



**PROJETO DE PESQUISA CONCEPA - LAPAV**

*"Estudo laboratorial de redução das  
temperaturas de usinagem e compactação  
de misturas asfálticas"*

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS "MORNAS"**

**RELATÓRIO FINAL  
ESTUDO LABORATORIAL**

Porto Alegre  
dezembro de 2007

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	4
2 REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	6
2.1 A IMPORTÂNCIA DA TEMPERATURA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	6
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS "MORNAS" .....	24
2.2.1 ASPHA-MIN®.....	25
2.2.2 SASOBIT®.....	26
2.2.3 EVOTHERMTM .....	27
2.2.4 WAM-Foam® .....	28
2.2.5 A proposta do LCPC.....	29
2.2.6 E.B.T.® .....	30
2.2.7 EBE.....	30
3 METODOLOGIA DE PESQUISA .....	32
3.1 INTRODUÇÃO .....	32
3.2 MATERIAIS.....	33
3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	33
3.3.1 Ensaio em amostras de ligantes .....	34
3.3.1.1 Penetração .....	34
3.3.1.2 Ponto de amolecimento .....	34
3.3.1.3 Densidade e massa específica .....	35
3.3.1.4 Viscosidade aparente.....	35
3.3.2 Ensaio em amostras de emulsão asfáltica .....	36
3.3.2.1 Densidade .....	36
3.3.2.2 Viscosidade Brookfield .....	37
3.3.2.3 Resíduo por evaporação .....	37
3.3.2.4 Peneiração.....	38
3.3.2.5 Sedimentação .....	39
3.3.2.6 Desemulsibilidade .....	40
3.3.2.7 Cobrimento.....	41
3.3.2.8 Adesividade .....	42

	3
3.3.3 Ensaio em amostras de concreto asfáltico .....	42
3.3.3.1 Dosagem Marshall .....	42
3.3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral .....	44
3.3.3.3 Módulo de resiliência .....	46
3.3.3.4 Efeito deletério da água .....	47
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	49
4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS .....	49
4.1.1 Agregados .....	49
4.1.2 Ligante asfáltico .....	51
4.2 PROJETO DA MISTURA .....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	57
REFERÊNCIAS .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

A pavimentação de rodovias é um desafio que o país precisa enfrentar no milênio que inicia. Considerando que aproximadamente 60% do transporte de cargas é realizado em rodovias, conclui-se que o aumento da densidade de rodovias pavimentadas é um condicionante para a diminuição do custo operacional do transporte e a decorrente redução nos custos finais dos bens e serviços. Não deve subestimar-se igualmente o efeito da melhoria das condições de rolamento dos pavimentos no aumento da competitividade dos produtos nacionais no exterior. Por último, mas não menos importante, uma rodovia com boas condições de tráfego é fundamental para a qualidade de vida das pessoas.

Observa-se que, apenas 160.000 km (10%) da malha viária nacional é pavimentada, com predomínio de pavimentos flexíveis com revestimentos asfálticos. O custo inicial das obras, as facilidades construtivas, a disponibilidade de um grande número de usinas asfálticas e o domínio dos processos construtivos, são fatores que colaboram para a manutenção dessa tendência na construção de novos pavimentos ou na recuperação estrutural de antigos.

Por outro lado, a preocupação com o aquecimento global tem levado ao desenvolvimento de processos construtivos mais adequados às premissas do desenvolvimento sustentável. Têm sido desenvolvidas técnicas inovadoras para reduzir as temperaturas de fabricação e aplicação de concreto asfáltico a quente sem sacrificar a qualidade do pavimento. Estas técnicas podem resultar na redução do consumo de energia e na emissão de gases poluentes na atmosfera, contribuindo igualmente para a melhoria das condições de trabalho nas usinas de concreto asfáltico e nos canteiros de obras. Além disso, podem permitir a abertura ao tráfego das rodovias mais rapidamente.

Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo viabilizar a produção em escala experimental de misturas asfálticas “mornas”, estudadas atualmente em países como

França e Suécia, como *enrobés tièdes* e *semi-tièdes*, e nos Estados Unidos e Inglaterra, como *warm mix asphalt*.

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.

O desenvolvimento do estudo laboratorial visa:

- × produzir um ligante asfáltico com características adequadas para a formulação de misturas “mornas”;
- × projetar misturas asfálticas “mornas”;
- × adaptar a produção do material ao procedimento de dosagem e compactação Marshall de corpos de prova e
- × avaliar as características mecânicas das misturas formuladas empregando ensaios tradicionalmente utilizados no Brasil.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A IMPORTÂNCIA DA TEMPERATURA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Diferentes técnicas visando a redução de até 55°C nas temperaturas de fabricação e aplicação de misturas asfálticas a quente têm sido propostas nos últimos anos. Estes novos processos e produtos empregam variados meios mecânicos e químicos para reduzir a resistência ao cisalhamento da mistura nas temperaturas de construção mantendo ou melhorando o desempenho do pavimento. O desenvolvimento destas tecnologias começou na Europa em 1997, com o objetivo de adequar os procedimentos empregados pela indústria da pavimentação às premissas do Protocolo de Kyoto (Newcomb, 2007). Os processos variam entre si, mas os objetivos são os mesmos: economizar energia e reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera.

Já está bastante consolidada a idéia de que para o pavimento atingir com eficácia a sua função estrutural e funcional é necessário haver um permanente controle tecnológico dos materiais no momento da construção do pavimento. Nesse controle, é fundamental que a temperatura de usinagem (temperatura de mistura) e de compactação estejam de acordo com as obtidas nos projetos das misturas asfálticas. A temperatura não pode estar acima (a chamada "queima da mistura"), nem abaixo da temperatura de projeto, visto que muitas de suas propriedades, como viscosidade, por exemplo, estão diretamente relacionadas à temperatura da mistura asfáltica. A seguir serão apresentados inúmeros estudos realizados que evidenciam e comprovam a importância da temperatura de usinagem e de compactação nas misturas asfálticas.

BIRMAN (1979) afirma que a temperatura da massa asfáltica é o elemento mais importante e que mais influencia no valor da densidade aparente. Para esse pesquisador, quase todos os problemas de execução dos concretos asfálticos

estariam resolvidos caso se conseguisse que os mesmos fossem espalhados e compactados dentro da faixa de temperatura especificada no projeto. Entretanto, duas situações são bastante comuns no campo. Às vezes a massa chega à pista em temperatura mais alta que a projetada e não se espera que ela decline para a realização do serviço, por razões de rendimento. Outras vezes, a massa chega à pista com temperatura inferior à projetada e aí nada pode ser feito visto que, estando a uma temperatura acima de 107°C, ela pode ser espalhada e compactada.

DE SOMBRE et al. (1998) afirma que o controle das temperaturas de compactação torna-se ainda mais importante quando os revestimentos são construídos durante períodos de baixas temperaturas. A mistura esfria muito mais rapidamente nestas condições, deixando um intervalo de tempo muito pequeno para que a compactação ocorra efetivamente.

Segundo DE SOMBRE et al. (1998), o conhecimento do intervalo de temperatura no qual o esforço de compactação é maximizado ajuda a assegurar a conformidade com as especificações de compactação. A otimização do intervalo de temperatura de compactação da mistura é uma forma eficiente de diminuir a coesão do ligante e o ângulo interno de atrito entre as partículas do agregado.

KENNEDY et al. (1984) afirmam que naquela época havia uma tendência das usinas de asfalto de operar com baixas temperaturas de mistura. Essas temperaturas baixas resultam principalmente do desejo de economizar energia durante a produção das misturas. O resultado imediato de uma baixa temperatura de mistura é uma baixa temperatura de compactação.

Segundo AZARI et al. (2003), a seleção de um intervalo apropriado de temperatura de compactação é um importante aspecto da preparação de corpos-de-prova em laboratório e de lançamento de misturas asfálticas, porque a temperatura afeta o teor ótimo de asfalto, o grau de envelhecimento e a absorção do asfalto, a estrutura do agregado e a densidade da mistura compactada, que por sua vez afetam o desempenho da mistura asfáltica. Os pesquisadores afirmam ainda que, as propriedades mecânicas parecem ser mais sensíveis às mudanças de temperatura de compactação do que a densidade.

O ASPHALT INSTITUTE (1989) afirma que entre 85°C e 150°C o asfalto é suficientemente fluído para que possa atuar como lubrificante no processo de compactação facilitando o movimento dos agregados das misturas para uma configuração densa. Para temperaturas abaixo desse valor, o asfalto torna-se muito rijo (mais viscoso) e é extremamente difícil a densificação adicional da mistura e, portanto, a compactação deve ser completada antes que a temperatura da massa alcance 85°C.

Segundo o ASPHALT INSTITUTE (1980), a viscosidade do asfalto tem grande influência na compactação. A viscosidade alta tende a segurar o movimento das partículas dos agregados durante a rolagem. Se a viscosidade é muito baixa, as partículas movem-se facilmente durante a compactação, mas não ocorre coesão suficiente para manter as partículas na posição, uma vez completada a compactação. Portanto, é fundamental que a mistura asfáltica seja compactada dentro da faixa de temperatura adequada.

De maneira geral, quanto mais quente a mistura, mais fluído o asfalto e menos resistente é a mistura à compactação. Segundo o ASPHALT INSTITUTE (1989), o limite superior de temperatura de mistura é aproximadamente 150°C, pois, temperaturas maiores podem causar danos ao asfalto pela aceleração do envelhecimento. Assim sendo, a melhor temperatura para iniciar a rolagem (compactação) é a máxima temperatura entre 85° e 150°C na qual a mistura suporte o rolo compactador sem deslocamentos horizontais ou fissuramento.

PINTO (1997) assegura que o início da compactação deve se dar a mais alta temperatura que a mistura suportar sem fissurar ou se deslocar, tomando-se por base a relação Viscosidade x Temperatura determinada no laboratório, como indicativo das temperaturas de aquecimento do ligante, do agregado e de compactação da mistura.

