

Efeito da densidade máxima teórica na dosagem e no comportamento mecânico de mistura asfáltica tipo CBUQ

K. L. Vasconcelos¹ e J. B. Soares²

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

L. M. Leite³

Centro de Pesquisa da Petrobrás – Cenpes, Brasil

Artigo Recebido: 04/08/2003 - Aprovado: 23/10/2003

RESUMO: A partir da densidade aparente dos agregados, da densidade aparente do corpo-de-prova compactado e da densidade máxima teórica (DMT) determinam-se as características volumétricas de uma mistura asfáltica e, em vários métodos, sua dosagem quanto ao teor de ligante a ser empregado. Diferentes procedimentos na determinação da DMT podem levar a resultados distintos, acarretando em parâmetros volumétricos também distintos. No Brasil, a DMT é comumente calculada através de uma ponderação das densidades reais dos materiais constituintes da mistura. Neste trabalho, além do cálculo da DMT, são investigados dois procedimentos de laboratório para sua determinação: (i) norma americana ASTM D 2041, que utiliza uma bomba de vácuo (método Rice) e, (ii) método utilizando querosene. São discutidas possíveis diferenças nos valores de DMT obtidos pelos procedimentos, avaliando a influência das diferenças nos parâmetros volumétricos e, conseqüentemente, na escolha do teor de projeto. Por fim, o comportamento mecânico das misturas cujo teor de ligante foi determinado pelos três métodos foi avaliado por meio dos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e vida de fadiga a tensão controlada.

ABSTRACT: Based on the bulk specific gravities of the aggregates and the compacted mixture and the theoretical maximum specific gravity (Gmm), one can determine the volumetric characteristics and the bitumen content of an asphalt mixture. Different procedures to determine the Gmm can lead to different values, also affecting the volumetric parameters. In Brazil, Gmm is determined indirectly from the mixture composition and the relative densities of its constituents. Besides the calculating Gmm from the densities of the constituents, the present study investigates two laboratory procedures: (i) ASTM D 2041, which uses a vacuum pump (Rice method) and (ii) method using kerosene. The differences in the Gmm values obtained by the investigated procedures are discussed, evaluating the influence of these differences in the volumetric parameters and, consequently, in the choice of the optimum asphalt content. Finally, the mechanical behavior of the resultant mixtures is evaluated by the indirect tensile strength, resilient modulus and fatigue life.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de misturas asfálticas, assim como o projeto de outros materiais de engenharia, trata basicamente da escolha e proporcionamento de materiais, a fim de obter a qualidade e propriedades desejadas. O objetivo final é a determinação de uma combinação e graduação de agregados econômica (dentro dos limites especificados) e do teor de asfalto correspondente.

Alguns procedimentos de dosagem de misturas asfálticas do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) vêm sendo utilizados há algumas décadas em vários estados americanos, bem como no Brasil. A maioria dessas misturas produzidas entre 1940 e meados de 1990 foi dosada seguindo o procedimento Marshall ou Hveem com resultados satisfatórios (Roberts *et al.*, 1996). Um determinado

método de dosagem porém, não se aplica a todos os tipos de mistura. Segundo o Manual de Asfalto (1989), os procedimentos acima mencionados não se adequam, por exemplo, para misturas com diâmetro máximo do agregado maior que 25mm. A adoção de determinado método para dosagem de uma mistura, algumas vezes não é suficiente para abordar desde a seleção e caracterização dos materiais, até, por fim, a escolha do teor de projeto do ligante. Isto pode ser observado com a adoção da metodologia Marshall, onde existem diferentes métodos de escolha do teor de projeto, para os mesmos procedimentos de caracterização (NAPA, 1982; Roberts *et al.*, 1996).

O V_v é um parâmetro comum aos mais diversos métodos de dosagem. Sua determinação depende da densidade máxima teórica da mistura (DMT) e da densidade aparente do corpo-de-prova compactado.

Observa-se na literatura diferentes formas de cálculo, ou determinação laboratorial da DMT, que nesse último caso vem sendo denominada de densidade máxima medida (DMM) (Mourão, 2003; Castelo Branco, 2004). No Brasil, a DMT é normalmente calculada por meio de uma ponderação das densidades reais dos materiais constituintes da mistura. Neste trabalho, são abordados três procedimentos para a determinação da DMT de misturas asfálticas: (i) calculada através de uma ponderação, (ii) determinada em laboratório seguindo a norma americana ASTM D 2041, que utiliza uma bomba de vácuo e, (iii) determinada em laboratório pelo método proposto por Castro Neto na 30ª Reunião Anual de Pavimentação utilizando querosene (Castro Neto, 1996).

2 DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA

A DMM é numericamente igual à razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto (Roberts *et al.*, 1996), conforme ilustrado na Figura 1(a).

