

INFLUÊNCIA DA DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Kamilla Lima Vasconcelos

Jorge Barbosa Soares

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP
Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - Petran
Universidade Federal do Ceará - UFC

Leni Mathias Leite

Centro de Pesquisa da Petrobras - Cenpes

RESUMO

A densidade máxima teórica (DMT) é um parâmetro necessário para o cálculo da densidade efetiva do agregado, da absorção de asfalto pelo agregado, do teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e do volume de vazios (V_v) numa dosagem de misturas asfálticas. A partir da densidade aparente dos agregados, da densidade aparente do corpo-de-prova compactado e da 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 e, (ii) método utilizando querosene. São discutidas possíveis diferenças nos valores de DMT obtidos pelos diferentes 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 diferentes métodos foi avaliado através dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência.

ABSTRACT

The theoretical maximum specific gravity (Gmm) is a parameter required for the calculation of the aggregate effective specific gravity, asphalt absorption, effective asphalt content and air voids content (V_v), within the design of a hot mix asphalt. From the Gmm and the bulk specific gravities of the aggregates and the compacted mixture, 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 calculation of Gmm, two laboratory procedures are investigated for its determination: (i) ASTM D 2041, which uses a vacuum pump and (ii) method using kerosene. The differences in the Gmm values obtained by different 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 tensile strength and resilient modulus.

1. INTRODUÇÃO

A mistura asfáltica a quente consiste na combinação de agregados uniformemente misturados e recobertos com asfalto. O concreto asfáltico é um tipo de mistura que deve satisfazer a requisitos rigorosos, apresenta massa densa, uniforme e de alta qualidade (Manual de Asfalto, 1989). O projeto de misturas asfálticas, assim como o projeto de outros materiais de engenharia, é uma questão de 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, de modo a obter uma mistura com as seguintes características (Manual de Asfalto, 1989):

- Asfalto suficiente para assegurar um pavimento durável;
- Estabilidade suficiente que satisfaça a demanda de tráfego sem distorções ou deslocamentos;

- Vazios em quantidade suficiente na mistura compactada total de modo a permitir a expansão térmica do asfalto e agregado nas temperaturas de verão, contudo, em pequena quantidade que evite efeitos danosos do ar e umidade;
- Trabalhabilidade suficiente que permita a colocação adequada da mistura sem segregação.

Alguns procedimentos de dosagem de misturas asfálticas do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) vêm sendo utilizados a 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:

1. Baseado somente no volume de vazios (Vv). O teor de projeto é escolhido como aquele correspondente a um Vv de 4%, ou o Vv correspondente à média das especificações (NAPA, 1982);
2. Baseado na estabilidade Marshall, peso específico e Vv. Neste caso, o teor de projeto é uma média de três teores, correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, ao peso específico máximo da amostra compactada e a um Vv de 4% (ou média das especificações) (Roberts et al., 1996);
3. Baseado num valor selecionado a partir dos teores obtidos para atender aos limites de Vv e RBV. Este método era adotado pelo 3ª Unidade de Infra-Estrutura Terrestre (UNIT) / Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT).

O Vv 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. No Brasil, ela é normalmente calculada através 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.

2. DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA

A DMT é numericamente igual a 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).

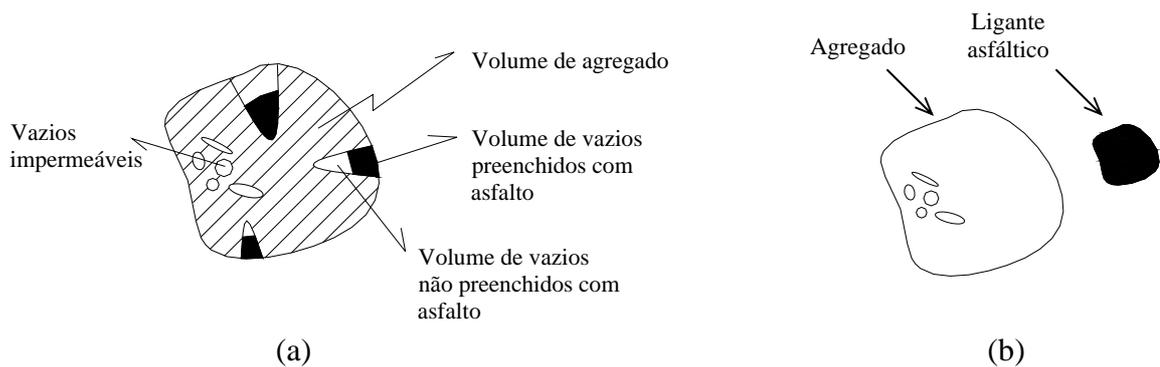


Figura 1: Ilustração (a) da DMT para mistura asfáltica e (b) do volume considerado na determinação da densidade real de agregados e ligante asfáltico

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).