O ASPHALT INSTITUTE (1994) afirma que dependendo da graduação da mistura (teor de finos), tipo da usina e do tempo de mistura, a temperatura de mistura apropriada para o adequado recobrimento dos agregados pode ser de 10°C a 30°C menor do que a temperatura indicada pelo laboratório. A temperatura de

compactação de campo encontra-se geralmente dentro do intervalo de temperatura indicado pelo laboratório e geralmente é ajustada para compensar um ou mais fatores que possam influenciar na compactação, tais como: temperatura do ar, temperatura da base, velocidade do vento, tipo de rolagem, distância de transporte e etc.

O efeito da temperatura de compactação foi extensivamente estudado por PARKER (1960). Inicialmente, o pesquisador tentou estudar esse efeito a partir de corpos-de-prova retirados de seções do pavimento compactadas em várias temperaturas diferentes. Entretanto, devido às dificuldades encontradas, o estudo foi realizado através da moldagem de corpos-de-prova Marshall em laboratório já que, segundo o próprio pesquisador, o revestimento quando compactado sob condições ideais (incluindo qualidade da mistura, condições atmosféricas ideais, uso de equipamentos apropriados e bons operadores) apresenta densidade aproximadamente igual a densidade obtida pelo método Marshall de compactação.

Asfaltos classificados por penetração em uma mesma categoria podem, entretanto, apresentar viscosidades bastante diferentes. Essa diferença de viscosidade pode influenciar bastante na compactação da mistura. McLEOD (1967) apresenta na Figura 2.1 a influência da viscosidade de um asfalto CAP 85/100 na facilidade de compactação das misturas asfálticas. A figura indica que para uma dada temperatura de compactação, um asfalto de baixa viscosidade atingirá uma certa densidade e que aumentando a temperatura de compactação de um asfalto de alta viscosidade, este poderá alcançar a mesma densidade observada para o asfalto de baixa viscosidade. Assim, para uma mesma temperatura e uma mesma energia de compactação, a mistura com asfalto menos viscoso apresentará menor resistência à compactação e conseqüentemente, uma maior densidade. As temperaturas de mistura não foram inferiores à 250°F (121°C). Após as misturas serem introduzidas nos moldes, ambos foram levados à temperatura de compactação desejada e então compactadas com energia de 50 golpes por face. Os resultados obtidos para as várias temperaturas de compactação investigadas (entre 100°F ou 38°C e 350°F ou 177°C) foram expressas em porcentagens dos valores encontrados para a temperatura de 275°F (135°C), considerada a temperatura ideal de compactação. Foram determinadas as

densidades aparentes, os vazios, os vazios cheios de betume, as Estabilidades e Fluências Marshall.

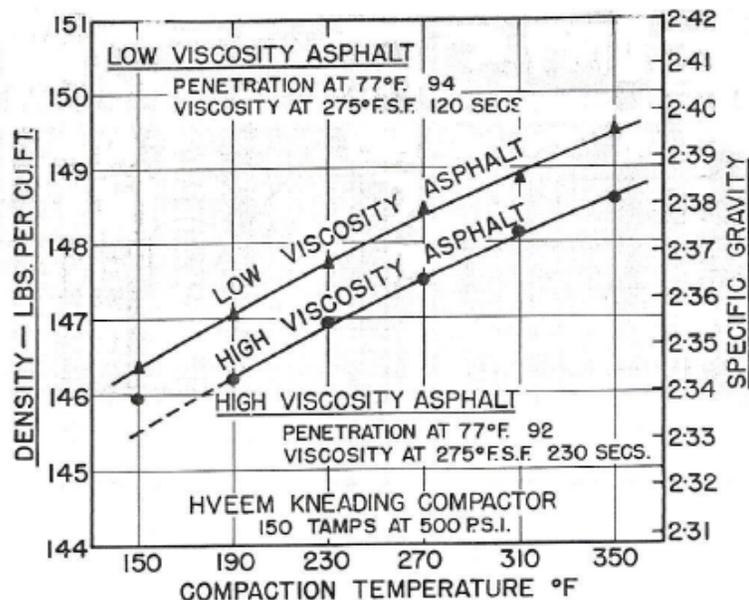


Figura 2.1: influência da viscosidade de um asfalto CAP 85/100 na facilidade de compactação das misturas asfálticas

PARKER (1960) mostrou que a temperatura de compactação além de influenciar nos parâmetros volumétricos, é capaz de influenciar também nas propriedades mecânicas das misturas. A Figura 2.2 indica que a Estabilidade Marshall aumentou cerca de 20% para temperaturas acima de 300°F (149°C) e que caiu rapidamente para temperaturas abaixo de 250°F (121°C), sendo que a 150°F (66°C) a Estabilidade observada foi pouco superior a 20% do valor observado a 275°F (135°C).

Com os resultados obtidos, o pesquisador concluiu que a rolagem intermediária e a final devem ser finalizadas antes que as temperaturas atinjam 225°F (107°C) e 175°F (79°C), respectivamente.

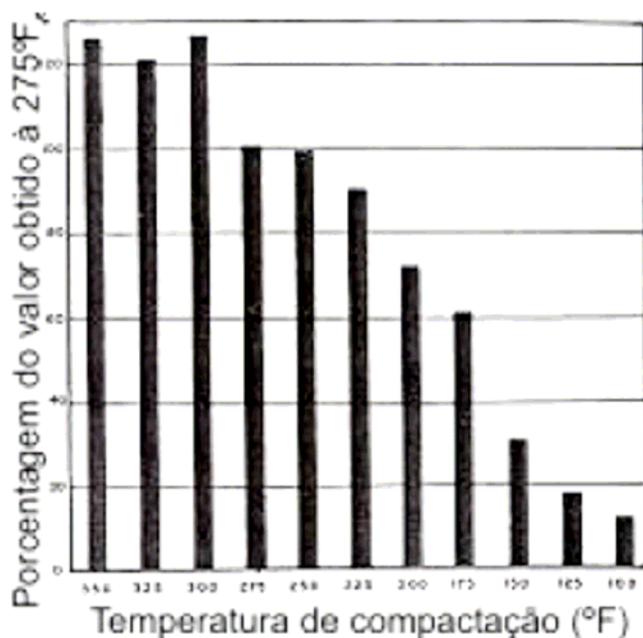


Figura 2.2: variação da Estabilidade em função da temperatura de compactação

HADLEY et al. (1971) conduziram um estudo em laboratório para investigar o efeito de vários fatores nas propriedades elásticas dos materiais asfálticos. Os pesquisadores concluíram que a temperatura de compactação foi o fator que mais influenciou na resistência à tração das misturas analisadas.

KENNEDY et al. (1984) observaram em 1980, o desempenho de uma camada de reforço de concreto asfáltico reciclado compactado em temperaturas relativamente baixas. Antes da conclusão do serviço, várias partes do revestimento começaram a apresentar alto grau de deterioração levando a realização de estudos em laboratório e em campo para determinar a causa do insucesso do reforço. Os pesquisadores lançaram mão de dados de campo e de laboratório obtidos durante a construção e os avaliaram para determinar a influência destes na deterioração observada. Fatores como o projeto da mistura, temperatura de mistura e de compactação e controle de laboratório foram analisados. Paralelamente, os pesquisadores extraíram corpos-de-prova antes e durante a remoção da parte do reforço deteriorada. A Figura 2.3 apresenta as temperaturas de mistura e de compactação registradas por dia de construção. O estudo mostrou que as temperaturas de mistura na usina variaram de

82°C a 154°C sendo que a maioria das temperaturas registradas ficou entre 88°C e 127°C. As temperaturas de compactação foram consideradas aproximadamente iguais às temperaturas de chegada da mistura na estrada e variaram entre 66°C e 149°C, sendo que a maioria das temperaturas registradas ficou entre 82°C e 110°C. Todas as temperaturas registradas mostraram-se abaixo da temperatura mínima de compactação de 132°C e, em alguns casos, abaixo inclusive da temperatura recomendada de interrupção de compactação, 79°C.

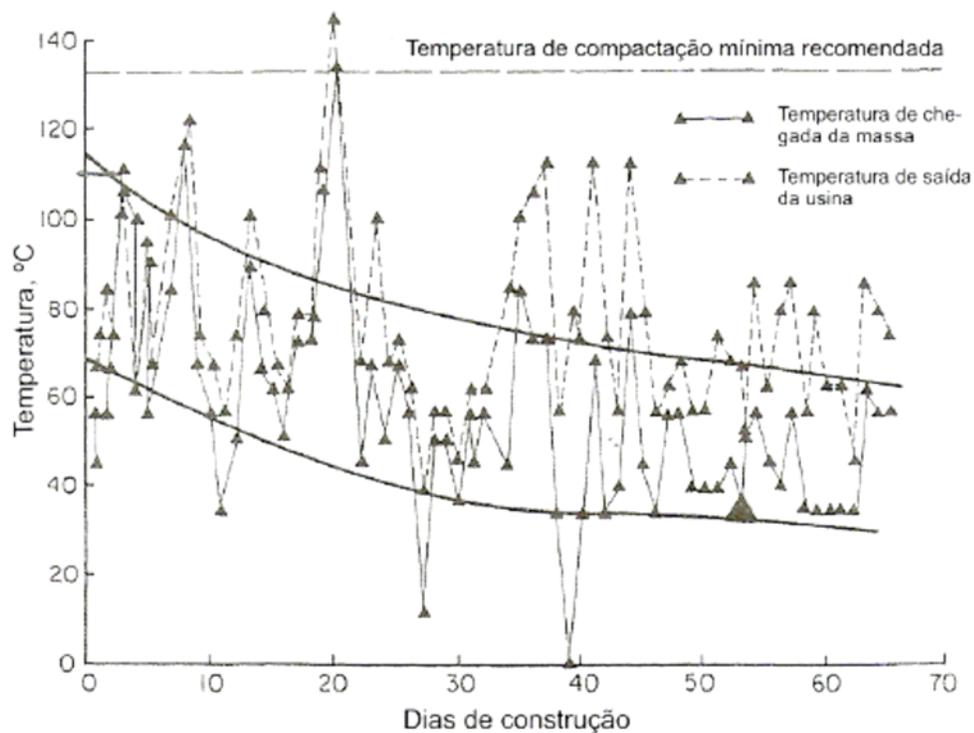


Figura 2.3: medidas de temperaturas de mistura e de compactação registradas ao longo da construção de rodovia

KENNEDY et al. (1984) fizeram uma comparação visual entre a deterioração observada no pavimento e as temperaturas de compactação registradas. Os pesquisadores dividiram a estrada em 4 níveis de deterioração: quase total, extremamente severa, severa e moderada. Assim, os pesquisadores verificaram que as seções da estrada submetidas às menores temperaturas de compactação foram as

primeiras a serem removidas (maior deterioração). Essa comparação confirmou a relação entre as baixas temperaturas de compactação e a severidade da deterioração.