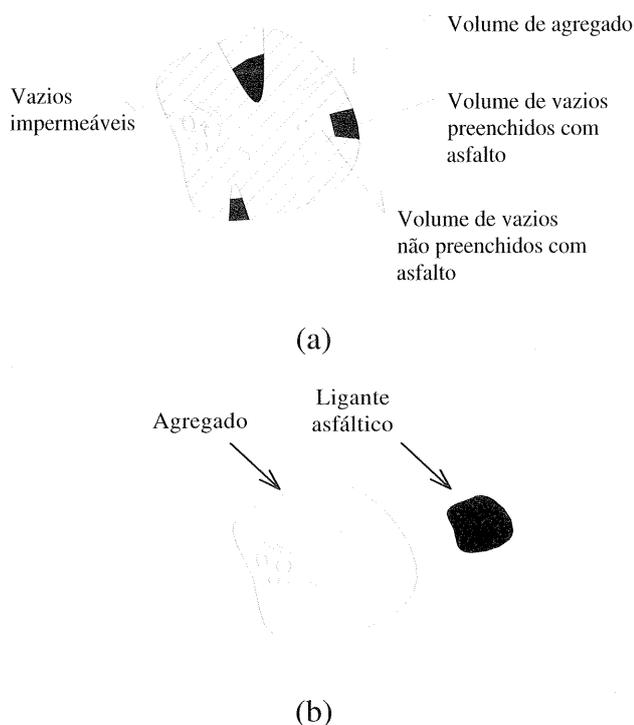


Figura 1. Ilustração (a) dos volumes considerados para DMM de mistura asfáltica e (b) do volume considerado na determinação da densidade real de agregados e ligante asfáltico

A DMT, além de usada no cálculo do percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, é utilizada no cálculo da absorção de ligante pelos agregados, da densidade efetiva do agregado, do teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e para fornecer valores alvo

para a compactação de misturas asfálticas através do compactador giratório (ASTM D 2041). Uma outra utilização da DMT é encontrada na determinação da massa específica de misturas asfálticas já compactadas em campo. Juntamente com a espessura do pavimento, a DMT é necessária para que se estime a massa específica da mistura, sem extração de corpos-de-prova, através do método nuclear (Schmitt *et al.*, 1997). Atualmente, muitos estados americanos especificam a massa específica de misturas asfálticas obtida em campo como um percentual da DMT (Roberts *et al.*, 1996).

Nos estados americanos o método Rice (ASTM D2041 e AASHTO T-209) é convencionalmente adotado. Existem, porém, propostas de outros procedimentos em substituição ao método Rice, como o apresentado por Franco e Lee (1990). O método foi chamado pelos autores de *pressure method* e é parte dos procedimentos descritos nas normas ASTM C 231 e AASHTO T-158, que trabalha segundo o princípio da lei de Boyle. O método consiste em igualar um volume conhecido de ar a pressão conhecida em uma câmara de ar selada, com um volume desconhecido de ar em uma amostra de mistura asfáltica e água. Não foi observada diferença de precisão entre o método Rice e o *pressure method*.

2.1 Ponderação das densidades reais

A determinação da DMT é comumente realizada através de uma ponderação das densidades reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica (brita ¾", areia de campo, pó de pedra e CAP, para o caso dessa pesquisa). O ensaio de densidade nesses agregados é feito segundo o DNER: para agregado graúdo - DNER-ME 81/98 e para agregado miúdo - DNER-ME 84/95. De posse das densidades reais de todos os materiais e suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura para os diferentes percentuais de ligante. A equação abaixo apresenta a fórmula adotada para o cálculo da DMT através dos pesos (P_i) e das densidades reais (G_i) dos materiais constituintes.

$$DMT = \frac{P_{cap} + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_{cap}}{G_{cap}} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (1)$$

Segundo Leahy e McGennis (1999), a equação acima foi inicialmente apresentada no primeiro manual de dosagem do Instituto do Asfalto. Nessa publicação é deixado a critério do projetista qual densidade dos agregados deve ser utilizada (aparente, real ou efetiva). Apesar de conveniente, o uso da densidade aparente resulta em um teor de vazios inferior ao real, visto que não é assumida absorção de asfalto. A adoção da densidade real também apresenta valores de vazios

errôneos (superiores). Nesse caso é assumido que a absorção de asfalto é igual a absorção de água. McLeod (1957) *apud* Leahy e McGennis (1999) defendeu a utilização da densidade efetiva de agregados, a fim de obter o volume de vazios definido como “volume total das pequenas bolsas de ar entre os agregados cobertos com ligante”. No Brasil porém, convencionou-se a adoção da densidade real dos agregados para o cálculo da DMT, possivelmente pela dificuldade de determinação da densidade efetiva.

A determinação da DMT pela Equação 1 é diretamente afetada pela norma utilizada para a determinação das densidades reais dos materiais granulares, ASTM ou DNER. Para este trabalho, optou-se por utilizar a metodologia nacional, através dos métodos de ensaio do DNER acima mencionados, para a determinação das densidades reais, sendo a única variável a DMT. O DNER dispõe ainda de outros métodos de ensaio de densidade de agregados (DNER-ME 085/94; DNER-ME 093/94; DNER-ME 194/98), porém estas variáveis não foram abordadas nesse estudo.