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 as normas do DNER para agregado graúdo (DNER-ME 81/98) e 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.

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

A determinação da DMT através da 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 das normas acima mencionadas, para a determinação das densidades reais, sendo a única variável a DMT. O DNER dispõe ainda de outras normas para ensaio de densidade de agregados (DNER-ME 085/94; DNER-ME 093/94; DNER-ME 194/98), porém estas variáveis serão abordadas em estudo posterior.

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 a 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 (Castro Neto, 1996)

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.

Abaixo segue um resumo do procedimento realizado em laboratório para a determinação da DMT de misturas asfálticas através do método proposto por Castro Neto (1996), aqui denominado “método do querosene”.

- Determinar a massa do picnômetro (P);
- Completar o picnômetro com querosene com auxílio do Becker e determinar a massa do picnômetro completo com querosene (P₁) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- Determinar a massa do picnômetro completo com água destilada (P₂) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- Adicionar aproximadamente 1 l de querosene no picnômetro e determinar a massa do conjunto (P₃) a qualquer temperatura;
- Verter a mistura betuminosa lentamente dentro do picnômetro com querosene com o auxílio da espátula e funil. A quantidade mínima da amostra deve ser de 1200 g com diâmetro máximo de 19,1 mm e sua temperatura deve estar próxima de 100°C;
- Determinar a massa do conjunto (P₄);
- Realizar pequenos movimentos de rotação no conjunto e, logo após, agitar a amostra com uma haste para expulsão dos possíveis vazios. Ao retirar a haste, limpá-la com a pisseta;
- Completar o picnômetro com querosene, colocar a tampa e determinar a nova massa (P₅);
- Imediatamente após a determinação da massa (P₅), agitar a mistura e determinar a temperatura da mistura t com precisão de 0,5°C. É conveniente que a temperatura esteja entre ± 5°C em relação à temperatura ambiente.

Após o procedimento descrito acima é possível calcular a massa específica máxima da mistura a uma dada temperatura através da Equação 2:

$$MEM(t) = \frac{(P_4 - P_3) \times (P_1 - P)}{(P_4 + P_1 - P_5 - P_3) \times (P_2 - P)} \quad (2)$$

A determinação da massa específica máxima a 25°C é dada por:

$$MEM(25^\circ C) = \frac{MEM(t)}{\left[1 + (3,783 \times 10^{-5} \times (25 - t))\right]} \quad (3)$$

Para a utilização desta fórmula, Castro Neto (1996) admitiu que a variação volumétrica por cm³ por °C de uma amostra com 5% de ligante seja de 3,783 × 10⁻⁵ cm³, conforme ASTM D 2041-94. A DMT no ensaio, denominada DMTE, é obtida pela seguinte equação:

$$DMTE = \frac{MEM(25^{\circ}C)}{0,9971} \quad (4)$$

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 de diâmetro reduzido, 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.