Devido ao fato do número de corpos-de-prova extraídos não ter sido suficiente para uma análise mais complexa, foram moldados corpos-de-prova em laboratório para analisar o efeito da energia e da temperatura de compactação nas propriedades mecânicas em uma mistura. As temperaturas selecionadas foram escolhidas dos registros diários durante a construção e as energias de compactação experimentadas foram de três tipos:

- × Tipo 1 (Energia de compactação variável): Neste tipo, os corpos-de-prova foram compactados nas temperaturas 66°C, 79°C, 93°C, 107°C e 121°C. A compactação foi feita segundo o procedimento padrão do Departamento de Rodovias e Transporte Público do estado do Texas/EUA (ação giratória até que seja alcançada uma pressão resistente de 1,034 MPa);
- × Tipo 2 (Energia de compactação constante): No tipo 2, os corpos-de-prova foram compactados nas mesmas temperaturas do tipo 1. A energia de compactação foi mantida constante e igual ao número de giros do compactador giratório necessário para atingir uma densidade de 2.315 kg/m<sup>3</sup> (uma das densidades mais baixas dos corpos-de-prova extraídos) enquanto a temperatura da mistura era de 93°C. Com a energia mantida constante, foi possível avaliar o efeito da temperatura na densidade;
- × Tipo 3 (Energia de compactação variável de acordo com a densidade): Neste tipo, metade dos corpos-de-prova foram compactados a 79°C e 107°C de forma que fossem alcançadas as densidades de 2,243 kg/m<sup>3</sup> e 2,387 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Esses valores correspondem aproximadamente ao menor e maior valor observado para corpos-de-prova extraídos da estrada.

KENNEDY et al. (1984) concluíram que para todos os casos a resistência à tração aumentou com a temperatura de compactação. Os pesquisadores ressaltam também que, para os tipos 1 e 2 as densidades alcançadas ficaram praticamente todas dentro

de limites aceitáveis entretanto, a resistência à tração diminui quase 50% ao longo do intervalo de temperatura investigado. A Figura 2.4 apresenta a variação da densidade e da resistência à tração com a temperatura de compactação para as três fases de compactação.

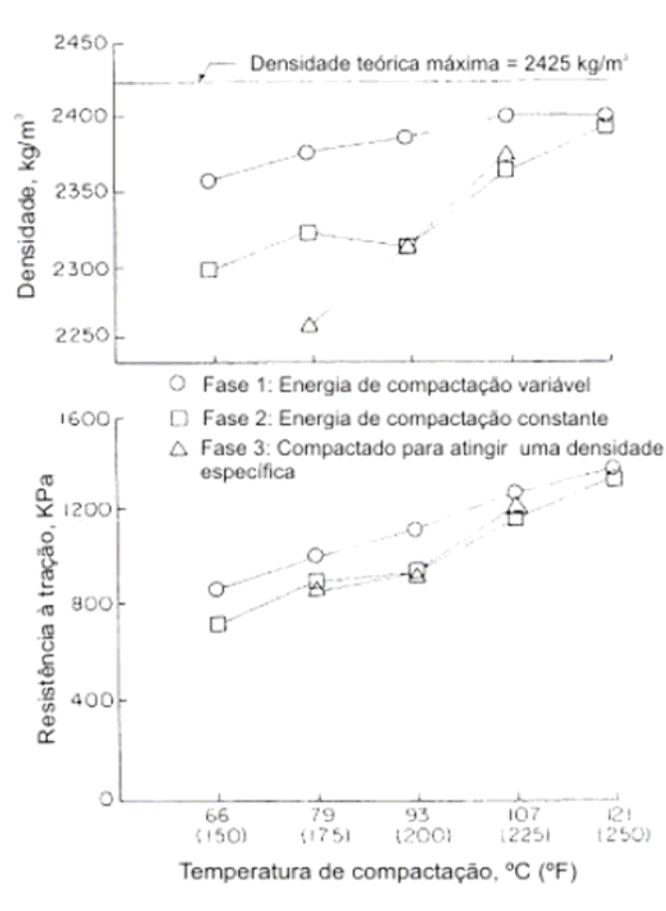


Figura 2.4: variação da densidade e da resistência à tração com a temperatura de compactação para as três fases de compactação (KENNEDY et al., 1984)

Com base nas observações de campo e nos resultados de laboratório obtidos durante a construção, os pesquisadores concluíram ainda que as densidades especificadas em laboratório foram atingidas. Entretanto, o estudo mostrou que as baixas temperaturas de compactação causaram um efeito adverso nas propriedades mecânicas da mistura investigada, contribuindo dessa maneira para a deterioração prematura do revestimento. Os pesquisadores afirmam ainda que, caso sejam observadas baixas temperaturas de mistura e de compactação no campo, é

recomendável que sejam avaliados seus efeitos no comportamento mecânico das misturas.

COLLINS (1998) realizou um experimento com temperaturas de compactação e o Analisador de Pavimento Asfáltico (APA). O pesquisador tomou uma certa mistura à 300°F (149°C) e compactou corpos-de-prova no compactador vibratório com a pressão adequada para que estes apresentassem vazios de 7%. Foram moldados então corpos-de-prova (pressão necessária para 7% de vazios) com temperaturas de compactação entre 200 e 280°F (93 e 138°C) com intervalos de 20°F (11°C) para a determinação dos vazios de cada corpo-de-prova. Após a caracterização dos corpos-de-prova, foram realizados os ensaios de fadiga. A Figura 2.5 mostra que à medida que a temperatura de compactação caiu, os vazios aumentaram e os ciclos necessários para a ruptura da viga caíram significativamente. Com os resultados dos ensaios de fadiga, o pesquisador concluiu que a mistura compactada à 200°F (93°C) teria aproximadamente 10% da vida útil da mistura compactada com 300°F (138°C).

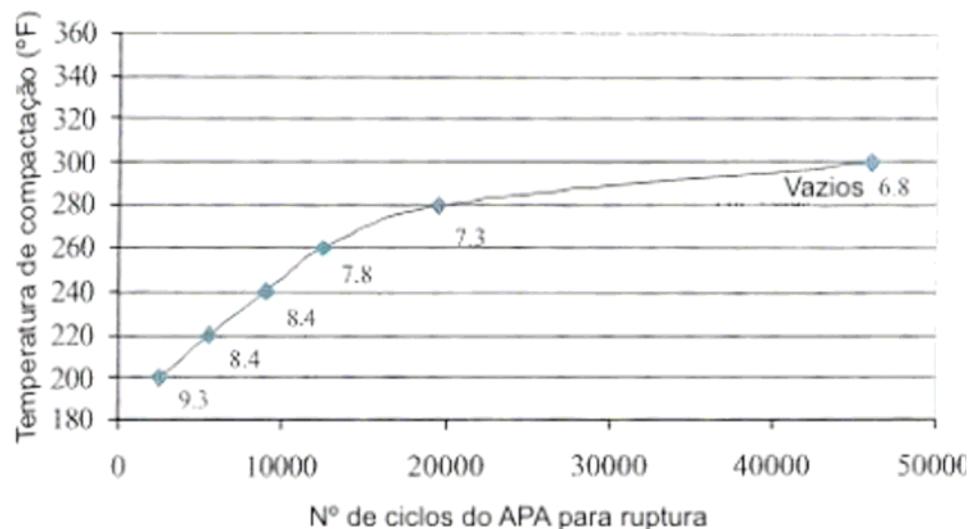


Figura 2.5: variação da temperatura de compactação com os vazios e ciclos necessários para a ruptura (COLLINS, 1998)

DE SOMBRE et al. (1998) determinaram para cada mistura a tensão cisalhante máxima e a plotaram em função da temperatura de compactação. Foi notado que as tensões cisalhantes mínimas ocorreram, de maneira geral, para temperaturas entre

105°C e 125°C para quase todas as misturas. Acima destas temperaturas, o asfalto torna-se mais fluido e ocorre um aumento do contato entre os agregados que provocou maior resistência à compactação devido a fricção entre os mesmos. Abaixo destas temperaturas, o asfalto torna-se mais viscoso o que também aumenta a resistência à compactação. Os pesquisadores concluíram portanto, que o intervalo de temperatura no qual as tensões cisalhantes são mínimas (menor resistência à tensão cisalhante quando compactada no compactador giratório) é o intervalo ótimo de temperatura de compactação, ou seja, a compactação naquelas temperaturas é mais eficiente (menor esforço de compactação) e proporciona maiores chances de se atingir as densidades desejadas.

DE SOMBRE et al. (1998) verificaram que o intervalo ótimo de compactação formado pela temperatura 15°C abaixo e 15°C acima da temperatura na qual a resistência à tensão cisalhante é mínima, mostra-se largo o suficiente para que se alcance a densidade desejada e bastante inferior ao intervalo determinado pela curva Viscosidade x Temperatura.

MELÉNDEZ (2001) estudou o efeito da temperatura de compactação na Estabilidade Marshall e na Fluência das misturas asfálticas através da compactação de corpos-de-prova, em laboratório, de acordo com os procedimentos descritos na ASTM D 1559-89. O pesquisador moldou 6 corpos-de-prova para cada temperatura de compactação (70°C, 90°C, 110°C, 130°C, 150°C e 170°C) mantendo-se constantes a granulometria da mistura, as características dos agregados, o teor de asfalto, a temperatura de mistura e a energia de compactação. A temperatura de mistura para todos os corpos-de-prova foi fixada em 153°C ± 2°C e a temperatura de compactação considerada padrão para efeitos de comparação foi de 144°C ± 2°C.

As Figura 2.6, Figura 2.7 e Figura 2.8 mostram a variação da densidade aparente, da Estabilidade Marshall e da Fluência com a temperatura de compactação, respectivamente.

