, podendo assim ser usada como peneira molecular. Sua estrutura cristalina complexa origina diversas variações de estruturas porosas, como a zeólitas X, Y, BEA, ZSM, ALPO e SAPO, tendo cada uma, diferentes capacidades de armazenamento de água em seus poros (Filho, 2006).

As zeólitas naturais são formadas a partir da precipitação de fluidos contidos nos poros, tal como nas ocorrências hidrotermais, ou pela alteração de vidros vulcânicos. As condições de temperatura, pressão, atividade das espécies iônicas e pressão parcial da água são fatores determinantes na formação das diferentes espécies de zeólitas (Luz, 1995).

Existem cerca de 40 espécies de zeólitas naturais conhecidas (Tabela 2.1), no entanto, apenas algumas espécies são amplamente utilizadas. Dentre essas se incluem: mordenita, clinoptilolita, heulandita, phillipsita, erionita e chabazita (Luz, 1995).

As zeólitas podem ser produzidas artificialmente (sintetizadas). Por serem mais puras, as zeólitas sintéticas são mais caras que as zeólitas naturais, pois são utilizadas em processos industriais sofisticados e quando se quer um material sem impurezas, com alta cristalinidade e área superficial.

Tabela 2.1: Principais zeólitas naturais

Zeólitas	Fórmula Química
laumontita	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$
clinoptilolita	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_{2-3} \text{Al}_3 (\text{Al}, \text{Si})_2 \text{Si}_{13} \text{O}_{36} \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$
stilbita	$\text{Na Ca}_2 \text{Al}_5 \text{Si}_{13} \text{O}_{36} \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$
phillipsita	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})_{1-2} (\text{Si}, \text{Al})_8 \cdot \text{O}_{16} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
erionita	$(\text{K}_2, \text{Ca}, \text{Na}_2)_2 \text{Al}_4 \text{Si}_{14} \text{O}_{36} \cdot 15 \text{H}_2\text{O}$
offretita	$(\text{K}_2, \text{Ca})_5 \text{Al}_{10} \text{Si}_{26} \text{O}_{72} \cdot 30 \text{H}_2\text{O}$
faujasita	$(\text{Na}_2 \text{Ca}) \text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12} \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$
chabasita	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{12} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
natrolita	$\text{Na}_2 \text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
thomsonita	$\text{Na Ca}_2 \text{Al}_5 \text{Si}_5 \text{O}_{20} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
mordenita	$(\text{Ca}, \text{Na}_2, \text{K}_2) \text{Al}_2 \text{Si}_{10} \text{O}_{24} \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$
epistilbita	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{16} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$
analcima	$\text{Na}_4 \text{Al}_3 \text{Si}_2 \text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
heulandita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{2-3} \text{Al}_3 (\text{Al}, \text{Si})_2 \text{Si}_{13} \text{O}_{36} \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$

Fonte: Luz, 1995

As principais propriedades decorrentes das estruturas das zeólitas são: alto grau de hidratação; baixa densidade; grande volume de espaços vazios quando desidratadas; alta estabilidade da estrutura cristalina, mesmo quando desidratada; propriedades de troca catiônica; canais de dimensões uniformes nos cristais desidratados; propriedades catalíticas; adsorção seletiva de gases e vapores (Luz, 1995; Filho, 2006).

2.1.3 Tecnologias de Misturas Mornas

Existem diversas formas de classificar as tecnologias WMA (Warm Mix Asphalt), demonstrado na Figura 2.1. Uma delas é pelo grau de redução de temperatura. Se a temperatura de mistura na usina é inferior a 100°C, a mistura asfáltica é considerada Half Warm Asphalt ou "semi-morna". Se a temperatura de mistura na usina é

superior a 100°C é considerada Warm Mix Asphalt ou “mistura morna”. Existe uma grande faixa de temperatura de produção para WMA, desde misturas produzidas entre 20 e 30°C abaixo das temperaturas de misturas a quente a temperaturas pouco acima de 100°C.

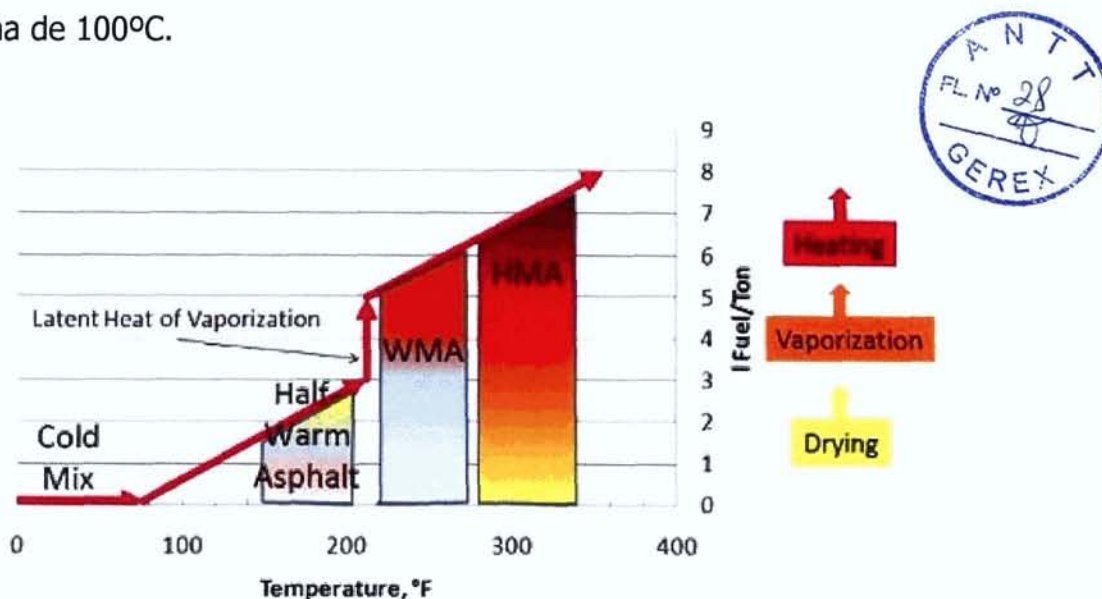


Figura 2.1: Classificação das misturas asfálticas quanto a sua temperatura

Outro tipo de classificação das tecnologias WMA é o uso de água, de algum aditivo orgânico ou cera, ou uso de aditivos químicos ou surfactantes. Os processos que adicionam pequenas quantidades de água ao asfalto a quente, tanto pelo processo de criação de espuma ou material hidrofílico como a zeólita, ou agregado úmido, são baseados no fato de que quando um certo volume de água se transforma em vapor a pressão atmosférica, ele sofre expansão. Quando dispersa na mistura asfáltica quente ocorre uma expansão do ligante resultando em redução da viscosidade.

Os processos que utilizam aditivos orgânicos ou ceras promovem a redução da viscosidade acima do ponto em que a cera passa para a fase líquida. O tipo de aditivo ou cera deve ser selecionado cuidadosamente, para que este ponto de solubilização seja superior às temperaturas de serviço da mistura asfáltica para reduzir o risco de deformação permanente e para minimizar o potencial de trincamento a baixas temperaturas. Os processos envolvendo o uso de aditivos químicos ou surfactantes baseiam-se em diferentes mecanismos, os agentes

surfactantes, por exemplo, facilitam o cobrimento do agregado a temperaturas reduzidas.

Dentre as principais tecnologias para misturas mornas utilizadas nos EUA podemos citar processos utilizando aditivos químicos como o EVOTHERMTM, o REDISETTMWMX e o REVIXTM; processos com aditivos orgânicos como o SASOBIT® e processos baseados na expansão volumétrica do ligante pela formação de vapor de água como LEA (Low Energy Asphalt), WAM FOAM, e a zeólita sintética.

2.1.3.1 EVOTHERM™

O processo EvothermTM foi desenvolvido nos EUA pela MeadWestvaco Asphalt Innovations. É um conjunto de aditivos químicos desenvolvido para melhorar cobrimento, adesividade e trabalhabilidade a temperaturas reduzidas. Uma emulsão asfáltica é misturada com os agregados aquecidos resultando em uma temperatura de mistura entre 85 e 115°C. A emulsão é modificada pelo EvothermTM. A maior parte da água na emulsão é transformada em vapor quando o ligante é acrescentado aos agregados. O asfalto residual presente na emulsão deve ser aproximadamente 70% (NAPA, 2007).

A indústria que comercializa o produto relata que a redução das temperaturas de produção de concreto asfáltico pode chegar a 38°C, podendo resultar em diminuição do consumo energético de até 55%, o que representa 45% de redução de 45% de emissão de CO₂ e SO₂ (FHWA, 2008).

Segundo Hurley e Prowell (2006) duas seções experimentais foram construídas na África do Sul e uma nos Estados Unidos empregando Evotherm. As temperaturas de produção e aplicação da mistura asfáltica utilizadas nos experimentos foram de 71 e 60°C, respectivamente.

Em 2007 um novo processo utilizando Evotherm™ foi desenvolvido. O aditivo é acrescentado durante o processo de mistura na usina no mesmo momento em que o ligante é adicionado aos agregados (NAPA, 2007). A Figura 2.2 apresenta as modificações necessárias na usina de asfalto.



Figura 2.2: Modificações necessárias na usina (NAPA, 2007)

Mais de 100.000 toneladas de misturas asfálticas mornas com Evotherm™ foram produzidas em todo o mundo até 2007. Nos EUA, 17 estados estão avaliando a técnica empregando diferentes ligantes asfálticos, agregados, esforço de compactação e até mesmo diferentes porcentagens de misturas asfálticas recicladas (10 a 30%) (NAPA, 2007).

Segundo D'Angelo et al (2008), até o final do ano de 2007 mais de 17 mil toneladas de material asfáltico produzido com adição de Evotherm™ foram aplicadas em obras de pavimentação.

2.1.3.2 LEA (Low Energy Asphalt)

O processo desenvolvido na França com o nome de Enrobé à Basse Energie (EBE), também conhecido como Low Energy Asphalt (LEA), constitui o primeiro processo desenvolvido para produção de misturas asfálticas em temperaturas intermediárias

(em torno de 100°C). Consiste na introdução da fração areia úmida após a mistura da fração graúda seca com o ligante asfáltico a quente. A idéia foi introduzida pela empresa FAIRCO no início dos anos 2000. O sucesso da técnica depende do teor de água final na mistura, para garantir, durante um tempo suficiente, a trabalhabilidade e a compactabilidade do material. O teor de umidade presente na mistura ao final do processo de produção deve ser aproximadamente 0,5% (Brosseaud, 2006).

O processo consiste em secar o agregado graúdo em aproximadamente a 150°C e então misturado com o ligante asfáltico aquecido na temperatura de mistura. Melhoradores de cobrimento e adesividade são adicionados ao ligante previamente (cerca de 0,5%), após a mistura do agregado graúdo com o ligante é adicionado o agregado miúdo umedecido com 3 a 4% de água. Esta umidade é transformada em vapor e promove a expansão do ligante em torno do agregado graúdo encapsulando o agregado miúdo, como mostra a Figura 2.3. A temperatura final de mistura é inferior a 100°C. Os agregados graúdos devem ser aquecidos a uma temperatura 20°C inferior a temperatura de aquecimento para emprego em misturas asfálticas a quente.

