

Dosagem de diferentes tipos de revestimento

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da dosagem de diferentes tipos de revestimentos asfálticos: misturas a quente e a frio; misturas recicladas; tratamentos superficiais e microrrevestimentos.

A dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. A definição do que vem a ser um teor ótimo não é simples. É possível que esse termo tenha sido escolhido por analogia ao teor ótimo de umidade de um solo, que, para uma determinada energia, é função somente da massa específica. Porém, no caso das misturas asfálticas, são vários os aspectos a serem considerados, e o teor “ótimo” varia conforme o critério de avaliação. Portanto, o mais conveniente é se nomear o teor de ligante dosado como teor de projeto, como forma de ressaltar que sua definição é convencional. Fica a sugestão e ao longo deste texto usar-se-á alternativamente os dois termos.

Durante a evolução dos procedimentos de dosagem, diversas formas de compactação de amostras vêm sendo desenvolvidas. Dependendo do sistema, as amostras podem ser, quanto à forma, cilíndricas, trapezoidais, ou retangulares, e a compactação pode ser realizada através de impacto, amassamento, vibração ou rolagem (Harman *et al.*, 2002) conforme exemplos apresentados na Figura 5.1.

O teor de projeto de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros. O método de dosagem mais usado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall em referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940. Durante a década de 1980, várias rodovias norte-americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante nas misturas. Muitos engenheiros acreditavam que a compactação por impacto das misturas durante a dosagem produzia corpos-de-prova (CP) com densidades que não condiziam com as do pavimento em campo. Esse assunto foi abordado no estudo realizado nos Estados Unidos sobre materiais asfálticos, denominado Strategic Highway Research Program (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem por amassamento, denominado Superpave. O procedimento SHRP-Superpave ainda não é de uso corrente no Brasil, embora vários trabalhos científicos o tenham utilizado (Marques, 2004; Vasconcelos, 2004; Pinheiro, 2004).



Figura 5.1 Exemplos de corpos-de-prova de diversas formas e compactadores de misturas asfálticas

O método de dosagem Marshall de misturas asfálticas (DNER-ME 043/95) ainda é o mais utilizado no país. Foi concebido no decorrer da 2ª Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares. Originalmente a compactação Marshall utilizava um esforço de 25 golpes com o soquete Proctor, seguido de aplicação de uma carga estática de 5.000 libras (2.268kgf) durante dois minutos. A aplicação dessa carga tinha a finalidade de nivelar a superfície do corpo-de-prova, visto que, como o soquete utilizado tinha diâmetro menor que o corpo-de-prova, a superfície final não era totalmente plana. Outras fontes citam a compactação inicial como sendo de 10 golpes seguidos de mais 5 (White, 1985).

Através da análise de trechos experimentais, verificou-se que o teor de ligante escolhido com o uso do método Marshall era muito elevado. As seções construídas com os teores escolhidos apresentavam exsudação com o decorrer do tempo devido à pós-compactação que o tráfego causava. Esse fato indicou que o esforço de compactação então empregado em laboratório era leve, não representando a compactação exercida em campo (White, 1985). Com base nessas observações, estudos foram realizados para

identificar o esforço de compactação que levaria à escolha de um teor de ligante adequado. Variações de peso e diâmetro do soquete se seguiram, resultando na adoção do peso de 10 libras (4,54kgf), 50 golpes e diâmetro de 3 7/8" (White, 1985).

Antes de apresentar os procedimentos de dosagem Marshall e Superpave, são definidos alguns parâmetros que eles utilizam.

5.2 DEFINIÇÕES DE MASSAS ESPECÍFICAS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

A Figura 5.2 (Asphalt Institute, 1995) apresenta um esquema para compreensão do uso dos parâmetros físicos dos componentes – asfalto e agregados – em uma mistura asfáltica que serão utilizados na determinação das massas específicas, aparente e efetiva, dos vazios de ar e do teor de asfalto absorvido em uma mistura asfáltica compactada.

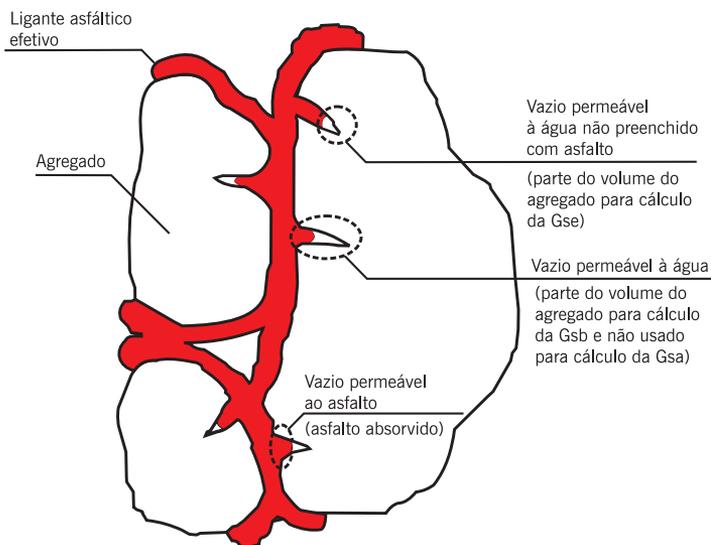


Figura 5.2 Esquema de componentes em uma mistura asfáltica compactada

(Fonte: Asphalt Institute, 1995)

5.2.1 Massa específica aparente de mistura asfáltica compactada

A massa específica aparente, obtida a partir de corpos-de-prova de uma mistura asfáltica compactada (G_{mb}), é dada pela seguinte razão:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{V_a + V_{ag-efetivo} + V_{ar}} \quad (5.1)$$

Onde:

M_s = massa seca do corpo-de-prova compactado, g;

V_a = volume de asfalto, cm^3 ;

$V_{ag-efetivo}$ = volume efetivo do agregado, cm^3 (Capítulo 3);

V_{ar} = volume de ar (vazios), cm^3 .

Em laboratório valores de volumes são facilmente determinados pela diferença entre massas, no caso entre a massa do corpo-de-prova pesada em balança convencional – Figura 5.3(a) – e a massa pesada submersa em balança hidrostática – Figura 5.3(b). Há uma diferença no procedimento da ASTM e do DNER no que diz respeito à consideração da massa do corpo-de-prova a ser pesada para obtenção do volume total do numerador da expressão 5.1.



(a) Pesagem convencional



(b) Pesagem hidrostática

Figura 5.3 Pesagem de corpos-de-prova

De acordo com a ASTM D 1188 ou D 2726, a massa específica aparente de uma mistura asfáltica compactada (Gmb) é numericamente igual à razão entre a massa seca (M_s), a uma temperatura prefixada, e a massa de um volume igual de água destilada livre de gás a mesma temperatura, sendo dada por:

$$Gmb = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sss_{sub}}} \times 0,9971 \quad (5.2)$$

Onde:

M_{sss} = massa de corpo-de-prova compactado na condição de superfície saturada seca, g, que corresponde ao corpo-de-prova com os poros superficiais saturados, sendo eliminado o excesso de água – Figura 5.4;

$M_{sss_{sub}}$ = massa de corpo-de-prova compactado na condição de superfície saturada seca e posteriormente submerso em água, g;

0,9971 = massa específica da água a 25°C, g/cm³.

No procedimento ASTM D 2726 a $M_{sss_{sub}}$ é medida com o corpo-de-prova diretamente submerso em água e deve ser usada em corpos-de-prova que absorvam até 2% de água. Caso contrário, deve-se usar o procedimento ASTM D 1188, no qual o corpo-de-prova é envolto em material impermeável. O procedimento AASHTO T 166 (2000) também trata da determinação da $M_{sss_{sub}}$.



(a) Após retirada da imersão em água



(b) Remoção da água na superfície do corpo-de-prova com toalha absorvente

Figura 5.4 Obtenção da condição de superfície saturada seca em corpo-de-prova de mistura asfáltica compactada

O DNER-ME 117/94 fixa o modo pelo qual se determina a massa específica aparente de mistura asfáltica em corpos-de-prova moldados em laboratório ou obtidos em pista. Segundo esse método, a massa específica aparente é definida como a relação entre a massa seca do corpo-de-prova compactado e a diferença entre essa massa seca (M_s) e a massa seca do corpo-de-prova posteriormente submersa em água ($M_{s_{sub}}$), ou seja:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{s_{sub}}} \times 0,9971 \quad (5.3)$$

Observe-se que o procedimento do DNER difere do procedimento da ASTM D 2726 na forma de considerar o volume do corpo-de-prova para cálculo da G_{mb} (denominadores das expressões 5.2 e 5.3). Enquanto na ASTM considera-se para cálculo deste volume a diferença entre a massa na condição de superfície saturada seca e a massa da mistura nessa condição e posteriormente submersa em água, o DNER não emprega o conceito de superfície saturada seca. Sendo assim, os valores da massa específica aparente de misturas asfálticas medidos pela metodologia americana e brasileira apresentarão valores diferentes. Cuidado deve ser tomado para não se usar esses dois conceitos distintos simultaneamente.

O mesmo método DNER-ME 117/94 fixa os procedimentos para a determinação da densidade aparente de misturas abertas e muito abertas através da utilização de parafina e fita adesiva, o que no caso da ASTM é dado por um outro método, o ASTM D 1188.

5.2.2 Massas específicas máximas teóricas e medida de misturas asfálticas

A massa específica máxima teórica, tradicionalmente denominada densidade máxima teórica (sigla DMT no Brasil), é dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica e é descrita mais adiante – Figura 5.5(a). Esse parâmetro é definido na norma de dosagem de misturas asfálticas ABNT NBR 12891.

A massa específica máxima medida, no Brasil denominada densidade máxima medida (DMM), é dada pela 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, conforme ilustrado na Figura 5.5(b). Neste livro será adotada a terminologia *Gmm* para esse parâmetro de modo a ficar consistente com a terminologia das massas específicas dos agregados apresentada no Capítulo 3. A *Gmm* também é chamada de densidade específica Rice (James Rice desenvolveu esse procedimento de teste). Esse parâmetro pode ser determinado em laboratório seguindo a ASTM 2041 (2000) ou a AASHTO T 209 (1999). No Brasil não há ainda método normatizado para essa determinação, embora alguns órgãos e instituições de pesquisa já adotem alguma variação das referidas normas norte-americanas.

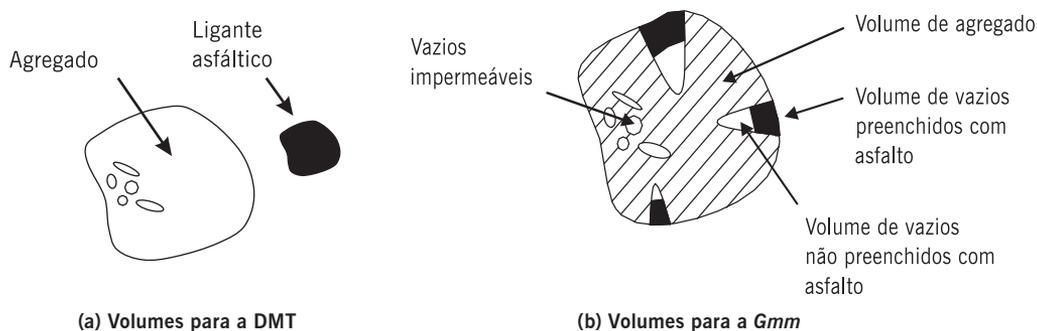


Figura 5.5 Ilustração dos volumes considerados na determinação da DMT e da *Gmm*

A *DMT* ou a *Gmm* são usadas no cálculo de: percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, absorção de ligante pelos agregados, massa específica efetiva do agregado (*Gse*, referida no Capítulo 3), teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e ainda para fornecer valores alvo para a compactação de misturas asfálticas através do compactador giratório. Uma outra utilização desses parâmetros é encontrada na determinação da massa específica de misturas asfálticas já compactadas em campo. Juntamente com a espessura do pavimento, a *DMT* ou a *Gmm* é necessária para que se estime a massa específica da mistura, sem extração de corpos-de-prova, através do método que faz uso do densímetro nuclear ou eletromagnético.

Adiante são descritos três procedimentos de determinação da *DMT* e *Gmm*: (i) ponderação das densidades reais (*DMT*); (ii) método do querosene (*Gmm*); (iii) ASTM D 2041 utilizando vácuo (*Gmm*). Vasconcelos *et al.* (2003) mostram que esses três procedimentos podem levar a uma variação de teor de projeto de asfalto de até 0,4% quando se consideram agregados com pouca absorção de ligante. No Brasil, o parâmetro em questão é tradicionalmente obtido através do primeiro procedimento, de formulação teórica em que a equação que define a *DMT* é função das massas específicas reais dos componentes da mistura asfáltica e da proporção com que cada um dos componentes participa na mistura total.

Ponderação das massas específicas reais

A determinação da *DMT* é comumente realizada através de uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica (brita 3/4", areia de campo, pó-de-pedra e asfalto, por exemplo). O ensaio de massa específica (correspondente numericamente à densidade) nesses agregados é feito segundo as normas do DNER para agregado graúdo (DNER-ME 81/98) e agregado miúdo (DNER-ME 84/95), conforme mostrado no Capítulo 3. De posse das massas específicas 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 expressão 5.4 apresenta o cálculo da *DMT* através das massas (M_i) e das massas específicas reais (G_i) dos materiais constituintes.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (5.4)$$

Onde:

$\%a$ = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica (por exemplo, no caso de um teor de asfalto de 5%, utiliza-se o número 5 na variável $\%a$ no denominador da expressão);

$\%Ag$, $\%Am$ e $\%f$ = porcentagens do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente.

Esta expressão pode ainda ser usada com as massas específicas efetivas dos agregados ou até a média entre as massas específicas reais e aparentes (Pinto, 1996), conceitos definidos no Capítulo 3. A determinação da *DMT* através da expressão 5.4 depende da norma utilizada para a obtenção das massas específicas reais dos materiais granulares, ASTM ou DNER. A massa específica efetiva é normalmente determinada para os agregados graúdos. Para o fíler e para o agregado miúdo utiliza-se somente o valor da massa específica real, uma vez que as normas brasileiras para determinação das massas específicas destes dois materiais somente indicam procedimentos para a massa específica real. Sem o valor da massa específica aparente não se pode determinar a massa específica efetiva pela média dos dois valores. É possível determinar a massa específica efetiva do agregado miúdo também como mostrado no Capítulo 3.

Massa específica máxima medida – procedimento com vácuo

A obtenção da *Gmm* em laboratório pode seguir o método ABNT NBR 15619, os métodos norte-americanos ASTM D 2041 (2000), AASHTO T 209 (1999) ou o método europeu EN 12697-5. A Figura 5.6 (Marques, 2004) ilustra um exemplo de equipamento utilizado nesse ensaio. A *Gmm* através do vácuo é empregada em projetos de misturas asfálticas dos Estados Unidos, Canadá (Instituto de Asfalto, 1989), África do Sul (Jooste, 2000), Austrália (APRG, 1997) e Europa (Heide, 2003).



(a) Calibração do Kitasato



(b) Preparação da amostra de mistura na bandeja



(c) Colocação da amostra no Kitasato



(d) Preenchimento com água



(e) Colocação do conjunto no agitador, aplicação de vácuo e detalhe de desprendimento de ar pela aplicação de vácuo



(f) Pesagem final

Figura 5.6 Exemplo de procedimento para determinação da *G_{mm}* em laboratório

(Fotos: Marques, 2004)

Para a realização do ensaio pesa-se, inicialmente, 1.500g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 12,5mm) em um recipiente de massa conhecida. Em seguida, ele é preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique coberta. É então aplicada uma pressão de vácuo residual no recipiente de 30mmHg (aplicação de 730mmHg), por um período de 15 minutos, a fim de expulsar o ar existente entre os agregados recobertos pelo filme de ligante, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 5.7.

Observe-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 do ar entre os grumos (Figura 5.7).

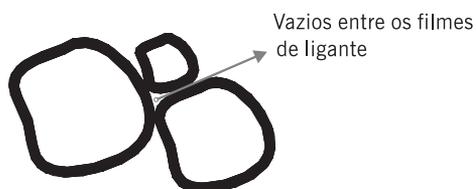


Figura 5.7 Ilustração dos vazios existentes entre os agregados recobertos ou entre os grumos

Após o período de vácuo, é restabelecida a pressão ambiente no recipiente. Completa-se então com água o volume do recipiente. O conjunto (recipiente, mistura asfáltica e água) é imerso em banho térmico para obtenção de equilíbrio de temperatura e posteriormente pesado, conforme indica a seqüência da Figura 5.8.



(a) Imersão do conjunto em banho térmico



(b) Pesagem do conjunto

Figura 5.8 Seqüência final do procedimento para determinação da *G_{mm}*

A vantagem do procedimento descrito é a obtenção da massa específica da mistura asfáltica sem a necessidade da obtenção das massas específicas dos seus constituintes separadamente, além de já considerar a absorção de ligante pelos agregados.

A G_{mm} é determinada pela expressão 5.5, devidamente ilustrada na Figura 5.9:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \times 0,9971 \quad (5.5)$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar, g;

B = massa do recipiente com volume completo com água, g;

C = massa do recipiente + amostra submersa em água, g.

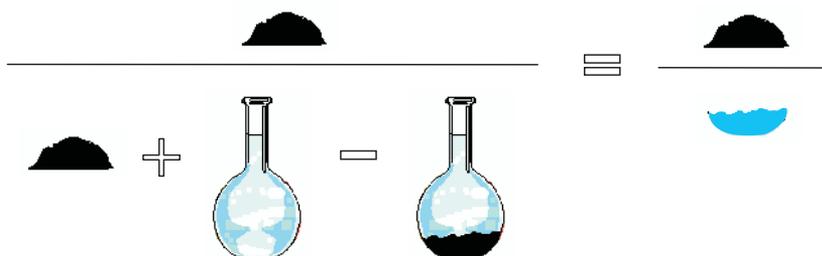


Figura 5.9 Massas consideradas para o cálculo da G_{mm}

Massa específica máxima medida – procedimento com querosene

O ensaio proposto por Castro Neto (1996) para obtenção da G_{mm} foi concebido visando criar um método em que o ar dos vazios fosse expulso 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 laboratórios de obras. O método substituiu o vácuo utilizado na norma ASTM D 2041 pela introdução de querosene como líquido de imersão da mistura asfáltica.

Um resumo do procedimento realizado em laboratório para a determinação da G_{mm} de misturas asfálticas através do método proposto por Castro Neto (1996) é o seguinte:

- determinar a massa do picnômetro (\mathcal{P});
- completar o picnômetro com querosene com auxílio do bico e determinar a massa do picnômetro completo com querosene (\mathcal{P}_1) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- determinar a massa do picnômetro completado com água destilada (\mathcal{P}_2) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- adicionar aproximadamente 1 litro de querosene no picnômetro e determinar a massa do conjunto (\mathcal{P}_3) a qualquer temperatura;
- verter a mistura asfáltica lentamente dentro do picnômetro com querosene com o auxílio da espátula e funil. A quantidade mínima da amostra deve ser de 1.200g com diâmetro máximo de 19,1mm e sua temperatura deve estar próxima de 100°C;
- determinar a massa do conjunto (\mathcal{P}_4);
- realizar pequenos movimentos de rotação no conjunto e, logo após, agitar a amostra com uma haste para expulsão do ar existente nos vazios. Ao retirar a haste, limpá-la com a pisseta;

- completar o picnômetro com querosene, colocar a tampa e determinar a nova massa (P_5);
- imediatamente após a determinação da massa (P_5), agitar a mistura e determinar sua temperatura t com precisão de $0,5^\circ\text{C}$. É conveniente que a temperatura esteja entre $\pm 5^\circ\text{C}$ em relação à temperatura ambiente.

Após o procedimento descrito acima é possível calcular a massa específica máxima da mistura, $MEM(t)$, a uma dada temperatura através da expressão 5.6:

$$MEM(t) = \frac{(P_4 - P_3) \times (P_1 - P)}{(P_4 + P_1 - P_5 - P_3) \times (P_2 - P)} \quad (5.6)$$

A determinação da massa específica máxima a 25°C , $MEM(25^\circ\text{C})$, é dada por:

$$MEM(25^\circ\text{C}) = \frac{MEM(t)}{[1 + (3,783 \times 10^{-5} \times (25 - t))]} \quad (5.7)$$

Para a utilização dessa fórmula, Castro Neto (1996) admitiu que a variação volumétrica por cm^3 por $^\circ\text{C}$ de uma amostra com 5% de ligante seja de $3,783 \times 10^{-5} \text{cm}^3$, conforme ASTM D 2041. A $MEM(25^\circ\text{C})$ é igual à Gmm (expressão 5.8) e é obtida pelo procedimento descrito anteriormente.

$$Gmm = \frac{MEM(25^\circ\text{C})}{0,9971} \quad (5.8)$$

A calibração do picnômetro é um passo indispensável para a boa aproximação dos resultados. A massa 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 5.10. Quanto menor o diâmetro, mais precisas serão as leituras, porém é importante que o diâmetro permita colocação do material líquido com uma pipeta.



Figura 5.10 Tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido

Castro Neto (1996) verificou que durante a execução dos ensaios o querosene desestrutura qualquer grumo de ligante e agregado, fazendo com que a quase totalidade do ar dos vazios seja expulsa logo no primeiro contato entre esses constituintes. Isso pode ser explicado também pelo fato de a temperatura de execução do ensaio atingir cerca de 100°C, facilitando essa desestruturação. Como o querosene é diluente do asfalto, o ensaio deve ser realizado em curto espaço de tempo de modo a evitar a total desestruturação que levaria à mesma inconsistência da determinação da *DMT* pela ponderação das massas específicas reais, conforme ilustrado na Figura 5.5(a). A total desestruturação dos grumos faz com que os vazios permeáveis existentes entre agregado e ligante, ilustrados na Figura 5.5(b), sejam preenchidos com querosene, modificando assim o volume considerado na determinação da *Gmm*.