Com base nos resultados apresentados, MELÉNDEZ (2001) concluiu que:

- × Houve uma clara tendência de aumento na Estabilidade Marshall com o aumento da temperatura de compactação;
- × Houve um ligeiro incremento da densidade aparente com o aumento da temperatura de compactação, apesar de uma maior dispersão dos resultados;
- × A Fluência não se mostrou muito sensível às variações de temperatura.

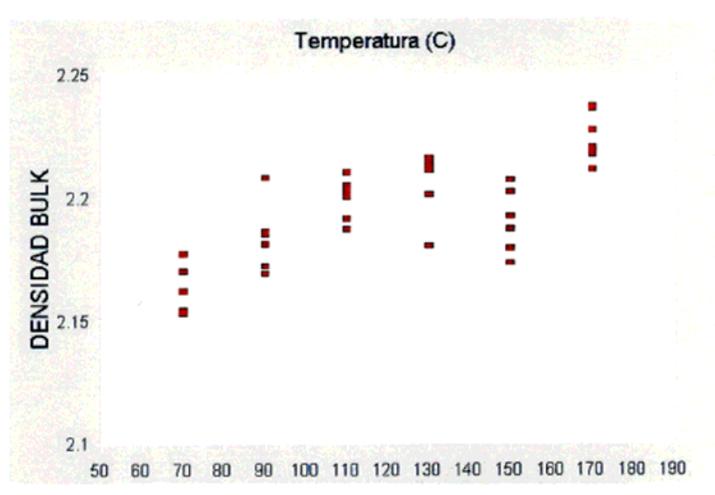


Figura 2.6: variação da densidade aparente com a temperatura de compactação (MELÉNDEZ, 2001)

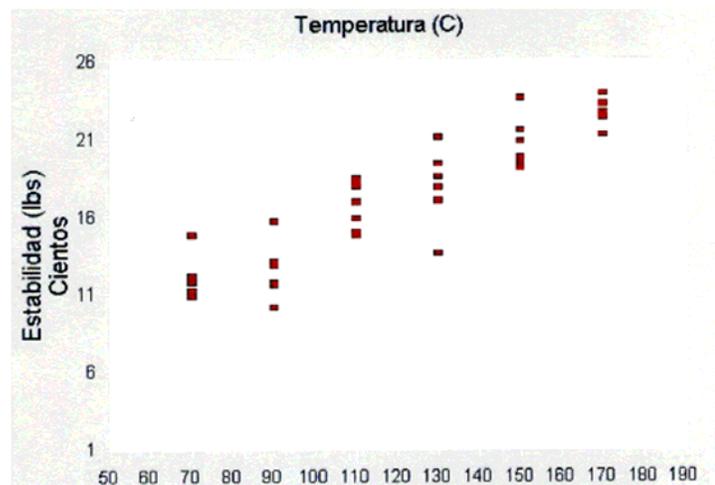


Figura 2.7: variação da Estabilidade Marshall com a temperatura de compactação (MELÉNDEZ, 2001)

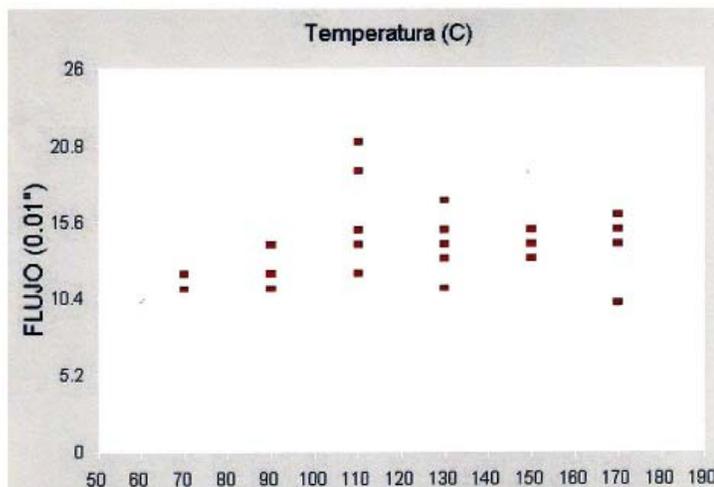


Figura 2.8: variação da Fluência com a temperatura de compactação (MELÉNDEZ, 2001)

SOARES et al. (2001) moldaram em laboratório vários corpos-de-prova com diferentes combinações de temperatura e energias de compactação com o objetivo de simular uma situação comum em campo onde a mistura começa a ser compactada abaixo da faixa de temperatura recomendada e aumenta-se a energia de compactação para atingir a densidade desejada. Por este motivo, os pesquisadores utilizaram o mesmo teor de ligante independente da temperatura e da energia de compactação. Foram realizados ensaios volumétricos de densidade e porcentagem de vazios e ensaios mecânicos de módulo de resiliência e resistência à tração, ambos à 25°C. Foi utilizada uma mistura enquadrada na faixa C do DNER, dosada segundo o método Marshall com energia de 50 golpes e temperatura de compactação de 160°C. O ligante utilizado foi o CAP 50/60 (PG 64-16) e todos os corpos-de-prova foram moldados no mesmo teor de ligante, 6,4%. Foram investigadas as temperaturas 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C e 160°C e as energias de 50 e 75 golpes por face do corpo-de-prova. No caso do estudo, as temperaturas de 120°C e 160°C representaram uma temperatura abaixo e uma temperatura acima da faixa recomendada pelo DNER, respectivamente. As temperaturas inferiores à 120°C tentaram simular um atraso na compactação da massa asfáltica em campo com o objetivo de verificar se o aumento da energia de compactação é suficiente para compensar o efeito do aumento de viscosidade do asfalto.

A Tabela 2.1 apresenta os resultados médios (4 corpos-de-prova) dos parâmetros volumétricos observados. Os pesquisadores observaram que as diferenças entre as densidades relativas às energias de 50 e 75 golpes são menores nas temperaturas extremas (80°C e 160°C) do que nas demais, pois na temperatura de 160°C o asfalto encontra-se com baixa viscosidade, e o maior contato entre os grãos impossibilita que um aumento da energia de compactação resulte num maior adensamento enquanto a 80°C, a viscosidade do ligante está muito alta impedindo que a compactação proporcione uma mistura mais densa. Eles observaram também que para o intervalo entre 90°C e 120°C, a porcentagem de vazios encontrada nas amostras compactadas com 50 golpes é aproximadamente a mesma das amostras compactadas com 75 golpes numa temperatura 10°C abaixo e, portanto, nesta faixa de temperatura o aumento da energia de compactação conseguiu reverter o aumento dos vazios devido à compactação a uma temperatura inferior.

Tabela 2.1

Golpes	Temperatura (°C)	%Vazios	Densidade
50	80	7,82	2,215
	90	7,21	2,229
	100	6,38	2,249
	110	5,66	2,267
	120	4,95	2,284
	160	3,81	2,311
75	80	7,58	2,221
	90	6,35	2,250
	100	5,80	2,263
	110	4,67	2,290
	120	4,00	2,307
	160	3,45	2,320

Fonte: SOARES et al., 2001.

SOARES et al. (2001) concluíram que não se pode prever o comportamento mecânico com base em um parâmetro volumétrico como a densidade. Ou seja, o fato de uma energia de compactação maior acarretar em maiores densidades não significa que isto se traduzirá em uma mistura mais rígida.

AZARI et al. (2003) afirmam que a determinação do intervalo apropriado das temperaturas de compactação é de fundamental importância para as misturas asfálticas que empregam ligantes asfálticos modificados por polímeros. Asfaltos

modificados apresentam viscosidades mais elevadas do que asfaltos convencionais e, conseqüentemente, as temperaturas indicadas por suas curvas Viscosidade x Temperatura recomendariam o uso de temperaturas elevadas. Por exemplo, para o ligante asfáltico modificado Novophalt a curva de viscosidade indica um intervalo de temperatura de  $190 \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . Para temperaturas extremamente elevadas, o polímero dos ligantes pode sofrer degradação alterando, portanto, a composição do ligante. Além disso, é possível perceber nessas temperaturas o aparecimento de fumaça vinda do ligante, o que é considerado extremamente perigoso. Para determinar um intervalo aceitável de temperatura de compactação para misturas com asfaltos modificados, AZARI et al. (2003) prepararam uma mistura com agregados de pedra calcária e ligante modificado Novophalt PG 76-22. A granulometria dos agregados atendeu a especificação do Departamento de Transportes de Maryland/EUA para camada de rolamento e a temperatura de mistura foi de  $145^{\circ}\text{C}$ .

As temperaturas de compactação utilizadas foram  $119^{\circ}\text{C}$ ,  $139^{\circ}\text{C}$ ,  $159^{\circ}\text{C}$  e  $179^{\circ}\text{C}$ . A temperatura de  $119^{\circ}\text{C}$  foi a menor temperatura na qual os corpos-de-prova apresentaram densidade aceitável e a temperatura de  $179^{\circ}\text{C}$  foi a temperatura mais baixa na qual notou-se a presença de fumaça. Antes dos corpos-de-prova serem compactados, a mistura foi envelhecida na temperatura de compactação durante 2 horas para simular o envelhecimento sofrido durante a usinagem, o transporte e a construção.

Os pesquisadores moldaram os corpos-de-prova para 4% de vazios com 100 giros do SGC. Cada corpo-de-prova tinha 15 cm de diâmetro e 12 cm de altura. Após a medição dos vazios, metade dos corpos-de-prova foram cortados horizontalmente e a outra metade sofreu cortes horizontais para que fossem estudados a estrutura do agregado e o efeito da direção do corte na medida das propriedades mecânicas. Os corpos-de-prova cortados foram ensaiados para a medida de vazios, a orientação dos agregados e as propriedades mecânicas.

Os ensaios mecânicos foram realizados no equipamento de cisalhamento direto (SST) SUPERPAVE nas temperaturas de  $25^{\circ}\text{C}$  para avaliar o comportamento da mistura à fadiga sob tensão e deformação controlada e, a  $50^{\circ}\text{C}$  para avaliar a

susceptibilidade da mistura à formação de trilha de roda. Foram medidos também, o  $G^*$  (Módulo de Cisalhamento) e  $\delta$  (ângulo fase) que foram transformados em duas propriedades relacionadas com o desempenho das misturas:  $G^*\text{sen}(\delta)$  (medida do dano ou da energia dissipada de uma material viscoelástico submetido a um carregamento a deformação controlada, que é um indicador do trincamento por fadiga) e  $\text{sen}(\delta)/G^*$  (medida da energia dissipada de um material viscoelástico submetido a um carregamento a tensão controlada, que é um indicador do potencial de formação de trilha de roda).