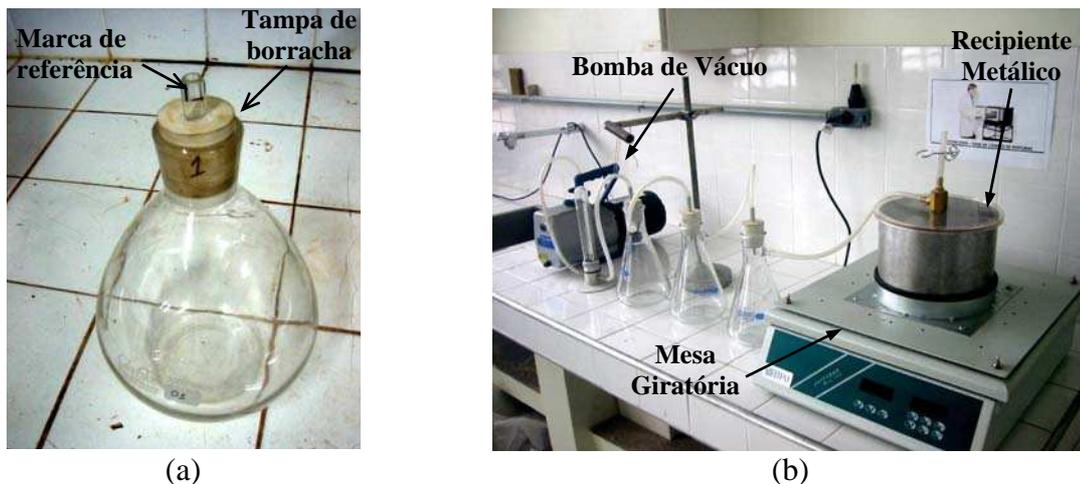


Figura 2: Ilustração (a) da tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido e (b) do equipamento de aplicação de vácuo para retirada do ar nos vazios da mistura

Nas conclusões apresentadas por Castro Neto (1996), foi verificado que durante a execução dos ensaios o querosene desestrutura qualquer grumo de ligante e agregado, fazendo com que a quase totalidade dos vazios fossem expulsos 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 desestruturação. 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 desestruturação 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 DMT, segundo o método americano ASTM D 2041-00 ou 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 DMT através do 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, 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 de vácuo 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 a pressão ambiente no recipiente metálico. Finalmente, o recipiente, juntamente com a mistura e a água, é pesado imerso. A DMT é determinada por:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)} \quad (5)$$

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 nesse procedimento, 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 grumos (Figura 3).

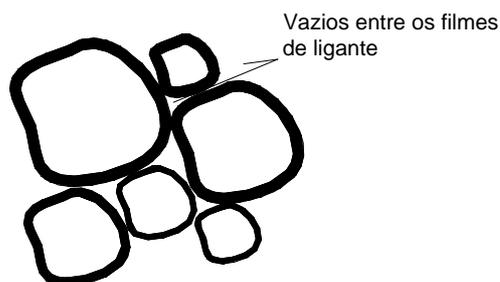


Figura 3: Ilustração dos vazios existentes entre os filmes de ligante, ou entre os grumos

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 filer 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) produzido 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 Tabela 1 apresenta a granulometria adotada, bem como os limites da faixa C e a faixa de controle (DNER-ME 313/97). 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 (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.

Tabela 1: Distribuição granulométrica da mistura utilizada segundo especificação do DNER

Peneiras	Faixa de Controle			Faixa C	
	P mín		P máx	X mín	X máx
¾"	100	100,0	100	100	100
½"	86	93,0	100	85	100
⅜"	78	85,0	92	75	100
N° 4	60	65,0	70	50	85
N° 10	45	50,0	55	30	75
N° 40	25	30,0	35	15	40
N° 80	12	15,0	18	8	30
N° 200	5	7,0	10	5	10