5.2.3 Considerações sobre a volumetria de misturas asfálticas

Segundo Roberts *et al.* (1996), uma compreensão básica da relação massa-volume de misturas asfálticas compactadas é importante tanto do ponto de vista de um projeto de mistura quanto do ponto de vista da construção em campo. É importante compreender que o projeto de mistura é um processo volumétrico cujo propósito é determinar o volume de asfalto e agregado requerido para produzir uma mistura com as propriedades projetadas. Entretanto, medidas do volume de agregados e asfalto no laboratório ou em campo são muito difíceis. Por essa razão, para simplificar o problema de medidas, massas são usadas no lugar de volumes e a massa específica é usada para converter massa para volume.

Dois parâmetros muito importantes são os vazios na mistura total (VTM) ou vazios de ar na mistura asfáltica compactada (no Brasil comumente chamado simplesmente de volume de vazios ou V_v) e o volume de vazios nos agregados minerais (VAM), que representa o que não é agregado numa mistura, ou seja, vazios com ar e asfalto efetivo (descontado o asfalto que foi absorvido pelo agregado). A Figura 5.11 ilustra esses volumes e ainda os vazios cheios com betume (VCB), que diz respeito tanto ao asfalto disponível para a mistura como àquele absorvido, e a relação betume-vazios, dada pela razão Asfalto Efetivo/VAM.

O cálculo acurado desses volumes é influenciado pela absorção parcial do asfalto pelo agregado. Se o asfalto não é absorvido pelo agregado, o cálculo é relativamente direto e a massa específica aparente (G_{sb}) do agregado pode ser usada para calcular o volume de agregado. Se a absorção do asfalto é idêntica à absorção de água como definido pela ASTM C 127 ou C 128, o cálculo é relativamente direto e a massa específica real (G_{sa}) pode ser usada para calcular o volume de agregados. Visto que quase todas as misturas têm absorção parcial de asfalto, os cálculos são menos diretos como explicado adiante.

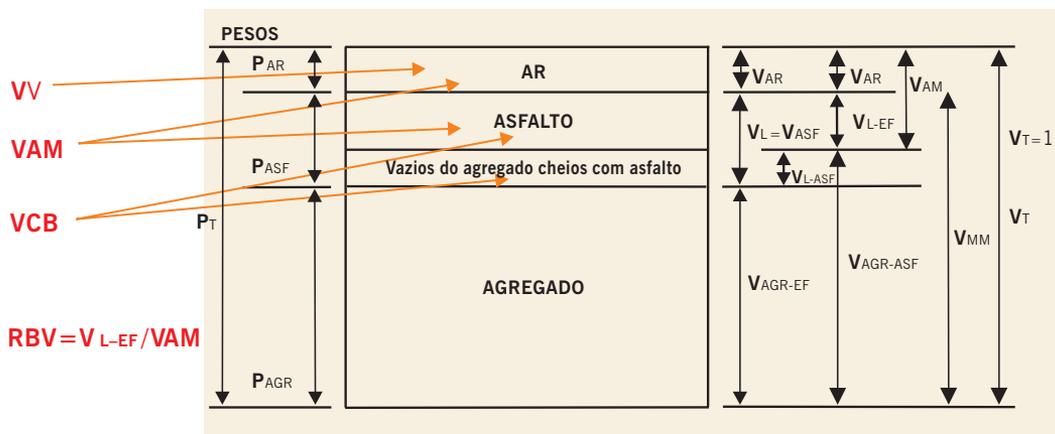


Figura 5.11 Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica

5.3 MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

O primeiro procedimento de dosagem documentado para misturas asfálticas é conhecido como método Hubbard-Field. Ele foi originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia e asfalto (composta por agregados miúdos e ligante, conforme descrito no Capítulo 4) e posteriormente modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos (Asphalt Institute, 1956). Segundo Roberts *et al.* (1996), entre 1940 e metade da década de 1990, 75% dos departamentos de transportes norte-americanos utilizavam o método Marshall e 25% o método Hveem. A partir de então foi introduzido o método Superpave que vem gradativamente substituindo os outros dois. No Brasil tem-se utilizado principalmente o método Marshall, ou suas variações, tendo o uso do método Superpave sido mais restrito a pesquisas no âmbito das universidades do país.

A norma DNER-ME 43/95, que trata do método de dosagem Marshall, recomenda o esforço de compactação de 50 golpes para pressão de pneu até 7kgf/cm² e de 75 golpes para a pressão de 7kgf/cm² a 14kgf/cm². Não há, na norma, nenhuma recomendação com relação à frequência de aplicação dos golpes. Esse aspecto se verifica, também, na norma da ASTM D 5581 (ASTM, 2001), assim como nas especificações da AASHTO referentes ao método Marshall. A Figura 5.12 apresenta o compactador Marshall em sua forma manual e automática.

5.3.1 Dosagem Marshall – misturas densas

Segue uma explicação passo a passo do procedimento de determinação dos parâmetros gerados numa dosagem Marshall para concreto asfáltico usado em camada de rolamento; passos semelhantes valem para outras misturas a quente considerando as respectivas particularidades.

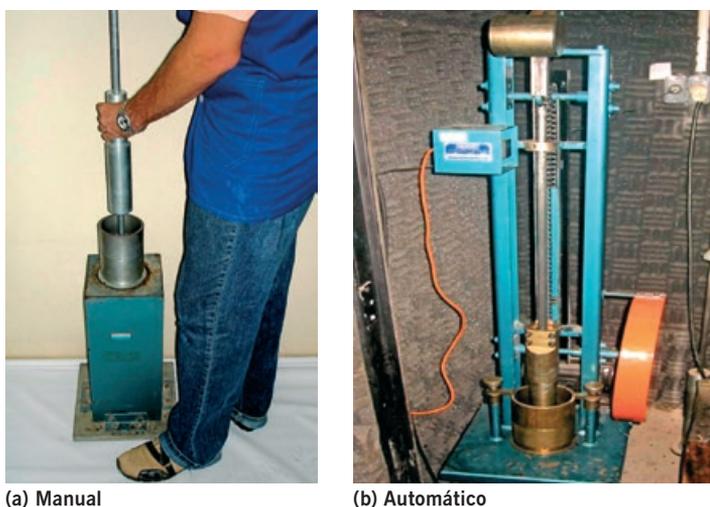


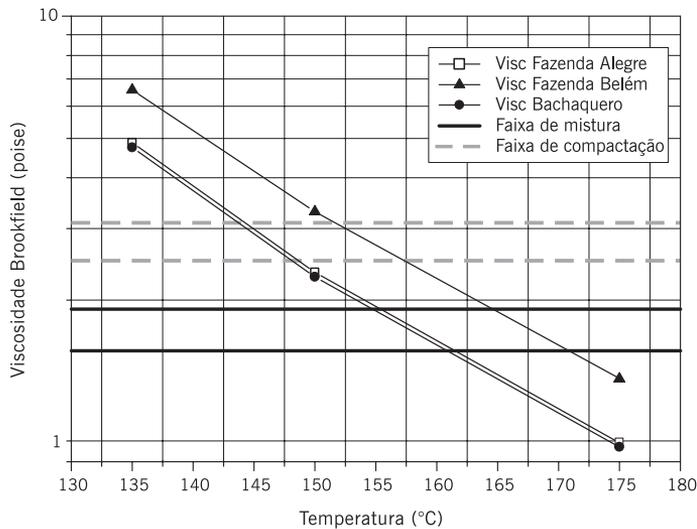
Figura 5.12 Exemplos de compactadores Marshall

1. Determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e dos agregados, conforme indicado nos Capítulos 2 e 3, respectivamente.
2. Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica (DNIT, Diretoria de Engenharia da Aeronáutica, órgãos estaduais ou municipais etc.).
3. Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida (Tabela 5.1). Ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura. Note-se que neste momento não se considera ainda o teor de asfalto, portanto, $\sum \%_n = 100\%$ (onde “n” varia de 1 ao número de diferentes agregados na mistura). A porcentagem-alvo na faixa de projeto corresponde à composição de agregados escolhida, podendo em campo variar entre um mínimo e um máximo em cada peneira de acordo com a especificação (Tabela 4.1 do Capítulo 4). Observe-se ainda que a porcentagem-alvo deve estar enquadrada dentro da faixa selecionada, como no exemplo da Tabela 5.1, a Faixa C do DNIT;

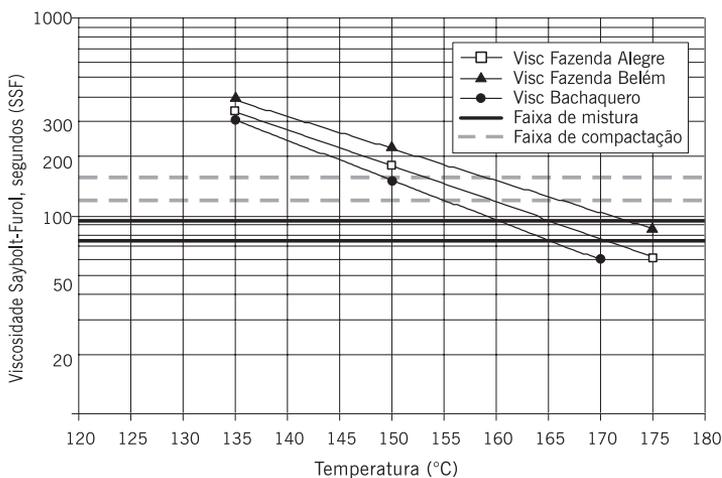
TABELA 5.1 EXEMPLO DA COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS
(números indicam percentual passante em cada peneira)

| Peneira | Brita 3/4" | Brita 3/8" | Pó-de-pedra | Areia de campo | Fíler | Faixa de projeto | | | Faixa C | |
|---------|------------|------------|-------------|----------------|-------|------------------|-------|-------|---------|-------|
| | 25% | 36% | 20% | 18% | 1% | %mín. | %alvo | %máx. | %mín. | %máx. |
| 3/4" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | | 100,0 | | | 100 |
| 1/2" | 72 | 100 | 100 | 100 | 100 | 86 | 93,1 | 100 | 80 | 100 |
| 3/8" | 33 | 98 | 100 | 100 | 100 | 76 | 82,6 | 90 | 70 | 90 |
| Nº 4 | 5 | 30 | 98 | 100 | 100 | 46 | 50,6 | 56 | 44 | 72 |
| Nº 10 | 3 | 6 | 82 | 99 | 100 | 33 | 38,0 | 43 | 22 | 50 |
| Nº 40 | 2 | 2 | 39 | 68 | 100 | 17 | 22,2 | 27 | 8 | 26 |
| Nº 80 | 1 | 1 | 21 | 41 | 100 | 10 | 13,1 | 16 | 4 | 16 |
| Nº 200 | 0 | 1 | 10 | 21 | 95 | 5 | 7,1 | 10 | 2 | 10 |

4. Escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido (Figura 5.13). A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou $0,17 \pm 0,02 \text{ Pa.s}$ se medida com o viscosímetro rotacional. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107°C nem superior a 177°C . A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177°C . A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de 125 a 155SSF ou $0,28 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$.



(a) Curva viscosidade (Brookfield) versus temperatura



(b) Curva viscosidade (Saybolt-Furol) versus temperatura

Figura 5.13 Exemplos de curvas de viscosidade obtidas em diferentes viscosímetros e faixas de mistura e compactação

5. Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de CPs a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo 3 CPs. Conforme a experiência do projetista, para a granulometria selecionada, é sugerido um teor de asfalto (T , em %) para o primeiro grupo de CPs. Os outros grupos terão teores de asfalto acima ($T+0,5\%$ e $T+1,0\%$) e abaixo ($T-0,5\%$ e $T-1,0\%$). Os CPs são moldados conforme indica a seqüência da Figura 5.14.



(a) Adição de asfalto aos agregados



(b) Homogeneização da mistura



(c) Colocação da mistura no molde



(d) Compactação da mistura



(e) Extração do corpo-de-prova do molde



(f) Medidas das dimensões do corpo-de-prova

Figura 5.14 Moldagem de corpos-de-prova tipo Marshall em laboratório

6. Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos-de-prova, obtêm-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura). Determinam-se para cada corpo-de-prova suas massas seca (M_S) e submersa em água (M_{Ssub}). Com estes valores é possível obter a massa específica aparente dos corpos-de-prova (G_{mb}), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (D_{MT}), vai permitir obter as relações volumétricas típicas da dosagem. Estas relações volumétricas serão mostradas no passo 9.
7. A partir do teor de asfalto do grupo de CPs em questão ($\%a$), ajusta-se o percentual em massa de cada agregado, ou seja, $\%n = \%n^* \times (100\% - \%a)$, onde $\%n^*$ é o percentual em massa do agregado “n” na mistura asfáltica já contendo o asfalto. Note-se que enquanto $\Sigma \%n^* = 100\%$, após o ajuste, $\Sigma \%n = 100\% - \%a$, conforme exemplo da Tabela 5.2.

TABELA 5.2 AJUSTE DO PERCENTUAL EM MASSA DOS AGREGADOS EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO (por simplificação são mostrados apenas quatro teores)

| Teor de asfalto, % | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| Brita 3/4", % | 23,625 | 23,500 | 23,375 | 23,250 |
| Brita 3/8", % | 34,020 | 33,840 | 33,660 | 33,480 |
| Areia de campo, % | 18,900 | 18,800 | 18,700 | 18,600 |
| Pó-de-pedra, % | 17,010 | 16,920 | 16,830 | 16,740 |
| Fíler, % | 0,945 | 0,940 | 0,935 | 0,930 |

8. Com base em $\%n$, $\%a$, e nas massas específicas reais dos constituintes (G_i), calcula-se a D_{MT} correspondente ao teor de asfalto considerado ($\%a$) usando-se a expressão 5.4 anteriormente apresentada, conforme exemplo da Tabela 5.3;

TABELA 5.3 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS CONSTITUINTES (g/cm³) E DMT DA MISTURA EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO

| Constituintes | Brita 3/4" | Brita 3/8" | Areia de campo | Pó-de-pedra | Fíler | Asfalto |
|--|------------|------------|----------------|-------------|-------|---------|
| Massa específica real, g/cm ³ | 2,656 | 2,656 | 2,645 | 2,640 | 2,780 | 1,0268 |

| Teor de asfalto, % | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| DMT | 2,439 | 2,422 | 2,404 | 2,387 |

9. Cálculo dos parâmetros de dosagem para cada CP, conforme expressões 5.9 e 5.10, e exemplo da Tabela 5.4:

$$\text{Volume dos corpos-de-prova: } V = M_S - M_{Ssub} \quad (5.9)$$

$$\text{Massa específica aparente da mistura: } G_{mb} = \frac{M_S}{V} \quad (5.10)$$

TABELA 5.4 CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA DAS MISTURAS COMPACTADAS
(por simplificação são mostrados apenas dois corpos-de prova, quando devem ser usados três para cada teor de asfalto)

| Teor de asfalto, % | 5,5 | | 6,0 | | 6,5 | | 7,0 | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| M_S , g | 1184,3 | 1180,2 | 1185,0 | 1184,4 | 1184,0 | 1188,1 | 1188,0 | 1183,4 |
| M_{Ssub} , g | 676,8 | 673,7 | 679,2 | 679,7 | 677,8 | 682,0 | 680,0 | 678,0 |
| Volume, cm ³ | 507,5 | 506,5 | 505,8 | 504,7 | 506,2 | 506,1 | 508,0 | 505,4 |
| G_{mb} , g/cm ³ | 2,334 | 2,330 | 2,343 | 2,347 | 2,339 | 2,348 | 2,339 | 2,342 |
| G_{mb} médio, g/cm ³ | 2,332 | | 2,345 | | 2,343 | | 2,340 | |

Os parâmetros volumétricos a seguir devem ser sempre calculados com valores de G_{mb} médio de três corpos-de-prova:

$$\text{Volume de vazios: } V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (5.11)$$

$$\text{Porcentagem em massa dos agregados: } \sum \%n = 100 - \%a \quad (5.12)$$

$$\text{Vazios do agregado mineral: } V_{AM} = 100 - \left(\frac{G_{mb} \times \sum \%n}{G_{sb}} \right) \quad (5.13)$$

$$\text{Relação betume/vazios: } RBV = 100 \times \left(\frac{V_{AM} - V_v}{V_{AM}} \right) \quad (5.14)$$

10. Após as medidas volumétricas, os corpos-de-prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos, conforme Figura 5.15(a). Retira-se cada corpo-de-prova colocando-o imediatamente dentro do molde de compressão – Figura 5.15(b). Determinam-se, então, por meio da prensa Marshall ilustrada na Figura 5.16(a), os seguintes parâmetros mecânicos resultantes da curva obtida na Figura 5.16(b):

- *estabilidade (N)*: carga máxima a qual o corpo-de-prova resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8mm/segundo);
- *fluência (mm)*: deslocamento na vertical apresentado pelo corpo-de-prova correspondente à aplicação da carga máxima.

No Brasil, grande parte dos laboratórios dispõe de prensas Marshall que usam anel dinamométrico para leitura da carga e um medidor mecânico de fluência, não permitindo a obtenção da curva mostrada na Figura 5.16(b), tendo, portanto, pouca precisão na determinação dos parâmetros.



(a) Corpos-de-prova submersos em água a 60°C

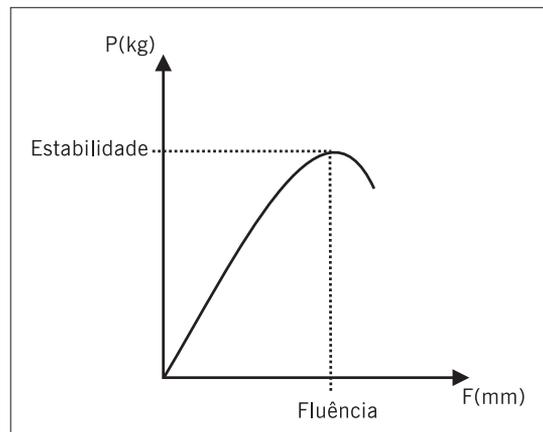


(b) Molde de compressão

Figura 5.15 Exemplo de corpos-de-prova submersos em banho-maria e molde de compressão



(a) Prensa Marshall



(b) Curva resultante do ensaio

Figura 5.16 Exemplo de equipamento de ensaio de estabilidade Marshall

Com todos os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, são plotadas seis curvas em função do teor de asfalto que podem ser usadas na definição do teor de projeto. A Figura 5.17 apresenta essas curvas com os dados do exemplo discutido.

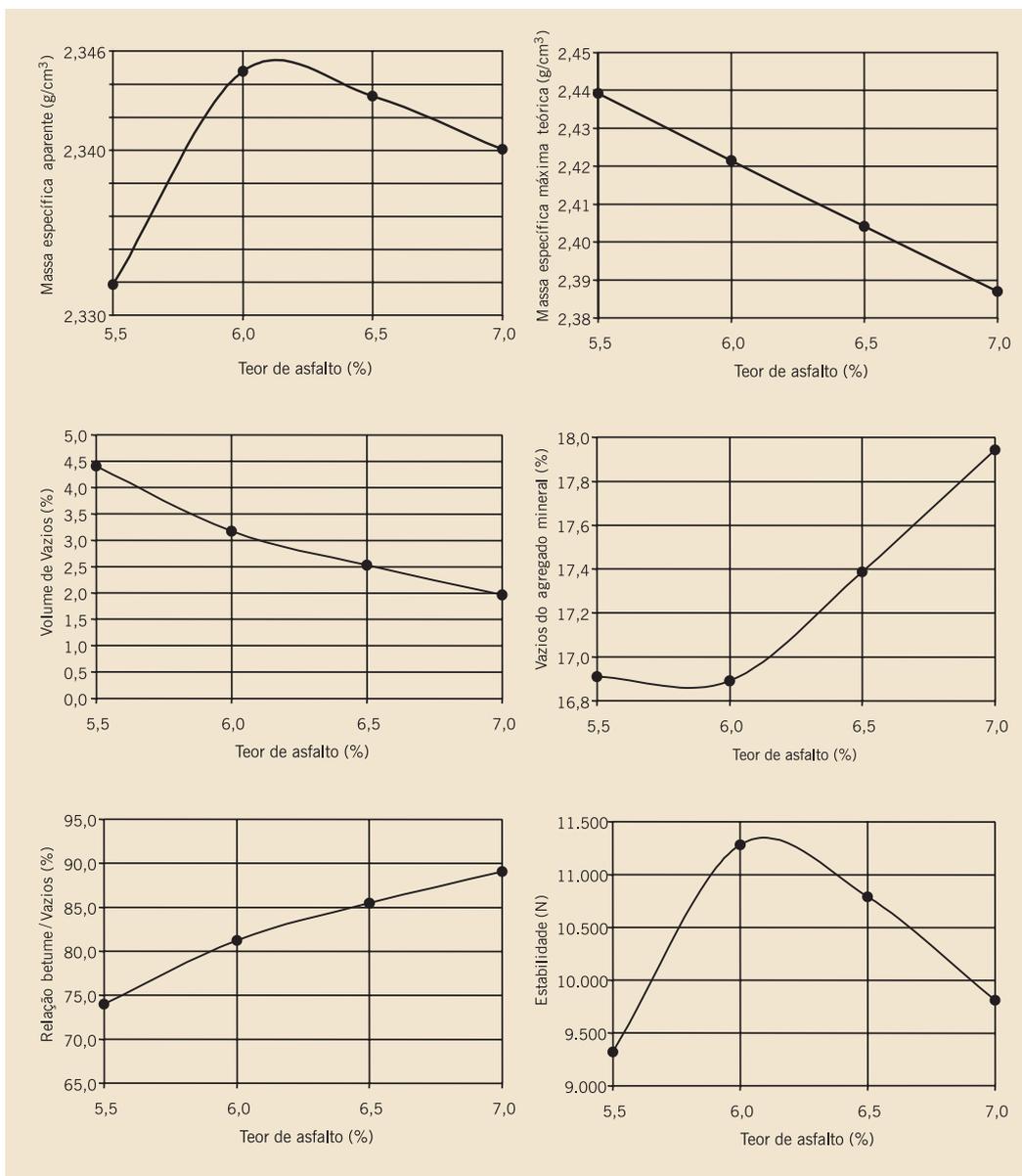


Figura 5.17 Exemplos de curvas dos parâmetros determinados na dosagem Marshall

Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico

O método de dosagem Marshall pode apresentar diversas alternativas para escolha do teor de projeto de ligante asfáltico. Segundo Napa (1982), a escolha do teor de asfalto primordialmente para camadas de rolamento em concreto asfáltico é baseada somente no volume de vazios (Vv), correspondente a 4%, ou o Vv correspondente à média das especificações. No Brasil, a escolha do teor de projeto correspondente a um Vv de 4% também é adotada no estado de São Paulo pela Dersa. Observa-se distinção de procedimentos para definição do teor de projeto dependendo do órgão, empresa ou instituto

de pesquisa. É comum também a escolha se dar a partir da estabilidade Marshall, da massa específica aparente e do Vv. Nesse caso, o teor de projeto é uma média de três teores, correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, à massa específica aparente máxima da amostra compactada e a um Vv de 4% (ou média das especificações).