A Figura 2.9 e a Figura 2.10 mostram o aumento do módulo de cisalhamento e a melhoria do desempenho à formação de trilha de roda com o aumento da temperatura de compactação.

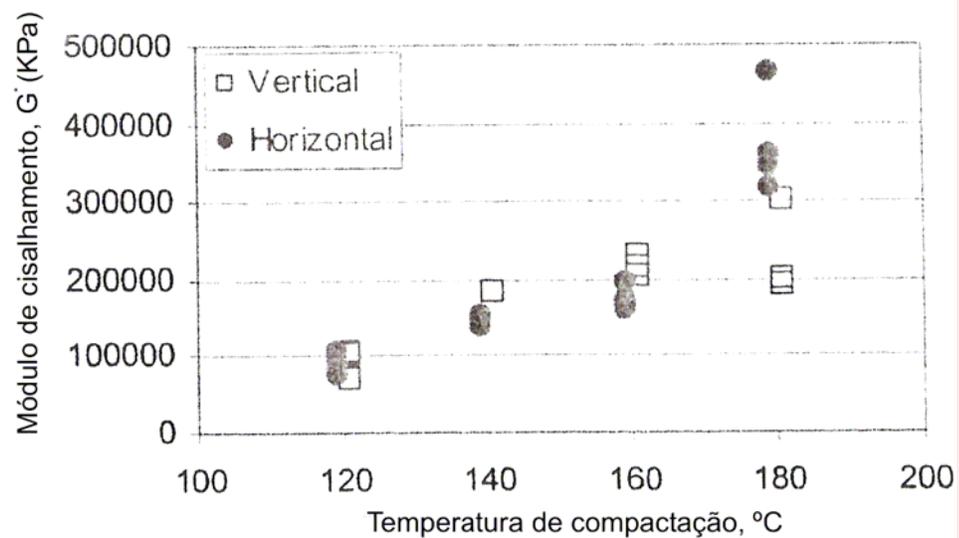


Figura 2.9: variação do módulo de cisalhamento com a temperatura de compactação

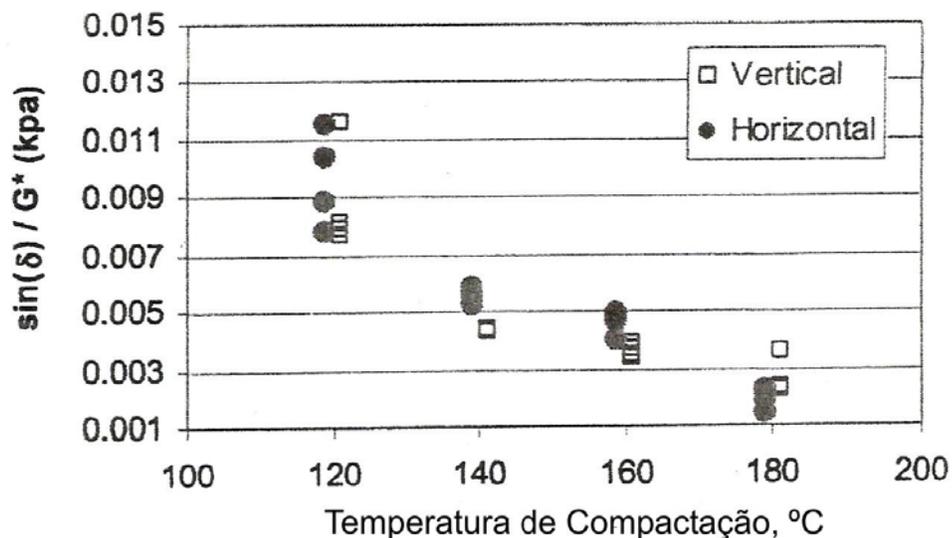


Figura 2.10: variação do desempenho à formação de trilha de roda com a temperatura de compactação

Os pesquisadores concluíram que para temperaturas entre 159°C e 179°C, a maioria das propriedades de cisalhamento não apresentaram melhora significativa. Para temperaturas entre 139°C e 159°C nenhuma das propriedades avaliadas apresentaram diferenças significativas.

Para concluírem que as temperaturas entre 139°C e 159°C formam o intervalo ideal de temperatura de compactação de misturas com ligante modificado Novophalt,

AZARI et al. (2003) levaram em consideração os seguintes fatores:

- \* Dificuldade em obter os vazios desejados ao compactar misturas asfálticas modificadas por polímeros em temperaturas inferiores à 119°C;
- \* A compactação dos corpos-de-prova entre 119°C e 159°C resultou em um melhor desempenho do material (alto módulo de cisalhamento, menor dano à trilha de roda e menor dano à fadiga sob tensão controlada) do que para o material compactado a temperaturas inferiores a deste intervalo;

- \* As propriedades de cisalhamento medidas mostraram-se consistentes quando os corpos-de-prova foram compactados entre 139°C e 159°C;
- \* A compactação entre 159°C e 179°C não melhorou significativamente as propriedades avaliadas.

## 2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS "MORNAS"

Diferentes técnicas visando a redução de até 55°C nas temperaturas de fabricação e aplicação de misturas asfálticas a quente têm sido propostas nos últimos anos. Estes novos processos e produtos empregam variados meios mecânicos e químicos para reduzir a resistência ao cisalhamento da mistura nas temperaturas de construção mantendo ou melhorando o desempenho do pavimento. O desenvolvimento destas tecnologias começou na Europa em 1997, com o objetivo de adequar os procedimentos empregados pela indústria da pavimentação às premissas do Protocolo de Kyoto (Newcomb, 2007). Os processos variam entre si, mas os objetivos são os mesmos: economizar energia e reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera.

As misturas asfálticas "mornas" diferem de outras misturas asfálticas pelas temperaturas nas quais são produzidas e pela resistência e durabilidade do produto final. As misturas asfálticas a frio são executadas em temperatura ambiente, variando entre 20 e 50°C, enquanto as misturas asfálticas a quente são produzidas em temperaturas variando entre 140 e 170°C. As misturas asfálticas "mornas" são produzidas em temperaturas entre 105 a 135°C. As misturas asfálticas a quente possuem maior estabilidade e durabilidade se comparadas às misturas a frio, o que explica a utilização deste material em camadas mais delgadas de pavimentos com baixo volume de tráfego. O principal objetivo das misturas asfálticas "mornas" é alcançar resistência e durabilidade equivalentes ou superiores às das misturas asfálticas a quente (Newcomb, 2007).

A diminuição da temperatura na produção de misturas asfálticas é muito desejável sob diversos aspectos. As reduções das emissões de gases poluentes e do consumo de energia são importante motivação ambiental. Pesquisas indicam que o consumo energético pode ser reduzido em até 30%. Existem ainda significativas vantagens construtivas e de desempenho. Em resumo: melhores resultados de trabalhabilidade garantindo melhor compactação; temperaturas de produção e aplicação reduzidas podem melhorar os resultados em pavimentação em climas frios e ainda representar

menor envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação, podendo possibilitar melhor desempenho do pavimento aumentando a resistência ao trincamento.

Entre as diversas tecnologias desenvolvidas e utilizadas mundialmente para a produção de misturas asfálticas “mornas” é possível destacar:

- × a adição de uma zeolita sintética comercializada como Aspha-min® durante a produção da mistura na usina para criar um efeito de espuma no ligante;
- × a utilização de aditivos orgânicos como o Sasobit®, uma cêra parafínica e o Asphaltan B®, uma cêra esterificada de baixo peso molecular;
- × a produção de concreto asfáltico com uma emulsão especial comercializada com Evotherm™;
- × um sistema composto por dois ligantes comercializado como WAM-Foam®, que introduz um ligante de menor rigidez e uma espuma de ligante asfáltico mais rígido em diferentes estágios durante a usinagem do concreto asfáltico;
- × a utilização de uma espuma de asfalto produzida a partir da mistura de uma emulsão asfáltica inversa e um ligante convencional proposta pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e
- × a produção de concreto asfáltico com secagem parcial dos agregados, processos conhecidos como E.B.T.® e EBE.

### 2.2.1 ASPHA-MIN®

O Aspha-Min® é um alumino silicato de sódio sintético, conhecido como zeolita, produzido pela Eurovia Services GmbH. As zeolitas são cadeias de silicatos com amplos espaços vazios em suas estruturas que garantem a presença de cátions, como o sódio e o alumínio, também permitindo a presença de moléculas de água. A maioria das zeolitas é caracterizada por sua habilidade de perder e absorver água sem alterar sua estrutura cristalina (Hurley e Prowell, 2006).

O produto é uma zeolita hidratada comercializada em pó e apresenta em sua constituição cerca de 20% de água na forma cristalina (Eurovia, 2006) que é liberada quando aquecida entre 85 e 182°C. Quando o Aspha-min® é adicionado à mistura junto com o ligante, em teores de aproximadamente 0,3% em peso de mistura, a água é liberada e causa a expansão volumétrica do ligante gerando uma espuma asfáltica que proporciona um aumento da trabalhabilidade e do cobrimento dos agregados a menores temperaturas (Hurley e Prowell, 2006).

O processo é aplicável a todo tipo de concreto asfáltico empregando qualquer tipo de ligante, também podendo ser empregado à misturas contendo concreto asfáltico reciclado. A fabricação pode ser realizada em todos os tipos de usina, contínua ou descontínua. Os principais benefícios da utilização do Aspha-min® são os seguintes (Eurovia, 2006):

- × redução das temperaturas de fabricação e aplicação superior a 30°C;
- × ganho energético de 20% e
- × redução da emissão de gases poluentes na atmosfera de 18 a 25%.

A Eurovia aplicou até o ano de 2005 cerca de 50.000 t de concreto asfáltico com adição do Aspha-min® na França e na Alemanha. Alguns trechos experimentais foram executados no Canadá e nos Estados Unidos (Bitume Info, 2006).