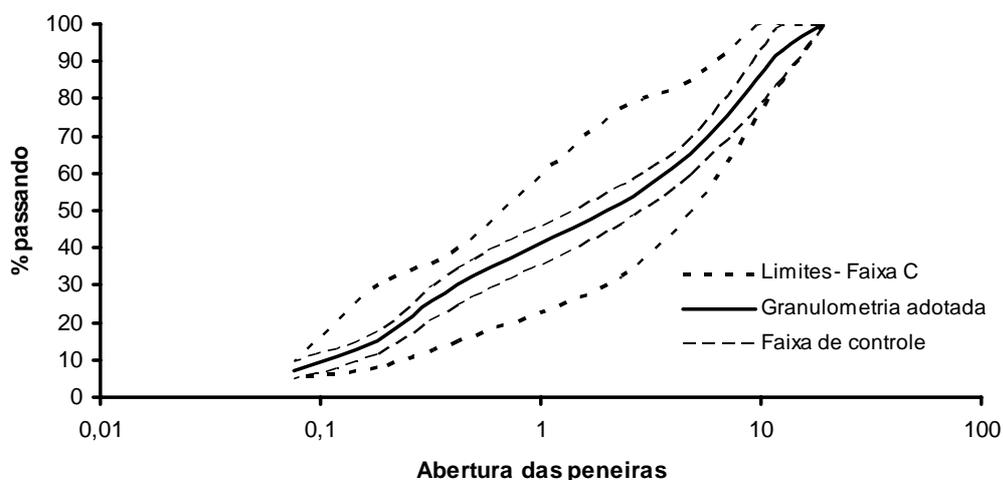


Figura 4: Distribuição granulométrica, segundo especificações do DNER

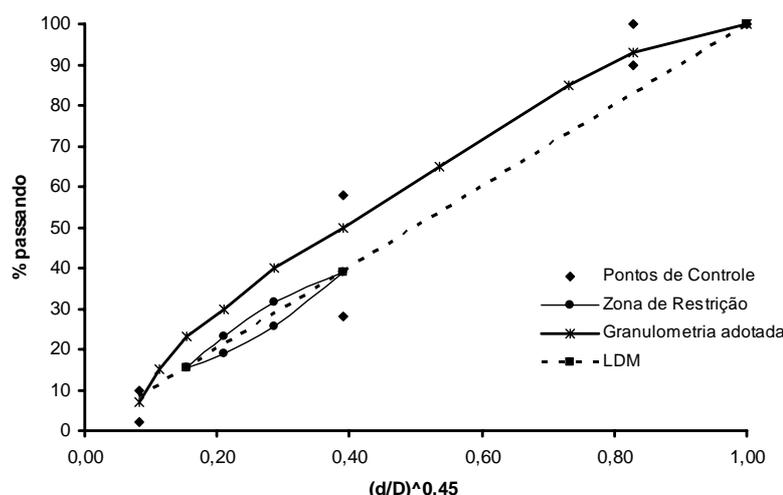


Figura 5: Distribuição granulométrica, segundo especificações Superpave

3.3. DMT's

Os valores de DMT obtidos segundo os três procedimentos anteriormente mencionados, encontram-se resumidos na Tabela 2. 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 através da fórmula, utilizou-se apenas um valor obtido através da média de três ensaios de densidade dos respectivos constituintes.

Tabela 2: 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

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.

Quando uma linha reta se ajusta a observações emparelhadas está se assumindo que o princípio da regressão linear é um modelo adequado. É necessário porém um método analítico para testar se o modelo é ou não apropriado. O método estatístico utilizado para essa finalidade é denominado “lack of fit” (Milton e Arnold, 1990; Neter et al., 1990). Este é baseado nas diferenças entre os valores observados da variável dependente (Y) e os valores previstos pela linha de regressão estimada. O resíduo, ou soma dos erros quadrados (SSE), pode apresentar valor elevado devido a alta variabilidade natural de Y, ou porque o modelo adotado é inapropriado.

Para utilização do teste “lack of fit” é necessário que existam pelo menos duas observações de DMT (Y) para pelo menos um dos valores de percentual de ligante (X). Desta forma, apenas o caso dos procedimentos utilizando vácuo e querosene foram testados quanto a aceitação do modelo de regressão linear adotado, visto que estes apresentavam para cada valor de X (% de ligante), três valores de Y (DMT). O procedimento detalhado do teste pode ser encontrado em Milton e Arnold (1990) e em Neter et al. (1990). A hipótese nula (H_0) testada é que o modelo de regressão linear é apropriado e a hipótese alternativa (H_a) que o modelo não é apropriado. A estatística acima segue uma distribuição F, de forma que valores elevados de F tendem a rejeição da hipótese nula.

O teste “lack of fit” com o procedimento a vácuo, assim como com querosene foram realizados com nível de significância de 5%. Para ambos os casos, não há indícios para rejeição da hipótese nula, de forma que os dois procedimentos são bem aproximados pela linha de regressão linear. A reta de regressão linear obtida para cálculo da DMT através da fórmula apresentou coeficiente de determinação (R^2) unitário, visto que na fórmula os valores de densidade são constantes, variando apenas o percentual dos materiais.

A segunda etapa da análise foi referente à comparação entre os três modelos (vácuo, querosene e fórmula) obtidos por regressão linear. A Figura 6 ilustra todos os valores de DMT obtidos pelos três procedimentos, bem como a equação da regressão linear e o valor de R^2 . 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.