Ainda outra forma de se obter o teor de projeto é fazendo uso somente de dois parâmetros volumétricos, Vv e RBV, o que é mostrado a seguir.

Os parâmetros determinados no passo 10 são correspondentes a cada CP. Os valores de cada grupo são as médias dos valores dos CPs com o mesmo teor de asfalto (Figura 5.18).

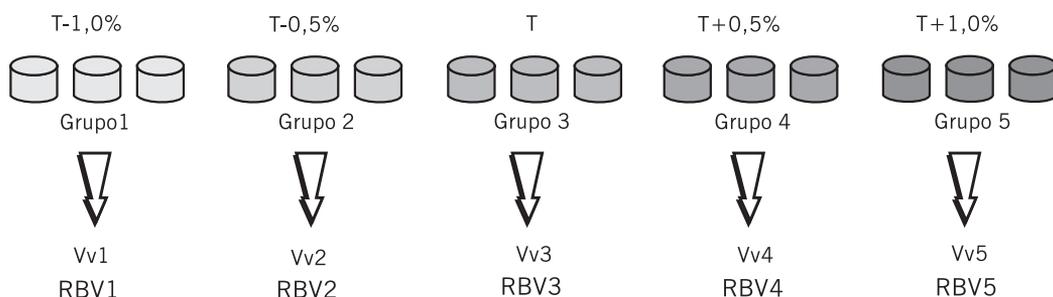


Figura 5.18 Representação esquemática dos grupos de corpos-de-prova

Pode-se então selecionar o teor de projeto a partir dos parâmetros de dosagem Vv e RBV. Com os cinco valores médios de Vv e RBV obtidos nos grupos de corpos-de-prova é possível traçar um gráfico (Figura 5.19) do teor de asfalto (no eixo “x”) versus Vv (no eixo “y1”) e RBV (no eixo “y2”). Adicionam-se então linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros.

O gráfico deve conter ainda os limites específicos das duas variáveis, indicados pelas linhas tracejadas, e apresentados na Tabela 5.5. A partir da interseção das linhas de tendência do Vv e do RBV com os limites respectivos de cada um destes parâmetros, são determinados quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4). O teor ótimo é selecionado tomando a média dos dois teores centrais, ou seja, teor ótimo = $(X2 + X3)/2$.

TABELA 5.5 EXEMPLOS DE LIMITES DE Vv E RBV PARA DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

| Faixas | Vv (%) | | RBV (%) | |
|----------------------------|--------|-----|---------|-----|
| | Mín | Máx | Mín | Máx |
| A (DNIT 031/2004) | 4 | 6 | 65 | 72 |
| B e C (DNIT 031/2004) | 3 | 5 | 75 | 82 |
| 3 (Aeronáutica, rolamento) | 3 | 5 | 70 | 80 |
| 7 (Aeronáutica, ligação) | 5 | 7 | 50 | 70 |

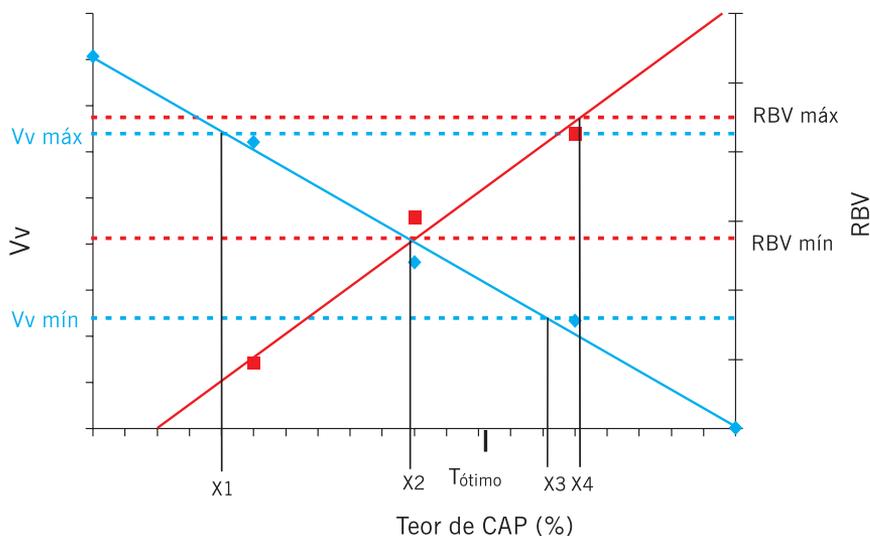


Figura 5.19 Teor de asfalto versus Vv e RBV

Para exemplificar o método, a Tabela 5.6 apresenta a escolha do teor de projeto de uma mistura de concreto asfáltico na faixa B do DNER com o CAP 30/45. Foi inicialmente escolhido um teor de asfalto de 5,0%. Os demais grupos foram dosados com 4,0%, 4,5%, 5,5% e 6,0%. Os valores dos parâmetros de dosagem apresentados são relativos às médias dos CPs de cada grupo. Na última linha da tabela é indicado o teor ótimo determinado através de um gráfico como o da Figura 5.19. O teor de projeto é dado por $(X2 + X3)/2$, onde $X1 = 4,4\%$, $X2 = 4,6\%$, $X3 = 5,4\%$ e $X4 = 5,5\%$.

TABELA 5.6 RESULTADOS DA DOSAGEM

| Teores de asfalto, % | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| G_{mb} , g/cm ³ | 2,350 | 2,356 | 2,371 | 2,369 | 2,380 |
| Vv, % | 5,837 | 4,907 | 3,603 | 2,967 | 1,805 |
| VAM, % | 15,0 | 15,2 | 15,1 | 15,7 | 15,7 |
| RBV, % | 61,1 | 67,8 | 76,2 | 81,1 | 88,5 |
| Teor de projeto, % | 5,0 | | | | |

Ressalte-se que os critérios convencionais volumétricos não garantem que o teor de projeto, dito “ótimo”, corresponda necessariamente ao melhor teor para todos os aspectos do comportamento de uma mistura asfáltica. Com a disseminação dos métodos mecânicos de dimensionamento, recomenda-se que numa dosagem racional a mistura seja projetada para um determinado nível de resistência à tração (RT) e de módulo de resiliência (MR), de maneira que os conjuntos de tensões nas camadas que compõem a estrutura do pavimento não venham a diminuir a vida útil do pavimento. Estes outros parâmetros mecânicos são discutidos no Capítulo 6.

A Tabela 5.7 mostra, como exemplo, os requisitos exigidos pela especificação DNIT-ES 031/2004 para serviços de concreto asfáltico a serem usados em revestimentos de pavimentos e que compõem os parâmetros a serem atendidos na dosagem de laboratório e no campo. Atente para o fato de que nesta especificação recente o parâmetro de RT já faz parte das exigências a serem atendidas na dosagem, talvez ainda discriminada a RT de forma não adequada, visto que só é definido um valor mínimo para este parâmetro e ainda associado à presença do parâmetro estabilidade.

TABELA 5.7 REQUISITOS DE DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO DO DNIT-ES 031/2004)

| Características | Método de ensaio | Camada de rolamento | Camada de ligação |
|------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Vv, % | DNER-ME 043 | 3 – 5 | 4 – 6 |
| RBV, % | DNER-ME 043 | 75 – 82 | 65 – 72 |
| Estabilidade mín., kgf (75 golpes) | DNER-ME 043 | 500 | 500 |
| RT a 25°C, mín., MPa | DNER-ME 138 | 0,65 | 0,65 |

5.3.2 Considerações finais sobre a dosagem Marshall

É importante considerar que a dosagem Marshall, realizada normalmente no país, segue as orientações da norma do DNER e que esta, embora parecida com a da ASTM e com os procedimentos recomendados pelo Instituto de Asfalto norte-americano, não foi talvez atualizada de acordo com as mudanças ocorridas nas citadas normas estrangeiras ao longo de revisões sucessivas, em pelo menos dois pontos importantes:

- a consideração da absorção de ligante pelos agregados e o uso da massa seca com superfície saturada;
- o uso de fórmula para cálculo da DMT. Na ASTM e no Instituto de Asfalto só se utiliza a *Gmm*, o que já leva em conta a absorção dos agregados e tem interferência muito grande nas determinações das relações volumétricas.

Assim, julgam os autores que há necessidade de se modificar as normas do ensaio Marshall de dosagem de concreto asfáltico urgentemente para adaptá-la ao padrão ASTM que é também o padrão usado em muitos outros países, nestes aspectos comentados e em outros. O uso do método Rice para a determinação da DMT foi objeto de pesquisa no IPR nas décadas de 1960 e 1970. Julgou-se na época que o ensaio não tinha repetibilidade adequada. Porém é importante considerar que houve uma grande evolução dos equipamentos usados neste ensaio especialmente no caso do vácuo e das balanças e atualmente a repetibilidade do método como descrito na ASTM 2041 (2000) é bastante satisfatória e evita a necessidade de se medir repetidas vezes as densidades dos agregados das várias frações e a absorção de água que não estima corretamente a absorção dos ligantes.

Também, apesar da existência de normas ABNT e DNER padronizando o método Marshall, há ainda uma dispersão significativa em seus resultados, e entre os diversos fatores

que causam esta dispersão, citam-se a forma de compactação dos corpos-de-prova, as características dos equipamentos usados e as condições operacionais do processo, o que caracteriza ainda uma variabilidade de resultados sob condições idênticas de materiais (Coelho e Sória, 1992). Motta (1998) relata algumas críticas relativas ao método Marshall. Entre elas, a pouca representatividade do método de compactação em relação ao campo e a grande influência na determinação do teor de projeto derivada de fatores ligados à preparação dos corpos-de-prova (tipo de soquete, formas de apoio etc.).

Francken *et al.* (1997) comentam que em um importante estudo interlaboratorial realizado em nível internacional pela RILEM, verificou-se uma variação entre 5,4 e 6,8% de teor de projeto determinado através do método de dosagem Marshall, para uma mesma mistura testada. Uma comparação entre os resultados dos diversos laboratórios envolvidos no estudo e o laboratório de referência apresentou considerável diferença, demonstrando assim que na utilização do método Marshall os procedimentos de trabalho dos laboratórios não são sempre semelhantes. Concluem que há necessidade de estar sempre se revendo normas, definições, equipamentos, procedimentos de preparação de amostras, calibrações e interpretações de resultados, de forma a retreinar os técnicos e melhorar a reprodutibilidade e a confiança nos resultados. Outro fator relevante nesse processo é o reduzido número de corpos-de-prova exigidos pela norma (mínimo de três), impossibilitando assim qualquer análise estatística dos resultados.

Na concepção do método Marshall, a compactação manual foi a única utilizada. Posteriormente, a compactação automática foi desenvolvida, poupando esforço do operador (Kandhal e Koehler, 1985), e também evitando sua influência durante a aplicação dos golpes. No entanto já foi constatado que geralmente corpos-de-prova compactados manualmente apresentam densidades maiores do que corpos-de-prova compactados automaticamente. Para levar em conta a diferença entre os resultados da compactação manual e automática, o método da AASHTO requer que quando do uso de compactação automática, que esta seja calibrada para que os resultados sejam comparáveis aos da compactação manual (Kandhal e Koehler, 1985).

No estudo de Aldigueri *et al.* (2001), utilizando o mesmo procedimento e apenas variando a forma de compactação, obteve-se uma diferença de 0,6% no teor de projeto para uma mesma mistura analisada. O fator de maior influência na diferença entre os dois tipos de compactação foi a frequência de aplicação dos golpes. Corpos-de-prova compactados na mesma frequência (1Hz), tanto no procedimento manual como no automático, apresentam densidades aparentes semelhantes. Os corpos-de-prova compactados manualmente e com frequências mais altas apresentaram densidades aparentes maiores. No intervalo de frequências utilizadas no referido estudo verificou-se uma diferença absoluta de até 1,43% de Vv entre os corpos-de-prova compactados com maior e menor frequência. Os autores recomendam que, para garantir maior uniformidade entre os resultados de dosagem Marshall, deve-se estipular o tempo de compactação quando da utilização de compactação manual, e utilizar-se sempre que possível a compactação automática para eliminar a possível interferência ocasionada pelo ritmo de compactação imposto pelo operador.

Reforça-se também a necessidade de se explorar melhor a granulometria dos agregados disponíveis além de se dosar cada mistura em função do asfalto escolhido e da estrutura na qual será empregada. Para um bom projeto é preciso compatibilizar as características do concreto asfáltico com toda a estrutura do pavimento, o que não é garantido quando se obtém o teor de projeto a partir de requisitos tradicionais. Recomenda-se, durante a dosagem, testar as misturas com ensaios tais como RT, MR e fadiga. Mais forte ainda deve ser o alerta quanto à necessidade de fiscalização no campo, tanto nas usinas quanto na pista, pois todo sucesso de qualquer projeto passa pela fabricação e aplicação correta da mistura.

5.3.3 Dosagem Superpave

A maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos Estados Unidos entre 1940 e 1990 foi dosada utilizando a metodologia Marshall ou Hveem (Roberts *et al.*, 1996). Desde 1993, porém, as universidades e departamentos de transporte norte-americanos vêm utilizando a metodologia Superpave, ainda em fase de testes no Brasil. Na pesquisa SHRP várias mudanças foram realizadas. Foi proposta uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis.

A maior diferença entre este novo procedimento e o Marshall é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros) – Figura 5.1(d) e (e).

Outra diferença que pode ser citada entre os dois processos é a forma de escolha da granulometria da mistura de agregados. A metodologia Superpave incluiu os conceitos de pontos de controle e zona de restrição, conforme mencionado no Capítulo 4. Teoricamente, pareceria razoável que a melhor graduação para os agregados nas misturas asfálticas fosse aquela que fornecesse a graduação mais densa. A graduação com maior densidade acarreta uma estabilidade superior através de maior contato entre as partículas e reduzidos vazios no agregado mineral. Porém, é necessária a existência de um espaço de vazios tal que permita que um volume suficiente de ligante seja incorporado. Isto garante durabilidade e ainda permite algum volume de vazios na mistura para evitar exsudação.

Vários investigadores propuseram faixas granulométricas para a densidade máxima. A mais conhecida é a curva de Fuller proposta por Fuller e Thompson em 1907 cuja expressão é:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (5.15)$$

Onde:

P = porcentagem de material que passa na peneira de diâmetro d ;

d = diâmetro da peneira em questão;

D = tamanho máximo do agregado, definido como uma peneira acima do *tamanho nominal máximo*, sendo este último definido como o tamanho de peneira maior que a primeira peneira que retém mais que 10% de material.

Os estudos de Fuller mostraram que a granulometria de densidade máxima pode ser obtida para um agregado quando $n = 0,50$. Na década de 1960, a Federal Highway Administration dos Estados Unidos adotou o expoente como 0,45.

Graficamente, a granulometria é mostrada num eixo cuja ordenada é a porcentagem que passa e a abscissa é uma escala numérica da razão “tamanhos de peneira/tamanho máximo do agregado”, elevada à potência de 0,45 (ou somente “tamanho da peneira” elevado a 0,45). A granulometria de densidade máxima é uma linha reta que parte da origem e vai até o ponto do tamanho máximo do agregado – Figura 5.20(a). Uma granulometria que repouse sobre ou próxima a esta linha não permitirá a incorporação de um volume adequado de ligante.

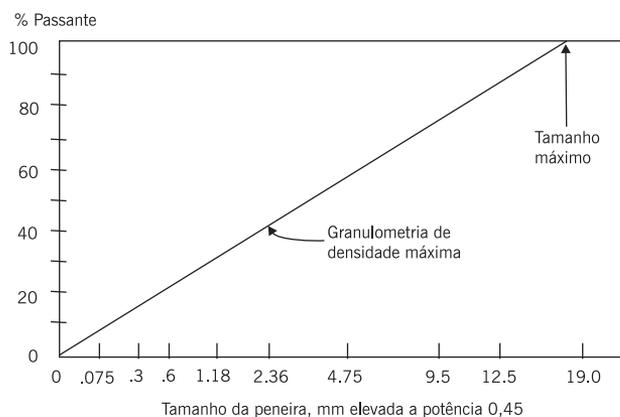
Nas especificações Superpave para granulometria dos agregados foram acrescentadas duas características ao gráfico de potência 0,45: (a) pontos de controle e (b) zona de restrição:

- os pontos de controle funcionam como pontos mestres onde a curva granulométrica deve passar. Eles estão no tamanho máximo nominal, um no tamanho intermediário (2,36mm) e um nos finos (0,075mm);
- a zona de restrição (ZR) repousa sobre a linha de densidade máxima e nas peneiras intermediárias (4,75mm ou 2,36mm) e no tamanho 0,3mm. Forma uma região na qual a curva não deve passar. Granulometrias que violam a zona de restrição possuem esqueleto pétreo frágil, que dependem muito do ligante para terem resistência ao cisalhamento. Estas misturas são muito sensíveis ao teor de ligante e podem facilmente deformar. As especificações Superpave recomendam, mas não obrigam, que as misturas possuam granulometrias abaixo da zona de restrição.

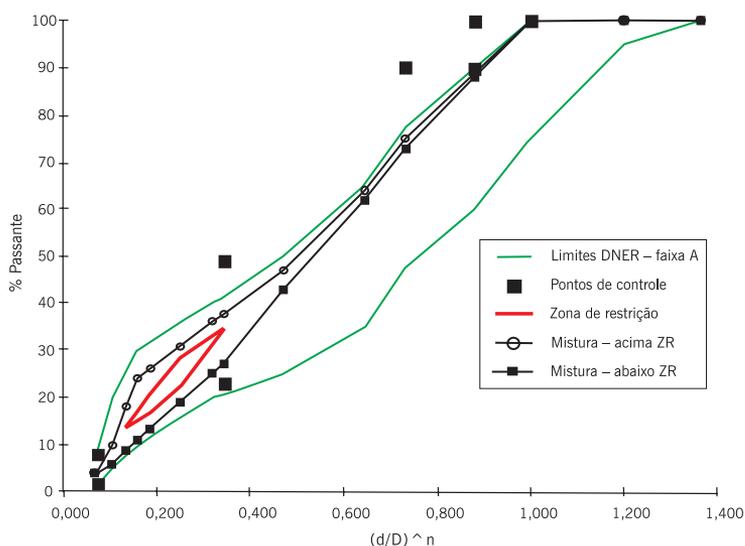
Embora as zonas de restrição não façam mais parte das especificações Superpave, a Figura 5.20(b) ilustra um exemplo com os limites da Faixa A de concreto asfáltico do DNIT – Tabela 4.1, duas curvas granulométricas enquadradas nesta faixa, os respectivos pontos de controle e zona de restrição, relativos às duas misturas, ambas com tamanho máximo nominal igual a 19mm (3/4”).

O tamanho do molde a ser utilizado na dosagem Superpave é um aspecto importante. O molde de 150mm de diâmetro é o requerido nas especificações Superpave, porém o Compactador Giratório Superpave (CGS) também admite moldagem de corpos-de-prova com 100mm, conforme mostrado adiante. No estudo realizado por Jackson e Cozor (2003) não foi observada diferença significativa no percentual da massa específica máxima (%*Gmm*) para os corpos-de-prova moldados com o cilindro de 100 e 150mm. Os autores advertem que a adequação dos dois tamanhos de molde é limitada a misturas com tamanho máximo de agregado de 25,4mm, ou menor.

No procedimento Superpave-SHRP há três níveis de projeto de mistura dependendo do tráfego e da importância da rodovia, conforme indicado na Tabela 5.8. Dependendo do tráfego, o projeto de mistura pode estar completo após o projeto volumétrico (Nível 1). Valores de tráfego (número N) sugeridos como limites entre os diferentes níveis são 10^6 e 10^7 . Nos Níveis 2 e 3, ensaios baseados em desempenho são conduzidos para otimizar o projeto a fim de resistir a falhas como deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento à baixa temperatura.



(a) Granulometria de densidade máxima



(b) Exemplo de granulometria num gráfico com pontos de controle e zona de restrição

Figura 5.20 Exemplo de granulometria adequada à especificação Superpave

TABELA 5.8 ORGANIZAÇÃO HIERÁRQUICA DO MÉTODO SUPERPAVE

| Nível | 1 | 2 | 3 |
|------------|-------------|---|---|
| Critério | Volumétrico | Volumétrico Ensaio de previsão de desempenho a uma temperatura | Volumétrico Ensaio de previsão de desempenho a três temperaturas |
| N (AASHTO) | $< 10^6$ | 10^6 a 10^7 | $\geq 10^7$ |

O projeto de mistura é todo feito utilizando o CGS. Trata-se de um equipamento portátil e prático com boa repetibilidade e reprodutibilidade. Um exemplo de CGS padronizado pelo Superpave está ilustrado na Figura 5.21 e tem as seguintes características:

- ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$;
- taxa de 30 rotações por minuto;
- tensão de compressão vertical durante a rotação de 600kPa;
- capacidade de produzir corpos-de-prova com diâmetros de 150 e 100mm.