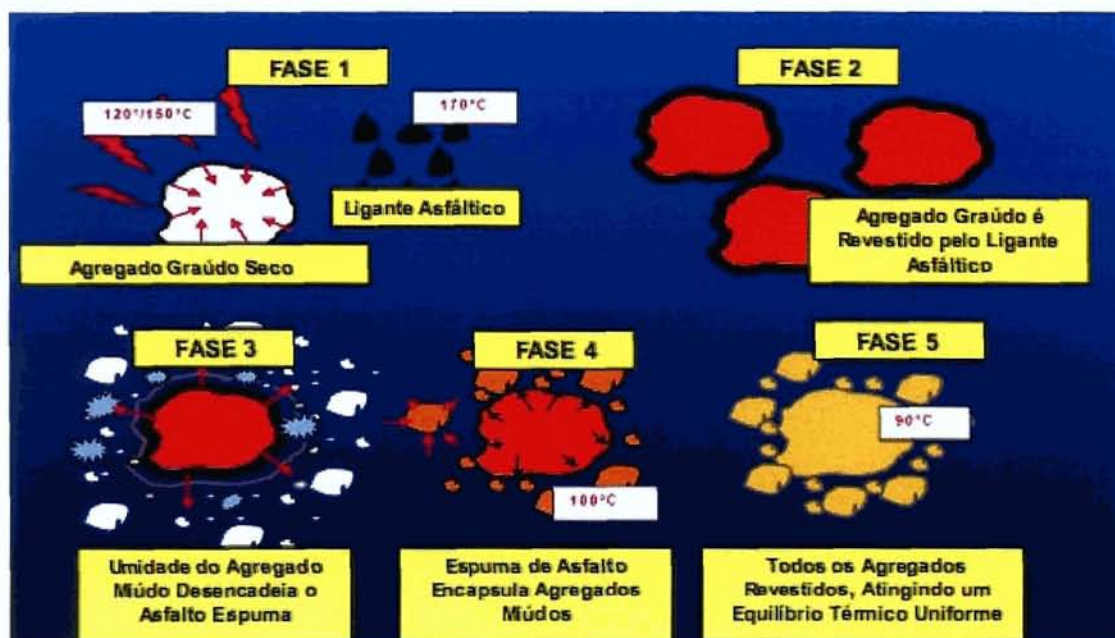


Figura 2.3: Sequência de mistura do processo LEA (NAPA, 2007)

Os parâmetros de produção – temperatura de aquecimento do agregado graúdo, temperatura da mistura final e teor de água - são definidos em função do projeto da mistura, das condições climáticas e do teor de água presente na fração areia dos agregados. O sistema pode ser utilizado em usinas tradicionais, contínuas ou descontínuas. O processo funciona com todos os tipos de ligantes utilizados tradicionalmente e permite a reciclagem de misturas asfálticas.

As condições de aplicação são idênticas às do concreto asfáltico a quente, mas as temperaturas variam entre 80 e 90°C, sem representar redução de desempenho (Bitume Info, 2006).

Na França, uma usina asfáltica no entorno de Paris foi adaptada para a produção de misturas asfálticas tipo LEA, desde 2005 cerca de 15.000 t deste material foram aplicadas em obras viárias. Algumas pesquisas relacionadas a este procedimento estão em andamento nos Estados Unidos (Brosseaud, 2006). Espanha e Itália também têm avaliado a técnica (D'Angelo *et al.*, 2008).

Até 2007, ao menos 8 projetos totalizando mais 38.000 toneladas de mistura morna segundo o processo LEA foram realizados nos EUA. Em todo o mundo já foram empregadas mais de 100.000 toneladas (NAPA, 2007).

2.1.3.3 SASOBIT®

Sasobit® é um produto comercializado pela Sasol Wax da África do Sul. É considerado um melhorador da viscosidade do asfalto, tanto durante a produção da mistura quanto durante a aplicação, devido a sua característica de reduzir a viscosidade do ligante asfáltico. Esta redução de viscosidade permite uma redução nas temperaturas de trabalho de cerca de 18 a 54°C. O produto, fornecido em flocos, pó ou líquido, é adicionado ao ligante asfáltico na usina em temperaturas variando entre 102 e 120°C não necessitando de misturadores especiais (Hurley e Prowell, 2006).

Segundo os autores Hurley e Prowell (2006), em aplicações realizadas na Ásia, Europa, África do Sul e Estados Unidos o Sasobit® foi adicionado diretamente à mistura de agregados na forma sólida (peletizado) ou na forma líquida empregando uma bomba dosadora. Não foram observadas alterações nos valores de estabilidade e fluência Marshall em comparação à mistura sem aditivo.

SASOBIT é uma cera parafínica sintética com ponto de solubilização superior a 98°C, formada por uma cadeia de hidrocarbonetos alifáticos. Aproximadamente 0,8 a 4% de SASOBIT® é adicionado ao ligante asfáltico ou juntamente com o ligante durante o processo de mistura. A Figura 2.4 apresenta as duas formas mais comuns de SASOBIT® (NAPA, 2007).

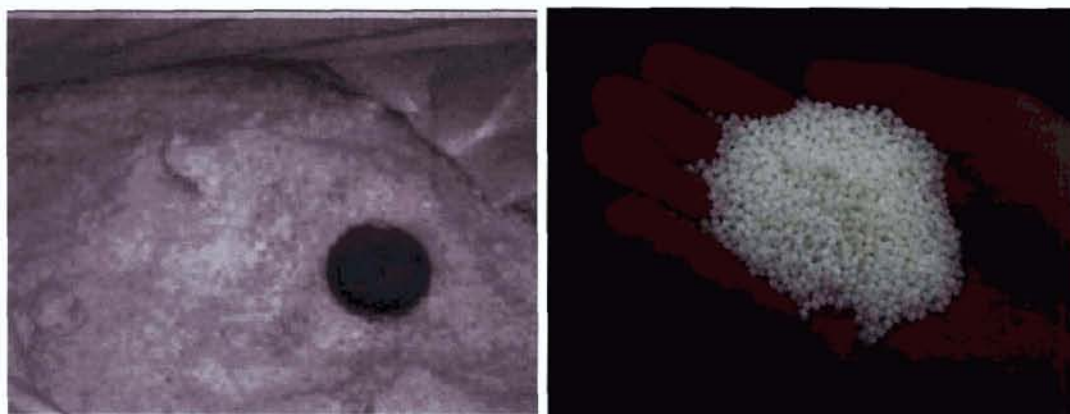


Figura 2.4: Duas formas de SASOBIT® (NAPA, 2007)

Desde 1997, mais de 142 projetos empregaram o Sasobit®, totalizando mais de 2 milhões de metros quadrados de pavimentos (Sasol Wax, 2006) em países como Áustria, Bélgica, China, França, Alemanha, Rússia, África do Sul, Reino Unido e Estados Unidos. Diversos tipos de agregados e misturas foram utilizados, entre eles o SMA (stone mastic asphalt). Segundo D'Angelo et al. (2008) mais de 10 milhões de toneladas de misturas asfálticas empregando a técnica para produção de misturas asfálticas com temperaturas reduzidas com o aditivo Sasobit® foram aplicadas em todo o mundo. Nos EUA, aproximadamente 250.000 toneladas de misturas mornas com SASOBIT® foram utilizadas (NAPA, 2007).



2.1.3.4 WAM Foam

O processo WAM Foam® (Warm Asphalt Mix Foam) de produção de mistura asfáltica “morna” resultou de uma parceria entre a Shell International Petroleum Company Ltd., Reino Unido e a empresa norueguesa Kolo-Veidekke (Shell Bitume, 2006). O processo WAM Foam usa a adição de dois ligantes asfálticos com características diferentes, um ligante com baixa viscosidade e outro com maior rigidez. A mistura resultante dos dois ligantes é selecionada para produzir o PG (Performance Grade) desejado. O ligante de menor rigidez representa cerca de 20 a 30% do total de ligante, esta porcentagem é necessária para garantir o cobrimento do agregado graúdo e para satisfazer a demanda de asfalto para absorção pelo agregado graúdo.

A temperatura de produção da mistura asfáltica para o processo WAM Foam varia entre 100-120°C. O agregado é aquecido a temperatura de mistura determinada para o ligante de menor rigidez, e é misturado a ele. Agentes melhoradores de adesividade pode ser adicionado ao ligante de menor rigidez. A formação de espuma a partir do ligante rígido é realizada pela adição de 2 a 5% de água em temperatura ambiente sobre o peso de ligante rígido a temperatura de 175-180°C (NAPA,2007).

A expansão volumétrica garante a distribuição do ligante na mistura e o cobrimento dos agregados (Kristjansdottir, 2006). A espuma combinada com o ligante de menor viscosidade garante as propriedades adequadas ao produto final. A Figura 2.5 mostra duas misturas asfálticas, uma mistura asfáltica quente e outra mistura morna utilizando o processo WAM Foam.

Para a produção de espuma de asfalto com o ligante rígido é necessário um equipamento específico mostrado na Figura 2.6. Após o processo de geração da espuma, ela é acrescentada a mistura.

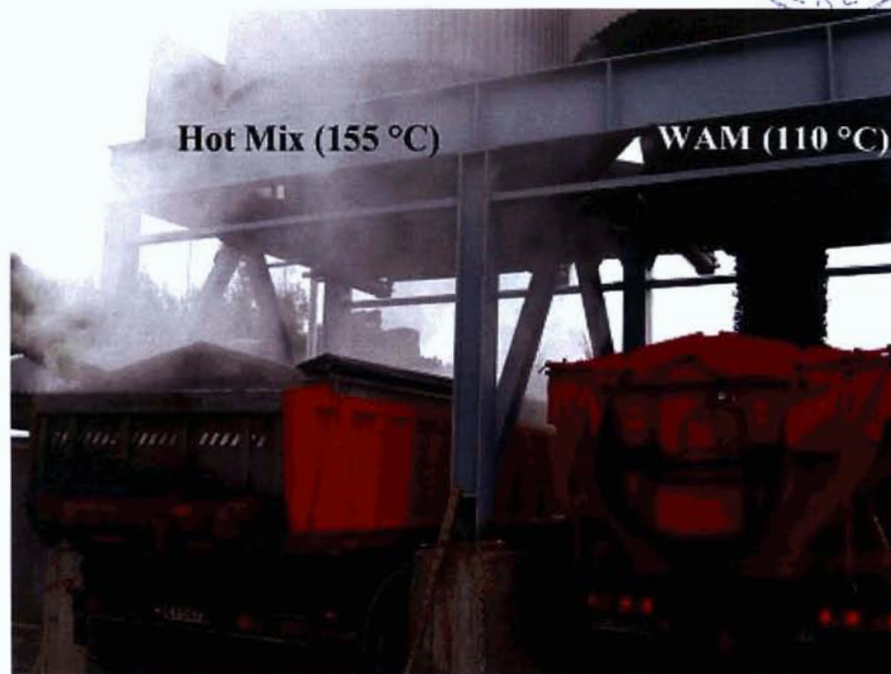


Figura 2.5: Dois tipos de misturas asfálticas



Figura 2.6: Equipamento necessário no processo WAM Foam (NAPA, 2007)

O sucesso do processo depende da escolha cuidadosa dos ligantes utilizados. Em alguns casos pode ser necessária a adição de um promotor de adesividade durante a primeira fase da mistura. O cobrimento nesta primeira etapa é vital para prevenir o descolamento do filme de ligante asfáltico da superfície dos agregados.

A redução das temperaturas de fabricação do concreto asfáltico pelo processo WAM Foam pode gerar economia energética de cerca de 30%, que resulta em uma redução de 30% na emissão de CO₂ na atmosfera (FHWA, 2006).

Mais de 60.000 toneladas de mistura morna pelo processo WAM Foam foram produzidas até o ano de 2007 em todo o mundo, especialmente na França, Noruega, Itália, Luxemburgo, Holanda, Suécia, Suíça e Reino Unido. Apenas uma pista experimental foi executada na América do Norte, no Canadá (NAPA, 2007).