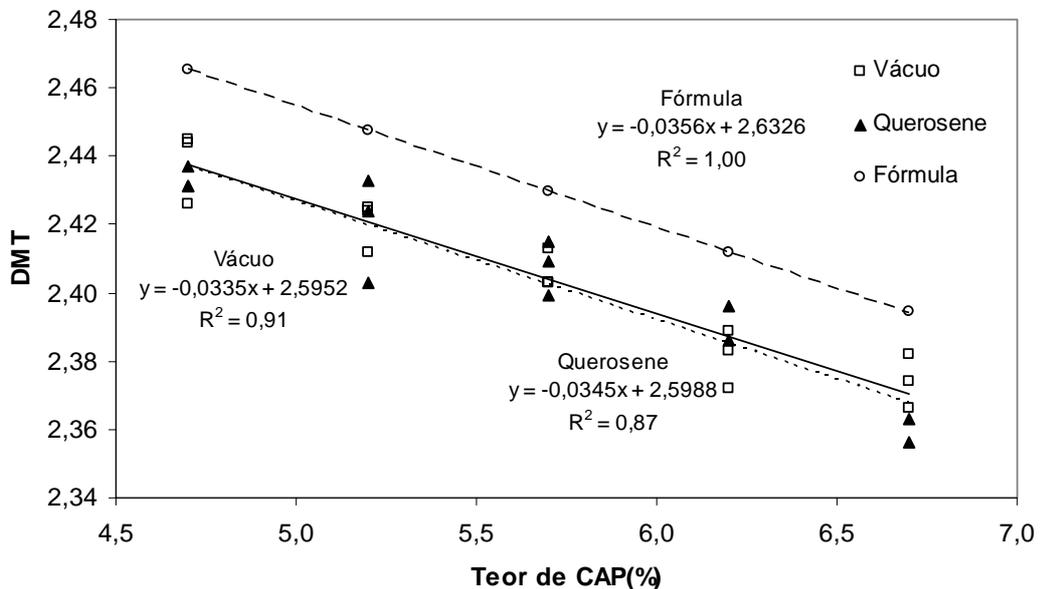


Figura 6: Linha de regressão obtida para os três procedimentos

Como o valor do coeficiente angular foi muito semelhante para as três retas, convém 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 3.

Tabela 3: Teor de projeto considerando diferentes valores de DMT

Teor de Projeto (%)	Fórmula			Vácuo			Querosene		
	-0,02	DMT medida	+0,02	-0,02	DMT medida	+0,02	-0,02	DMT medida	+0,02
	6,1	6,3	6,6	5,7	6,0	6,2	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 4 apresenta os parâmetros volumétricos e o teor de projeto da mistura, para os diferentes valores de DMT.

Tabela 4: Parâmetros volumétricos e teor de projeto da mistura

% ligante	Fórmula		ASTM D 2041		Querosene	
	V _v	RBV	V _v	RBV	V _v	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. Em laboratório, é ainda desejada uma variação inferior, visto que o controle é maior, além dos materiais terem sido fracionados entre as peneiras ¾" (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) e resistência à tração (RT) (DNER-ME 138/94). A Tabela 5 apresenta as médias e os desvios padrões para as três misturas.

Tabela 5: Resultados dos ensaios mecânicos

Teor de Ligante (%)	Módulo de Resiliência (MPa, 25°C)		Resistência à Tração (MPa, 25°C)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
6,3	2623	364	0,91	0,063
6,0	2974	451	0,92	0,090
5,9	3270	383	0,93	0,060

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, onde $H_0: \sigma^2_1 = \sigma^2_2$ e $H_a: \sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$. 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%.

4. CONCLUSÕES

Os resultados de DMT obtidos foram aproximados por uma reta de regressão linear (Figura 6) 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 foi levada 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 e RT. Tanto para o ensaio de MR, como

de 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 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Carlos Felipe Granjeiro 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

- 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*.
- 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.
- 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.
- 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 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.
- 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.
- 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. *32° Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Brasília, v. I, p. 148-160.

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
Departamento de Engenharia de Transportes
Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici – Bloco 703 s/n
CEP 60455-760
email: kamilla@det.ufc.br, jsoares@det.ufc.br e leniml@cenpes.petrobras.com.br