Quando da ponderação das densidades reais dos materiais para cálculo da DMT, adota-se um conceito diferente de DMT daquele ilustrado na Figura 1(a). A densidade real dos agregados é numericamente igual à razão entre a massa da parte sólida e a soma do volume de agregados e vazios impermeáveis, conforme ilustrado na Figura 1(b). A densidade do ligante asfáltico considera apenas o volume da parte sólida (DNER-ME 193/96).

2.2 Método do Querosene

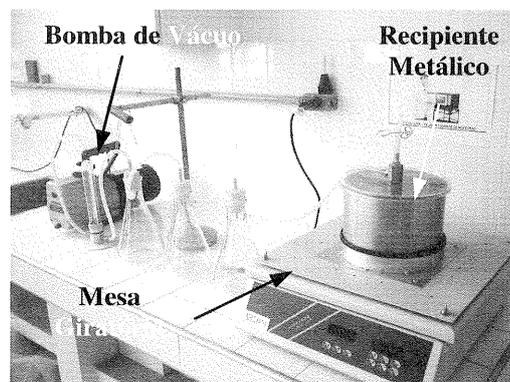
O ensaio proposto por Castro Neto (1996) para determinação da DMT foi concebido visando criar um método em que os vazios de ar fossem expulsos da mistura sem a aplicação de vácuo. A motivação do referido autor deu-se devido à dificuldade da realização do ensaio com aplicação de vácuo em obras, visando implementar um processo que não utilizasse equipamentos sofisticados. Como o querosene é um diluente do asfalto, o estudo de uma metodologia que pudesse substituir a norma ASTM D 2041 foi iniciado. A descrição do procedimento de ensaio pode ser encontrada em Castro Neto (1996).

A calibração do picnômetro é um passo indispensável para boa aproximação dos resultados. O peso do picnômetro completo com querosene, assim como com água destilada, varia de forma considerável com a temperatura que o conjunto apresenta. É importante que o picnômetro apresente tampa de borracha, para evitar entrada da parte líquida entre a tampa e o picnômetro, e que dentro da borracha exista um orifício preenchido com vidro, para que a leitura seja realizada em uma marca de referência nesse vidro de diâmetro reduzido, conforme ilustrado na Figura 2(a). Quanto menor o diâmetro, mais precisas serão as

leituras, porém é importante que o diâmetro permita colocação do material líquido com uma pipeta.



(a)



(b)

Figura 2. Ilustração (a) da tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido e (b) do equipamento de aplicação de vácuo para retirada do ar nos vazios da mistura

Nas conclusões apresentadas por Castro Neto (1996), foi verificado que durante a execução dos ensaios o querosene destrutura qualquer grumo de ligante e agregado, fazendo com que a quase totalidade dos vazios fosse expulsa logo no primeiro contato entre estes constituintes. Isso pode ser explicado também pelo fato da temperatura de execução do ensaio chegar a próximo de 100°C, facilitando essa destruturação. Esse é um fato relevante, pois se esse fenômeno realmente acontece, está se incorrendo na mesma inconsistência da determinação da DMT pela ponderação das densidades reais, conforme ilustrado na Figura 1(b). A total destruturação dos grumos fará com que os vazios permeáveis existentes entre agregado e ligante, ilustrado na Figura 1(a), sejam preenchidos com querosene, modificando assim o volume considerado na determinação da DMT.

2.3 ASTM D 2041

A determinação da DMM, segundo os métodos

americanos ASTM D 2041 e AASHTO T-209, ou o método europeu EN 12697-5, foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará. A Figura 2(b) ilustra o equipamento utilizado neste ensaio. A DMM determinada por meio de vácuo é empregada em projetos de misturas betuminosas dos Estados Unidos, Canadá (Manual de Asfalto, 1989), África do Sul (Jooste, 2000), Austrália (APRG, 1997) e Europa (Heide e Nicholls, 2003).

Para a realização do ensaio pesa-se, inicialmente, 1500 g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 12,5 mm) em um recipiente metálico de peso conhecido. Em seguida, este é preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique coberta. É então aplicada uma pressão residual no recipiente de 30 mmHg, por um período de 15 minutos, a fim de expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante, ilustrado na Figura 3. Logo após esse período é restabelecida pressão ambiente no recipiente metálico. Finalmente, o recipiente, juntamente com a mistura e a água, é pesado imerso. A DMT é determinada por:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)} \quad (2)$$

em que:

- A: massa da amostra seca em ar, g;
- B: massa do recipiente metálico imerso em água, g;
- C: massa do recipiente + amostra imerso em água, g.

Observa-se no procedimento acima descrito, que a temperatura de ensaio gira em torno da temperatura ambiente, não havendo desestruturação de grumos formados por agregados e ligante asfáltico. A permanência desses grumos faz com que os vazios existentes entre os dois materiais permaneçam sem alteração, tendo o vácuo a função apenas de expulsão dos vazios entre os filme de ligante, ou seja, entre os grumos (Figura 3).