Certas características devem ser calibradas periodicamente. O item crítico de calibração é o sistema de medida de altura, normalmente obtido por meio de corpos-de-prova de referência de dimensões conhecidas. A célula de carga pode ser calibrada por meio de um anel ou outra célula de carga de precisão adequada e já calibrada. A velocidade de giro pode ser checada por medida de tempo da rotação sob número conhecido de revoluções. Outro item crítico é a calibração do ângulo de giro, que pode ser efetuada por vários meios que dependem do compactador. Um método de calibração do ângulo envolve o uso de transferidor digital que mede diretamente o desvio do ângulo de um local fixo. Outro método usa extensores precisos para medidas coletadas com molde a várias orientações. As medidas são usadas para cálculo do ângulo de giro. Em qualquer caso, o ângulo deve ser checado com o molde contendo o corpo-de-prova sob condições de carregamento.

Passo a passo para determinação do teor de projeto – Superpave

O primeiro passo do procedimento Superpave consiste na escolha de três composições granulométricas com os materiais à disposição. O passo seguinte é a compactação de corpos-de-prova (CGS) com um teor de tentativa para cada mistura (dois corpos-de-prova por mistura), obtido por meio de estimativas usando-se a massa específica efetiva

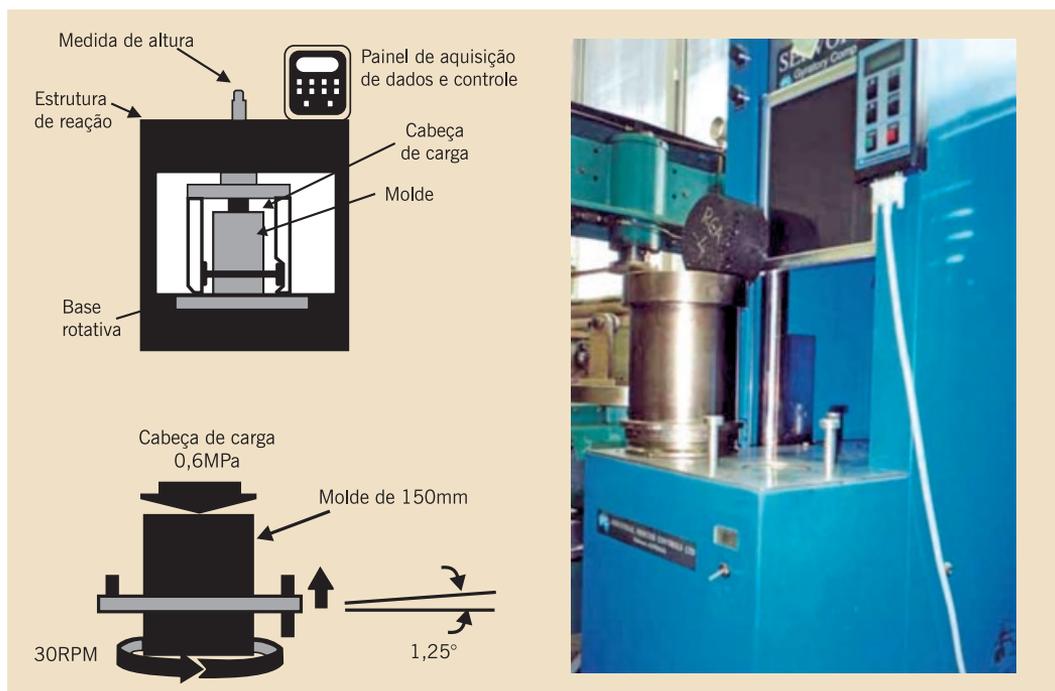


Figura 5.21 Ilustração esquemática e exemplo de compactador giratório Superpave (CGS)

dos agregados (Capítulo 3). Dessas misturas experimentais se obtêm as propriedades volumétricas (Vv, VAM e RBV) após a compactação dos corpos-de-prova no compactador giratório com o número de giros de projeto (determinado em função do tráfego, conforme visto mais adiante).

Além dos requisitos volumétricos tradicionais mencionados, verifica-se também a proporção pó/asfalto, que corresponde à razão entre o teor de material passante na peneira Nº 200 e o teor de ligante, parâmetro que deve estar entre 0,6 e 1,2. Considerações sobre o efeito desse parâmetro podem ser encontradas em Motta e Leite (2000).

A premissa principal do projeto de misturas Superpave Nível 1 (único abordado neste livro) é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros de projeto. Caso isto não ocorra nesta mistura experimental, faz-se uma estimativa por meio de fórmulas empíricas para saber qual teor de ligante deve ser usado para se atingir os 4% de vazios. Este teor calculado será o teor de ligante estimado para cada mistura. O procedimento Superpave faculta ao projetista escolher qual das misturas testadas, entre as três composições granulométricas, melhor atende às exigências volumétricas especificadas para o projeto.

A etapa seguinte da metodologia Superpave consiste da seleção do teor de ligante asfáltico de projeto. Para isto são confeccionados corpos-de-prova no teor de ligante estimado, conforme descrito anteriormente. Outros corpos-de-prova devem ser confeccionados considerando outros três teores, o teor estimado $\pm 0,5\%$ e $+1\%$. Os corpos-de-prova são novamente compactados no $N_{projeto}$ e as propriedades volumétricas correspondentes obtidas. O teor final de projeto é aquele que corresponde a um $Vv = 4\%$. O fluxograma da dosagem em questão é ilustrado na Figura 5.22, sendo os detalhes dos passos apresentados a seguir.

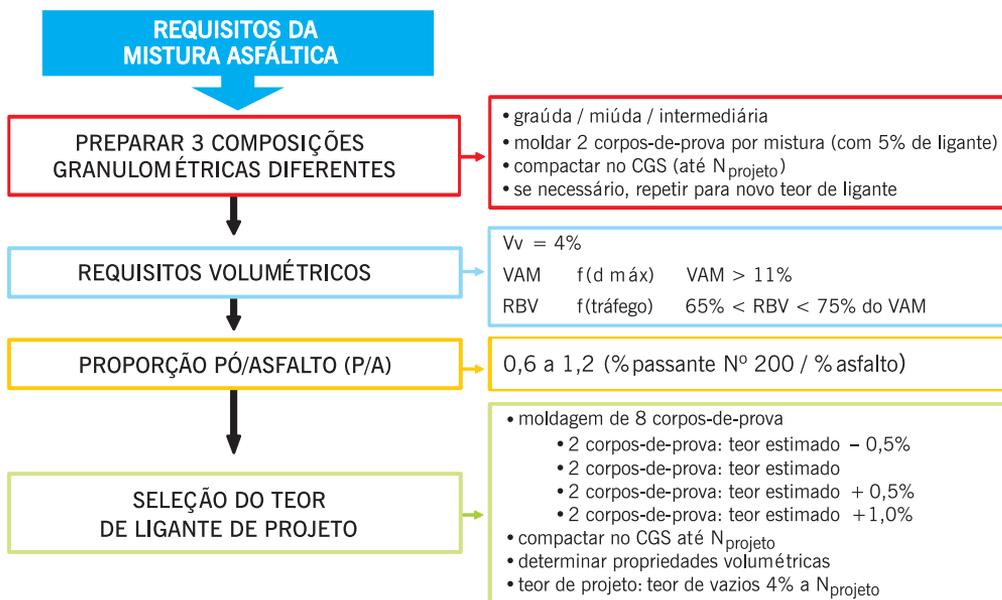


Figura 5.22 Fluxograma da dosagem Superpave

Determinação do teor de ligante inicial

No procedimento Superpave, para a definição do teor de asfalto (ligante) inicial de projeto utilizam-se expressões empíricas baseadas nos seguintes parâmetros: massas específicas aparente e real da composição de agregados, fator de absorção desta composição, percentual de agregados na mistura, V_v da mistura, massa específica do ligante e tamanho máximo nominal de peneira para a composição de agregados.

Considera-se que o teor de ligante inicial é aquele no qual os vazios dos agregados não absorvem mais ligante. Tal consideração implica que quantidades de ligante iguais ou maiores que este teor comporão uma mistura de agregados com massa específica efetiva constante. Conforme apresentado no Capítulo 3, a massa específica efetiva do agregado é a relação entre a massa seca do agregado e o volume da parte sólida deste grão mais o volume dos vazios preenchidos por asfalto.

O teor inicial de ligante é estimado de acordo com os seguintes cinco passos, sendo as grandezas definidas após a expressão 5.20.

- *Passo 1:* cálculo da massa específica efetiva da composição de agregados (G_{se}) considerando máxima absorção de ligante pelos vazios dos agregados:

$$G_{se} = G_{sb} + F_a \times (G_{sa} - G_{sb}) \quad (5.16)$$

- *Passo 2:* cálculo do volume de ligante absorvido (V_{la}). Neste passo precisa-se assumir um determinado teor de ligante, P_l , e um conseqüente teor de agregado, P_{ag} , ambos em massa:

$$V_{la} = \frac{P_{ag} \times (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (5.17)$$

- *Passo 3:* cálculo do volume de ligante efetivo (V_{le}):

$$V_{le} = 0,081 - 0,02931 \times \ln(TMN) \quad (5.18)$$

- *Passo 4:* cálculo da massa de agregado (M_{ag}):

$$M_{ag} = \frac{P_{ag} \times (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}}\right)} \quad (5.19)$$

- *Passo 5:* estimativa do teor de ligante inicial (P_{li}):

$$P_{li} = \left[\frac{G_l \times (V_{le} + V_{la})}{[G_l \times (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}]} \right] \times 100 \quad (5.20)$$

Onde:

M_{ag} = massa de agregado, g;

G_{sb} = massa específica aparente da composição de agregados, g/cm³;

G_{sa} = massa específica real da composição de agregados, g/cm³;

G_l = massa específica do ligante, g/cm³;

F_a = fator de absorção;

P_l = teor de ligante, % em massa (admitido para uma determinada faixa granulométrica, por exemplo, 5%);

P_{ag} = percentual de agregados na mistura, % em massa, dado por $(1 - P_l)$;

P_{li} = teor de ligante inicial, % em massa;

V_v = volume de vazios, %;

V_{la} = volume de ligante absorvido, %;

V_{le} = volume de ligante efetivo, %;

TMN = tamanho máximo nominal de peneira para a composição de agregados, polegadas.

A partir do valor da Gmm (ASTM D 2041), calcula-se a Gse da composição de agregados para o teor de ligante inicial estimado (expressão 5.21). Esta última é assumida constante, ou seja, independente do teor de ligante, e usada no cálculo das $Gmms$ dos demais teores pela expressão 5.22.

$$Gse = \frac{100 - P_l}{\frac{100}{Gmm} + \frac{P_l}{G_l}} \quad (5.21)$$

$$Gmm = \frac{100}{\frac{P_{ag}}{Gse} + \frac{P_l}{G_l}} \quad (5.22)$$

Determinação do teor de ligante de projeto

Realiza-se a compactação de dois CPs no teor de ligante inicial (P_{li}), bem como em mais três outros teores ($\pm 0,5$ e $+1,0\%$ em relação ao P_{li}). A compactação é realizada no CGS, com pressão aplicada de 600kPa e o ângulo de rotação de 1,25°. A seqüência do procedimento de compactação é apresentada na Figura 5.23. Destaca-se o fato da mistura não-compactada permanecer em estufa à temperatura de compactação (função da viscosidade do ligante – Figura 5.13) por um período de 2 horas antes da compactação – Figura 5.23(a), de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem.

Realizada a compactação de um corpo-de-prova, é feita a pesagem (a seco, submersa e superfície saturada seca) (ASTM D 3203-94) para determinação do V_v da mistura compactada para três esforços de compactação (número de giros):

- $N_{inicial}$, esforço de compactação inicial;
- $N_{projeto}$, esforço de compactação de projeto (no qual V_v deve ser igual a 4%);
- $N_{máximo}$, esforço de compactação máximo (representa a condição de compactação da mistura ao fim da sua vida de serviço).



(a) Simulação do envelhecimento de curto prazo em estufa



(b) Retirada do molde e material da estufa



(c) Colocação do papel-filtro no fundo do molde



(d) Colocação da mistura no molde



(e) Colocação do papel-filtro no topo do molde após a mistura



(f) Ajuste do corpo-de-prova para compactação



(g) Extração do corpo-de-prova após compactação



(h) Corpos-de-prova Superpave (diâmetros 150 e 100mm) e corpo-de-prova Marshall (100mm) e respectivos moldes

Figura 5.23 Seqüência do procedimento de compactação Superpave

Os esforços de compactação $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ são usados para se avaliar a compactabilidade da mistura. O $N_{projeto}$ é usado para se selecionar o teor de ligante de projeto. Estes valores são função do tráfego (N), e variam conforme indicado na Tabela 5.9.

TABELA 5.9 NÚMERO DE GIROS ESPECIFICADOS NA NORMA DE DOSAGEM SUPERPAVE

| Parâmetros de compactação | | | Tráfego |
|---------------------------|---------------|--------------|---|
| $N_{inicial}$ | $N_{projeto}$ | $N_{máximo}$ | |
| | 50 | 75 | Muito leve (local) |
| 7 | 75 | 115 | Médio (rodovias coletoras) |
| 8 | 100 | 160 | Médio a alto (vias principais, rodovias rurais) |
| 9 | 125 | 205 | Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesado) |

Durante o processo de compactação, a massa específica do CP é monitorada em função da altura. Esta massa específica, referida como percentual da G_{mm} , pode ser plotada *versus* o número de giros (ou *versus* o logaritmo do número de giros) – Figura 5.24. Este processo permite avaliar a compactabilidade da mistura, ou seja, sua trabalhabilidade e seu potencial de densificação, que depende do esqueleto mineral (agregados).

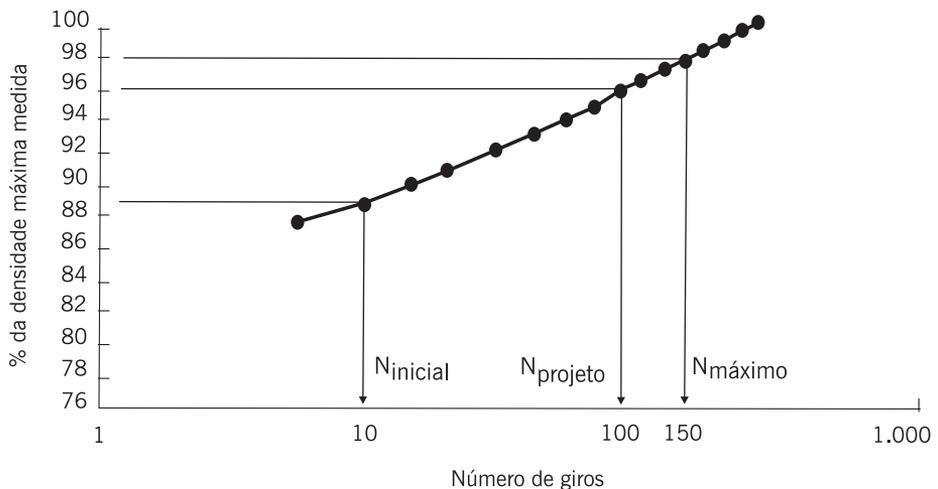


Figura 5.24 Curva de compactação típica obtida do CGS (Motta *et al.*, 1996)

As massas específicas estimadas da mistura asfáltica (G_{mb}), correspondentes aos esforços de compactação $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$ são, respectivamente, $G_{inicial}$, $G_{projeto}$, $G_{máximo}$, expressas como percentuais da massa específica máxima (G_{mm}). Para garantir uma estrutura de esqueleto mineral adequada, as especificações exigem: $G_{inicial} \leq 89\% G_{mm}$. O valor limite para $G_{máximo}$ garante que a mistura não vai compactar excessivamente sob o tráfego previsto e ter um comportamento plástico levando a

deformações permanentes. As especificações exigem $G_{\text{máximo}} \leq 98\% G_{\text{mm}}$. Em outras palavras, o volume de vazios mínimo deve ser 2%. O teor de projeto deve satisfazer os critérios apresentados na Tabela 5.10.

TABELA 5.10 CRITÉRIOS VOLUMÉTRICOS PARA ESCOLHA DO TEOR DE PROJETO

| Esforço de compactação (número de giros) | Relação entre massa específica aparente e a G_{mm} (%) | Vv (%) |
|--|---|--------|
| N_{inicial} | < 89% | > 11% |
| N_{projeto} | 96% | 4% |
| $N_{\text{máximo}}$ | < 98% | > 2% |

Os dados do CGS são usados da seguinte forma, sendo um exemplo de compactação apresentado na Tabela 5.11:

- estima-se a G_{mb} para cada número de giros em função da altura do corpo-de-prova;
- corrige-se a G_{mb} estimada em cada giro a partir de G_{mb} no $N_{\text{máximo}}$; esta correção se deve à consideração do corpo-de-prova como um cilindro perfeito, o que na realidade não é;
- determina-se a G_{mb} corrigida como uma porcentagem em relação à G_{mm} , para cada número de giros.

TABELA 5.11 EXEMPLO DE COMPACTAÇÃO POR AMASSAMENTO (CGS)

| CP N° 1: Massa Total = 4869g | | | | |
|--------------------------------------|------------|--|---|-------------------|
| $G_{\text{mm}} = 2,563\text{g/cm}^3$ | | | | |
| N° de giros | Altura, mm | G_{mb} (estimada) g/cm ³ | G_{mb} (corrigida) g/cm ³ | % G_{mm} |
| 8 (N_{inicial}) | 127,0 | 2,170 | 2,218 | 86,5 |
| 50 | 118,0 | 2,334 | 2,385 | 93,1 |
| 100 | 115,2 | 2,391 | 2,444 | 95,4 |
| 109 (N_{projeto}) | 114,9 | 2,398 | 2,451 | 95,6 |
| 150 | 113,6 | 2,425 | 2,478 | 96,7 |
| 174 ($N_{\text{máximo}}$) | 113,1 | 2,436 | 2,489 | 97,1 |
| G_{mb} (medida) | – | 2,489 | – | – |

As condições de projeto estabelecidas para a mistura do exemplo na Tabela 5.11 foram tais que levaram a: $N_{\text{máximo}} = 174$, $N_{\text{inicial}} = 8$ e $N_{\text{projeto}} = 109$. Durante a compactação, a altura é medida automaticamente pelo CGS após cada giro, sendo registrada para o número de giros correspondente na 1ª coluna. Os valores de G_{mb} (estimada) foram determinados por:

$$G_{\text{mb}}(\text{estimada}) = \frac{M_m}{V_{\text{mx}}} \quad (5.23)$$

Onde:

Mm = massa do CP, g, que depende do número de giros;

V_{mx} = volume do CP no molde durante a compactação, cm^3 , dado por:

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0,001 cm^3/mm^3 \quad (5.24)$$

Onde:

d = diâmetro do molde (150 ou 100mm);

h_x = altura do corpo-de-prova no molde durante a compactação, mm.

Para ilustrar esta determinação, considere as condições do CP a 50 giros. A altura do CP é de 118mm. O volume estimado do mesmo a 50 giros é:

$$V_{mx} = \frac{\pi (150 mm)^2 118,0 mm}{4} \times 0,001 cm^3/mm^3 = 2085,2 cm^3 \quad (5.25)$$

Assim, a Gmb (estimada) a 50 giros é:

$$Gmb(\text{estimada}) = 4867,8g / 2085,2 cm^3 = 2,334g/cm^3 \quad (5.26)$$

Este cálculo admite que o CP seja um cilindro de laterais sem rugosidade, o que não retrata a realidade. O volume do corpo-de-prova é levemente menor que o volume do cilindro de laterais sem rugosidade devido a irregularidades superficiais. É por isso que a Gmb final estimada a 174 giros ($2,436g/cm^3$) é diferente da Gmb medida após 174 giros ($2,489g/cm^3$).

Para corrigir esta diferença a Gmb estimada a qualquer número de giros é corrigida pela razão entre a massa específica aparente medida e a massa específica aparente estimada a $N_{m\acute{a}ximo}$, usando a seguinte expressão:

$$C = \frac{Gmb(\text{medida})}{Gmb(\text{estimada})} \quad (5.27)$$

Onde:

C = fator de correção;

Gmb (medida) = massa específica aparente medida a $N_{m\acute{a}ximo}$;

Gmb (estimada) = massa específica aparente estimada a $N_{m\acute{a}ximo}$.

A Gmb estimada para todos os outros números de giros pode ser corrigida usando o fator de correção por meio da seguinte expressão:

$$Gmb_n(\text{corrigida}) = C \times Gmb_n(\text{estimada}) \quad (5.28)$$

Onde:

Gmb_n (corrigida) = massa específica aparente corrigida do corpo-de-prova a qualquer giro n ;

Gmb_n (estimada) = massa específica aparente estimada a qualquer giro n .

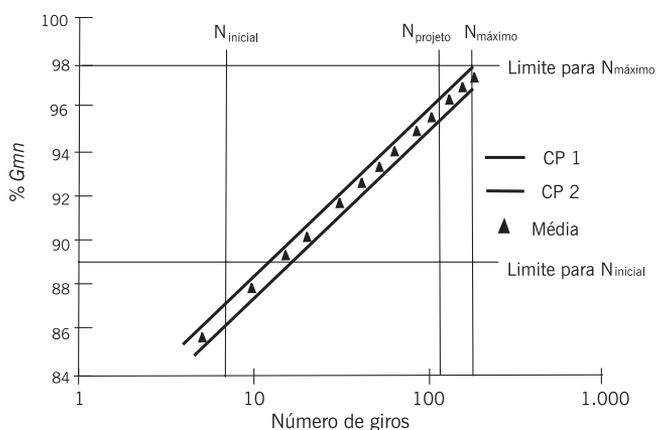


Figura 5.25 Gráfico de compactação dos corpos-de-prova do exemplo

Neste exemplo a razão é $2,489/2,436$ ou $1,022$. O percentual da Gmm é calculado como a razão Gmb (corrigida) para Gmm . Para se determinar o teor de projeto de uma mistura asfáltica, utiliza-se a média dos resultados referentes a dois corpos-de-prova. O gráfico de compactação para este exemplo mostrando os dois CPs e a média está apresentado na Figura 5.25.