2.1.3.5 Zeólita Sintética

As zeólitas sintéticas são compostas de alumino silicatos e metais alcalinos. Contém na sua composição aproximadamente 20% de água cristalizada que é liberada pelo aumento da temperatura acima do ponto de ebulição da água. As zeólitas liberam uma pequena quantidade de água, criando um efeito controlado de expansão, reduzindo a viscosidade do ligante, a liberação gradual da água da zeólita garante trabalhabilidade por um período de 6 a 7 horas. A trabalhabilidade é mantida até que a temperatura atinja aproximadamente 100°C. As zeólitas sintéticas são adicionadas as misturas convencionais sem alterar as características de projeto, o teor da ordem de 0,3% sobre o peso total da mistura é normalmente adicionado ao mesmo tempo que o asfalto. A Figura 2.7 apresenta o aspecto de duas zeólitas sintéticas.



Figura 2.7: Aspectos de duas zeólitas sintéticas

Até 2007, mais de 300.000 toneladas com zeólitas foram produzidas em todo o mundo, inicialmente na França, Alemanha e EUA.



3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Esta pesquisa tem como objetivos específicos caracterizar misturas asfálticas produzidas em temperaturas intermediárias empregando procedimentos laboratoriais e testes realizados em usina de produção de concreto asfáltico.

Este capítulo é dedicado à descrição da metodologia experimental prevista para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.1 INTRODUÇÃO

A partir das tecnologias concebidas mundialmente para a formulação de misturas asfálticas "mornas", foram escolhidas com base para o desenvolvimento desta pesquisa as metodologias EBE e E.B.T.[®], além do procedimento proposto pelo LCPC, tendo em vista a possibilidade de produzir o material sem a adição de produtos patenteados. Busca-se, com este experimento, desenvolver uma técnica inovadora para a formulação e utilização de misturas asfálticas em temperaturas intermediárias (aproximadamente 100°C).

O Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul possui uma planta experimental para produção de emulsões asfálticas. Este equipamento será utilizado para a produção de ligante asfáltico com as características necessárias para a aplicação em misturas asfálticas "mornas". A Figura 3.1 apresenta uma esquematização da planta experimental.

O sistema consiste basicamente em um moinho coloidal abastecido por dois tanques (de CAP e de fase aquosa). Todo o sistema é aquecido com óleo térmico. Foram instalados sensores de temperatura digitais a fim de obter-se com precisão a temperatura dos componentes água, CAP e emulsão pronta.

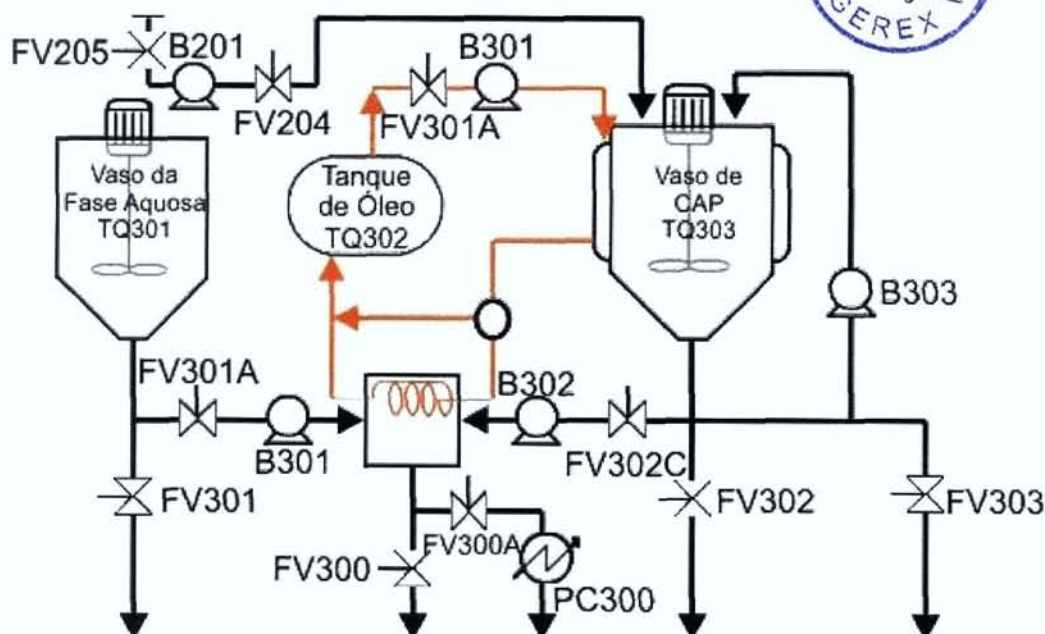


Figura 3.1: fluxograma da planta experimental para produção de emulsões asfálticas

3.2 MATERIAIS

No desenvolvimento desta pesquisa, serão utilizados agregados de rocha basáltica provenientes da formação Serra Geral. Este tipo de rocha é considerada o mais representativo do Estado do Rio Grande do Sul. Usina de Britagem da TRS, localizada em Santo Antônio da Patrulha, que são representativos dos materiais empregados em pavimentação no Estado do Rio Grande do Sul.

Os ligantes asfálticos adotados serão escolhidos visando produzir misturas asfálticas "mornas" com desempenho adequado à finalidade proposta para utilização.

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

A avaliação das características dos ligantes empregados e das misturas asfálticas estudadas será realizada utilizando diversas técnicas laboratoriais. Os ensaios serão executados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS.



3.3.1 Ensaios em amostras de ligantes

A caracterização cuidadosa dos materiais asfálticos a serem utilizados é fundamental para o compreender o comportamento da mistura asfáltica resultante. Serão realizados ensaios para a determinação de características como a penetração, o ponto de amolecimento, a densidade e a massa específica e da viscosidade aparente, parâmetro preconizado pela metodologia Superpave.

3.3.1.1 Penetração

A penetração (PEN) é a distância em décimos de milímetros que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra sob condições prefixadas de carga e temperatura. O equipamento utilizado para este fim é o penetrômetro. O ensaio é normalizado pela NBR 6576: Materiais Betuminosos - Determinação da Penetração (ABNT, 1998).

Para realização do ensaio a amostra é fundida, colocada em um recipiente adequado, resfriada à temperatura de ensaio (em geral 25°C) em banho de água e submetida à penetração de uma agulha padrão com sobrecarga de $100 \pm 0,5$ g durante 5 s.

3.3.1.2 Ponto de amolecimento

O asfalto amolece lentamente sob aquecimento e não possui ponto de fusão. Buscando uma referência semelhante ao ponto de fusão, várias metodologias foram desenvolvidas a fim de medir a temperatura na qual o asfalto possui certa consistência, o mais conhecido e empregado é o ponto de amolecimento anel e bola. O ponto de amolecimento do asfalto foi determinado conforme a norma NBR 6560: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola (ABNT, 2000).

A amostra de ligante é fundida e colocada em um molde que consiste de um anel de latão. O anel contendo a amostra é mantido suspenso em um banho, à temperatura



controlada, e sobre ele é colocada uma esfera padronizada de aço. O conjunto é aquecido a uma velocidade constante fazendo com que a amostra amoleça dentro do anel e ceda ao peso da bola que se deslocará a uma determinada distância. O ponto de amolecimento (PA) é a temperatura lida no momento em que a esfera metálica atravessa o anel perfeitamente cheio de material betuminoso e toca uma placa de referência após ter percorrido uma distância de 25,4 mm.

3.3.1.3 Densidade e massa específica

Densidade é a relação entre a massa do cimento asfáltico de petróleo a 25°C e a massa de igual volume de água à 4°C. A determinação deste parâmetro tem por finalidade a transformação de unidades gravimétricas em volumétricas e é utilizado no cálculo do volume de vazios da mistura betuminosa. Massa específica é a relação entre massa e volume do material. A sistemática do ensaio é padronizada pelo método NBR 6296: Produtos betuminosos semi-sólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa (ABNT, 2004).

A amostra é colocada em um picnômetro calibrado, preenchendo cerca de $\frac{3}{4}$ de seu volume. Pesa-se a amostra e o picnômetro e completa-se o volume remanescente com água. O picnômetro cheio é mantido na temperatura de ensaio de $25,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ e pesado. A densidade da amostra é calculada a partir da sua massa e da massa de água deslocada pela amostra no picnômetro cheio.

3.3.1.4 Viscosidade aparente

A consistência dos ligantes é medida através da viscosidade. O ensaio de viscosidade rotacional foi selecionado para medir esta propriedade, segundo a metodologia descrita na NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (ABNT, 2004). O método consiste na medição do torque necessário para rodar uma haste de prova (*spindle*) imersa em uma amostra de ligante aquecida sob velocidade constante.

A quantidade de amostra utilizada no ensaio depende do tamanho da haste de prova, que deve ser selecionada em função do ligante. Para ligantes convencionais é utilizado o *spindle* 21 e para ligantes modificados o 27 (*Asphalt Institute*, 1994; *Asphalt Institute*, 2000). A velocidade de ensaio deve ser mantida constante, preferencialmente 20 rpm. Foram realizadas medidas de viscosidade à 135, 155, 175 e 195°C.

3.3.2 Ensaios em amostras de emulsão asfáltica

Para caracterizar o comportamento das emulsões asfálticas (EA) produzidas serão realizados ensaios como peneiração, sedimentação, desemulsibilidade, entre outros.

3.3.2.1 Densidade

A densidade do material asfáltico é realizada segundo a norma DNER ME 193/96, Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: determinação da densidade. Este parâmetro é utilizado no cálculo das propriedades volumétricas das misturas asfálticas.

Para a realização deste ensaio com materiais líquidos deve-se primeiramente homogeneizar a EA a 25°C durante 30 minutos em imersão. Após, verte-se a emulsão nos picnômetros (duas amostras) tendo o cuidado para evitar a inclusão de bolhas de ar. O picnômetro é tampado e todo o excesso de material é retirado. O peso do picnômetro com emulsão é registrado.

A densidade do material betuminoso líquido é dada pela equação 3.1.

$$D_l = \frac{c - a}{b - a}$$

Equação 3.1



Onde:

D_1 = Densidade da EA

a = Massa do picnômetro vazio com tampa (g)

b = Massa do picnômetro vazio com tampa cheio de água destilada (g)

c = Massa do picnômetro vazio com tampa cheio com amostra de EA (g)

3.3.2.2 Viscosidade Brookfield

A viscosidade de uma emulsão é influenciada pela consistência da fase dispersante (água e solvente, caso haja) e pelo teor de resíduo asfáltico existente. A viscosidade tem importante significado para emulsões asfálticas, pois é uma propriedade que afeta a utilização deste material. Em vários tipos de construção, este material deve ser uniformemente aplicado através de spray. Portanto, a emulsão deve-se manter pouco espessa a fim de poder ser bombeada durante sua aplicação. Para mistura, a viscosidade pode afetar a trabalhabilidade e a espessura final de filme sobre o agregado.

O ensaio de viscosidade aparente mede o torque necessário para girar um *spindle* imerso numa amostra de ligante. Para a ASTM D 4402-87, o coeficiente de viscosidade é a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento. A velocidade do ensaio é mantida constante a 20 rpm. O ensaio é realizado à temperatura de 25°C e com *spindle* 21 em um viscosímetro Brookfield do tipo RVDV II.

3.3.2.3 Resíduo por evaporação

O ensaio de resíduo por evaporação ou destilação determina quantitativamente o resíduo asfáltico presente na emulsão. Este ensaio é realizado segundo a norma NBR 6568.

Neste método, duas amostras de $50 \pm 1g$ de emulsão são colocadas em recipientes e levadas à estufa a temperatura de $163 \pm 3^\circ C$ durante 2 horas. Ao final deste período, retiram-se as amostras do forno e mistura-se até homogeneização do resíduo. As amostras são então recolocadas no forno por mais 1 hora a fim de garantir a completa evaporação da fase aquosa. Ao final deste tempo, retiram-se as amostras da estufa e após resfriamento à temperatura ambiente, pesa-se os resíduos finais (CAP residual presente na emulsão asfáltica). Este resíduo é a porcentagem em relação à massa inicial e a massa do resíduo final.