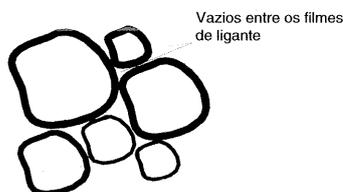


Figura 3. Ilustração dos vazios existentes entre os filmes de ligante

No trabalho realizado por Kandhal e Khatri (1990) foram testadas as variáveis: temperatura do ensaio (69, 77 e 85°F), pressão residual (16, 23 e 30mm Hg) e

tempo de vácuo (5, 10 e 15min). Os valores encontrados como níveis ótimos pelos autores são os atualmente apresentados nas normas ASTM D 2041 e AASHTO T-209.

Castelo Branco (2003) cita ainda como vantagens desse método o fato de ser desnecessária a determinação das densidades reais individuais dos agregados, além de haver e o desconto dos poros preenchidos com ligante e não com água.

3 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

3.1 Seleção dos materiais

A seleção dos agregados foi feita de forma a enquadrar as misturas na Faixa C do DNER, sendo utilizada brita ¾”, como agregado graúdo; areia de campo, como agregado miúdo; e pó de pedra como material passante na peneira N°200, com densidades reais 2,659; 2,646 e 2,650, respectivamente. Todos os agregados são provenientes da pedreira de Itaitinga - CE. Adotou-se como material de enchimento o pó de pedra passando na peneira N°200 e não o da areia de campo devido ao maior percentual de fíler natural existente no primeiro. Para a realização dos ensaios, bem como para a moldagem dos corpos-de-prova, os materiais foram fracionados da peneira ¾” à peneira N°200, passando por toda a série especificada pelo DNER, de forma a assegurar que a curva granulométrica fosse a mesma, sendo a única variável no estudo, a forma de determinação da DMT. Como ligante, utilizou-se o CAP 50/60, densidade real 1,02 (Soares *et al.*, 1998), oriundo do petróleo venezuelano Bachaquero refinado na Lubrificantes do Nordeste (Lubnor)/Petrobras.

3.2 Curva granulométrica

Sabe-se que variações na geometria e tamanho dos agregados podem ocasionar diferentes valores de absorção de ligante por esses agregados e, conseqüentemente, diferenças no teor de projeto do ligante (Ishai e Gelber, 1982). Desta forma, foi realizado fracionamento entre as peneiras ¾” (19,1mm) e de N°200 (0,075mm), conforme mencionado no item 3.1. Optou-se por enquadrar a granulometria na Faixa C do DNER, visto que esta é a faixa mais utilizada para CBUQ em obras no estado do Ceará. A título ilustrativo, apresentou-se também os requisitos Superpave da granulometria de misturas asfálticas, através dos pontos de controle e da zona de restrição (Motta *et al.*, 1996), estando a granulometria também enquadrada nesses requisitos. As Figuras 4 e 5 apresentam a curva granulométrica segundo DNER e Superpave.

É importante ressaltar que as misturas com granulometrias de tamanho nominal máximo de 9,5 a 19 mm que violam a zona restrita, mas se enquadram nos demais requisitos Superpave, se comportam de

forma semelhante, ou melhor, que as misturas com granulometria fora da zona restrita (Watson *et al.*, 1997 *apud* Chowdhury *et al.*, 2001; Hand e Epps, 2001; Kandhal e Cooley, 2002). Kandhal e Colley sugeriram ainda que o requisito “zona restrita” fosse abolido das especificações AASHTO e Superpave para projeto de misturas.

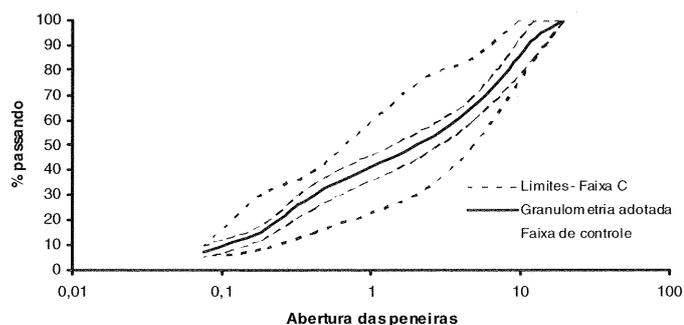


Figura 4. Distribuição granulométrica, segundo especificações do DNER

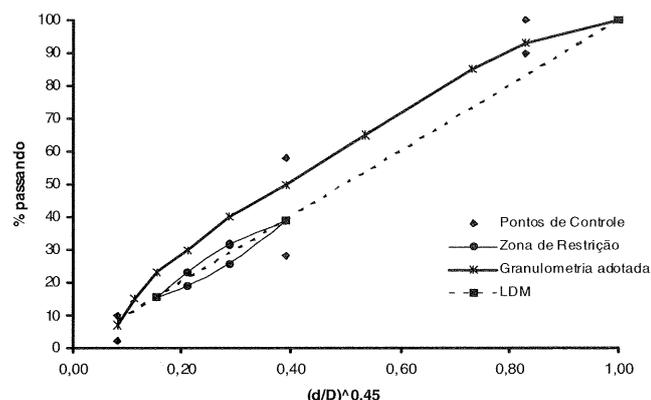


Figura 5. Distribuição granulométrica, segundo especificações Superpave

3.3 DMT's

Os valores de DMT obtidos segundo os três procedimentos anteriormente mencionados, encontram-se resumidos na Tabela 1 e Figura 6. Para os métodos com bomba de vácuo, assim como com querosene, foram realizados três ensaios para cada teor de ligante, de forma que o valor apresentado na tabela é uma média desses valores. Para o cálculo pela da fórmula, utilizou-se apenas um valor obtido através da média de três ensaios de densidade dos respectivos constituintes.