Exemplo

Segue um exemplo passo a passo de uma dosagem Superpave, desde a verificação das propriedades das combinações de agregados até a determinação do teor de projeto de ligante. O exemplo foi retirado de FHWA (1995) e Motta *et al.* (1996). São consideradas três composições granulométricas, sendo, conforme recomendação Superpave, uma mistura miúda, uma graúda e uma intermediária. Daqui por diante as misturas tentativas são denominadas misturas 1, 2 e 3. Todas passam abaixo da zona de restrição, embora isto seja uma recomendação e não uma exigência, e atendem aos requisitos Superpave para agregados (Capítulo 3), conforme indica a Tabela 5.12, quais sejam: angularidade dos agregados graúdos e miúdos, partículas alongadas e achatadas e teor de argila (equivalente de areia).

TABELA 5.12 DADOS DOS AGREGADOS DAS MISTURAS TENTATIVAS 1, 2 E 3

| Propriedades | Critério Superpave | Mistura tentativa 1 | Mistura tentativa 2 | Mistura tentativa 3 |
|---------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Angularidade graúdos, % | 96%/90% mín. | 96%/92% | 95%/92% | 97%/93% |
| Angularidade miúdos, % | 45% mín. | 48% | 50% | 54% |
| Alongadas/Achatadas, % | 10% máx. | 0% | 0% | 0% |
| Equivalente areia, % | 45 mín. | 59 | 58 | 54 |
| Gsb combinado, g/cm^3 | NA | 2,699 | 2,697 | 2,701 |
| Gsa combinado, g/cm^3 | NA | 2,768 | 2,769 | 2,767 |

NA = não aplicável

Seguindo o fluxograma indicado na Figura 5.22, para cada uma das três composições granulométricas, molda-se um mínimo de dois corpos-de-prova no CGS, assumindo-se no exemplo um teor de 5,0% de ligante ($P_l = 5\%$). Parte-se deste teor admitido com o objetivo de determinar um teor de ligante inicial (P_{li}) para cada granulometria, a partir dos parâmetros volumétricos em cada caso, conforme indicado a seguir.

- *Passo 1:* cálculo da G_{se} considerando máxima absorção de ligante pelos vazios dos agregados, conforme expressão 5.16, $G_{se} = G_{sb} + F_a \times (G_{sa} - G_{sb})$, assumindo-se $F_a = 0,8$:

$$\text{Mistura 1: } G_{se} = 2,699 + 0,8 \times (2,768 - 2,699) = 2,754 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Mistura 2: } G_{se} = 2,697 + 0,8 \times (2,769 - 2,697) = 2,755 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Mistura 3: } G_{se} = 2,701 + 0,8 \times (2,767 - 2,701) = 2,754 \text{ g/cm}^3$$

- *Passo 2:* cálculo do volume de ligante absorvido pelo agregado (\mathcal{V}_{la}), por meio da expressão 5.17, assumindo $\mathcal{V}_v = 4\%$, $\mathcal{P}_l = 5\%$, conseqüentemente, $\mathcal{P}_{ag} = 95\%$, e $G_l = 1,02$:

$$V_{la} = \frac{P_{ag} \times (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right)$$

$$\text{Mistura 1: } V_{la} = \frac{0,95 + (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,02} + \frac{0,95}{2,754}\right)} \times \left(\frac{1}{2,699} - \frac{1}{2,754}\right) = 0,0171 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Mistura 2: } V_{la} = \frac{0,95 + (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,02} + \frac{0,95}{2,755}\right)} \times \left(\frac{1}{2,697} - \frac{1}{2,755}\right) = 0,0181 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Mistura 3: } V_{la} = \frac{0,95 + (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,02} + \frac{0,95}{2,754}\right)} \times \left(\frac{1}{2,701} - \frac{1}{2,754}\right) = 0,0165 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

- *Passo 3:* cálculo do volume de ligante efetivo (\mathcal{V}_{le}), conforme expressão 5.18, $V_{le} = 0,081 - 0,02931 \times \ln(TMN)$, lembrando que TMN é dado em polegadas e, neste caso, as três misturas possuem o mesmo $\mathcal{T}MN$:

$$\text{Misturas 1, 2 e 3: } V_{le} = 0,081 - 0,02931 \times [\ln(0,75)] = 0,089 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

- *Passo 4:* cálculo da massa de agregado (M_{ag}), em gramas, por meio da expressão 5.19:

$$M_{ag} = \frac{P_{ag} \times (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}} \right)}$$

$$\text{Mistura 1: } M_{ag} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\frac{0,05}{1,02} + \frac{0,95}{2,754}} = 2,315 \text{ g}$$

$$\text{Mistura 2: } M_{ag} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\frac{0,05}{1,02} + \frac{0,95}{2,755}} = 2,316 \text{ g}$$

$$\text{Mistura 3: } M_{ag} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\frac{0,05}{1,02} + \frac{0,95}{2,754}} = 2,315 \text{ g}$$

- *Passo 5:* estimativa do teor de ligante inicial (P_{li}), por meio da expressão 5.20:

$$P_{li} = \left[\frac{G_l \times (V_{le} + V_{la})}{[G_l \times (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}]} \right] \times 100$$

$$\text{Mistura 1: } P_{li} = \left[\frac{1,02 \times (0,089 + 0,0171)}{1,02 \times (0,089 + 0,0171) + 2,315} \right] \times 100 = 4,46\%$$

$$\text{Mistura 2: } P_{li} = \left[\frac{1,02 \times (0,089 + 0,0181)}{1,02 \times (0,089 + 0,0181) + 2,316} \right] \times 100 = 4,50\%$$

$$\text{Mistura 3: } P_{li} = \left[\frac{1,02 \times (0,089 + 0,0165)}{1,02 \times (0,089 + 0,0165) + 2,315} \right] \times 100 = 4,44\%$$

Como no exemplo os P_{li} estimados foram muito próximos uns dos outros (diferença na segunda casa decimal, que não é viável na prática), admite-se um valor único inicial tentativa para o prosseguimento da dosagem. Neste caso foi admitido $P_{li} = 4,4\%$ para as três misturas, ou seja, os corpos-de-prova para cada mistura são moldados neste teor. Portanto, de modo a ficar consistente com o exemplo, assume-se aqui $P_{li} = 4,4\%$ para as três misturas, afinal os dados da compactação se referem a este teor específico e único no qual foram moldados os corpos-de-prova.

De posse dos teores de ligante iniciais das três composições, um mínimo de dois corpos-de-prova para cada mistura tentativa é compactado no CGS. Em cada caso também

são preparadas duas misturas para a determinação da Gmm . Todas as misturas devem passar por envelhecimento em estufa por 2 horas, na temperatura de compactação, antes de serem compactadas. Os números de giros ($N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$) usados para compactação são determinados com base no volume de tráfego, conforme indicado na Tabela 5.9.

Os dados da compactação giratória Superpave devem ser analisados calculando, para cada número de giros desejado, a massa específica aparente estimada (Gmb) e a corrigida, esta última ainda como porcentagem da massa específica máxima teórica (Gmm). Um exemplo de compactação de corpos-de-prova foi apresentado na Tabela 5.11, lembrando que a correção da Gmb se dá em virtude do cálculo da Gmb estimada ser realizado considerando um volume de cilindro de superfície lisa, o que não corresponde à realidade. O volume verdadeiro é ligeiramente menor devido à presença de vazios na superfície ao redor do perímetro do corpo-de-prova.

Realizando-se, a partir das respectivas compactações no CGS, os cálculos da Tabela 5.11 para cada uma das três misturas deste exemplo, têm-se os valores de Gmb corrigidos apresentados na Tabela 5.13. Observe-se que os valores devem ser relativos a médias de dois corpos-de-prova.

TABELA 5.13 VALORES DE Gmb CORRIGIDOS E RESPECTIVOS CRITÉRIOS, DADOS COMO % Gmm

| Gmb corrigido, % Gmm | Crítério | Mistura 1 | Mistura 2 | Mistura 3 |
|--------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| % Gmm @ $N_{inicial}$ | < 89 | 87,1 | 85,6 | 86,3 |
| % Gmm @ $N_{projeto}$ | 96 | 96,2 | 95,7 | 95,2 |
| % Gmm @ $N_{máximo}$ | < 98 | 97,6 | 97,4 | 96,5 |

A partir das porcentagens da Tabela 5.13 correspondentes ao $N_{projeto}$, as porcentagens de vazios (V_v) e vazios no agregado mineral (VAM) são determinadas:

$$\text{Mistura 1: } V_v = 100\% - 96,2\% = 3,8\%$$

$$\text{Mistura 2: } V_v = 100\% - 95,7\% = 4,3\%$$

$$\text{Mistura 3: } V_v = 100\% - 95,2\% = 4,8\%$$

O VAM , em %, é dado por:

$$VAM = 100 - \left(\frac{\%Gmm @ N_{projeto} \times Gmm \times P_{ag}}{Gsb} \right) \quad (5.29)$$

Onde:

Gsb = massa específica aparente da composição de agregados, g/cm^3 ;

$P_{ag} = 1 - P_{li} = 1 - 0,044 = 0,956$, assumido o mesmo para as três misturas.

Portanto,

$$\text{Mistura 1: } VAM = 100 - \left(\frac{96,2 \times 2,563 \times 0,956}{2,699} \right) = 12,7\%$$

$$\text{Mistura 2: } VAM = 100 - \left(\frac{95,7 \times 2,565 \times 0,956}{2,697} \right) = 13,0\%$$

$$\text{Mistura 3: } VAM = 100 - \left(\frac{95,2 \times 2,568 \times 0,956}{2,701} \right) = 13,5\%$$

A Tabela 5.14, apresenta o resumo das informações de compactação das três misturas analisadas no exemplo.

TABELA 5.14 RESUMO DAS INFORMAÇÕES DA COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS TENTATIVAS

| Mistura tentativa | % Ligante | %Gmm a N_{inicial} (N = 8) | %Gmm a N_{projeto} (N = 109) | %Gmm a $N_{\text{máximo}}$ (N = 174) | Vv, % | VAM, % |
|-------------------|-----------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------|--------|
| 1 | 4,4 | 87,1 | 96,2 | 97,6 | 3,8 | 12,7 |
| 2 | 4,4 | 85,6 | 95,7 | 97,4 | 4,3 | 13,0 |
| 3 | 4,4 | 86,3 | 95,2 | 96,5 | 4,8 | 13,5 |

A premissa principal do projeto de mistura Superpave Nível 1 é que a quantidade correta de ligante asfáltico seja usada em cada mistura tentativa de maneira a atingir exatamente 96% de *Gmm* ou 4% de vazios no N_{projeto} . Claramente, isto não aconteceu para nenhuma das misturas do exemplo. A mistura 1 contém uma quantidade de ligante levemente superior à necessária para atingir um volume de vazios de 4% no N_{projeto} , tendo apenas 3,8% de vazios. Além disso, o *VAM* da mistura 1 é muito baixo.

Cabe então ao projetista se perguntar caso tivesse usado menos asfalto na mistura 1 para obter 4% de vazios no N_{projeto} , se o *VAM* e outras propriedades requeridas poderiam ter melhorado a níveis aceitáveis. Para responder, uma estimativa de qual teor de ligante seria necessário para se obter $Vv = 4\%$ (96% de *Gmm* no N_{projeto}) é determinada para cada mistura tentativa usando a seguinte expressão empírica:

$$P_{l, \text{estimado}} = P_{li} - [0,4 \times (4 - Vv)] \quad (5.30)$$

Onde:

$P_{l, \text{estimado}}$ = teor de ligante estimado, em %;

P_{li} = teor de ligante inicial (tentativa), em %, admitido 4,4% para as três misturas;

Vv = vazios no N_{projeto} , em %.

Portanto, no exemplo:

$$\text{Mistura 1: } P_{l, \text{estimado}} = 4,4 - [0,4 \times (4 - 3,8)] = 4,3\%$$

$$\text{Mistura 2: } P_{l, \text{estimado}} = 4,4 - [0,4 \times (4 - 4,3)] = 4,5\%$$

$$\text{Mistura 3: } P_{l, \text{estimado}} = 4,4 - [0,4 \times (4 - 4,8)] = 4,7\%$$

As propriedades volumétricas (*VAM* e *RBV*) e de compactação da mistura são então estimadas para estes teores de ligantes. Esta etapa é exclusivamente realizada de modo a responder: “O que aconteceria às propriedades da mistura se tivesse sido usada a quantidade exata de ligante para obter $V_v = 4\%$ no $N_{projeto}$?” Pode-se assim realizar uma comparação apropriada das misturas tentativas.

A estimativa do *VAM*, em %, é feita por meio da expressão:

$$VAM_{\text{estimado}} = VAM_{\text{inicial}} + C \times (4 - V_v) \quad (5.31)$$

Onde:

VAM_{inicial} = *VAM* do teor de ligante inicial tentativa;

C = constante igual a 0,1 se $V_v < 4,0\%$ e igual a 0,2 se $V_v > 4,0\%$.

A estimativa de *RBV*, em %, é dada por meio da expressão:

$$RBV_{\text{estimado}} = \frac{VAM_{\text{estimado}} - 4,0}{VAM_{\text{estimado}}} \quad (5.32)$$

No exemplo, as estimativas de *VAM* são as seguintes:

$$\text{Mistura 1: } VAM_{\text{estimado}} = 12,7 + 0,1 \times (4 - 3,8) = 12,7\%$$

$$\text{Mistura 2: } VAM_{\text{estimado}} = 13,0 + 0,2 \times (4 - 4,3) = 13,0\%$$

$$\text{Mistura 3: } VAM_{\text{estimado}} = 13,5 + 0,2 \times (4 - 4,8) = 13,3\%$$

E as de *RBV* as seguintes:

$$\text{Mistura 1: } RBV_{\text{estimado}} = \frac{12,7 - 4,0}{12,7} = 68,5\%$$

$$\text{Mistura 2: } RBV_{\text{estimado}} = \frac{13,0 - 4,0}{13,0} = 69,2\%$$

$$\text{Mistura 3: } RBV_{\text{estimado}} = \frac{13,4 - 4,0}{13,4} = 70,1\%$$

Estima-se ainda, considerando a situação ideal de $V_v = 4\%$, os seguintes dois parâmetros apresentados na Tabela 5.14: (i) %Gmm a $N_{inicial}$ e (ii) %Gmm a $N_{máximo}$, por meio de expressões que consideram o volume de vazios real atingido em cada caso (correspondente ao teor de ligante inicial tentativa), ou seja:

$$\%Gmm, estimada @ N_{inicial} = \%Gmm, tentativa @ N_{inicial} - (4,0 - V_v) \quad (5.33)$$

$$\%Gmm, estimada @ N_{máximo} = \%Gmm, tentativa @ N_{máximo} - (4,0 - V_v) \quad (5.34)$$

No exemplo em análise, obtêm-se os seguintes valores:

Mistura 1: $\%Gmm, estimada @ N_{inicial} = 87,1 - (4,0 - 3,8) = 86,9\%$
 $\%Gmm, estimada @ N_{máximo} = 97,6 - (4,0 - 3,8) = 97,4\%$

Mistura 2: $\%Gmm, estimada @ N_{inicial} = 85,6 - (4,0 - 4,3) = 85,9\%$
 $\%Gmm, estimada @ N_{máximo} = 97,4 - (4,0 - 4,3) = 97,7\%$

Mistura 3: $\%Gmm, estimada @ N_{inicial} = 86,3 - (4,0 - 4,8) = 87,1\%$
 $\%Gmm, estimada @ N_{máximo} = 96,5 - (4,0 - 4,8) = 97,3\%$

A Tabela 5.15 apresenta o resumo das propriedades volumétricas e de compactação das misturas tentativas para o correspondente teor de ligante asfáltico estimado que resulta em 4% de vazios no $N_{projeto}$, partindo-se de um teor de ligante inicial tentativa de 4,4%.

TABELA 5.15 RESUMO DAS INFORMAÇÕES DAS MISTURAS TENTATIVAS PARA $V_v = 4\%$ NO $N_{PROJETO}$

| Mistura tentativa | Ligante tentativa, % | Ligante estimado, % | VAM, % | RBV, % | %Gmm @ $N_{inicial}$ (N = 8) | %Gmm @ $N_{máximo}$ (N = 174) |
|-------------------|----------------------|---------------------|--------|--------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 4,4 | 4,3 | 12,7 | 68,5 | 86,9 | 97,4 |
| 2 | 4,4 | 4,5 | 13,0 | 69,2 | 85,9 | 97,7 |
| 3 | 4,4 | 4,7 | 13,3 | 70,1 | 87,1 | 97,3 |

As propriedades estimadas são comparadas com os critérios de projeto. Para o tráfego de projeto e o tamanho máximo nominal (TMN) dos agregados, os critérios volumétricos e de compactação são os seguintes: $V_v = 4\%$; $VAM > 13\%$ para TMN 19,0mm; $RBV = [65\%, 75\%]$ para N entre 10 e 30×10^7 ; $\%Gmm @ N_{inicial} < 89\%$; $\%Gmm @ N_{máximo} < 98\%$.

Por fim, há uma faixa requerida para a proporção de pó/asfalto (*dust/asfalto*). Este critério é constante para todos os níveis de tráfego. Ele é calculado como uma porcentagem em massa do material passante na peneira N° 200 (0,075mm) dividido pelo teor de

ligante efetivo (este em % da massa da mistura). O teor de ligante efetivo ($P_{le, estimado}$), em %, é determinado como segue:

$$P_{le, estimado} = -(P_{ag} \times G_l) \times \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) + P_{l, estimado} \quad (5.35)$$

Onde:

G_{sb} = massa específica aparente da composição de agregados, g/cm³;

G_{se} = massa específica efetiva da composição de agregados, g/cm³;

G_l = massa específica do ligante, g/cm³;

P_{ag} = percentual de agregados na mistura, % em massa;

Para as misturas do exemplo:

$$\text{Mistura 1: } P_{le, estimado} = -(95,7 \times 1,02) \times \left(\frac{2,754 - 2,699}{2,754 \times 2,699} \right) + 4,3 = 3,6\%$$

$$\text{Mistura 2: } P_{le, estimado} = -(95,5 \times 1,02) \times \left(\frac{2,755 - 2,697}{2,755 \times 2,697} \right) + 4,5 = 3,7\%$$

$$\text{Mistura 3: } P_{le, estimado} = -(95,3 \times 1,02) \times \left(\frac{2,754 - 2,701}{2,754 \times 2,701} \right) + 4,7 = 4,0\%$$

Verificando agora a proporção de pó/asfalto (P/A), dada por:

$$P/A = \frac{\text{passante } N^{\circ} 200}{P_{le, estimado}} \quad (5.36)$$

Tem-se que,

$$\text{Mistura 1: } P/A = \frac{3,1}{3,6} = 0,86$$

$$\text{Mistura 2: } P/A = \frac{2,9}{3,7} = 0,78$$

$$\text{Mistura 3: } P/A = \frac{3,5}{4,0} = 0,88$$

Todas as P/A estão dentro da especificação, qual seja, entre 0,6 e 1,2.

Após estimar todas as propriedades das três misturas, o projetista pode observar os valores e decidir se uma ou mais são aceitáveis ou se misturas tentativas adicionais devem ser avaliadas.

- a mistura 1 é inaceitável com base no critério de \mathcal{UAM} mínimo;
- a mistura 2 é aceitável, mas o \mathcal{UAM} está no mínimo;
- a mistura 3 tem um valor de \mathcal{UAM} aceitável bem como atende ao critério para \mathcal{RBV} , proporção P/A e aos critérios de compactação.

A partir destes dados, a mistura 3 é selecionada como sendo o projeto estrutural do agregado. Um mínimo de dois corpos-de-prova é compactado a cada um dos seguintes quatro teores de asfalto (Superpave exige um mínimo de quatro teores): $P_{l,estimado}$ (4,7% para a mistura 3 do exemplo); $P_{l,estimado} \pm 0,5\%$ (ou seja, 4,2% e 5,2%); $P_{l,estimado} + 1,0\%$ (ou seja, 5,7%).

Um mínimo de dois corpos-de-prova também é preparado para a determinação da massa específica máxima teórica no teor de ligante estimado. Corpos-de-prova são preparados e testados da mesma maneira que a etapa de Seleção do Projeto de Estrutura do Agregado. A Figura 5.26 ilustra a compactação dos dois corpos-de-prova da mistura 3 com 4,2% de ligante asfáltico. Curvas semelhantes são obtidas para os outros três teores.