Para cada tipo de EA existem valores mínimos de asfalto residual recomendados por norma. Para as emulsões para utilização em misturas mornas o resíduo mínimo deve ser 90% de CAP.

3.3.2.4 Peneiração

O ensaio de peneiramento identifica a presença de glóbulos de asfalto em grandes dimensões, que podem ocorrer caso a emulsão seja grosseira ou caso o processo de coalescência já tenha iniciado ou pela presença de outras partículas sólidas na emulsão provenientes de alguma contaminação do tanque, ou no transporte ou devido a outro fator.

A presença de quantidade excessiva de partículas retidas na peneiração indica que problemas podem ocorrer durante aplicação do material.

Durante o ensaio, 1000 ml de emulsão são passados pela peneira de 0,841 mm. Logo após, é determinada a porcentagem, em peso, retida na peneira. Este ensaio é normalizado pelo DNER ME 005/94 Emulsões Asfálticas - Determinação da peneiração. A porcentagem máxima admitida de material retido na peneira é de 0,10%.

O resíduo de peneiração é obtido a partir da Equação 3.2.



$$\%P = \frac{M}{1000} \times 100$$

Equação 3.2

Onde:

P = Resíduo de Peneiração (%)

M = Massa do resíduo retido (g)

3.3.2.5 Sedimentação

O ensaio de sedimentação representa a capacidade de uma emulsão asfáltica apresentar estabilidade à estocagem prolongada sem que haja separação das fases constituintes. Este ensaio é normalizado pela norma DNER ME 006/2000, Determinação da Sedimentação.

Neste ensaio, utiliza-se duas provetas graduadas contendo 500 ml de emulsão, como mostra a Figura 3.2. Após um período de cinco dias à temperatura ambiente, retira-se amostras de 50 g do topo e do fundo de cada proveta. Estas amostras devem ser agitadas vigorosamente. Levam-se os resíduos, à estufa por duas horas, para que a água total contida na emulsão evapore. Ao fim deste processo, mede-se somente o peso de CAP. Com estes valores é calculado, pela diferença entre topo e base, o resíduo por sedimentação.

A percentagem máxima admitida de diferença entre a massa de resíduo retirado do topo e da base deve ser igual ou inferior a 5%. Estes valores caracterizam emulsões de boa estabilidade à estocagem. O resíduo de sedimentação (5 dias) é dado pela Equação 3.3:

$$R_{Sed} = \frac{A - B}{50} \times 100$$

Equação 3.3

Onde:

R_{Sed} = Resíduo de Sedimentação (%)

A = Resíduo do Fundo (g)

B = Resíduo do Topo (g)



Figura 3.2: Ensaio de sedimentação

3.3.2.6 Desemulsibilidade

A medida da desemulsibilidade se propõe a determinar a velocidade de ruptura de uma emulsão. Este ensaio é aplicável somente em EA catiônicas e aniônicas de ruptura rápida ou média. Ele é utilizado para identificar ou classificar uma emulsão como ruptura rápida (RR) ou ruptura média (RM). Este ensaio foi realizado segundo a norma NBR 6569.

A ruptura de uma determinada massa de emulsão catiônica é acelerada através da adição de 35% de Aerosol OT. O CAP residual é separado por peneiramento (material retido em peneira de 1,4mm) e seu peso é determinado. O resultado do ensaio é a relação percentual entre a massa de CAP obtida pelo peneiramento e a massa de CAP obtida a partir da destilação de uma amostra de mesmo volume, conforme Equação 3.4.

$$D = \frac{P_1}{P_2} \times 100 \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

D = Desemulsibilidade (%)

P₁ = Massa de CAP retida na peneira (g)

P₂ = Massa de CAP obtida por destilação de uma segunda amostra (g)

3.3.2.7 Cobrimento

Este ensaio é aplicável para emulsões que serão utilizadas em misturas asfálticas a frio. Este teste, portanto, não é aplicável para emulsões do tipo RR, utilizadas principalmente para serviços de tratamentos.

O objetivo do teste de cobrimento é assegurar que uma emulsão é estável à mistura com uma determinada composição granulométrica por um determinado tempo fornecendo um cobrimento uniforme. Este ensaio é realizado seguindo a norma ASTM D244-97c, Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts: Coating Test.

O ensaio consiste em misturar vigorosamente 35 ± 1 g de emulsão com 465 ± 1 g de agregados (já na composição granulométrica a ser utilizada) com uma espátula



metálica durante 3 minutos. Após ruptura da emulsão, separação da fase aquosa, observar qual a percentagem de agregado que se encontra coberta pela emulsão.

3.3.2.8 Adesividade

Este ensaio consiste em submeter uma amostra da mistura já curada à água em ebulição por três minutos. É um método expedito do ensaio W.S.T. (Wet Stripping Test), normalizado pela ISSA TB-109.

A superfície do agregado, recoberta com asfalto, é expressa em porcentagem da superfície total de agregados. Valores acima de 90% são considerados satisfatórios, valores entre 75% e 90% são razoáveis e abaixo de 75%, insatisfatórios.

Para realização do ensaio a amostra é fundida, colocada em um recipiente adequado, condicionada à temperatura de 25°C em banho de água e submetida à penetração de uma agulha padrão com sobrecarga de $100 \pm 0,5$ g durante 5 s. O valor da PEN de um material é resultante da média de três determinações.

3.3.3 Ensaio em amostras de concreto asfáltico

Para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas estudadas serão realizados ensaios para determinação da resistência à tração, do módulo de resiliência e do efeito deletério da água. As amostras testadas serão moldadas em laboratório seguindo a metodologia Marshall.

3.3.3.1 Dosagem Marshall

Os conceitos do método Marshall de dosagem de misturas asfálticas para pavimentação foram formulados por Bruce Marshall. O Corpo de Engenheiros do Exército Americano, após pesquisas extensas e estudos de correlação, alteraram o



procedimento de ensaio Marshall e acrescentando alguns itens desenvolveram critérios de dosagem de misturas betuminosas.

Resumidamente, os procedimentos do método consistem em moldar-se por compactação a quente, uma série de corpos-de-prova com diferentes porcentagens de ligante asfáltico, dentro de moldes cilíndricos metálicos, após a compactação as amostras são armazenadas ao ar livre durante 24 h e extraídas dos moldes; em seguida, esses corpos-de-prova são imersos em um banho à 60°C de temperatura, sendo retirados do banho e, imediatamente, submetidos a uma compressão diametral, aplicada por uma prensa, através de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por Marshall.

O valor da carga máxima suportada pelos corpos-de-prova é conhecido como estabilidade Marshall e a deformação de ruptura como fluência. Além destes dois parâmetros são calculados também, a densidade, o volume de vazios e a relação betume/vazios, que representa a quantidade de vazios do agregado mineral preenchida por betume. Os valores limites dos parâmetros Marshall são normalizados por diversos órgãos rodoviários. Os valores de estabilidade e fluência serão determinados à 60°C e corrigidos em função da altura ou volume do corpo-de-prova, conforme preconiza a metodologia ME 043: Misturas betuminosas à quente – ensaio Marshall (DNER, 1995).

Inicialmente serão coletados e armazenados os agregados e os ligantes utilizados na preparação das misturas. O agregado deve ser armazenado em sacos impermeáveis, em local isento de umidade, devidamente identificados. O ligante deve ser acondicionado e armazenado preferencialmente em latas de 3,6 / para evitar seu reaquecimento.

Para a moldagem das amostras de concreto asfáltico são seguidos os seguintes passos:

i) separação dos agregados: cada uma das frações de agregado utilizada (brita 3/4", brita 3/8", pó-de-pedra) é seca em estufa à 60°C e separada em frações granulométricas; em seguida cada fração é lavada na respectiva peneira e então

seca em estufa e acondicionada em sacos plásticos; para separação dos agregados é utilizado um agitador de peneiras específico para esta finalidade;

ii) pesagem e mistura: a partir do ajuste granulométrico, feito com auxílio de uma planilha eletrônica, o material pétreo é pesado em bandejas metálicas, e então levado à estufa para aquecimento; a determinação das temperaturas de mistura e compactação são determinadas através da relação temperatura *versus* viscosidade.

A mistura dos agregados é feita em um misturador eletromecânico desenvolvido por Specht (2004) durante pesquisa realizada em seu doutorado. O equipamento é composto de um motor elétrico trifásico, controle eletrônico de rotação, cuba térmica dotada de duas resistências elétricas (2000 W cada) imersas em óleo térmico e com capacidade para 10 l; o controle de temperatura da cuba é feito através de um controlador digital com precisão de 2°C. Cada batelada de massa é suficiente para a moldagem de 5 amostras.

iii) compactação: a densificação dos corpos-de-prova é realizada em compactador mecânico tipo Marshall com frequência de 60 Hz e contador eletrônico do número de golpes. A massa é colocada em três camadas dentro de um molde pré-aquecido e sofre acomodação por golpes de um soquete metálico. A energia de compactação pode ser de 50 ou 75 golpes por face com frequência de 1 golpe por segundo.

iv) desmoldagem: após a compactação as amostras são deixadas em repouso durante 24 h e então extraídas dos moldes.

3.3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

A realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, realizadas em amostras Marshall com 116,0 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, seguiu as prescrições da norma NBR 15087: Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral (ABNT, 2004). A velocidade de avanço do carregamento é de 0,8 mm/s e a Equação 3.5 é utilizada para o cálculo de R_t .

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi.d.h}$$

Equação 3.5

Onde:

σ_R : resistência à tração por compressão diametral à temperatura do ensaio, expressa em Megapascal, com precisão de 0,01 MPa.

F : carga de ruptura em Newtons, com precisão mínima de 20 N.

h : a altura do corpo-de-prova em milímetros, com precisão de 0,1 mm.

d : diâmetro do corpo-de-prova em milímetros, com precisão de 0,1 mm.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento de compressão em amostras cilíndricas; o carregamento é aplicado em planos paralelos, diametralmente opostos. Esta configuração de carga, gera um plano de tensões de tração, razoavelmente uniforme no plano perpendicular ao da aplicação da carga. O estado biaxial de tensões, gerado na amostra durante o carregamento, está esquematicamente apresentado na Figura 3.3. Esta configuração de solicitação é verificada também nos ensaios de módulo de resiliência e fadiga.

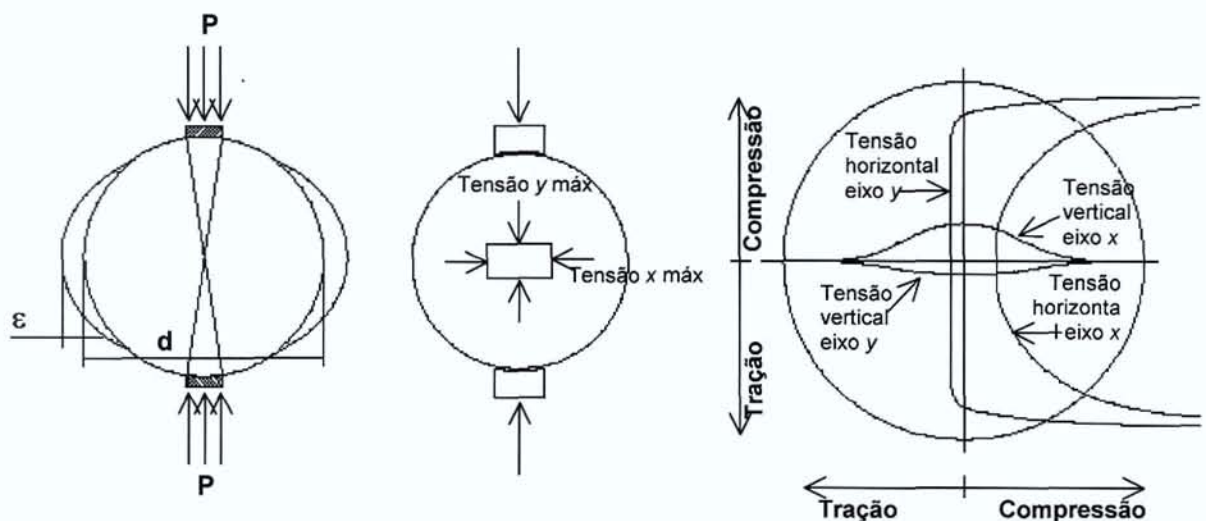


Figura 3.3: Estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral

3.3.3.3 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência é um fator importante na definição do dimensionamento racional dos pavimentos, estando intimamente ligado ao projeto da mistura. É definido como a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas asfálticas são submetidas a carregamentos cíclicos, de baixa duração.