Conforme realizado no estudo de Castelo Branco (2004), foi aplicada uma pressão abaixo da exigida pela norma ASTM D 2041, que deveria ser uma pressão residual de 30mmHg (diferença entre 760mm e 730mm). A bomba de vácuo utilizada não possui capacidade para aplicar pressão acima de 140mm de mercúrio. Vale ressaltar que se a pressão empregada fosse de 30 mm de Hg, os valores obtidos seriam inferiores aos da Tabela 1 e mais próximos aos obtidos pelo método usando querosene.

Tabela 1. Valores médios de DMT para os três procedimentos

% ligante	Fórmula	Vácuo	Querosene
4,7	2,466	2,438	2,433
5,2	2,447	2,420	2,420
5,7	2,429	2,407	2,408
6,2	2,412	2,381	2,391
6,7	2,394	2,374	2,359

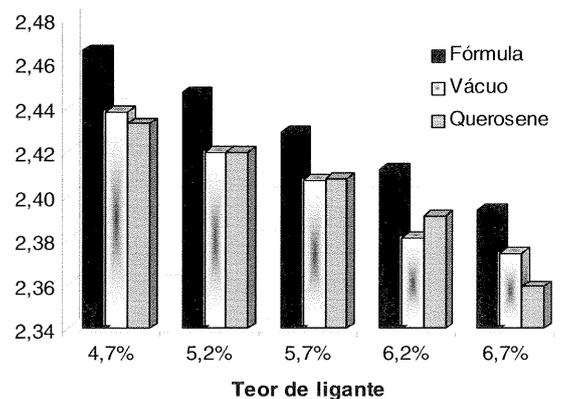


Figura 6. Valores médios de DMT para os três procedimentos

Antes de tirar qualquer conclusão sobre os resultados apresentados, optou-se por fazer uma análise dos dados obtidos, com o intuito de verificar: (a) se os três procedimentos para determinação da DMT podem ser aproximados pelo modelo de regressão linear e (b) se apresentam a “mesma” linha de regressão linear.

O método estatístico utilizado para testar se o modelo de regressão linear era ou não apropriado denomina-se *lack of fit*. O procedimento detalhado desse teste pode ser encontrado em Milton e Arnold (1990) e em Neter *et al.* (1990). Para o presente estudo foi adotada a hipótese nula (H_0) de que o modelo de regressão linear era apropriado, e como hipótese alternativa (H_a) de que o mesmo não era. Os testes foram realizados com nível de significância de 5%. Baseado nos testes mencionados, tanto o procedimento a vácuo, como com querosene são bem aproximados pela linha de regressão linear.

A segunda etapa da análise foi referente à comparação entre os três modelos (vácuo, querosene e fórmula) obtidos por regressão linear. Os três procedimentos apresentaram coeficiente de determinação elevado e similaridade quanto à reta obtida. Baseado nos valores dos coeficientes (intercepto e angular) obtidos para as três retas é possível afirmar, através dos intervalos de confiança dos coeficientes, que os procedimentos através do vácuo e com querosene apresentaram a “mesma” linha de regressão linear, o mesmo não sendo observado para o procedimento através da fórmula.

O valor do coeficiente angular foi muito semelhante para as três retas. Dessa forma optou-se por analisar com mais cuidado os valores dos interceptos. A variação máxima observada na DMT foi de 0,0286 para

4,7% de ligante. Uma vez que os resultados da determinação da DMT podem sofrer variações, foi realizada uma análise de sensibilidade para o valor do teor de projeto, com a variação da DMT. Para cada percentual de ligante, variou-se a DMT de 0,02 para mais e para menos, valor associado a repetibilidade do ensaio (ASTM D 2041). Os resultados dos teores de projeto obtidos para os três procedimentos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Teor de projeto considerando diferentes valores de DMT

Teor de Projeto (%)	Fórmula		
	-0,02	DMT calculada	+0,02
6,1	6,3	6,6	
Teor de Projeto (%)	Vácuo		
	-0,02	DMT* medida	+0,02
5,7	6,0	6,2	
Teor de Projeto (%)	Querosene		
	-0,02	DMT* medida	+0,02
5,7	5,9	6,2	

3.4 Parâmetros Volumétricos e Teor de Projeto

O teor de projeto foi determinado baseado no método convencionalmente usado pela 3ª UNIT/DNIT e cujo procedimento adotado encontra-se descrito em Soares *et al.* (2000). Os parâmetros volumétricos foram obtidos através dos procedimentos de dosagem Marshall (Roberts *et al.*, 1996). A Tabela 3 apresenta os parâmetros volumétricos e o teor de projeto da mistura, para os diferentes valores de DMT.