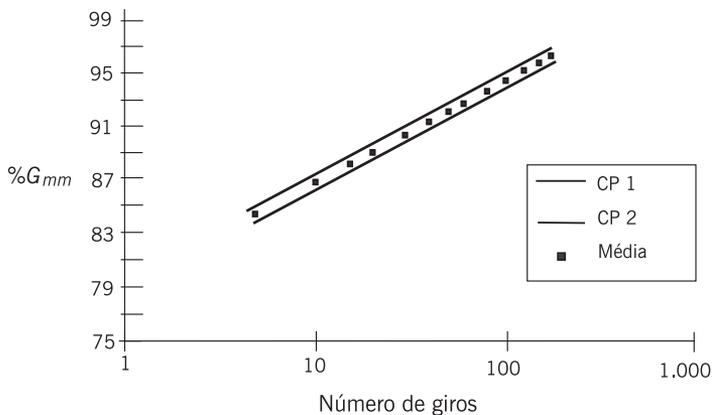


Figura 5.26 Curva de compactação da mistura 3 com 4,2% de ligante e Tamanho Máximo Nominal de 19mm

As propriedades são avaliadas para a mistura selecionada com diferentes teores de ligante usando-se os dados de compactação no $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$. As tabelas a seguir mostram as propriedades volumétricas e de compactação da mistura, com a variação do teor de ligante

TABELA 5.16 RESUMO DAS INFORMAÇÕES DA MISTURA 3

| Ligante, % | %Gmm @ $N_{inicial}$ (N = 8) | %Gmm @ $N_{projeto}$ (N = 109) | %Gmm @ $N_{máximo}$ (N = 174) | Vv, % | VAM, % | RBV, % | Massa específica, g/cm ³ |
|------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|--------|--------|-------------------------------------|
| 4,2 | 85,8 | 94,5 | 95,8 | 5,5 | 13,4 | 59,3 | 2,441 |
| 4,7 | 87,1 | 96,1 | 97,5 | 3,9 | 13,2 | 70,1 | 2,461 |
| 5,2 | 87,4 | 97,0 | 98,5 | 3,0 | 13,4 | 77,9 | 2,467 |
| 5,7 | 88,6 | 98,1 | 99,8 | 1,9 | 13,6 | 86,2 | 2,476 |

As propriedades volumétricas são calculadas no número de giros de projeto ($N_{projeto}$) para cada teor de ligante asfáltico testado. A partir desses dados pontuais o projetista pode gerar gráficos do teor de vazios, VAM e RBV versus teor de ligante asfáltico. O teor de ligante

de projeto é estabelecido para um volume de vazios de 4%. Neste exemplo, o teor de ligante é de 4,7%, valor que corresponde praticamente a $V_v = 4\%$ no $N_{projeto} = 109$ giros. Todas as outras propriedades são verificadas no teor de projeto quanto ao atendimento dos critérios. Os valores de projeto para uma mistura nominal de 19,0mm (mistura 3) são apresentados na Tabela 5.17 juntamente com os critérios correspondentes.

TABELA 5.17 PROPRIEDADES DE PROJETO DA MISTURA COM 4,7% DE LIGANTE

| Propriedades da mistura | Resultado | Critério |
|---------------------------|-----------|-----------|
| Vv | 4,0% | 4,0% |
| VAM | 13,2% | 13,0 mín. |
| RBV | 70,1% | 65% a 75% |
| Proporção pó/asfalto | 0,88 | 0,6 a 1,2 |
| %Gmm @ $N_{inicial} = 8$ | 87,1% | < 89% |
| %Gmm @ $N_{máximo} = 174$ | 97,5% | < 98% |

A última etapa no projeto Superpave Nível 1 é avaliar a sensibilidade à umidade do projeto da mistura final escolhida, o que é feito por meio do teste AASHTO T 283. Corpos-de-prova são compactados até aproximadamente 7% de vazios. Um subgrupo de três corpos-de-prova é considerado de controle e outro subgrupo de três corpos-de-prova é condicionado, sendo submetido a uma saturação a vácuo, seguida de um ciclo opcional de congelamento, seguida ainda de um ciclo de degelo de 24 horas a 60°C. Todos os corpos-de-prova são testados para determinação da resistência à tração estática indireta (RT). A sensibilidade à água é avaliada pela relação da resistência média do subgrupo condicionado e do subgrupo de controle, sendo a relação mínima admissível de 70% a 80% dependendo do órgão viário. Este ensaio é visto em maior detalhe no Capítulo 6. Ensaio adicionais de previsão de desempenho são usados nos Níveis 2 e 3, mas não são abordados de forma específica neste livro, sendo o leitor referido a Motta *et al.* (1996) para uma apresentação destes ensaios. O Capítulo 6 apresenta, contudo, os diversos ensaios mecânicos que têm sido usados no Brasil para avaliação mecânica de misturas asfálticas.

5.3.4 SMA

O SMA – *Stone Matrix Asphalt*, apresentado no Capítulo 4, deve necessariamente apresentar um esqueleto pétreo onde seja garantido o contato entre os grãos de agregados graúdos. Este contato é garantido quando o VCA_{MIX} (vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada) é menor ou igual ao VCA_{DRC} (vazios da fração graúda do agregado compactado) (NAPA, 1999) – Figura 5.27. Ou seja, quando os agregados graúdos, em sua grande maioria com dimensões similares, tocam-se, formam-se vazios que devem ser ocupados, em parte, por um mástique, composto por agregados na fração areia, fíler, asfalto e fibras. Deve-se sempre manter vazios com ar para que a mistura não exsude e possa ainda sofrer compactação adicional pelo tráfego.

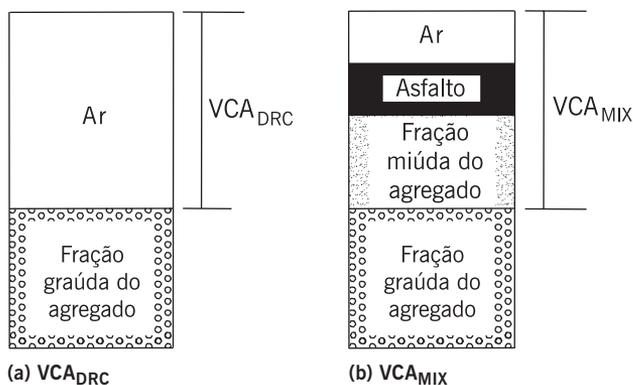


Figura 5.27 Representação esquemática dos parâmetros volumétricos de controle do SMA

Os parâmetros VCA_{MIX} e VCA_{DRC} podem ser obtidos utilizando-se as expressões (5.37) e (5.38):

$$VCA_{DRC} = \left(\frac{G_{sb-g} G_W - G_s}{G_{sb-g} G_W} \right) \times 100 \quad (5.37)$$

Onde:

VCA_{DRC} = vazios da fração graúda do agregado compactado, %;

G_s = massa específica da fração graúda do agregado seco compactado, kg/dm³ (DNER-ME 153/97);

G_W = massa específica da água (998kg/m³);

G_{sb-g} = massa específica aparente da fração graúda do agregado, g/cm³.

$$VCA_{MIX} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb-g}} \times P_{CA} \right) \quad (5.38)$$

Onde:

VCA_{MIX} = vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %;

G_{mb} = massa específica aparente da mistura compactada, g/cm³;

G_{sb-g} = massa específica aparente da fração graúda do agregado, g/cm³;

P_{CA} = % de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura.

A fração de agregado graúdo é definida como sendo a porção relativa à mistura total de agregados, retida numa determinada peneira que varia de acordo com o diâmetro máximo nominal dos agregados, como apresentado na Tabela 5.18.

O projeto de mistura do SMA, segundo a Napa, 1999, deve seguir ainda os requisitos mínimos apresentados na Tabela 5.19. Os parâmetros de volume de vazios, VAM e estabilidade são obtidos com corpos-de-prova Marshall (ABNT NBR 12891/1993) compactados com 50 golpes de cada lado. A Napa também indica a compactação no equipamento giratório, sendo que os mesmos valores são fixados para amostras após 100 giros.

TABELA 5.18 DEFINIÇÃO DA FRAÇÃO GRAÚDA DE AGREGADO (NAPA, 1999)

| Diâmetro máximo nominal dos agregados | | Porção de agregado retida na peneira | |
|---------------------------------------|---------|--------------------------------------|-----------|
| mm | Peneira | mm | Numeração |
| 25 | 1" | 4,75 | Nº 4 |
| 19 | 3/4" | 4,75 | Nº 4 |
| 12,5 | 1/2" | 4,75 | Nº 4 |
| 9,5 | 3/8" | 2,36 | Nº 8 |
| 4,75 | Nº 4 | 1,18 | Nº 16 |

Exemplo: Para uma mistura com diâmetro máximo nominal de 25mm, o agregado graúdo é a porção da mistura total de agregados que fica retida na peneira de 4,75mm de abertura (peneira Nº 4).

TABELA 5.19 ESPECIFICAÇÃO PARA MISTURAS SMA UTILIZANDO MÉTODO MARSHALL (NAPA, 1999)

| Propriedade | Requerido |
|--|---------------|
| Cimento asfáltico, %, mín. | 6 |
| % de vazios com ar | 4 |
| VAM, %, mín. | 17 |
| % VCA_{MIX} | $< VCA_{DRC}$ |
| Estabilidade, N, mín. | 6.200 |
| Resistência à tração retida RTR, %, mín. | 70 |
| Escorrimento na temperatura de usinagem, %, máx. | 0,3 |

A resistência à tração retida (RTR) é obtida de acordo com procedimento da AASHTO T 283, que avalia o dano por umidade induzida, conforme apresentado no Capítulo 6.

O valor de escorrimento do ligante asfáltico segue a norma AASHTO T 305-97. O ensaio de escorrimento é utilizado para determinar a quantidade de ligante asfáltico que potencialmente poderá escorrer da mistura de SMA. É estabelecido um valor máximo admitido no ensaio laboratorial de forma a evitar perda de ligante no transporte, na aplicação e na compactação do SMA. Em linhas gerais, o ensaio consiste em inserir uma amostra de no mínimo 1.200g de SMA usinado, utilizando a faixa granulométrica, teor de ligante e teor de fibras que se deseja testar, em um cesto cilíndrico confeccionado com tela metálica de abertura 6,3mm, com fundo suspenso, afastado do fundo. Pesa-se e insere-se o conjunto apoiado em um papel-filtro, dentro de uma estufa regulada na temperatura de compactação por $1h \pm 1min$ (Figura 5.28). Transcorrido o tempo, retira-se o conjunto da estufa e pesa-se a folha de papel-filtro novamente que poderá conter ligante escorrido da mistura.

As Figuras 5.28 (d) e (e) ilustram resultados obtidos com SMA com e sem fibras de celulose, e usinado com dois ligantes distintos, um convencional e um modificado por

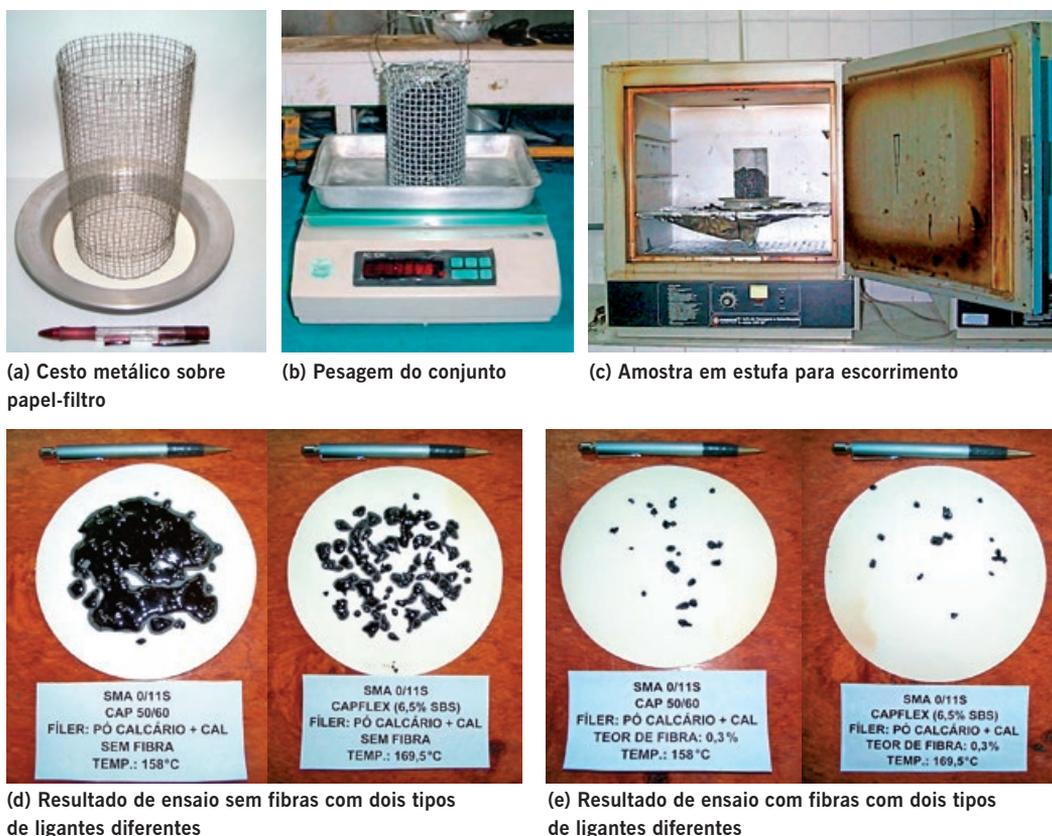


Figura 5.28 Ensaio de escorrimento de ligante asfáltico de mistura SMA

(Fotos: (a), (b) e (c) Silva, 2005; (d) e (e) Mourão, 2003)

polímero SBS. Observe-se o efeito benéfico das fibras e de ligantes modificados para reduzir o escorrimento. A porcentagem de escorrimento é expressa pela massa de ligante escorrida e depositada sobre o papel-filtro dividida pela massa total da mistura inserida inicialmente no cesto.

A determinação da quantidade de fibras necessária para a mistura SMA também pode ser feita empregando-se o método alemão conhecido por Schellenberg, originalmente concebido para esse fim. De forma resumida, este método utiliza 1.000g da mistura asfáltica, com as características que serão utilizadas no revestimento, despejada dentro de um béquer, previamente tarado. O recipiente com seu conteúdo é levado à estufa na temperatura de compactação por $1h \pm 1min$. Decorrido este período, o conjunto é removido da estufa e o conteúdo é imediatamente despejado em outro recipiente. Pesa-se novamente o béquer e calcula-se a massa de ligante que eventualmente tenha ficado preso à superfície do béquer. Esta porcentagem não deve exceder a 0,3% para ser considerada satisfatória, sendo desejável que seja inferior ou igual a 0,2%.

5.3.5 CPA

As misturas asfálticas abertas do tipo CPA – camada porosa de atrito – mantêm uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de fíler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico, conforme apresentado no Capítulo 4.

A dosagem destas misturas abertas é realizada com corpos-de-prova compactados no Marshall com 50 golpes por lado. Segundo as especificações brasileiras do DNER-ES 386/99, na condição compactada em laboratório, estas misturas devem apresentar vazios com ar na faixa de 18 a 25%. Na França, estas misturas são utilizadas desde a década de 1960, sendo aplicadas atualmente com vazios entre 20 e 30%. Por se tratar de mistura asfáltica de caráter funcional, cuja contribuição importante é a retirada da água da superfície do pavimento, é importante manter o esqueleto sólido com contato grão-grão, de modo que haja uma manutenção dos vazios com ar no decorrer do tempo. Para manutenção desses vazios e estabilidade da mistura, devem ser garantidas principalmente a resistência à desagregação, especificada no DNER pela perda de massa máxima admissível no ensaio Cântabro, e a resistência à tração por compressão diametral, apresentadas no Capítulo 6. A perda de massa no Cântabro não deve ultrapassar os 25% (DNER-ES 386/99) e a resistência à tração mínima é de 0,55kN (DNER-ES 386/99). É importante realçar que quanto menor a perda de massa do Cântabro, melhor será sua resistência à desagregação. Os espanhóis, que originalmente propuseram o ensaio de desgaste Cântabro, fixam perda de no máximo 20% para as misturas drenantes. É interessante, igualmente, realizar o ensaio de perda de massa, após condição de exposição aos danos induzidos pela água para comparação com o resultado a seco, sem condicionamento prévio.

5.4 DOSAGEM DE MISTURAS A FRIO

As misturas a frio, apresentadas no Capítulo 4, são aquelas cujo ligante é a emulsão asfáltica (Capítulo 2). O uso de misturas a frio iniciou-se na Inglaterra com uma técnica denominada *retread process*, tendo sido bastante utilizada pela França para restauração de seus pavimentos após a 2ª Guerra Mundial. No Brasil, esta técnica de mistura passou a ser utilizada em 1966. A partir de 1980 as emulsões asfálticas foram mais difundidas com a técnica de pré-misturados a frio (PMF) densos em revestimentos asfálticos delgados (Tuchumantel Jr., 1990). Nas últimas décadas os PMFs vêm sendo prioritariamente utilizados para uso em revestimentos de vias urbanas sujeitas a baixo volume de tráfego, camadas intermediárias de revestimento e em serviços urbanos de conservação como regularização de revestimentos, e remendos de panelas (Abeda, 2001).

As principais misturas a frio são os tratamentos superficiais (TS), areia asfalto a frio (AAUF) e PMF. As vantagens do uso de misturas a frio são muitas, entre elas: produção e execução à temperatura ambiente, reduzindo o consumo de combustíveis; alta trabalhabilidade devido ao estado fluido do ligante à temperatura ambiente; menor agressão ao

meio ambiente em relação aos asfaltos diluídos de petróleo (Capítulo 2); além de evitar o envelhecimento prematuro do asfalto por oxidação que pode ocorrer nas usinas em misturas a quente (Santana, 1993).

O processo de cura das misturas a frio ainda não é perfeitamente compreendido (Moulthrop *et al.*, 1997). Este fator tem importância maior quando se verifica que não há um consenso entre os métodos de dosagem de misturas a frio com relação ao grau e ao método de cura que devem ser considerados como representativos do processo que ocorre em campo (Silveira, 1999; Moreira e Soares, 2002).

A dosagem de PMFs é realizada segundo o método DNER-ME 107/94. A dosagem dos PMFs inicia-se com o cálculo dos teores preliminares de asfalto e emulsão asfáltica (EA). Para tanto, pode ser utilizada a metodologia descrita a seguir que se baseia na proposição de Duriez (Santana, 1993), que consiste do cálculo da superfície específica dos agregados a partir da proporção dos diversos tamanhos de partícula devidamente ponderada.

Para a determinação da superfície específica dos agregados, utiliza-se a fórmula de Vogt (Σ), que consiste em uma adaptação da formulação de Duriez para as peneiras correspondentes às especificações brasileiras:

$$100 \Sigma = 0,07P_4 + 0,14P_3 + 0,33P_2 + 0,81P_1 + 2,7S_3 + 9,15S_2 + 21,9S_1 + 135F \quad (5.39)$$

Onde:

Σ = superfície específica de agregados;

P_4 = massa do material retido entre as peneiras 2" – 1";

P_3 = massa do material retido entre as peneiras 1" – 1/2";

P_2 = massa do material retido entre as peneiras 1/2" – N° 4;

P_1 = massa do material retido entre as peneiras N° 4 – N° 10;

S_3 = massa do material retido entre as peneiras N° 10 – N° 40;

S_2 = massa do material retido entre as peneiras N° 40 – N° 80;

S_1 = massa do material retido entre as peneiras N° 80 – N° 200;

F = massa do material passante na peneira N° 200.

A Figura 5.29 apresenta um fluxograma para a determinação da massa específica média dos agregados a partir da massa específica de três frações predefinidas.

Após calcular a superfície específica média dos agregados, faz-se sua correção com um fator determinado em função da massa específica real média dos agregados ($Gsa_{médio}$), conforme indica a Tabela 5.20 (Santana, 1993).

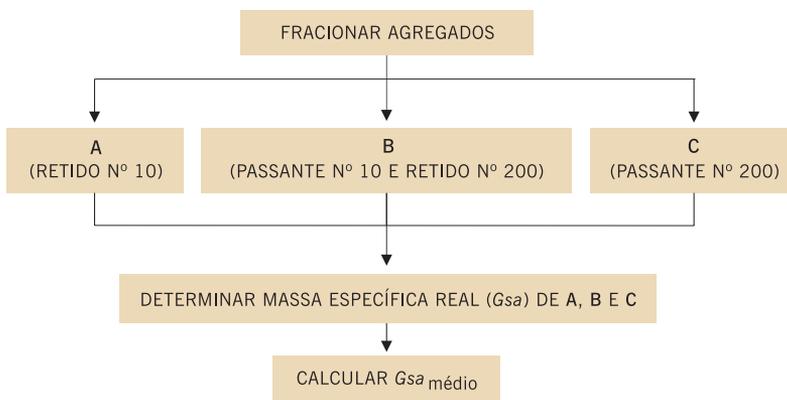


Figura 5.29 Fluxograma para determinação da massa específica real média dos agregados

TABELA 5.20 FATORES CORRETIVOS DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DO MÉTODO DE DURIEZ

| Massa específica, $G_{sa\text{médio}}$, g/cm^3 | Fatores corretivos |
|--|--------------------|
| 2,35 | 1,13 |
| 2,45 | 1,08 |
| 2,55 | 1,02 |
| 2,65 | 1,00 |
| 2,75 | 0,97 |
| 2,85 | 0,93 |
| 2,95 | 0,90 |

Calcula-se, então, o teor de asfalto residual (p) em relação à massa total dos agregados utilizando a expressão de Duriez:

$$p = k \times \sum \times 0,2 \quad (5.40)$$

Onde:

k = módulo de riqueza.

Para PMF denso, Santana (1993) sugere valores de k entre 3,2 e 4,5. Obtém-se o teor de asfalto (p') e de emulsão asfáltica (p'_{EA}) sobre a mistura asfáltica total a partir das seguintes relações:

$$p' = \frac{100 \times p}{100 + p} \quad (5.41)$$

$$p'_{EA} = \frac{100 \times p'}{t} \quad (5.42)$$

Onde:

t = teor percentual em massa de asfalto na emulsão asfáltica.

Tendo sido definido o teor t , procede-se à dosagem Marshall descrita anteriormente variando-se os teores de moldagem (geralmente $t \pm 1\%$ e $t \pm 2\%$) e determinando-se então os parâmetros volumétricos e mecânicos. Santana (1993) sugere a determinação do teor de projeto final de acordo com o teor que obtiver a maior massa específica aparente do corpo-de-prova.

5.5 MISTURAS RECICLADAS A QUENTE

No caso de misturas recicladas a quente (Capítulo 4), há uma diversidade de métodos de dosagem quanto aos seguintes aspectos: procedimentos de ensaio, definição de agregado fresado (com ou sem o ligante envelhecido), parâmetros necessários para a definição do teor do ligante novo e percentual de fresado a ser reaproveitado. O termo ligante novo refere-se ao ligante, com ou sem agente rejuvenescedor (AR) misturado, que é adicionado ao fresado para devolver ao ligante suas características iniciais. Enquanto nos Estados Unidos é comum o uso de ligantes menos consistentes sem AR para contrabalançar o ligante endurecido do fresado, no Brasil tem sido comum a utilização de ARs, sendo o ligante novo uma mistura de AR com cimento asfáltico virgem. A seguir são discutidos três métodos de dosagem, seus procedimentos, vantagens e desvantagens.