O módulo de resiliência das amostras de concreto asfáltico é determinado através da prescrições da metodologia ME 133: Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência (DNER, 1994).

Utilizam-se para estes ensaios, corpos-de-prova de 101,6 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura. O equipamento utilizado, conforme Figura 3.4, é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz. O equipamento funciona dentro de um câmara com temperatura controlada; isso permite ensaios em diversas temperaturas.

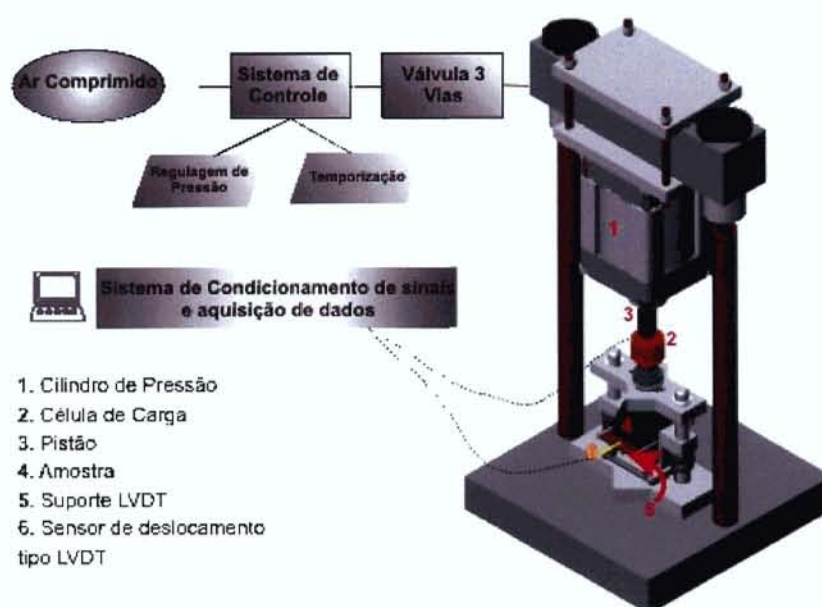


Figura 3.4: Equipamento de módulo de resiliência



A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1 s e 0,9 s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um L.V.D.T., ligado a um microcomputador. A Equação 3.6 é utilizada para o cálculo do módulo de resiliência.

$$MR = \frac{P}{\Delta \cdot h} \times (0,2692 + 0,9976\mu)$$
Equação 3.6

Onde:

MR: módulo de resiliência;

P: carga aplicada;

Δ : deformação elástica ou resiliente;

h: altura do corpo-de-prova; e

μ : coeficiente de Poisson.

3.3.3.4 Efeito deletério da água

A prática brasileira de avaliação da adesividade agregado-ligante tem se limitado aos ensaios visuais de verificação da ocorrência de desprendimento da película de ligante em agregados graúdos (após imersão em banho de água destilada a 40°C por 72 h) e agregados miúdos (quando a mistura é submetida à ação de água destilada fervente e a soluções de carbonato de sódio ferventes). Estes métodos não apresentam correlação com o que acontece no campo, podendo apresentar resultados enganosos.

A metodologia SUPERPAVE avalia a sensibilidade à umidade da mistura asfáltica através do método de ensaio T-283: *Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage* (AASHTO, 1989). Os resultados permitem a estimativa do



descolamento da película de ligante do agregado nas misturas betuminosas e a avaliação de aditivos líquidos, como os melhoradores de adesividade que são usados nos ligantes (dope), ou sólidos em pó, tal como a cal hidratada, que são adicionadas ao agregado.

São produzidos dois subgrupos com três corpos-de-prova cada, que são compactados para atingirem um teor de vazios entre 6 e 8 %. Um subgrupo é condicionado pela saturação a vácuo. Em seguida, aplicam-se ciclos de congelamento e imersão em banhos de água. Todos os corpos de prova são avaliados em termos de resistência à tração indireta. Misturas não suscetíveis à umidade apresentam a proporção entre resistência à tração de amostras condicionadas e não condicionadas maior que 70 %.

3.3.3.5 Fadiga

Os ensaios laboratoriais utilizados para a determinação da vida de fadiga são diferenciados pelo processo de desenvolvimento das tensões: flexão, torção, tração direta ou indireta. No Brasil, o ensaio mais empregado é o de compressão diametral à tensão controlada. Este ensaio tem sido utilizado em todo mundo pela simplicidade nos processos de execução e preparação das amostras. As amostras podem ser preparadas com o uso do soquete Marshall ou extraídas de placas ou da pista.

O sistema de carregamento do ensaio de módulo de resiliência foi utilizado para a determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas testadas. As amostras foram submetidas a diversos níveis de tensão (proporcionais à resistência à tração estática) e levadas à ruptura por fadiga à temperatura de 25°C.

3.3.3.6 Ensaio de fluência por compressão uniaxial com carregamento dinâmico

A avaliação da deformação permanente por compressão uniaxial com carregamento dinâmico (*creep* dinâmico) foi realizada em corpos-de-prova Marshall utilizando o



mesmo equipamento empregado na determinação do módulo de resiliência. Uma célula de carga e dois transdutores tipo LVDT ligados a um microprocessador compõem o sistema de aquisição automática de dados.

O ensaio consiste na aplicação de pulsos de carga de duração de 0,1 s intercalados de um tempo de repouso de 0,9 s. Os corpos-de-prova são mantidos na temperatura do ensaio (45°C) por no mínimo 4h e submetidos em seguida a um condicionamento com aplicação de 200 ciclos de carga. Após o período de condicionamento, o carregamento é suspenso por 100 s, o que permite a recuperação das deformações elásticas. Na seqüência são aplicados 3.600 ciclos de carga (1 h) com posterior período de repouso e descarregamento de 15 min.

Os LVDTs são fixados à alça superior de um sistema de sustentação tocando a alça inferior. As deformações são resultado dos deslocamentos no centro do corpo-de-prova em relação à distância entre as alças. Este procedimento garante que as irregularidades da superfície de contato, fontes de erros, tenham influência somente sobre a distribuição do carregamento. A partir dos dados obtidos pelos LVDTs são determinados os deslocamentos sofridos pela amostra. As deformações são calculadas dividindo-se os deslocamentos registrados pela distância entre os anéis de fixação dos LVDTs na amostra. São obtidos a partir deste procedimento os valores das deformações total, recuperável e permanente. A tensão utilizada neste ensaio foi de 0,1 MPa.



4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no estudo de técnicas para produção de misturas asfálticas a temperaturas intermediárias. Neste relatório serão apresentados os resultados referentes ao estudo da técnica que utiliza emulsão asfáltica e aditivo químico a base de enxofre.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

4.1.1 Agregados

Os agregados utilizados são provenientes da jazida de basalto localizada em Santo Antônio da Patrulha. A distribuição granulométrica dos agregados é apresentada na Tabela 4.1.

A curva granulométrica das misturas estudadas, apresentada na Figura 4.1, é composta por 21% de brita 3/4", 14% de brita 3/8", 58% de pó-de-pedra, 4% de areia e 3% de cal. A Tabela 4.2 apresenta as densidades dos agregados e da mistura mineral empregadas nos cálculos das características volumétricas das misturas asfálticas mornas projetadas.

Tabela 4.1: Granulometria dos agregados utilizados

PENEIRA	mm	Brita 3/4	Brita 3/8	Pó-de-pedra	Areia	Cal
3/4"	19,1	100,0				
1/2"	12,7	64,6				
3/8"	9,5	24,1	100,0	100,0		
n 4	4,76	1,3	7,9	93,9	100,0	
n 8	2,38	0,7	2,4	68,2	99,6	
n 30	0,59	0,4	1,5	26,0	90,9	100,0
n 50	0,297	0,3	1,4	18,7	37,4	99,6
n 100	0,149	0,3	1,2	12,4	1,8	82,4
n 200	0,074	0,2	0,9	9,0	0,8	54,4

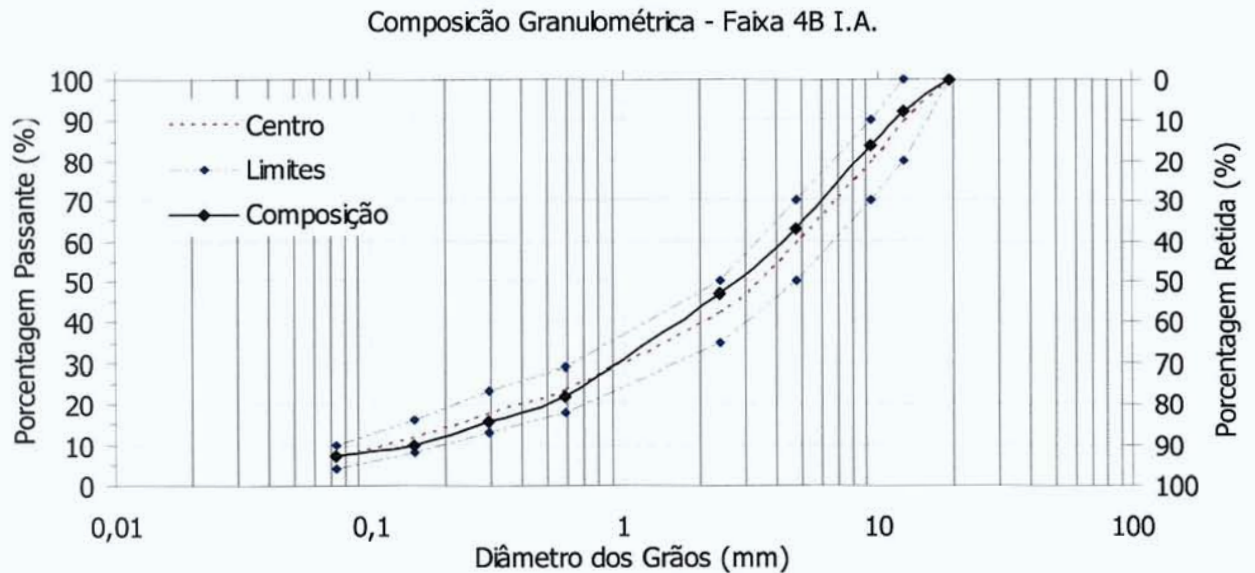


Figura 4.1: Curva granulométrica das misturas estudadas



Tabela 4.2: Densidades dos agregados e da mistura mineral

Agregados					Mistura Mineral	
Peneiras	%	D.real	D.ap.	Ab.	D.real	2,804
3/4" a 8	53,0	2,842	2,768	0,94	D.ap.	2,765
Pas. 8	47,0	2,762	---	---	Dmm	2,784

4.1.2 Ligante asfáltico

As características do CAP 50/70 foi empregado na formulação das misturas "mornas" estudadas são apresentadas na Tabela 4.3, cada resultado representa a média de três determinações.