Tabela 3. Parâmetros volumétricos e teor de projeto da mistura

% ligante	Fórmula		ASTM D 2041		Querosene	
	Vv	RBV	Vv	RBV	Vv	RBV
4,7	8,0	56,7	6,9	60,1	6,7	60,8
5,2	6,3	65,0	5,2	69,1	5,2	69,1
5,7	5,0	72,1	4,1	75,9	4,1	75,7
6,2	3,8	78,8	2,6	84,6	3,0	82,6
6,7	3,3	82,2	2,5	86,1	1,8	89,2
Teor de Projeto (%)	6,3		6,0		5,9	

Segundo DNER-ES 313/97, a variação de ligante permitida em um CBUQ é 0,3%. Os resultados de teor de projeto obtidos para os três procedimentos apresentaram variação de no máximo 0,4%, o que em campo já seria motivo de alerta. Vale ressaltar que se a pressão empregada fosse 30 mm de Hg, prevista pelo ensaio ASTM D 2041, os valores de DMT seriam menores, acarretando diferentes resultados de Vv e RBV, podendo propiciar maior diferença entre os teores de ligante. Em laboratório, é ainda desejada uma variação inferior, visto que o controle é maior, além dos materiais terem sido fracionados entre as peneiras 3/4" (19,1mm) e de N°200 (0,075mm), passando por toda a série especificada pelo DNER.

3.5 Ensaio mecânicos

Devido à proximidade dos teores de ligante obtidos, optou-se por realizar um estudo estatístico, a fim de verificar, ou não, diferenças no comportamento mecânico das três misturas. A análise do comportamento mecânico das misturas foi realizada através dos ensaios de módulo de resiliência (MR) (DNER-ME 131/94); resistência à tração (RT) (DNER-ME 138/94) e vida de fadiga a tensão controlada. A Figura 7 ilustra as médias encontradas para os ensaios de MR e RT das três misturas.

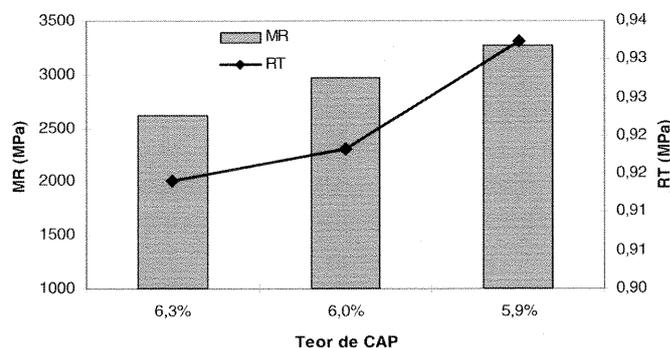


Figura 7. Média dos ensaios de MR e RT

Segundo Roberts *et al.* (1996), a maioria das propriedades das misturas asfálticas apresenta distribuição normal. Tal fato permite que um número reduzido de ensaios sirva para estimar a distribuição populacional. Baseado neste fato, uma análise estatística foi conduzida com base nos dados das três misturas citadas na Tabela 5, a fim de investigar o efeito do teor de ligante, e indiretamente da DMT, na RT e no MR dos corpos-de-prova.

A análise estatística foi realizada com as misturas duas a duas, visto que o objetivo é saber quais dos processos podem ser considerados iguais. A comparação estatística dos resultados dos parâmetros mecânicos para as três misturas foi feita através do teste de hipótese detalhado em Soares *et al.* (1998).

Primeiro realizou-se o teste na relação entre duas variâncias da variável comparada (MR ou RT), totalizando seis testes. Em seguida, foi testada a diferença das médias da variável em questão (MR e RT), associada aos corpos-de-prova com dois percentuais diferentes de ligante asfáltico, levando a mais seis testes. Não foi encontrada diferença estatística nas variâncias de MR e RT das misturas com os três percentuais de ligante, para grau de confiança de 95%, em todos os testes.

Em seguida, foi testada a diferença das médias da variável em questão (MR e RT), associada aos corpos-de-prova com dois percentuais diferentes de ligante asfáltico, levando a mais seis testes. Nessa etapa $H_0: \mu_1 = \mu_2$ e $H_a: \mu_1 > \mu_2$. Para as médias de RT não foi encontrada diferença estatística para nenhum dos teores de ligante. Para o MR porém, essa diferença foi observada entre os teores de 6,3 e 6,0%, bem como entre 6,3 e 5,9%, de forma que apenas as médias das misturas com 5,9 e 6,0% de ligante podem ser consideradas iguais. Também para um grau de confiança de 95%.

O ensaio de fadiga foi realizado por compressão diametral a tensão controlada. As médias de três resultados para as diferentes misturas (fórmula, vácuo e querosene) estão dispostas na Figura 8. Os ensaios foram realizados para tensões de tração equivalentes de 25, 35 e 45% do valor de RT para todas as misturas. Foram tentados ensaios para níveis de tensão inferiores de tensão (15%), mas devido à longa duração, os mesmos não foram concluídos para o fechamento do presente trabalho.