5.5.1 Dosagem do Asphalt Institute

O método de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) do Asphalt Institute (1995) segue os passos da dosagem Marshall convencional para misturas novas com o acréscimo de algumas etapas para análise do ligante do revestimento fresado. O procedimento consiste das seguintes etapas:

- 1) Determinação da composição do material reciclado. A partir de amostras do fresado, determina-se a granulometria dos agregados deste fresado, o teor e a viscosidade do asfalto presentes neste material. Conhecendo a granulometria dos agregados após extração do ligante envelhecido e dos agregados novos que serão misturados, é calculada a combinação entre eles para atender as especificações. A escolha dos agregados novos é feita com base nas faixas granulométricas sugeridas pelos órgãos rodoviários e nas características de abrasão e equivalente de areia destes materiais.
- 2) Estima-se pela expressão 5.43 a quantidade aproximada de ligante total necessária:

$$P_l = 0,035 a + 0,045 b + K \times c + F \quad (5.43)$$

Onde:

P_l = demanda aproximada de ligante (combinação de envelhecido e novo) para a mistura reciclada, % em massa da mistura;

a = percentual de agregado mineral retido na peneira 2,36mm (N° 8);

b = percentual de agregado mineral passando na peneira 2,36mm e retido na peneira 0,075mm (N° 200);

c = percentual de agregado mineral passando na peneira 0,075mm;

K = constante, função da quantidade de agregado c que passa na peneira 0,075mm (0,15 para c entre 11 e 15%, 0,18 para c entre 6 a 10% e 0,20 para c igual ou menor que 5%);

F = fator de absorção dos agregados com valores entre 0 e 2%. No caso da ausência deste dado, o valor de 0,7 é sugerido.

3) Estimativa do percentual de ligante novo na mistura. A quantidade de ligante a ser incorporada é expressa como uma porcentagem da massa da mistura, conforme a expressão 5.44:

$$P_{ln} = \frac{(100^2 - rP_{lf})P_{lt}}{100(100 - P_{lf})} - \frac{(100 - r)P_{lf}}{100 - P_{lf}} \quad (5.44)$$

Onde:

P_{ln} = percentual de ligante novo (cimento asfáltico novo + AR) na mistura reciclada;

r = percentual em massa de agregado novo com relação ao agregado total da mistura reciclada;

P_{lt} = teor de ligante (combinação de envelhecido e novo) da mistura reciclada em porcentagem;

P_{lf} = teor de ligante do material fresado em porcentagem.

4) Seleção da consistência do ligante novo. Inicialmente determina-se a porcentagem de ligante a ser incorporado em relação à quantidade total de ligante asfáltico na mistura:

$$R = \frac{100P_{ln}}{P_{lt}} \quad (5.45)$$

Em seguida a viscosidade do asfalto reciclado (ponto A da Figura 5.30) é marcada no eixo y de um gráfico de viscosidade *versus* a porcentagem de ligante novo incorporado na mistura. Também é marcada a viscosidade a ser alcançada pela mistura de ligante

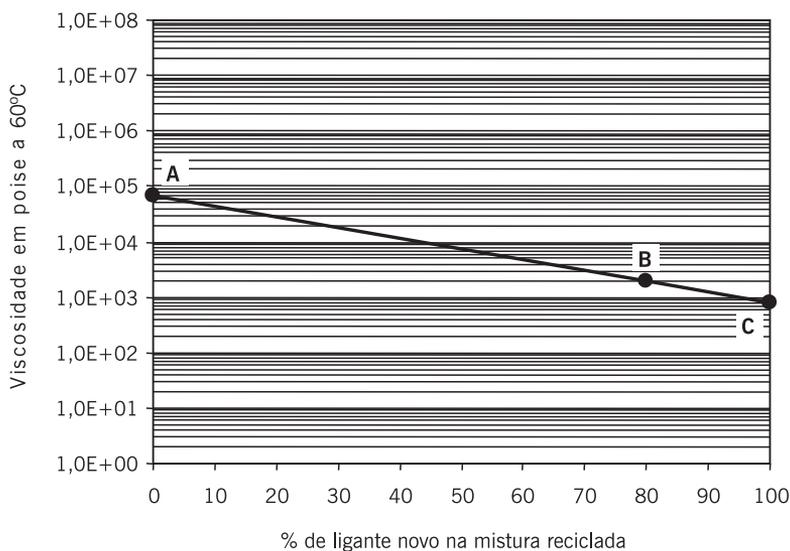


Figura 5.30 Viscosidade *versus* porcentagem de ligante novo

do fresado com ligante novo (ponto B) no percentual R encontrado na expressão 5.26. Ligam-se os pontos A e B e determina-se a interseção com o eixo direito do gráfico (ponto C). Este ponto indica o valor da viscosidade a 60°C do ligante asfáltico novo que deve ser incorporado à MARQ.

5) Realiza-se então o procedimento de dosagem Marshall convencional e determina-se o teor de projeto da mistura. Para o Asphalt Institute, o teor de projeto é aquele que apresenta um $V_v = 4\%$.

Vale comentar que o teor de projeto pode ser determinado levando-se em conta outros parâmetros. No Brasil, conforme visto anteriormente, o teor de projeto é aquele que satisfaz os limites de estabilidade e fluência, podendo ser determinado a partir dos limites estabelecidos para os parâmetros volumétricos RBV e V_v (DNER-ES 319/1997).

O procedimento do Asphalt Institute tem como principal vantagem a simplicidade, pois uma vez definida a quantidade de ligante novo em relação ao ligante do fresado, a dosagem segue o procedimento Marshall convencional. Como desvantagem menciona-se o fato de o procedimento descrito se basear apenas na viscosidade a 60°C dos ligantes para definição do teor de ligante novo. Nenhuma consideração é feita sobre o desempenho do ligante à baixa e à média temperaturas.

5.5.2 Dosagem proposta por Castro Neto (2000)

O método descrito anteriormente se baseia na viscosidade do ligante fresado após a extração e recuperação de ligante de misturas asfálticas conforme as normas ASTM D 2172 e D 1856. Estes métodos têm sofrido críticas tanto no Brasil como no exterior, devido à sua complexidade e por estarem sujeitos a erros atribuídos a problemas durante a evaporação do solvente ou a presença de finos no ligante (Whiteoak, 1991; Castro Neto, 2000). A recuperação do ligante do fresado sem sua contaminação pelo solvente ou fíler no processo de extração é necessária nos métodos de dosagem de MARQ. A ocorrência ou não de contaminação é de difícil avaliação no processo de recuperação do ligante. Soares *et al.* (1998) reportaram o aumento da penetração de um asfalto após alguns anos de uso em serviço quando comparadas às medidas no asfalto original, o que pode indicar contaminação do ligante recuperado do material fresado pelo solvente.

Com o objetivo de realizar a dosagem de MARQ sem a necessidade de recuperação do ligante envelhecido, Castro Neto (2000) propôs um método que considera o comportamento da mistura reciclada com diferentes valores de teor de ligante novo através da avaliação dos valores de MR e RT. O procedimento prescinde da extração e caracterização do ligante do material fresado. O passo inicial é a determinação do intervalo de MR e/ou de RT que a mistura reciclada deve apresentar de acordo com a experiência do projetista. A partir desses valores adota-se, também com base na experiência, uma porcentagem de material fresado a ser reciclado. Estabelecida esta porcentagem, a composição granulométrica final desejada (agregados do fresado mais agregados novos) e selecio-

nado o ligante novo, confeccionam-se corpos-de-prova com diferentes teores de ligante. Avaliam-se os valores de MR e RT dos corpos-de-prova e verifica-se o teor de ligante mais adequado à mistura a partir dos valores desejados dos referidos parâmetros mecânicos.

Castro Neto (2000) afirma que na maioria dos casos a quantidade de AR varia de 0 a 30% da quantidade de ligante do fresado. É sugerido ainda que os estudos de dosagem sejam iniciados a partir do valor médio de 15% de AR. Faz-se então uma dosagem Marshall completa usando este percentual para definir o teor de projeto da mistura. Após a definição do teor de projeto, moldam-se corpos-de-prova com porcentagens de AR variando de 0 a 30% da quantidade de ligante do fresado, apenas no teor de projeto. Verifica-se então a variação dos parâmetros mecânicos da mistura (MR e RT) com o teor de ligante. Determina-se o percentual de AR em relação à quantidade de ligante do fresado que satisfaça os valores de MR e RT estimados para o teor de projeto definido anteriormente.

Para a definição final do teor de projeto é necessária a determinação do V_v , necessitando, portanto, do valor da massa específica máxima (teórica ou medida). Conforme discutido anteriormente, este parâmetro pode ser determinado em laboratório (G_{mm}) ou calculado a partir dos valores das massas específicas individuais dos materiais que compõem a mistura (DMT). Para misturas recicladas há a dificuldade em calcular-se a DMT uma vez que a massa específica do fresado teria que ser obtida separando o material em diferentes frações. Uma alternativa mais simples é determinar experimentalmente a G_{mm} , o que é feito rotineiramente no exterior, mas não no Brasil. No procedimento de dosagem proposto por Castro Neto (2000) fez-se uso do querosene em substituição ao vácuo, como apresentado anteriormente para o cálculo da G_{mm} .

O método proposto por Castro Neto (2000) para dosagem de misturas recicladas a quente, embora considere apenas indiretamente a reologia do ligante envelhecido e recuperado, apresenta a vantagem de se basear em parâmetros mecânicos para a determinação do teor de ligante novo e do teor total de ligante (novo e envelhecido) na mistura reciclada.

5.5.3 Dosagem Superpave

As especificações Superpave não contêm recomendações específicas para a dosagem de misturas recicladas. Um trabalho posterior, da Federal Highway Administration (FHWA) norte-americana e do grupo de misturas do Superpave (Bukowski, 1997) definiu um procedimento para o uso de misturas recicladas introduzindo pequenas modificações no procedimento convencional. O estudo recomenda que a quantidade de material fresado a ser reciclado seja enquadrada numa das três faixas seguintes (percentual em massa da mistura final): Faixa 1 – até 15% de material fresado a ser reutilizado; Faixa 2 – entre 16 e 25%; Faixa 3 – acima de 25%.

Para quantidades de material fresado na faixa 1, Bukowski (1997) recomenda que seja realizada uma dosagem seguindo as recomendações exigidas para uma mistura virgem. Para quantidades de material fresado no intervalo da faixa 2, é recomendado que o ligante novo a ser adicionado na mistura seja um PG (*performance grade* = grau de desempenho) inferior ao do ligante recuperado do material fresado. Finalmente, para quantidades

dentro da faixa 3 é necessário que se faça um estudo da variação dos parâmetros G^* (módulo de cisalhamento complexo) e δ (ângulo de fase) para diferentes razões de quantidade de ligante envelhecido (do material fresado) pela quantidade de ligante novo. Após a determinação destes parâmetros para as diferentes razões, seleciona-se aquela que corresponde aos valores de G^* e δ necessários às condições de tráfego e ambiente às quais será exposta a mistura.

Khandal e Foo (1997) sugerem que a combinação de ligante do fresado e ligante novo seja feita através da construção de um gráfico com a temperatura na qual a relação $G^*/\text{sen } \delta = 1\text{kPa}$ é atendida nas diferentes combinações de ligante do fresado e ligante novo (ver Figura 5.31). A relação $G^*/\text{sen } \delta$ indica o comportamento quanto às deformações permanentes do ligante asfáltico. Quanto maior o valor desta relação, maior a resistência a deformações permanentes pois um maior valor de G^* indica um ligante mais rígido e um menor δ indica um comportamento mais elástico.

Considere a Figura 5.31 como um exemplo ilustrativo da curva sugerida por Khandal e Foo (1997). Verifica-se que o ligante novo é um PG 58- (correspondência com 100% no eixo x) e o ligante envelhecido tem uma temperatura crítica de 88°C (correspondência com 0% no eixo x). Apenas referência à temperatura superior para atender o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta = 1\text{kPa}$ é feita neste exemplo. Uma quantidade de 79% de ligante novo em relação ao total de ligante (combinação de ligante envelhecido e novo) resultaria num PG 64-. Caso as condições de tráfego e ambiente exijam um PG 70- como ligante da mistura reciclada, uma quantidade de ligante novo de 57% seria necessária.

McDaniel e Anderson (2000, 2001), com base nas sugestões de Bukowski (1997) e Kandhal e Foo (1997), propuseram um procedimento de dosagem de MARQ seguindo os critérios adotados pela metodologia Superpave. O procedimento gerado pelo projeto *Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the Superpave system*, codificado como NCHRP 9-12 (2000) baseia-se na extração e recuperação do ligante pelo método

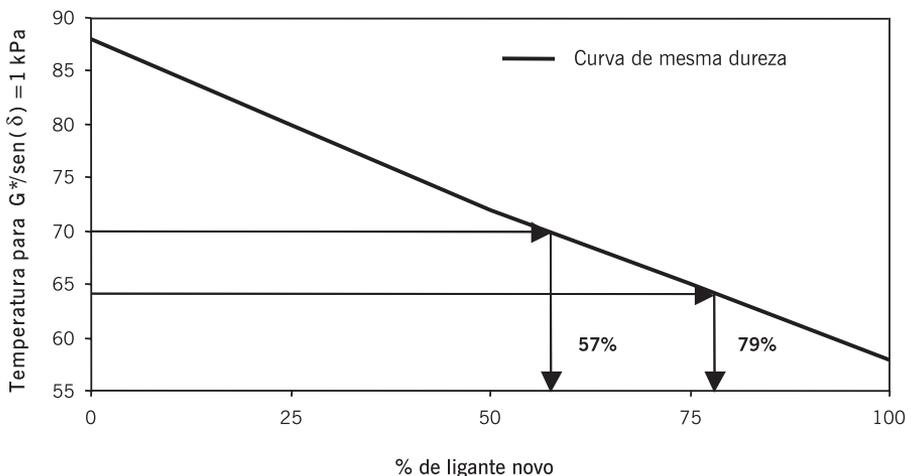


Figura 5.31 Temperatura versus percentagem de ligante novo (Kandhal e Foo, 1997)

AASHTO T 319 (2003) para determinação do teor de ligante do fresado e das características reológicas Superpave do ligante envelhecido à semelhança do método do *Asphalt Institute*. Neste procedimento, misturas com até 20% de material fresado podem ser dosadas como se fossem misturas novas. Acima deste valor de material fresado, o ligante do fresado deve ser extraído e caracterizado pelos parâmetros G^* e δ . Os agregados resultantes da extração também são caracterizados como um novo material a ser incorporado na composição de agregados. O processo é descrito da seguinte forma:

1. Seleção do material fresado a ser reciclado: o material fresado deve ser o mais homogêneo possível. Uma caracterização levando em conta a Gmm da mistura fresada (ASTM D 2041), a distribuição granulométrica sem extração de ligante, o teor de ligante da mistura fresada e a distribuição granulométrica após a extração de ligante são necessários para a determinação da homogeneidade do material. Vale ressaltar que a metodologia empregada para extração e recuperação do ligante é a AASHTO T 319 (2003) dada a boa reprodutibilidade e precisão dos resultados com este método em relação a outros métodos tradicionais.
2. Caracterização dos agregados da mistura fresada separada em duas frações: (i) fração miúda (material passante na peneira 4,76mm ou N° 4) e (ii) fração graúda (material retido nesta peneira). Faz-se a extração de ligante de ambas as frações determinando o teor de ligante de cada. O processo de extração pode ser por equipamento tipo rotarex ou simplesmente queima da mistura fresada com combustão total do ligante em estufa de ignição (*ignition oven*). As duas frações são caracterizadas quanto à granulometria e às massas específicas aparente e real.
3. Definição da quantidade de material fresado a ser reciclado, conforme experiência local.
4. Composição das curvas granulométricas da mistura reciclada: a granulometria da mistura reciclada é determinada a partir das distribuições granulométricas das frações graúda e miúda dos agregados do fresado, do percentual de reaproveitamento deste material na mistura reciclada e das distribuições granulométricas dos agregados virgens. A Tabela 5.21 apresenta um exemplo ilustrativo da composição granulométrica de uma MARQ com 25% de agregados do material fresado (10% de fração miúda e 15% de fração graúda).
McDaniel e Anderson (2001) sugerem que sejam escolhidas e ensaiadas no mínimo três composições granulométricas, todas respeitando os critérios de granulometria da metodologia Superpave (zonas de restrição e pontos de controle).
5. Caracterização das composições de agregados: abrasão Los Angeles, equivalente areia, angularidade da fração miúda (ASTM C 1252), lamelaridade da fração graúda (ASTM D 4791) e determinação das massas específicas, real e aparente (ASTM C 127 e ASTM C 128). Os resultados obtidos nestes ensaios devem se enquadrar nos limites adotados pelos órgãos rodoviários para cada procedimento.

TABELA 5.21 EXEMPLO DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA RECICLADA (% PASSANTE)

| Peneiras (mm) | Fração miúda ^a | Fração graúda ^a | Brita 3/4" | Brita 3/8" | Areia de campo | Pó-de-pedra | Granulometria da MARQ |
|---------------|---------------------------|----------------------------|------------|------------|----------------|-------------|-----------------------|
| | Percentuais de uso | | | | | | |
| | 10% | 15% | 30% | 30% | 5% | 10% | 100% |
| 25,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 19,1 | 100,0 | 85,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 97,7 |
| 12,5 | 100,0 | 69,0 | 73,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 87,4 |
| 9,5 | 100,0 | 41,5 | 39,3 | 97,8 | 100,0 | 100,0 | 72,3 |
| 4,76 | 100,0 | 0,0 | 5,3 | 37,4 | 99,3 | 98,9 | 37,7 |
| 2 | 80,0 | 0,0 | 1,8 | 12,6 | 97,1 | 80,2 | 25,2 |
| 0,42 | 61,0 | 0,0 | 1,1 | 7,1 | 75,3 | 43,2 | 16,6 |
| 0,18 | 38,0 | 0,0 | 0,8 | 5,0 | 37,4 | 21,8 | 9,6 |
| 0,075 | 15,0 | 0,0 | 0,4 | 2,9 | 11,5 | 8,7 | 3,9 |

^a Referente ao material fresado.

6. Caracterização dos ligantes: nesta etapa se verifica a viscosidade, penetração, ponto de amolecimento, além dos parâmetros reológicos G^* e δ dos ligantes.
7. Determinação da quantidade de ligante novo: após realizada a caracterização dos ligantes (do fresado e novo), utiliza-se um gráfico relacionando a temperatura crítica do ligante (correspondente a um valor de $G^*/\text{sen}\delta=1\text{kPa}$) e o percentual de material fresado a ser reaproveitado na mistura final. No exemplo ilustrado na Figura 5.32, para 0% de material fresado tem-se no eixo y a temperatura crítica correspondente ao ligante novo (54°C), enquanto para 100% tem-se a temperatura crítica correspondente ao ligante envelhecido do fresado (87°C). No caso de uma temperatura de trabalho desejada de 64°C , deve-se utilizar 30% de material fresado. No exemplo em questão, caso não se disponha de um ligante novo com temperatura crítica de 54°C , este deve ser misturado com um AR adequando a sua temperatura de trabalho ao valor desejado.

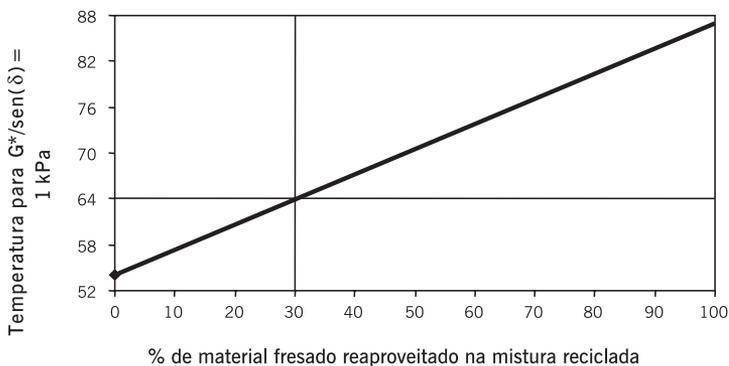


Figura 5.32 Determinação do teor de fresado a ser incorporado na MARQ

8. A partir deste ponto, passa-se para a definição do teor de ligante inicial de projeto e a dosagem segue os passos indicados no procedimento convencional Superpave apresentado anteriormente para misturas a quente. O método de dosagem de MARQ proposto por McDaniel e Anderson (2001) segue todas as etapas do procedimento de dosagem de novas misturas asfálticas a quente do Superpave Nível 1 (SHRP, 1994b), com adição das etapas relativas à caracterização do material fresado, extração de ligante, caracterização de ligantes e agregados, e seleção do ligante novo a ser incorporado na mistura conforme as características do ligante velho (fresado) além das condições de ambiente e tráfego ao qual a mistura estará sujeita.

McDaniel e Anderson (2001) sugerem uma última verificação do teor de ligante definido através do ensaio de suscetibilidade à umidade induzida (AASHTO T 283), proposto inicialmente por Lottman. A relação final entre o valor de RT obtido no ensaio e o valor obtido da maneira convencional deve ser no mínimo de 80%.