Tabela 4.3: Características do CAP 50/70 utilizado

Característica	CAP 50/70
Densidade	1,010
Penetração – 100g, 5s, 25°C (10^{-1} mm)	52
Ponto de amolecimento (°C)	47

O ensaio empregando o viscosímetro Brookfield foi utilizado para a determinação da temperatura de mistura do ligante. A variação da viscosidade em função da temperatura para CAP 50/70 é mostrada na Figura 4.2. A partir dos resultados a faixa de temperaturas adotada foi 157 - 164°C, para garantir o cobrimento adequado dos agregados.

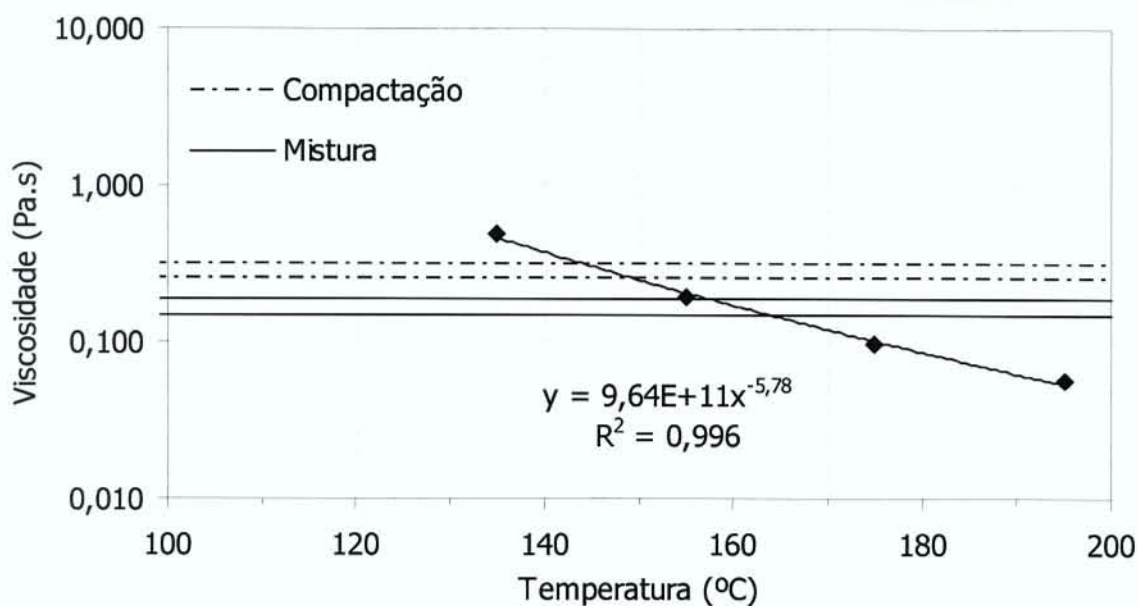


Figura 4.2: Variação da viscosidade do CAP 50/70 em função da temperatura

4.1.3 Emulsão asfáltica

A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica utilizada nesta etapa da pesquisa.

Tabela 4.4: Características da emulsão asfáltica

Ensaio	Unidade	Valores especificados		Resultados
		Mínimo	Máximo	
Carga da partícula	---	positiva	---	positiva
Visc. Saybolt Furol, 50°C	s	100	400	223
Resíduo da emulsão	%	67	---	68,5
Peneiração, 841µm	% em peso	0,1	---	0,02
Sedimentação, 5 dias	%	---	5	---
Desemulsibilidade	% em peso	50	---	62,5
Ph	Ph	---	6,5	3,1
Densidade	---	---	---	0,999

O aditivo a base de enxofre é constituído de produtos químicos melhoradores de cobrimento e trabalhabilidade, promotores de adesividade e agentes emulsificantes. O produto é adicionado à emulsão asfáltica aquecida a 80°C em teores de até 0,5% em peso de emulsão. Durante a produção da mistura asfáltica a emulsão é utilizada em substituição aos ligantes asfálticos convencionais.

O teor de aditivo empregado foi determinado a partir de ensaios para a avaliação da adesividade ligante-agregado segundo o método do DNER ME 078/94 - Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Foram investigados teores de aditivo de 0,3, 0,4 e 0,5%. Como pode ser observado na Figura 4.3 os teores investigados resultaram em adesividade adequada, não sendo observado descolamento de ligante. Sendo assim, o teor adotado foi 0,3%.

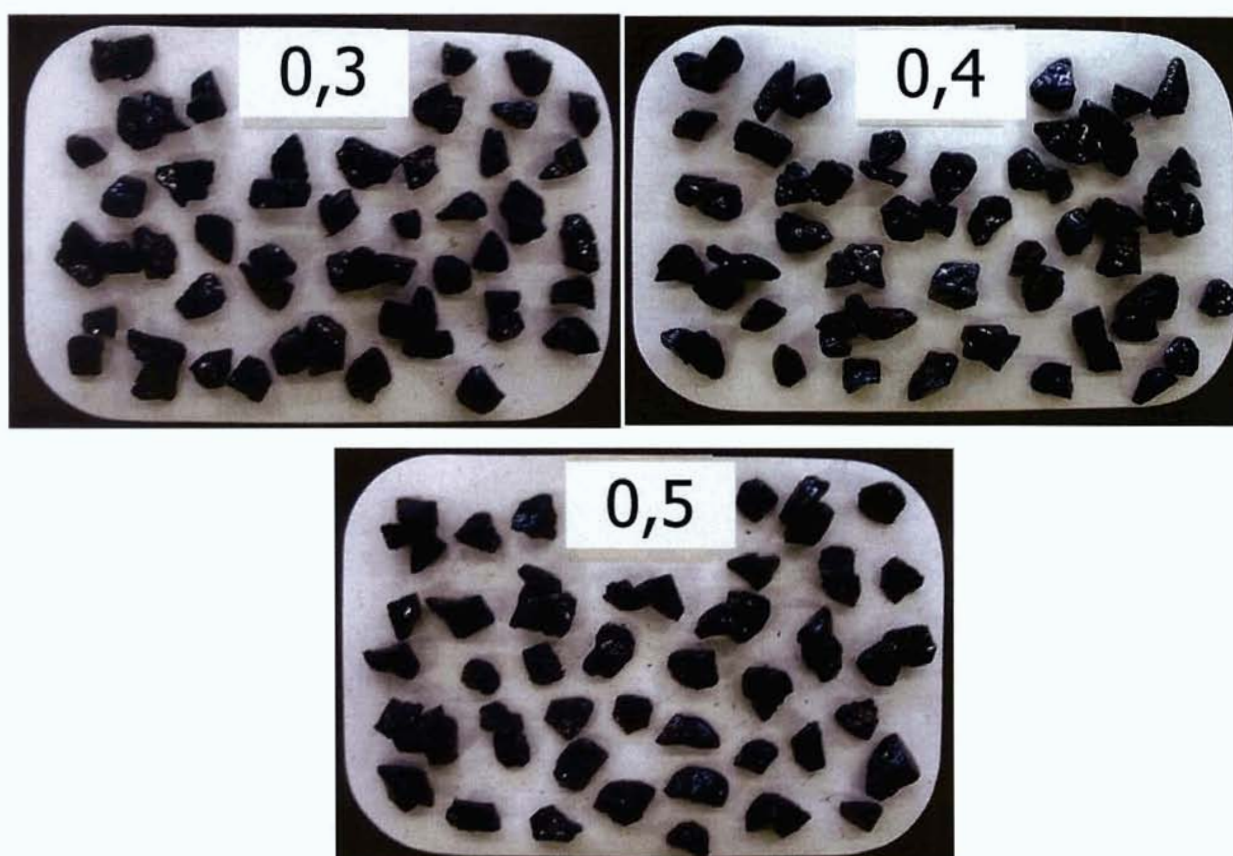


Figura 4.3: Avaliação da adesividade ligante-agregado para determinação do teor de aditivo

4.2 PROJETO DA MISTURA COM EMULSÃO

A curva granulométrica das misturas estudadas, apresentada na Figura 4.4, é composta por 21% de brita 3/4", 14% de brita 3/8", 58% de pó-de-pedra, 4% de areia e 3% de cal.

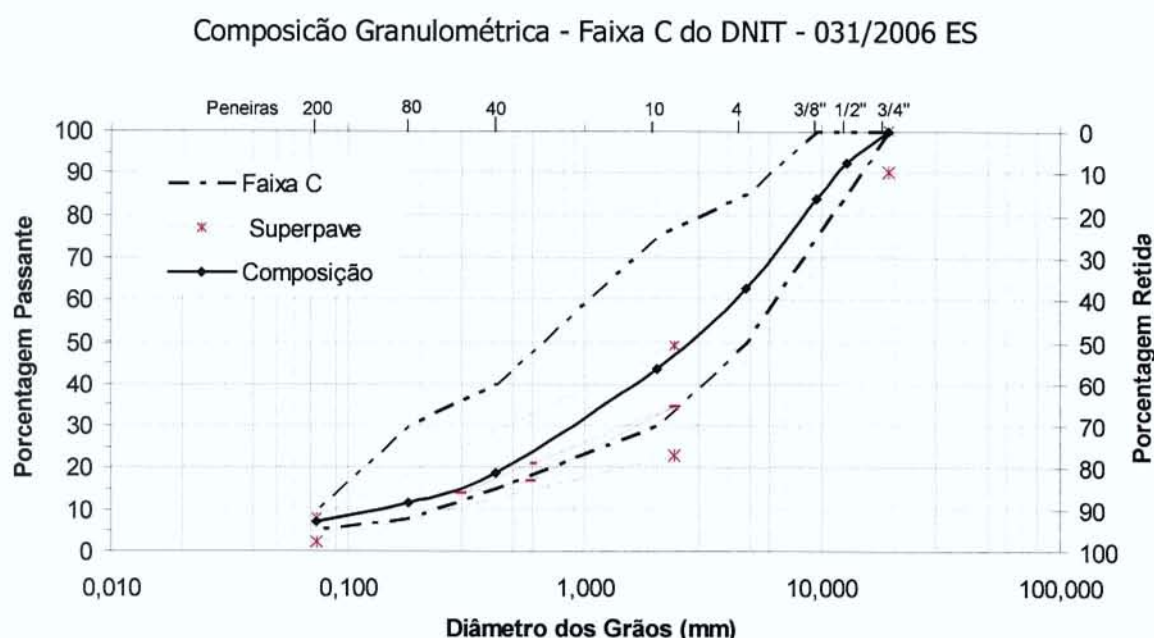


Figura 4.4: Curva granulométrica da mistura estudada

Para o projeto da mistura asfáltica foi determinado o teor de emulsão que resultaria em igual teor de ligante asfáltico de projeto (5,5%) em função do resíduo asfáltico da emulsão.

O procedimento de mistura é realizado a 120°C. Os agregados são aquecidos de forma a garantir esta temperatura quando adicionada a emulsão a 80°C. Durante o processo de mistura a emulsão sofre ruptura e ocorre a cura em função da temperatura que causa evaporação. A temperatura de compactação deve variar entre 90 e 100°C.

As características volumétricas da mistura produzida são apresentadas na Tabela 4.5, cada resultado representa a média de três determinações.

Tabela 4.5: Características volumétricas das misturas

	D. aparente	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
REF (TRS)	2,43	4,0	17	76
REF (LAPAV)	2,49	2,1	16	86
EBE 8	2,47	2,6	16	84
Emulsão	2,45	3,6	17	79

As amostras produzidas foram utilizadas para a realização de ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) e Cantabro. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam as médias de três determinações obtidas nos ensaios de MR e RT, respectivamente. Os valores da mistura de referência (TRS) (0% de água) foram fornecidos pela Concepa, podendo-se considerar que o MR é um pouco elevado para um concreto asfáltico produzido com ligante convencional. Com o objetivo de confirmar os valores foram realizados novos ensaios para a determinação das características volumétricas e do MR e da RT da mistura de referência (REF), sendo denominados REF (LAPAV).