### 2.2.2 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, 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.

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*). Os teores de Sasobit® adicionados variaram entre 0,8 e 4% da massa do ligante asfáltico.

### 2.2.3 EVOTHERMTM

O Evotherm é um produto desenvolvido pela indústria americana MeadWestvaco Asphalt Innovations. É um conjunto de produtos químicos constituído de melhoradores de cobertura e trabalhabilidade, promotores de adesividade e agentes emulsificantes. O produto é adicionado a uma emulsão asfáltica com elevado resíduo asfáltico (70%) em teores de cerca de 0,5% em peso de emulsão. Durante a produção da mistura asfáltica a emulsão com Evotherm é utilizada em substituição aos ligantes asfálticos convencionais ((Hurley e Prowell, 2006).

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 emissão de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> (FHWA, 2006).

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.

#### 2.2.4 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 Bitumes, 2006).

No processo WAM-Foam® dois ligantes com características diferentes, um com baixa viscosidade e um com maior rigidez, são utilizados em conjunto para a produção da mistura asfáltica em temperaturas entre 100 e 120°C podendo ser compactada entre 80 e 110°C. O ligante menos viscoso é misturado aos agregados em uma primeira fase para garantir o completo cobrimento. O ligante mais viscoso é adicionado em seguida em forma de espuma produzida pela injeção de água fria entre 1 and 5% no ligante aquecido. Quando a água entra em contato com o ligante quente se transforma em vapor que produz uma espuma volumosa que se desfaz lentamente e o ligante mantém suas propriedades originais. O 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.

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 CO<sub>2</sub> na atmosfera (FHWA, 2006).

### 2.2.5 A proposta do LCPC

O *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)* propõe a utilização de uma espuma de asfalto produzida a partir da mistura de uma emulsão asfáltica inversa e um ligante convencional. Uma emulsão asfáltica inversa é constituída de água dispersa em ligante asfáltico, com teor de ligante residual superior a 90%. Segundo o processo proposto a emulsão asfáltica é produzida pela mistura de água e de ligante à 95°C sem adição de tensoativo, o contato entre os dois materiais causa a formação de gotas de água que ficam dispersas no ligante.

A produção da espuma de asfalto acontece em três etapas:

- × 1ª etapa: mistura de ligante (160-170°C) e de uma emulsão inversa (95°C);
- × 2ª etapa: vaporização da água da emulsão em contato com o ligante asfáltico em maior temperatura e
- × 3ª etapa: formação de uma espuma de asfalto volumosa que favorece a mistura e o cobrimento dos agregados.

Este processo prevê:

- × a produção de uma espuma de asfalto sob a forma de uma volume aerado com um filme de ligante contínuo;
- × a fabricação da espuma à pressão atmosférica;
- × tempo de meia-vida de 45 a 75s;
- × utilização de ligantes asfálticos empregados atualmente em pavimentação e
- × o emprego de uma emulsão asfáltica inversa estabilizada sem tensoativo.

Gaudefroy *et al.* (2006) apresentam um esquema do princípio de uma instalação industrial para a produção de espuma de asfalto pelo processo proposto pelo *LCPC*.

### 2.2.6 E.B.T.®

A empresa francesa Eiffage Travaux Publics propôs um processo de fabricação de misturas asfálticas em temperaturas de cerca de 90°C. O princípio de fabricação consiste da secagem parcial dos agregados minerais, de forma a retirar parte da água natural dos agregados durante o processo de mistura com o ligante asfáltico aquecido. Pode ser necessário acrescentar um pouco de água antes da introdução do ligante, buscando controlar o teor de água destinado a promover a formação de uma espuma asfáltica. A expansão necessária ao cobrimento dos agregados é promovida pela incorporação de aditivos (Bitume Info, 2006).

A presença da água residual diminui a viscosidade da mistura e garante uma boa trabalhabilidade à temperatura de aplicação, em torno de 70°C (Bitume Info, 2006).

O processo proposto pode ser utilizado em todos os tipos de usinas asfálticas, sendo necessárias pequenas adaptações para permitir a adição de água (Olard *et al.*, 2006).

O desempenho do E.B.T.® (*Enrobés à Basse Temperature*) é similar ao obtido por um concreto asfáltico a quente convencionalmente utilizado na Europa. A solução é considerada a mais econômica disponível no mercado europeu, visto que se adapta perfeitamente às usinas asfálticas existentes, sem necessidade de modificações custosas de material. A redução do consumo energético e das emissões de gases poluentes na atmosfera é de cerca de 40 a 50% (Olard *et al.*, 2006).

### 2.2.7 EBE

O processo EBE (*Enrobés à Basse Énergie*) é proposto pela empresa francesa FAIRCO. Consiste em secar somente os elementos grosseiros do esqueleto mineral, mantendo os elementos de granulometria arenosa úmidos. A mistura do ligante asfáltico com os agregados acontece em duas etapas. Na primeira etapa a parte seca e aquecida do material pétreo é misturada ao ligante asfáltico, em seguida é acrescentada a fração arenosa úmida, provocando a expansão do ligante e

permitindo a formação de uma mistura homogênea, de temperatura inferior a 100°C. Assim, a quantidade de energia consumida para secagem e aquecimento dos agregados é dividida por dois em relação a um concreto asfáltico a quente convencional.

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).

.

### 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.<sup>®</sup>, 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.

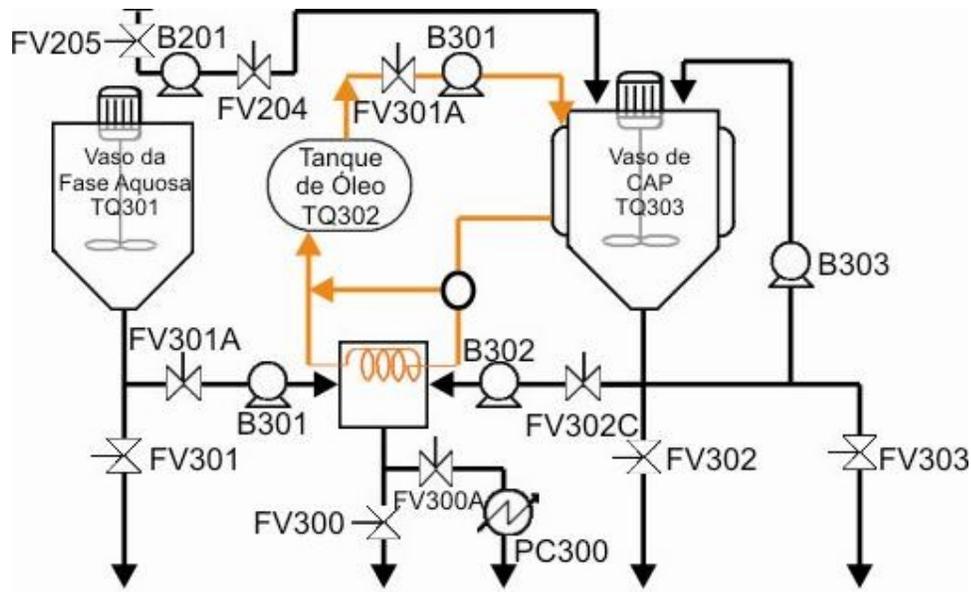


Figura 3.1: fluxograma da planta experimental para produção de emulsões asfálticas

### 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 Ensaio 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:

$D_l$  = 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  $50 \pm 1\text{g}$  de emulsão são colocadas em recipientes e levadas à estufa a temperatura de  $163 \pm 3^\circ\text{C}$  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.

$$\%P = \frac{M}{1000} \times 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

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, retiram-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:

$$R_{Sed} = \frac{A - B}{50} \times 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

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 (%)

P<sub>1</sub> = Massa de CAP retida na peneira (g)

P<sub>2</sub> = 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 percentagem 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 l 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  $R_t$ .

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi.d.h} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

$\sigma_R$ : 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 sollicitação é verificada também nos ensaios de módulo de resiliência e fadiga.

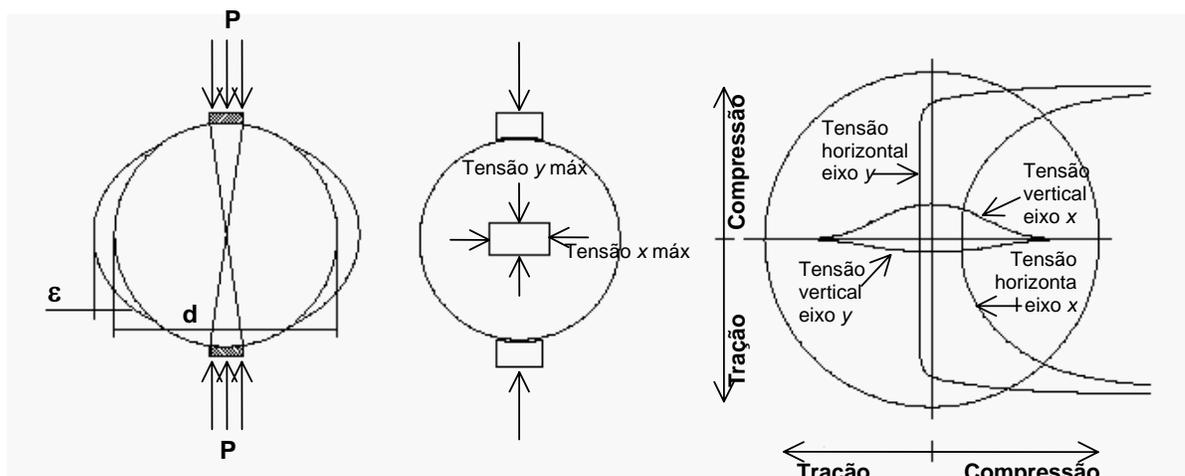


Figura 3.3: Estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral

### 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.

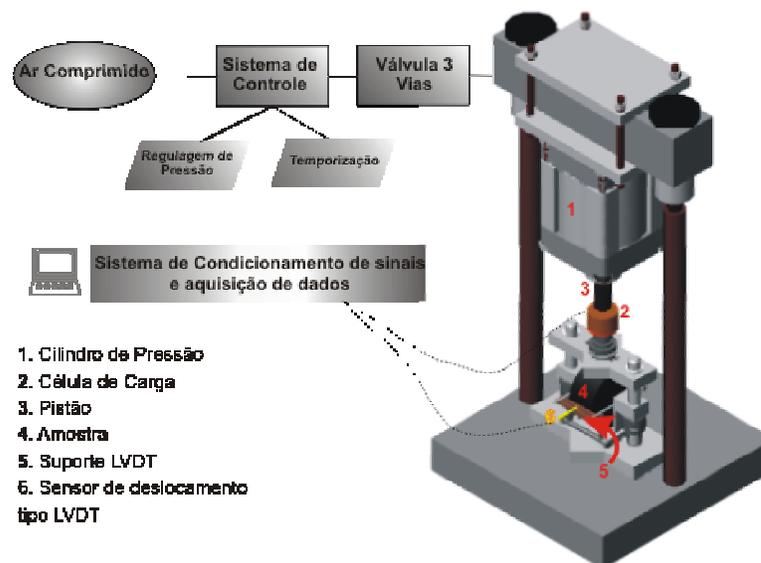


Figura 3.4: Equipamento de módulo de resiliência

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.