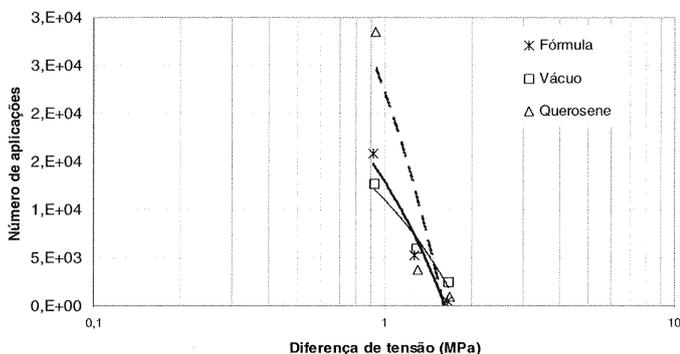


Figura 8. Vida de fadiga a tensão controlada (25°C)

Observa-se da Figura 8, que para o menor nível de tensão testado, a mistura com DMT determinada através do método do querosene (teor de projeto de 5,9%) apresenta uma tendência a maior vida de fadiga, o que era esperado devido essa mistura ter apresentado maior valor de MR. Para níveis de tensão mais elevados, porém, as três misturas apresentaram vida de fadiga semelhantes.

4 CONCLUSÕES

Os resultados de DMT obtidos foram aproximados por

uma reta de regressão linear e os procedimentos através do vácuo e com querosene apresentaram a “mesma” linha de regressão linear para grau de confiança de 95%, o mesmo não sendo observado para o procedimento através da fórmula. Este último apresentou coeficientes da reta de regressão significativamente diferentes dos coeficientes obtidos para os outros dois procedimentos.

É sabido de outros autores (Marques *et al.*, 2001; Neubauer e Partl, 2002), que misturas asfálticas dosadas pela metodologia Superpave resultam em teor de projeto menor que as misturas dosadas pela metodologia Marshall. Nesse estudo não foram levados em consideração todos os requisitos da dosagem Superpave, apenas a determinação da DMT com aplicação de vácuo. O resultado do teor de projeto foi estatisticamente maior para a mistura dosada com a DMT obtida pela ponderação das densidades reais, o que pode ser indício da afirmação feita pelos autores acima mencionados.

A determinação da DMT pelos três procedimentos estudados levou a variação máxima de teor de projeto do ligante de 0,4%. As misturas com os três diferentes percentuais de ligante foram testadas mecanicamente através dos ensaios de MR, RT e vida de fadiga a tensão controlada. Para os ensaios de MR e RT, as variâncias observadas para os três teores de ligante foram consideradas iguais. O teste das médias para os ensaios de RT também foi estatisticamente igual para os três teores. Para os ensaios de MR foi observada diferença estatística entre as médias para os teores de 6,3 e 6,0%, bem como entre 6,3 e 5,9%, de forma que apenas as médias das misturas com 5,9 e 6,0% de ligante puderam ser consideradas iguais. Desta forma, um excesso de ligante de 0,4% parece ser considerável quando se tratando do ensaio de MR. A vida de fadiga não foi tão afetada pela diferença de 0,4% de ligante para níveis de tensão mais elevados. Para o nível mais baixo (25% de RT), a mistura com maior valor de MR (5,9% de ligante) apresentou uma tendência a maior vida de fadiga.

A proximidade dos resultados obtidos para as DMT's através do vácuo e do querosene pode levar a algumas conclusões, entre as quais, no ensaio utilizando querosene pode não haver desestruturação completa dos grumos, conforme mencionado por Castro Neto (1996). Esse fato levaria a consideração de um volume maior no cálculo da DMT, já que os vazios existentes entre agregado e ligante seriam contabilizados. O contrário foi observado para o caso das DMT's obtidas através da ponderação das densidades reais dos materiais. Pelo conceito de densidade real, o volume contabilizado para sua determinação refere-se apenas a parte sólida para ligantes, e parte sólida e vazios impermeáveis para agregados. A exclusão dos vazios permeáveis não preenchidos com ligante leva a maiores valores de DMT. A adoção da densidade efetiva dos agregados, e

não da densidade real, levaria a valores de DMT mais próximos do valor obtido através da aplicação do vácuo, conforme observado por McLeod (1957) *apud* Leahy e McGennis (1999).