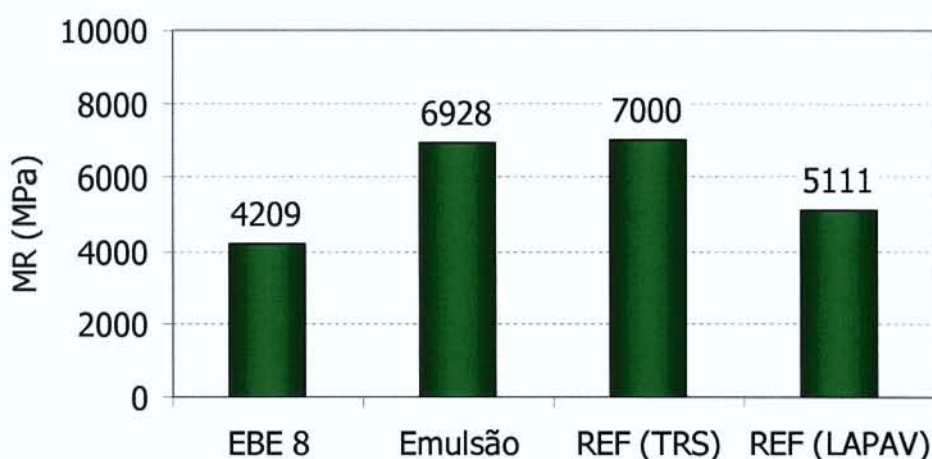


Figura 4.5: MR das misturas estudadas

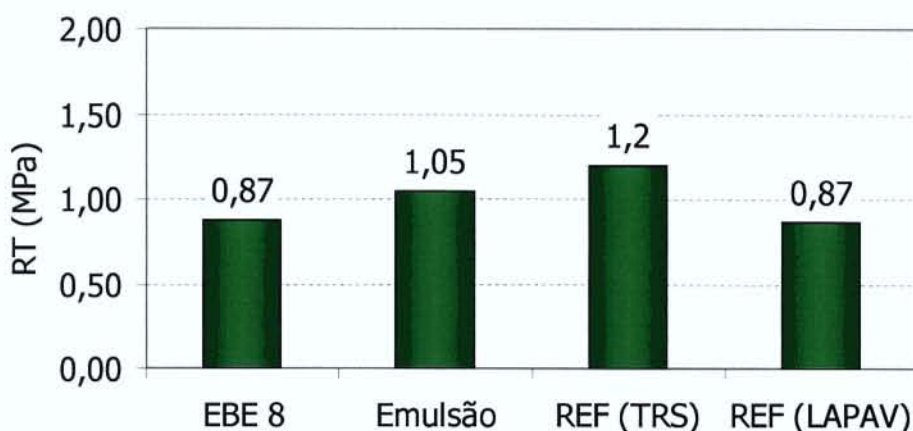


Figura 4.6: RT das msituras estudadas

Os valores de MR e RT obtidos para as misturas “mornas” avaliadas são muito próximos aos observados para CBUQs produzidos com ligante convencional (da ordem de 4.000 MPa e 1 MPa, respectivamente), portanto, considerando o desempenho mecânico das amostras, é correto concluir que as técnicas empregadas são adequadas para a produção de misturas asfálticas a temperaturas intermediárias.

Cabe ressaltar a importância da verificação da adesividade do ligante ao agregado pétreo que pode ter sido reduzida em função da utilização de emulsão asfáltica. Esta característica foi avaliada empregando a metodologia Lottman Modificada. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos segundo este método. A resistência à tração representa a média do resultado para 3 corpos-de-prova. Os materiais avaliados atenderam à especificação SUPERPAVE™ de resistência retida à tração (RRT) superior a 70%. Observa-se o efeito positivo da utilização de um melhorador de adesividade evidenciada pelo excelente resultado das amostras produzidas com emulsão. A RRT foi superior à observada para o concreto asfáltico convencional (REF).



Tabela 4.6: Resultado dos ensaios Lottman Modificado

	Emulsão	EBE	REF
RT condicionados (MPa)	0,469	0,305	0,479
RT sem condicionamento (MPa)	0,538	0,435	0,581
RRT (%)	87	70	82,5

A avaliação da perda de massa devido ao desgaste por abrasão em consequência do tráfego foi realizada através do ensaio Cantabro que utiliza o equipamento Los Angeles. A perda de massa das amostras avaliadas é apresentada na Tabela 4.7, cada resultado representa a média de três determinações. Observa-se um aumento da perda para as misturas produzidas com emulsão asfáltica provavelmente em função da maior "rigidez" observada nos resultados de MR e RT.

Tabela 4.7: Perda de massa no ensaio Cantabro

	Perda de massa (%)
Emulsão	7,3
EBE 8	2,6
REF	3,1

4.3 PROJETO DA MISTURA COM ZEÓLITA

Para o projeto da mistura asfáltica com zeólita estipulou-se, baseado na literatura, o teor de aditivo a ser utilizado em 0,3% sobre o peso total (ligante + agregado). Foi necessário fazer testes para determinação das temperaturas de mistura e compactação. A temperatura de mistura deve variar entre 100 e 120°C e a temperatura de compactação entre 80 e 100°C. Para estabelecer a melhor temperatura foram realizados testes de mistura e compactação variando estas temperaturas avaliando o cobrimento dos agregados e a trabalhabilidade da mistura,

bem como o comportamento mecânico dos materiais resultantes empregando os ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT). Foram avaliadas temperaturas de mistura de 120, 110 e 100°C e de compactação de 85 e 95°C. Analizou-se a influência da granulometria da zeólita trabalhando com duas amostras de material: uma mais granular (passante na peneira n. 10 e retido na peneira n. 80 – fração areia) e uma mais fina (passante na peneira 200 – fíler). A Figura 4.7 apresenta a distribuição granulométrica da zeólita disponibilizada para este estudo.

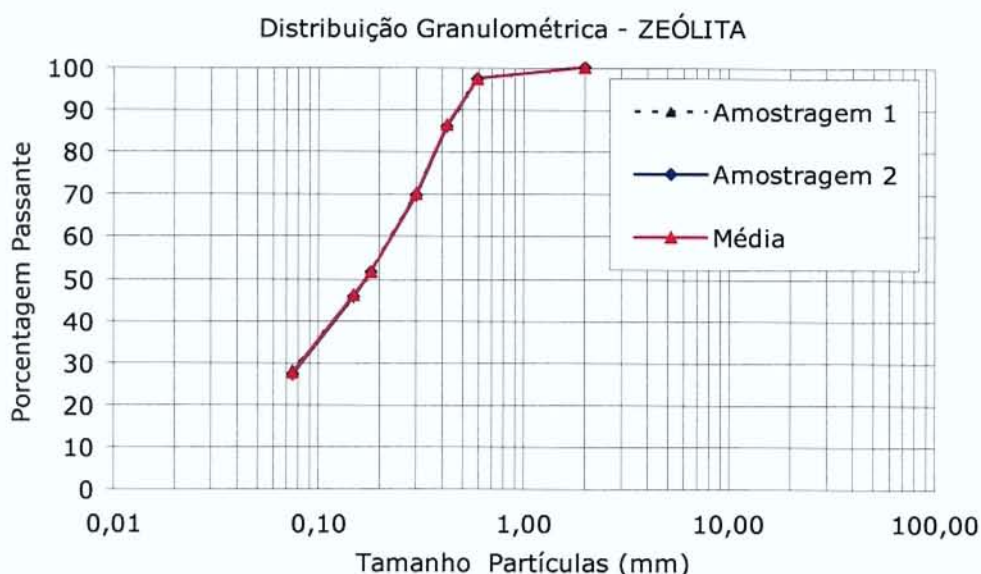


Figura 4.7: Distribuição granulométrica da zeólita estudada

As características volumétricas das misturas produzidas são apresentadas na Tabela 4.8. É possível observar que a granulometria da zeólita adicionada tem pouca influência sobre as características volumétricas das amostras. No entanto, as temperaturas de mistura e compactação têm papel fundamental. Os resultados mais próximos da mistura de comparação e com melhores características foram obtidos para o conjunto de temperaturas 110 e 95°C (mistura e compactação). A redução é bastante significativa uma vez que para a mistura convencional estas temperaturas são próximas de 160 e 140°C.



Tabela 4.8: Características volumétricas das misturas

	D. aparente	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
REF (TRS)	2,43	4,0	17	76
REF (LAPAV)	2,49	2,1	16	86
EBE 8	2,47	2,6	16	84
Emulsão	2,45	3,6	17	79
Ret # 80 (100 - 85°C)	2,41	4,8	18	73
Ret # 80 (110 - 85°C)	2,42	4,6	18	74
Ret # 80 (120 - 85°C)	2,42	4,6	18	74
Ret # 80 (110 - 95°C)	2,43	4,1	17	76
Ret # 80 (120 - 95°C)	2,44	3,9	17	78
Pass #200 (100 - 85°C)	2,42	4,4	18	75
Pass #200 (110 - 85°C)	2,41	4,7	18	74
Pass #200 (110 - 95°C)	2,43	4,2	18	76

A Tabela 4.9 apresenta os resultados de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) para as amostras avaliadas (média de três determinações). É possível observar que, no que diz respeito às características mecânicas avaliadas, nem a granulometria da zeólita nem as temperaturas têm influência significativa no comportamento do material analisado. Sendo assim, com base nos resultados apresentados o conjunto de temperaturas 110 e 95°C, mistura e compactação respectivamente, foi considerado o mais adequado para produção de misturas asfálticas "mornas" com emprego de zeólita.



Tabela 4.9: Características mecânicas das misturas

	RT (MPa)	MR (MPa)
REF (TRS)	1,20	7.000
REF (LAPAV)	0,87	5.111
EBE 8	0,87	4.209
Emulsão	1,05	6.928
Ret # 80 (100 - 85°C)	0,93	6.247
Ret # 80 (110 - 85°C)	1,14	7.170
Ret # 80 (120 - 85°C)	1,13	6.529
Ret # 80 (110 - 95°C)	1,14	6.570
Ret # 80 (120 - 95°C)	1,21	8.224
Pass #200 (100 - 85°C)	1,02	6.695
Pass #200 (110 - 85°C)	1,05	6.891
Pass #200 (110 - 95°C)	1,12	6.401

4.4 AVALIAÇÃO DA VIDA DE FADIGA

O trincamento por fadiga é um dos defeitos mais comuns observados em pavimentos com baixo desempenho. É caracterizado pelo aparecimento de trincas longitudinais nas trilhas de roda que podem propagar-se pela superfície do pavimento formando trincas interligadas tipo couro de jacaré. Este tipo de defeito pode ter seu início na superfície do pavimento, devido a ação de forças cisalhantes resultantes do tráfego, ou na fibra inferior da camada asfáltica resultando de tensões de tração excessivas.

A vida de fadiga das misturas estudadas nesta pesquisa foi avaliada empregando ensaios de fadiga à tensão controlada à 25°C; o critério de ruptura neste tipo de ensaio é o trincamento completo do material. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam as curvas de fadiga para a mistura estudada em função da tensão de tração e da diferença de tensões, cada ponto na curva representa um ensaio. A curva que representa a vida de fadiga de uma mistura asfáltica em função da solicitação aplicada segue modelo da seguinte equação:

$$N_f = a \times S^b$$

Onde: N_f : vida de fadiga; S : solicitação e a , b : constantes do modelo.