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

Onde:

*MR*: módulo de resiliência;

*P*: carga aplicada;

$\Delta$ : deformação elástica ou resiliente;

*h*: altura do corpo-de-prova; e

$\mu$ : 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 %.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no estudo da técnica para produção de misturas asfálticas a temperaturas intermediárias proposta pela empresa francesa FAIRCO, conhecida como *Enrobés à Basse Énergie* (EBE).

A partir do projeto da mistura asfáltica com ligante convencional (CAP 50/70) formulado pelo Consórcio Construtor TRS foram estudados os procedimentos para a formulação de misturas asfálticas "mornas".

Por problemas técnicos com a usina de produção de emulsões asfálticas, não foi possível realizar a etapa da pesquisa que previa a utilização deste tipo de ligante.

### 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

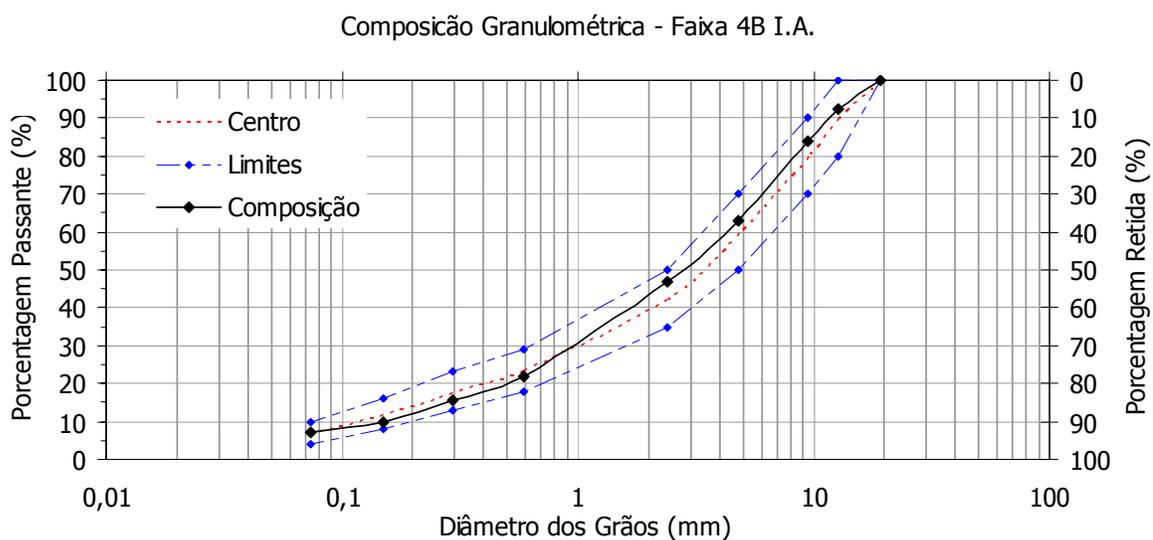


Figura 4.1: Curva granulométrica das misturas estudadas

Tabela 4.2: Densidades dos agregados e da mistura mineral

Agregados					Mistura Mineral	
Peneiras	%	D.real	D.ap.	Ab.	D.real	
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.

Tabela 4.3: Características do CAP 50/70 utilizado

Característica	CAP 50/70
Densidade	1,010
Penetração – 100g, 5s, 25°C (10 <sup>-1</sup> 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.

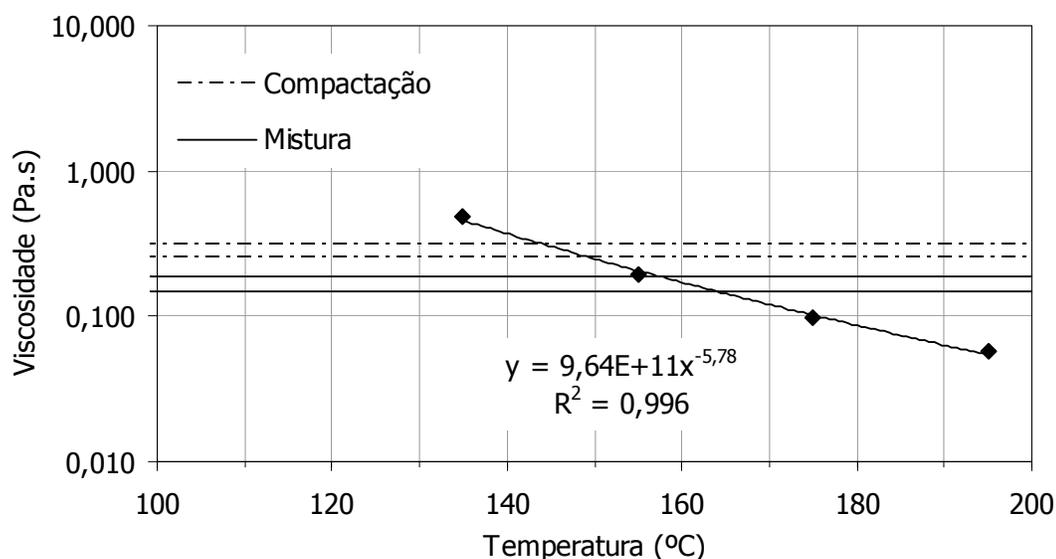


Figura 4.2: Variação da viscosidade do CAP 50/70 em função da temperatura

## 4.2 PROJETO DA MISTURA

Para o projeto das misturas "mornas" foram adotados três teores de umidade: 5, 8 e 10% em relação ao teor de ligante asfáltico de projeto (5,5%). O critério para a escolha destes valores está ligado ao fato de que em outras técnicas de projeto de misturas "mornas" são utilizadas emulsões asfálticas invertidas, isto é, com mais de 90% de asfalto residual.

Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada teor de umidade da seguinte forma:

- × O agregado graúdo até a #10 (2mm) (inclusive) + areia + cal foi pesado e colocado na estufa para aquecer a 165°C;
- × Em outro recipiente foi separado o material da #40 até a #200. Estas frações não foram aquecidas;
- × O agregado graúdo aquecido foi misturado ao ligante asfáltico a 160°C;
- × Em seguida, a água foi acrescentada ao agregado miúdo homogeneizando a umidade do material;
- × O agregado miúdo úmido foi adicionado à mistura agregado graúdo + ligante, mantendo-se a temperatura de mistura em 100°C;
- × Moldagem do corpo-de-prova com 75 golpes por face com temperatura variando entre 90 e 100°C em molde aquecido;
- × Após 12h as amostras foram desmoldadas, medidas e pesadas ao ar e imersas em água para determinação das características volumétricas.

Durante a produção das amostras foi observado o cobrimento do agregado pelo ligante asfáltico de modo que o processo de mistura era encerrado somente quando a concreto asfáltico apresentava cobrimento satisfatório. A presença de água garantiu a trabalhabilidade da mistura em temperaturas baixas.

As características volumétricas das misturas produzidas são apresentadas na Tabela 4.4. Observa-se que o volume de vazios obtido para as amostras de mistura "morna"

são um pouco baixos se considerarmos 4% como referência e que os valores de RBV são superiores ao limite recomendado para misturas a quente (< 82%).

As amostras produzidas foram utilizadas para a realização de ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT). As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os resultados obtidos 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).

Tabela 4.4: Características volumétricas das misturas

Água (%)	D. aparente	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
REF (TRS)	2,43	4,0	17	76
<b>REF (LAPAV)</b>	<b>2,49</b>	<b>2,1</b>	<b>16</b>	<b>86</b>
5	2,46	3,2	17	81
8	2,47	2,6	16	84
10	2,48	2,3	16	85

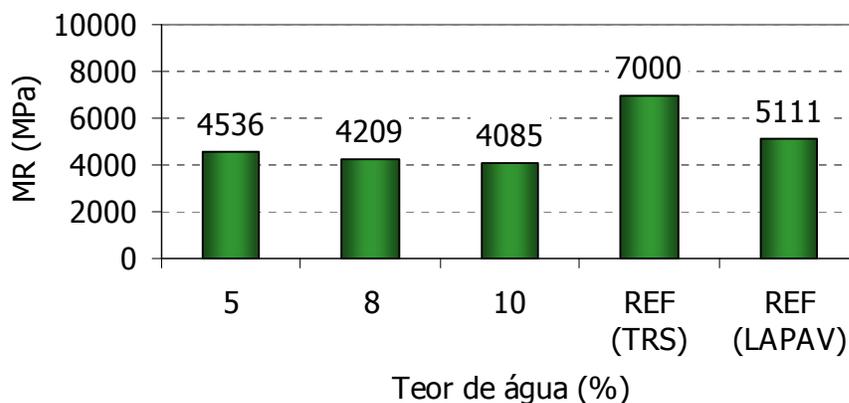


Figura 4.3: Variação do MR com o teor de água

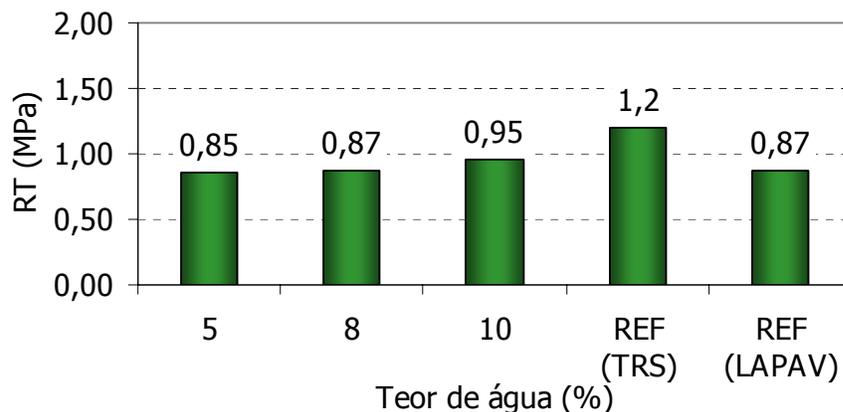


Figura 4.4: Variação da RT com o teor de água

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 a técnica empregada é adequada 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 devido à adição do agregado miúdo umedecido. Esta característica foi avaliada empregando a metodologia Lottman Modificada utilizando amostras moldadas com 8% de água. A Figura 4.5 apresenta a RT de corpos-de-prova confinados e sem confinamento, resultando em resistência à tração retida (RRT) de 70%, no limite da especificação SUPERPAVE. Para as amostras de referência, moldadas sem adição de água a RRT obtida foi de 82%.