O fato de ter se empregado uma pressão de 140 mm de Hg ao invés de 30 mm, indicada pelo método ASTM D 2041, provavelmente, acarretaria valores de DMT semelhantes aos do querosene. Neste caso, o comportamento mecânico das misturas, cujos teores de ligante foram estimados a partir de métodos laboratoriais e do cálculo ponderal, seriam mais distintos, acarretando diferenças mais significativas, tanto em módulo de resiliência, como em vida de fadiga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, pelo incentivo e apoio nas análises estatísticas, ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP/DET/UFC e ao CNPq pelas bolsas do primeiro e do segundo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1994) T 209 – Standard Method of Test for Maximum Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures
- APRG (1997) Selection and Design of Asphalt Mixes: Australian Provisional Guide. Austroads APRG Report N° 18 published May 1997, updated 1998 and March 1999 ARRB Transport Research.
- ASTM (2000) D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.
- Castelo Branco, V.T.F. (2004) Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Castro Neto, A.M. (1996) Determinação da Densidade Máxima Teórica de Misturas Betuminosas. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Salvador, v. 1, p. 35-60.
- Chowdhury, A.; J.D.C. Grau; J.W. Buttom e D.N. Little (2001) Effect of Aggregate Gradation on Permanent Deformation of Superpave HMA. 80° Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, DC, USA.
- DNER (1994a) ME 85 – Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994b) ME 93 – Solos – determinação da densidade real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994a) ME 133 – Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994b) ME 138 – Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1995) ME 84 – Agregado miúdo – determinação da densidade real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1996) ME 193 – Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1997) ES 313 – Pavimentação – concreto betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1998a) ME 81 – Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1998b) ME 194 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1998c) ME 083 – Agregados – Análise Granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Franco, C.A. e K.W. Lee (1990) Development of the Pressure Method for Determining Maximum Theoretical Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures. Transportation Research Record 1269, National Research Council, Washington, DC.
- Hand, A.J. e A.L. Epps (2001) Impact of Gradation Relative to the Superpave Restricted Zone on HMA Performance. 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Heide J.P.J. e J.C. Nicholls (2003) Harmonized European Test Methods. Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. PTEBM'03 Proceedings of the 6th International RILEM Symposium.
- Ishai, I. e H. Gelber (1982) Effect of Geometric Irregularity of Aggregates on the Properties and Behavior of Bituminous Concrete. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Technical Sessions, v. 51, p. 494 – 521.
- Jooste, F.J.; A. Taute; B.M.J.A. Verhaeghe; A.T. Visser e O.A. Myburgh (2000) A new hot mix design method for Southern Africa. World of Asphalt Pavements Conference, Sidney, Australia.
- Kandhal, P.S. e M.A. Khatri (1990) Improved Rice Method for Determining Theoretical Maximum Specific Gravity of Asphalt Paving Mixtures. Transportation Research Record 1269, National Research Council, Washington, DC.
- Kandhal P.S. e L.A. Cooley (2002) Investigation of the Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Technical Sessions, v. 71, p. 479 – 534.
- Leahy, R.B. e R.B. McGennis (1999) Asphalt Mixes: Materials, Design and Characterization. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 68A, p. 70-127.
- Manual de Asfalto (1989) Instituto de Asfalto. Série do Manual N° 4 (MS-4).
- Marques, G.L.; L.F.M. Leite; L.M.G. Motta e R.S. Constantino (2001) Estudos de Dosagens de Misturas Betuminosas Superpave versus Métodos Tradicionais. 11° Congresso del Asfalto, Lima, Peru.
- Milton, J.S. e J.C. Arnold (1990) Introduction to Probability and Statistics: Principles and Applications for Engineering and the Computing Sciences. McGraw Hill, New York, EUA.
- Motta, L.M.G.; I. Tonial; L.M. Leite e R.S. Constantino (1996) Curso sobre Programa SHRP: Aplicação a Ligantes, Agregados e Misturas Betuminosas, IBP, Rio de Janeiro.
- Mourão, F.A.L. (2003) Misturas Asfálticas de Alto Desempenho. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- NAPA (1982) Mix Design Techniques – Part I. NAPA TAS-14. National Asphalt Pavement Association, Instructors Manual.
- Neter, J.; W. Wasserman e M.H. Michael (1990) Applied Linear Statistical Models: Regression, Analysis of Variance and Experimental Designs. Third Edition, Irwin, Boston, EUA.

- Neubauer, O. e M.N. Partl (2002) Volumetrische und Mechanische Optimierung Von Splittmastixasphalt. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA. Dübendorf Abteilung Strassenbau / Abdichtungen – Forschungsauftrag VSS 1996/034, Dübendorf.
- Roberts, F.L.; P.S. Kandhal; R.E. Brown; D. Lee e T.W. Kennedy (1996) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA. Maryland.
- Schmitt, R.L.; A.S. Hanna; J.S. Russel e E.V. Nordheim (1997) Pavement Density Measurement Comparative Analysis using Core and Nuclear Methods. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 66, p. 379-406.
- Soares, J.B.; L.M.G. Motta; L.M. Nóbrega; L.M. Leite e E.F. Nobre Jr. (1998) Estudo Comparativo de Cimento Asfáltico de Petróleo na Pista Experimental do Ceará. Anais do XII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, v. I, p. 590-601.
- Soares, J.B.; F.A.C. Freitas; J.V.C. Branco e L.M.G. Motta (2000) Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. 32º Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, v. I, p. 148-160.

CONTATOS

¹Nome: Kamilla Lima Vasconcelos
E-mail: kamilla@det.ufc.br

²Nome: Jorge Barbosa Soares
E-mail: jsoares@det.ufc.br

³Nome: Leni Mathias Leite
E-mail: leniml@cenpes.petrobras.com.br