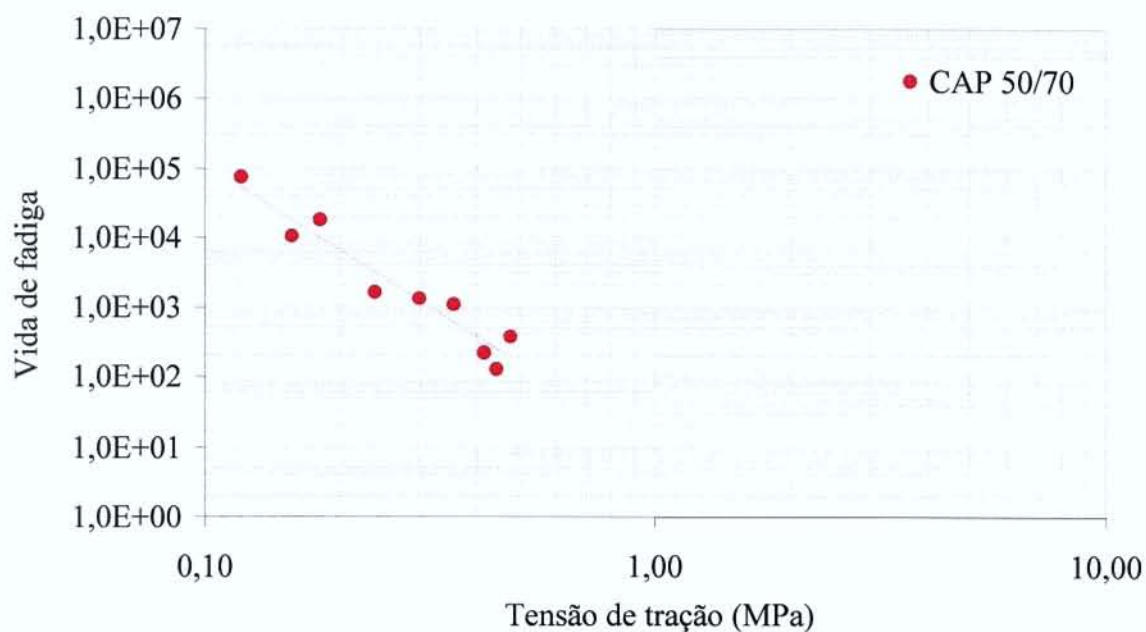


Figura 4.8: Curva de fadiga da mistura estudada em função da tensão de tração

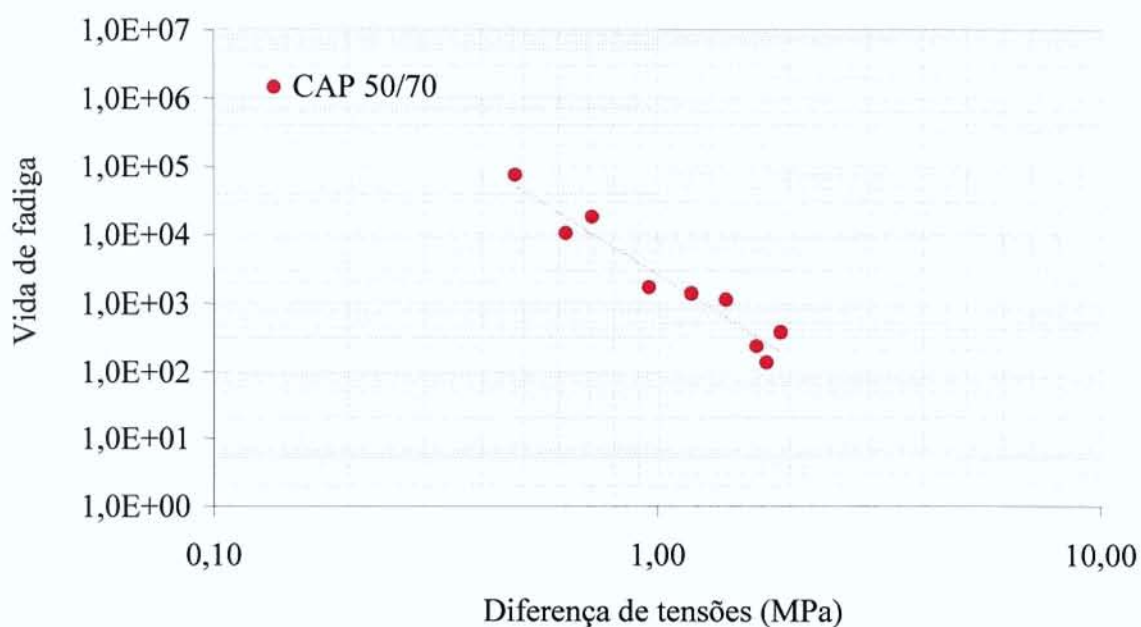


Figura 4.9: Curva de fadiga da mistura estudada em função da diferença de tensões

A Tabela 4.10 apresenta as constantes dos modelos gerados para a vida de fadiga da mistura estudada em função da tensão de tração e da diferença de tensões.

Tabela 4.10: Constantes do modelo de fadiga para as misturas estudadas

MISTURA	TENSÃO DE TRAÇÃO (MPa)			DIFERENÇA DE TENSÕES (MPa)		
	a	b	R ²	a	b	R ²
CAP 50/70	8,91	-4,0869	0,93	2.573	-4,0869	0,93

4.5 RESISTÊNCIA ÀS DEFORMAÇÕES PERMANENTES

O tráfego pesado, em especial lento e canalizado, aliado a altas temperaturas pode causar deformações plásticas nas trilhas de roda, defeito comum nas rodovias brasileiras. Afundamentos acentuados indicam a ruptura do pavimento e diminuem a segurança e o conforto do usuário por favorecer a ocorrência dos fenômenos de hidroplanagem e *spray*.

Segundo Souza *et al.* (1991) o ATR resulta da combinação da densificação e da distorção por cisalhamento dos materiais, podendo ocorrer em uma ou mais camadas do pavimento.

Com o objetivo de avaliar a resistência às deformações permanentes da mistura estudada foram realizados ensaios de *creep* dinâmico. A partir dos resultados obtidos nestes procedimentos é possível estabelecer o módulo de *creep* dinâmico ou módulo de fluência dinâmica empregando a equação a seguir:

$$E_c = \frac{\sigma_{axial}}{\varepsilon_{esp}}$$

Onde: E_c : módulo de *creep* dinâmico em MPa; σ_{axial} : tensão axial aplicada em MPa e ε_{esp} : deformação permanente específica em mm/mm.

A Tabela 4.11 apresenta os deslocamentos absolutos medidos e as deformações específicas e módulos de *creep* dinâmico calculados para a mistura estudada (média de três determinações). A utilização de ligantes modificados pode aumentar a resistência às deformações das misturas asfálticas se comparada à obtida para a mistura com CAP 50/70.

Tabela 4.11: Resultados dos ensaios de *creep* dinâmico

	CAP 50/70
Deslocamento (mm)	
Elástico	0,474
Plástico	0,505
Total	0,600
Deformação específica (mm/mm)	
Recuperável	0,0118
Permanente	0,0013
Total	0,013
Módulo de <i>creep</i> dinâmico (MPa)	7,9

4.6 CONCLUSÕES

Avaliando os resultados obtidos para as técnicas para produção de misturas mornas empregando emulsão modificada e zeólita considera-se viável a realização de testes de produção em usina de asfalto. A partir da escolha da técnica a ser avaliada em verdadeira grandeza, sugere-se a realização de ensaios para análise da vida de fadiga e da resistência às deformações permanentes em escala laboratorial, comparando o comportamento da mistura com os resultados já obtidos para misturas convencionais.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca de métodos produtivos mais eficientes, otimizando a utilização dos recursos naturais e limitando o impacto destas atividades sobre o meio ambiente é uma preocupação global, objetivando atingir um desenvolvimento sustentável.

A construção de pavimentos se enquadra neste contexto e pesquisas recentes têm procurado criar tecnologias que proporcionam menores consumo energético e redução nas emissões de gases poluentes na atmosfera, entre elas destaca-se a produção e aplicação de misturas asfálticas em temperaturas intermediárias – cerca de 100°C.

Em sintonia com as pesquisas mundiais, este projeto buscou o desenvolvimento de procedimentos aplicáveis de acordo com a realidade da pavimentação brasileira. A técnica proposta pela empresa francesa FAIRCO, conhecida como *Enrobés à Basse Énergie* (EBE), mostrou-se adequada para produção de misturas asfálticas a temperaturas intermediárias, resultando em materiais com características mecânicas muito próximas às observadas para a mistura de referência produzida em temperatura convencional.

No entanto, para garantir o sucesso da aplicação da técnica EBE, considerava-se fundamental a execução de um teste de usinagem e compactação empregando os equipamentos utilizados em obras rodoviárias. A realização deste procedimento experimental avaliada em conjunto por LAPAV e CONCEPA foi considerada difícil em função das alterações necessárias na Usina de Asfalto para produção da mistura (explanadas no capítulo I deste relatório). Sendo então reconsiderada a sequência da pesquisa, optando-se por analisar outras técnicas que viabilizassem a execução de pavimentos empregando misturas “mornas”.

As duas opções avaliadas – emulsão modificada e zeólita – mostraram-se adequadas e facilmente produzidas sem necessidade de adaptações significativas para produção utilizando usinas asfálticas tradicionais.

A redução nas temperaturas de produção e aplicação das misturas estudadas atingiu aproximadamente 50°C. Para as misturas com emulsão estas temperaturas são 120 e 95°C e para as misturas com zeólita 110 e 95°C. Considerando a utilização de zeólitas, esta diminuição resulta em ganho energético de aproximadamente 20% e redução da emissão de gases poluentes na atmosfera de 18 a 25% (Eurovia, 2006). Para a produção de misturas mornas com a técnica empregando emulsão modificada pode-se esperar uma diminuição do consumo energético de até 55%, o que representaria redução de 45% de emissão de CO₂ e SO₂ na atmosfera (FHWA, 2006).

A técnica a ser empregada pela concessionária será definida em função da escolha do produto a ser adquirido – emulsão modificada ou zeólita. Esta escolha pode ser em função de custos ou de facilidade de produção. A técnica empregando zeólita parece ser, a primeira vista, de simples produção, uma vez que o aditivo é fornecido em pó e adicionado à mistura durante o processo de usinagem juntamente com o ligante asfáltico (escolhido em função das necessidades de projeto).

Cabe ressaltar que as duas técnicas são promissoras visto que as baixas temperaturas podem aumentar a distância de transporte entre a usina e o local de execução, além de permitir o trabalho em condições climáticas mais adversas que as misturas asfálticas a quente convencionais. A diferença entre as temperaturas de mistura e compactação (entre 25 e 35°C) é comparável às temperaturas para misturas à quente demonstrando ser perfeitamente executável. No entanto, não deve ser descartado um teste de usinagem e aplicação em verdadeira grandeza.



Equipe executora

Coordenador: Professor DSc. Jorge Augusto Pereira Ceratti

Equipe técnica: Professor Dr. Washington Peres Núñez

Enga. Dra. Luciana Rohde

Equipe de apoio: Ândreas Ostermann (aluno de Graduação)

Diego Treichel (aluno de Graduação)

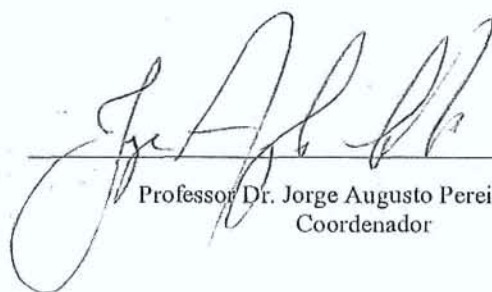
Daniel (técnico do LAPAV)

Vinícius (técnico do LAPAV)



56

Equipe executora



Professor Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti
Coordenador



Professor Dr. Washington Peres Núñez
Equipe técnica