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 de referência observada foi de 3,1% e para as amostras produzidas com acréscimo de 8% de água ao agregado miúdo totalizou 2,6%, não sendo observada diferença significativa de comportamento entre as amostras de mistura “morna” e de referência.

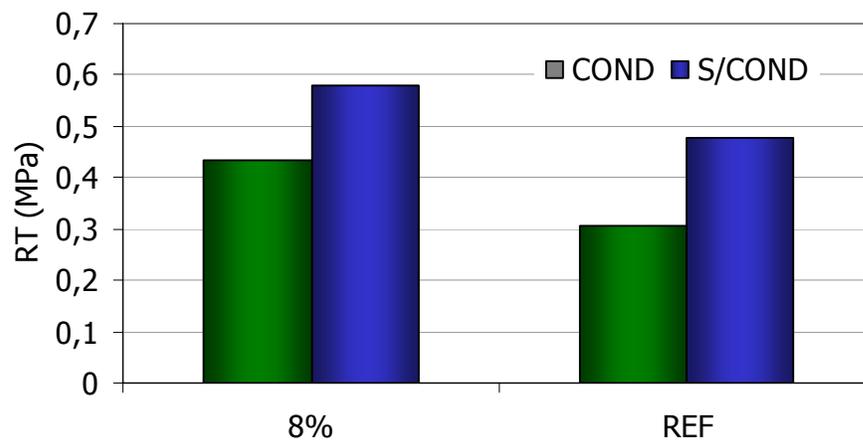


Figura 4.5: RT de amostras para a determinação da RRT



## 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 matérias com características mecânicas muito próximas às observadas para a mistura de referência produzida em temperatura convencional.

Sendo assim, para garantir o sucesso da aplicação da técnica EBE, considera-se fundamental a execução de um teste de usinagem e compactação empregando os equipamentos utilizados em obras rodoviárias. A viabilidade da realização deste procedimento experimental está sendo avaliada em conjunto por LAPAV e CONCEPA.

## REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. T-283: Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. AASHTO, 1989.

ASPHALT INSTITUTE., **Factors affecting compaction**. Educational Series Nº 9 (ES-9), 1980.

ASPHALT INSTITUTE., **The Asphalt Handbook**. Manual Series Nº 4 (MS-4). 1989.

ASPHALT INSTITUTE., **Laboratory mixing and compaction temperatures**. Asphalt Institute Technical Bulletin, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6296: Produtos betuminosos semi-sólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa. ABNT, Rio de Janeiro, 4 p, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 6560: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. ABNT, Rio de Janeiro, 5 p, 2000.

\_\_\_\_\_. NBR 6576: Materiais Betuminosos - Determinação da Penetração. ABNT, Rio de Janeiro, 5 p, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 12891: Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. ABNT, Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. NBR 15087: Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. ABNT, Rio de Janeiro, 4 p, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. ABNT, Rio de Janeiro, 4 p, 2004.

AZARI, H.; Mc CUEN, R. H.; STUART, K. D., **Optimum compaction temperature for modified binders**. Journal of Transportation Engineering, V.129, nº 5, p. 531-537, September/October, 2003.

BIRMAN, S., **Grau de compressão de concreto asfáltico**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Publicação nº 668, Rio de Janeiro, 1979.

BITUME INFO. **Un sujet chaud, les enrobés basses calories**. Paris, n.12, p.12-15, 2006. Disponível em: [http://www.bitume.info/rub\\_magazine\\_B1.htm](http://www.bitume.info/rub_magazine_B1.htm) . Acesso em: 12 de dezembro de 2006.

COLLINS, R., **Letter regarding fatigue susceptibility of samples compacted at different temperatures**. Astec Industries, Chattanooga, TN, 1998.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 043: Misturas betuminosas à quente – Ensaio Marshall. DNER, Rio de Janeiro, 11 p, 1995.

\_\_\_\_\_. ME 133: Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência. DNER, Rio de Janeiro, 5 p, 1994.

DE SOMBRE, R.; NEWCOMB, D. E.; CHADBOURN, B.; VOLLER, V., **Parameters to define the laboratory compaction temperature range of hot mix asphalt**. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 67, p. 125-142, 1998.

EUROVIA. Fiche technico-commerciale Enrobés tièdes à l'aspha-min. Disponível em: [http://www.eurovia.com/EuroviaMedia/m2/34/344-1fr.aspha\\_min.pdf](http://www.eurovia.com/EuroviaMedia/m2/34/344-1fr.aspha_min.pdf) . Acesso em: 20 de dezembro de 2006.

FHWA. Federal Highway Administration. U. S. Department of Transportation. **Warm mix technologies and research**. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/wma.html> . Acesso em: 12 de dezembro de 2006.

GAUDEFROY, V.; BURBAN, O.; PETITEAU, C.; DE LA ROCHE, C. **Mousse de Bitume pour Enrobés Tièdes** – Situation actuelle et Brevet LCPC. In: Journées Techniques Routes, Paris, fev 2006. Disponível em: [http://www.lcpc.fr/fr/sources/seminaires/jtr\\_2006/doc/54\\_petiteau.pdf](http://www.lcpc.fr/fr/sources/seminaires/jtr_2006/doc/54_petiteau.pdf) . Acesso em: 15 de dezembro de 2006.

HADLEY, W. O.; HUDSON, W. R.; KENNEDY, T. W., **Evaluation and prediction of the tensile properties of asphalt-treated materials**. Research Report 98-9, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, May, 1971.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt. In: Association of Asphalt Paving Technologists Annual Meeting, 81., Savannah, 2006. **Annual Meeting and Technical Sessions**. Savannah: AAPT, V.75, 2006. CD ROM.

KENNEDY, T. W.; ROBERTS, F. L.; MCGENNIS, R. B., **Effects of compaction temperature and effort on the engineering properties of asphalt concrete mixtures**. Placement and compaction of asphalt mixtures, ASTM STP 829, F. T. Wagner, Ed., American Society for Testing and Materials, p. 3-27, 1984

KRISTJANSDOTTIR, O. **Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving**. 2006. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - University of Washington, Washington, 2006. Disponível em: <http://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/650.1.pdf> . Acesso em: 20 de dezembro de 2006.

McLEOD, N. W., **Influence of viscosity of the asphalt cements on compaction of paving mixtures in the field**. 45th Annual Meeting of the Highway Research Record, Washington, D. C., 84 p., 1967.

MELÉNDEZ, A. S., **Efectos de la temperatura de compactación en la resistencia al flujo plástico**. Unidad de Investigacion Y Desarrollo Vial, Ministerio de Obras Publicas, Transporte, Vivienda Y Desarrollo Urbano, San Salvador, Republica de El Salvador, 2001.

NEWCOMB, D. **An Introduction to Warm-mix Asphalt**. Disponível em: <http://www.hotmix.org>. Acesso em 14 de fevereiro de 2007.

OLARD, F.; LE NOAN, C.; HUON, P. **Les enrobés à basse température: E.B.T.® : Une nouvelle génération d'enrobés dans la gamme des produits routiers Appia**. Revue Générale des Routes, Paris, n. 846, p. 85-91, 2006.

PARKER, C. F., **Steel-Tired rollers**. Highway Research Board, Bulletin nº 246, Washington, D.C., p. 1-41, 1960.

PINTO, S., **Materiais pétreos e concreto asfáltico: conceituação e dosagem**. 1. ed. Rio de Janeiro: Seção de meios auxiliares – Instituto Militar de Engenharia, 1997.

SASOL WAX. **Roads and trials with Sasobit®**. Disponível em: [http://www.sasolwax.com/data/sasolwax\\_/Bitumen%20Modification/Roads%20and%20trials.pdf](http://www.sasolwax.com/data/sasolwax_/Bitumen%20Modification/Roads%20and%20trials.pdf) . Acesso em 25 de novembro de 2006.

SHELL BITUMES. **Quand les bitumes Shell font campagne pour l'environnement...** Le liant, n.38, 2006. Disponível em: <http://www.bitumes.shell.fr/DOC/Newsletter/LIANT%20N38.pdf> . Acesso em: 26 de novembro de 2006.

SOARES, J. B., SILVEIRA, M. A., MOTTA, L. M. G., **Efeito da temperatura e do grau de compactação nas propriedades das misturas asfálticas**. 11º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Lima-Peru, Novembro, 2001.

SPECHT, L. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 280 p, 2004.

## **Equipe executora**

Coordenador: Professor DSc. Jorge Augusto Pereira Ceratti

Equipe técnica: Professor Dr. Washington Peres Núñez

Eng Dr. Luciana Rohde (doutoranda do PPGEC/UFRGS)

Eng MSc Danielle C. de Souza (doutoranda PPGEC/UFRGS)

Equipe de apoio: Andréas Ostermann (aluno de Graduação)

Diego Treichel (aluno de Graduação)

Bruna Canarin (aluna de Graduação)

Daniel (técnico do LAPAV)