5.6 TRATAMENTO SUPERFICIAL

O tratamento superficial, como descrito no Capítulo 4, é um revestimento flexível de espessura delgada, executado por espalhamento sucessivo de ligante asfáltico e agregado, em operação simples ou múltipla, sendo classificado em dois tipos:

- o tratamento superficial simples (TSS) inicia-se pela aplicação do ligante, sendo recoberto em seguida por uma única camada de agregado. O ligante penetra de baixo para cima no agregado (penetração invertida). A prática em alguns estados brasileiros recomenda subdividir a taxa de emulsão em duas aplicações, sendo a primeira antes da distribuição dos agregados e a segunda, diluída em água como banho superficial sobre os agregados já espalhados;
- o tratamento múltiplo inicia-se pela aplicação do ligante que penetra de baixo para cima (penetração invertida) na primeira camada de agregado, enquanto a penetração das camadas seguintes de ligante é tanto invertida como direta. A espessura acabada é da ordem de 10 a 20mm. Os tratamentos múltiplos dividem-se em tratamento superficial duplo (TSD) e tratamento superficial triplo (TST).

O tratamento superficial é uma solução bastante difundida há décadas no país para revestimentos de pavimentos novos, sobre base granular, de solo ou estabilizada, com amplo histórico de sucesso. Mais recentemente a aplicação desta técnica vem sendo estendida também para restaurações de pavimentos, podendo ser executada sobre praticamente qualquer tipo de revestimento que não tenha irregularidades significativas e que não apresente sinais de defeitos estruturais quando utilizada isoladamente (Capítulo 11). Devido à pequena espessura do tratamento, é especialmente importante a sua ligação eficiente à superfície a receber o tratamento.

No tratamento superficial é o agregado que confere a textura e a cor da pista, sendo as seguintes suas funções principais:

- transmitir as cargas até o substrato;
- resistir à abrasão e à fragmentação pela ação do tráfego;
- resistir ao intemperismo;
- assegurar uma superfície antiderrapante;
- promover uma drenagem superficial adequada.

Para obter essas qualidades é necessário que as propriedades geométricas, físico-químicas e mecânicas do agregado, que dependem das suas características mineralógicas e dos métodos usados na sua fabricação, satisfaçam algumas exigências, ilustradas na Figura 5.33:

- desgaste Los Angeles igual ou inferior a 40%;
- índice de forma superior a 0,50;
- durabilidade, perda inferior a 12%;
- granulometria do agregado obedecendo a faixas específicas.

Com respeito à graduação, a distribuição mais uniforme é a mais adequada. Com agregados bem graduados (graduação contínua) há um envolvimento heterogêneo das partículas, podendo-se chegar à ausência total de cobertura de alguns grãos, diminuindo-se assim a adesão global e aumentando-se o risco de rejeição destes. O risco de exsudação posterior do ligante também é maior. Com agregados de dimensões similares, aplicados na taxa correta, há uma adesão mais uniforme e, portanto, maior estabilidade do conjunto. Obtém-se, assim, também, uma área máxima de contato pneu-agregado.

Costuma-se denominar os agregados de dimensões similares pelos diâmetros nominais mínimo (d) e máximo (D), com uma indicação da tolerância quanto às frações menor que d e maior que D . Segundo Pinto (2004), o diâmetro máximo é definido como a abertura da malha da menor peneira na qual passam, no mínimo, 95% do material, enquanto o diâmetro mínimo é a abertura da malha da maior peneira na qual passam, no máximo, 5% do material. Não existe um critério universal quanto aos valores numéricos que devem ser satisfeitos pela granulometria do agregado. Geralmente, os tamanhos relativos das peneiras d e D são assim definidos: $d \geq k \times D$, onde $k = 0,5$ a $0,8$, sendo



(a) Equipamento Los Angeles



(b) Peneiras para índice de forma



(c) Peneiras para análise granulométrica

Figura 5.33 Exemplos de equipamentos para ensaios em agregados para tratamento superficial

(Fotos: Chaves, 2004)

as porcentagens permitidas das frações superiores a D e inferiores a d da ordem de 10 a 25%. A Tabela 5.22 apresenta uma recomendação para a graduação de agregado, de acordo com a intensidade do tráfego (Larsen, 1985).

TABELA 5.22 RECOMENDAÇÃO PARA AGREGADOS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS (Larsen, 1985)

| Tráfego | 1 | 2 e 3 ^a |
|---|---------|--------------------|
| VMD total (volume médio diário nos dois sentidos) | > 2.000 | ≤ 2.000 |
| $k (= d/D)$ | ≥ 0,65 | ≥ 0,50 |
| Fração > D | ≤ 10% | ≤ 20% |
| Fração > 1,25 D | zero | – |
| Fração > 1,50 D | – | zero |
| Fração < d | ≤ 15% | ≤ 25% |
| Fração < 2mm (peneira N° 10) | ≤ 2% | ≤ 5% |
| Fração < 0,075mm (peneira N° 200) | ≤ 0,5% | ≤ 1,0% |

^a Tráfego 2 corresponde a $500 < \text{VMD} \leq 2.000$ e tráfego 3 a $\text{VMD} \leq 500$. Apesar das recomendações serem idênticas para tráfego 2 e 3, o tamanho do agregado tende a ser menor quanto menor o volume de tráfego, e fica a critério do projetista.

De forma geral, quanto mais pesado e intenso o tráfego, maior deverá ser o tamanho do agregado. Por outro lado, quanto mais rígido o substrato, menor será este tamanho. Para fixação adequada do tratamento superficial na base de solo mais fino, é indicado o agulhamento de agregado na mesma, previamente à colocação do TSS. Na escolha do tamanho do agregado, deve-se ainda considerar que, acima de um certo valor, da ordem de 12,5mm (tratamento simples), a dificuldade em se fixar o agregado no ligante aumenta significativamente, sendo maior o risco de rejeição. Quanto maior o tamanho do grão, maior será também o ruído gerado e maior o desgaste dos pneus.

Para os tratamentos múltiplos, o agregado de tamanho maior (primeira camada) é protegido pela(s) camada(s) superior(es), e o risco de rejeição ou de exsudação é menor. O tamanho relativo do agregado, nas várias camadas do tratamento múltiplo, é frequentemente escolhido de tal maneira que o tamanho nominal do agregado em cada camada seja a metade do correspondente tamanho na camada inferior.

A dosagem exata das taxas a serem empregadas deve ser indicada pelo laboratório. A subdosagem de ligante resultará em um revestimento pouco durável, sujeito a desagregação. O excesso de ligante asfáltico resultará em uma camada de rolamento com pouco atrito e sujeita à exsudação.

5.6.1 Projeto do tratamento superficial

O projeto para o tratamento superficial visa a adequação do tipo de tratamento e dos materiais a serem usados, bem como as suas dosagens de acordo com as condições específicas da obra. A base de conhecimento ainda hoje usada nesses projetos data da década de

1930, mais especificamente dos estudos de F. M. Hanson na Nova Zelândia, cujas conclusões foram comprovadas em vários outros países. Atualmente existe um grande número de métodos para dosagem dos materiais no tratamento superficial, em geral considerando-se parâmetros relacionados ao tamanho do agregado: diâmetro médio no caso do método de Linckelheyl; tamanho máximo efetivo (abertura da malha da peneira na qual passam 90% do agregado) no caso do método da Califórnia; diâmetro “médio ponderado” no caso do método do Asphalt Institute. Larsen (1985) destaca que quando se usam agregados de tamanho comum, 5 a 20mm, há pequena diferença nos resultados obtidos pelos diversos métodos.

Ver Larsen (1985) e Pinto (2004) para discussões mais detalhadas e exemplos de diferentes métodos de dosagem, enquanto aqui será visto apenas o método experimental direto de dosagem.

Método experimental direto

O método direto mais usado é o chamado ensaio de placa ou bandeja, que consiste em espalhar o agregado sobre uma placa plana de área conhecida ($500 \times 500\text{mm}$) de modo a cobrir a área da placa, obtendo-se um mosaico uniforme de agregado sem superposição e sem falhas. Deve-se repetir o processo três vezes (Pinto, 2004).

Calcula-se a taxa de agregado graúdo da primeira camada (T_g) pela seguinte expressão:

$$T_g = \frac{P_t - P_p}{A} \quad (5.46)$$

Onde:

P_t = massa da placa com o agregado;

P_p = massa da placa;

A = área da placa.

Conhecida a massa específica aparente solta do agregado em g/cm^3 , calcula-se a mesma taxa em litros/m^2 , ou seja:

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times \frac{10^{-3} \text{ dm}^3}{10^{-3} \text{ kg}} = \frac{\text{l}}{\text{m}^2} \quad (5.47)$$

A taxa de agregado miúdo (T_m) é aproximadamente metade da taxa de agregado graúdo no caso do TSD. A taxa de ligante (T_L), considerando CAP, é determinada por:

$$T_L = 0,10 \times T_T \quad (5.48)$$

Onde:

$$T_T = T_g \left(\frac{\text{l}}{\text{m}^2} \right) + T_m \left(\frac{\text{l}}{\text{m}^2} \right) \quad (5.49)$$

O uso de uma caixa dosadora ($800 \times 250 \times 40\text{mm}$), idealizada por Vaniscotte e Duff (1978a, 1978b), é útil na dosagem do agregado – Figura 5.34 (Larsen, 1985). Espalha-se o agregado sobre o fundo da caixa, em posição horizontal, de modo a formar um

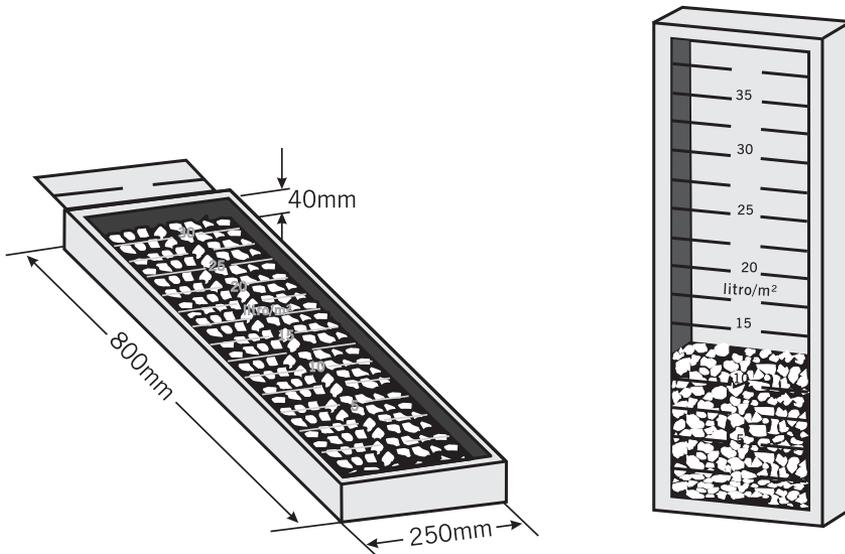


Figura 5.34 Caixa dosadora para tratamento superficial (Larsen, 1985)

mosaico igual ao que se deseja construir na pista. Coloca-se então a caixa na posição vertical e lê-se a taxa de agregado, em litro/m², na graduação indicada na tampa transparente da caixa (Pinto, 2004). A mesma caixa também pode ser usada no controle do espalhamento na pista.

A dosagem ótima é a que corresponde à ausência de exsudação e o mínimo de rejeição de agregado da última camada do tratamento, o que é possível a partir do uso de um simulador de tráfego de laboratório, onde rodas padronizadas solicitam o tratamento construído em placas experimentais.

Pinto (2004) apresenta o seguinte exemplo do método experimental direto para um TSD. Dada a massa da bandeja ou placa com o agregado da primeira camada, $P_t = 9,019\text{kg}$, sendo a massa da bandeja ou placa, $P_p = 3,593\text{kg}$ e a área da placa $A = 0,32\text{m}^2$.

Calcula-se a taxa de agregado grúdo da primeira camada (T_g):

$$T_g = \frac{P_t - P_p}{A} = \frac{9,019 - 3,593}{0,32} = 17\text{kg/m}^2$$

Lembrando que a taxa de agregado miúdo (T_m) é aproximadamente metade da taxa de agregado grúdo, portanto, $T_m = 9\text{kg/m}^2$. A taxa total de agregados é dada por:

$$T_T = 17 + 9 = 26\text{kg/m}^2$$

Conhecida a massa específica aparente solta do agregado, no exemplo $1,35\text{g/cm}^3$, calcula-se a taxa total de agregados em litros/m² da seguinte forma:

$$T_T = \frac{17 + 9}{1,35} = 19\text{litros/m}^2$$

A taxa de ligante (T_L) é determinada por: $T_L = 0,10 \times T_T = 0,10 \times 19 = 1,9 \text{ litro/m}^2$

Esse volume é dividido entre os dois banhos, assumindo-se como regra prática que 60% do valor é colocado no 1º banho de ligante e 40% no 2º banho:

1º banho de ligante (60%): $1,2 \text{ litro/m}^2 \Rightarrow 1^{\text{a}}$ camada de agregado: 17 kg/m^2

2º banho de ligante (40%): $0,7 \text{ litro/m}^2 \Rightarrow 2^{\text{a}}$ camada de agregado: 9 kg/m^2

Como ilustração de dosagem de TST pelo método da caixa dosadora, apresenta-se a seguir um outro exemplo de modo a fornecer ao leitor ordens de grandeza dos parâmetros considerados.

1. Materiais utilizados: o material asfáltico usado é uma emulsão RR-2C, obedecendo às características técnicas da NBR 14594. Os agregados são brita 1 (3/4" – 5/8"), brita 0 (3/8" – 1/4") e pedrisco (1/4" – 2,38mm), enquadradas nas faixas A, B e C da especificação DNER-ES 310/97. As granulometrias desses agregados são apresentadas na Tabela 5.23 e os resultados dos demais ensaios na Tabela 5.24.
2. Projeto: pelo método direto da caixa dosadora chegou-se às quantidades indicadas na Tabela 5.25.

TABELA 5.23 GRADUAÇÃO DOS AGREGADOS PARA TST USADOS NO EXEMPLO

| Peneira | Brita 1 | Especificação Faixa A | Brita 0 | Especificação Faixa B | Pedrisco | Especificação Faixa C |
|---------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|----------|-----------------------|
| 1" | – | 100 | – | – | – | – |
| 3/4" | 100,0 | 90 – 100 | – | – | – | – |
| 1/2" | 23 | 20 – 55 | – | 100 | – | – |
| 3/8" | 0,3 | 0 – 15 | 100,0 | 85 – 100 | 100,0 | 100 |
| Nº 4 | 0,2 | 0 – 5 | 14 | 10 – 30 | 91,4 | 85 – 100 |
| Nº 10 | – | – | 0,4 | 0 – 10 | 22,7 | 10 – 40 |
| Nº 200 | 0,1 | 0 – 1 | 0,2 | 0 – 2 | 0,8 | 0 – 2 |

TABELA 5.24 RESULTADOS DOS DEMAIS ENSAIOS

| | Unidade | Especificação | Brita 1 | Brita 0 | Pedrisco |
|--|-------------------|---------------|---------|---------|----------|
| Massa específica aparente solta | g/cm ³ | – | 1,551 | 1,532 | 1,450 |
| Ensaio de qualidade do agregado | | | | | |
| Índice de lamelaridade (DAER/RS-EL 108/01) | % | 40 – máx. | 13,4 | 8,7 | – |
| Abrasão Los Angeles | % | 40 – máx. | 16,1 | | |

TABELA 5.25 RESULTADOS DA DOSAGEM

| | |
|---|--|
| Taxa da 1ª aplicação de RR-2C | 1,1 litro/m ² |
| Taxa da 1ª aplicação de agregado – brita 1 | 19,4kg/m ² |
| Taxa da 2ª aplicação de RR-2C | 1,2 litro/m ² |
| Taxa da 2ª aplicação de agregado – brita 0 | 10,2kg/m ² |
| Taxa da 3ª aplicação de RR-2C (diluída) | 1,0 litro/m ² diluído a 30% de água |
| Taxa da 3ª aplicação de agregado – pedrisco | 6,7kg/m ² |

Obs.: Para os cálculos da taxa de ligante considerou-se o resíduo da emulsão no valor de 68,0%.

5.7 MICRORREVESTIMENTO E LAMA ASFÁLTICA

Conforme visto no Capítulo 4, o microrrevestimento asfáltico e a lama asfáltica são tecnologias afins, embora a segunda seja mais restritiva, estando os agregados neste caso sujeitos a especificações menos severas quando comparadas às especificações do micro. Em ambos os casos o ganho estrutural é mínimo ou inexistente, sendo as técnicas usadas fundamentalmente para melhoramento da rugosidade do revestimento. Os procedimentos de dosagem são empíricos e envolvem ensaios e análises em laboratório complementadas por observações em campo. Primeiramente são descritos aqui os ensaios mecânicos usados no procedimento de dosagem quando se consideram as duas técnicas, para em seguida serem apresentados de forma resumida os procedimentos propriamente ditos, devidamente acompanhados de exemplos práticos. Aconselha-se buscar as referências Espírito Santo e Reis (1994), FHWA (1994), ISSA (2005a, 2005b) e DNIT (2005) para maiores detalhes.

5.7.1 Ensaios mecânicos

A dosagem da lama asfáltica e do microrrevestimento é realizada de acordo com as recomendações da International Slurry Surfacing Association (ISSA) fazendo uso dos seguintes ensaios, que são descritos a seguir:

- *Wet Track Abrasion Test* (ISSA-TB 100);
- *Loaded Wheel Test* (ISSA-TB 109);
- *Wet Stripping Test* (ISSA-TB 114).

Wet Track Abrasion Test (WTAT)

Por meio deste ensaio determina-se o teor de ligante mínimo para uma lama asfáltica ou um microrrevestimento. O ensaio reflete a resistência à abrasão relativa à porcentagem de ligante. Em conjunto com o *Loaded Wheel Test* (LWT), permite determinar o teor ótimo de ligante que será empregado. O teste simula as condições abrasivas, como veículos freando e fazendo curvas, em condições úmidas. O procedimento de ensaio utiliza uma amostra em forma de disco, com 6mm de espessura e 280mm de diâmetro. Esta amostra



Figura 5.35 Exemplo de equipamento WTAT

é ensaiada após passar um período de 1 hora ou, excepcionalmente, 6 dias submersa em água. Este disco é colocado no equipamento (Figura 5.35), ainda submerso em água e submetido a uma carga abrasiva rotativa de 2,3kg por 5 minutos. Após este período, seca-se e pesa-se o disco. A perda máxima de massa para amostras submetidas à imersão por 1 hora e 6 dias é, respectivamente, 538g/m² e 807g/m². O teor de ligante que resulta nestas perdas de massa é considerado o teor mínimo de ligante.

Loaded Wheel Test (LWT)

Neste ensaio, realizado numa espécie de simulador laboratorial de tráfego, determina-se o teor de ligante máximo para uma lama asfáltica ou um microrrevestimento. O procedimento emprega um corpo-de-prova de 50mm de largura por 375mm de comprimento que é compactado com 1.000 ciclos com carga de 57kg no equipamento (Figura 5.36). Após a compactação, o corpo-de-prova é lavado, seco e pesado. Coloca-se então 300g de areia sobre o corpo-de-prova, que é submetido a mais 100 ciclos. O corpo-de-prova é removido mais uma vez e pesado. O aumento de massa devido à adesão da areia é anotado. O valor máximo aceitável de aumento de massa é de 538g/m².

Wet Stripping Test (WST)

Este ensaio consiste em submeter um corpo-de-prova de 6 ou 8mm de espessura e 60mm de diâmetro da mistura curada à água em ebulição por 3 minutos. Após a amostra ser retirada da água, observa-se quanto da superfície do agregado continuou recoberta por asfalto. Este valor é expresso em percentagem. O valor mínimo estabelecido pela norma é de 90%.



(a) LWT – vista geral



(b) LWT – detalhe

Figura 5.36 Exemplo de equipamento LWT

A dosagem do microrrevestimento pode ainda utilizar dois outros ensaios em adição ao que vem sendo usado para dosagem da lama asfáltica:

- teste de coesão;
- teste de Schulze-Breuer e Ruck.

Teste de coesão

O teste de coesão é usado para classificar o microrrevestimento por tempo de cura e tempo de tráfego e otimizar a quantidade de fíler empregada na mistura. Tempo de cura é o tempo necessário para que uma toalha de papel pressionada sobre a superfície do microrrevestimento não fique manchada por emulsão livre. O coesímetro – Figura 5.37(a) – é um aparelho que aplica uma pressão de 200kPa no corpo-de-prova para a realização do ensaio. O procedimento de ensaio consiste em colocar o corpo-de-prova no coesímetro, aplicar a carga, colocar o torquímetro no local apropriado – Figura 5.37(b), girá-lo num arco de 90° a 120° e medir o torque resultante – Figura 5.37(c).

Uma mistura é definida como de cura rápida se obtém no corpo-de-prova um torque de 1,2N.m quando ensaiado entre 20 e 30 minutos depois de moldado. Uma mistura que desenvolve 1,96N.m de torque quando ensaiada em 60 minutos após a moldagem é classificada como de tráfego rápido. Um torque de 1,2N.m é considerado como a coesão necessária na qual a mistura está “curada”, resistente à água e não pode ser misturada outra vez. O torque de 1,96N.m representa coesão suficiente para abertura ao tráfego.

Teste de Schulze-Breuer e Ruck

Este ensaio é uma checagem final de compatibilidade entre o asfalto e o agregado de 0 a 2mm. São utilizados corpos-de-prova de 30mm de diâmetro por 30mm de espessura (Figura 5.38). O corpo-de-prova é fabricado com agregado misturado a 8,2% de asfalto que é compactado num equipamento apropriado, sendo então submerso em água por seis dias e depois pesado para o cálculo da absorção.



(a) Coesímetro



(b) Ensaio em andamento



(c) Verificação do torque

Figura 5.37 Exemplo de teste de coesão



(a) Colocação do material para a confecção do corpo-de-prova



(b) Compactação do corpo-de-prova



(c) Corpo-de-prova na mão do técnico e equipamentos para sua confecção

Figura 5.38 Exemplo de confecção de corpo-de-prova para o ensaio Schulze-Breuer e Ruck

O corpo-de-prova é então colocado em um tubo com água e encaixado no equipamento (Figura 5.39). Após ser submetido a 3.600 ciclos, é pesado novamente para o cálculo de perda por abrasão. O corpo-de-prova é colocado mais uma vez em água, desta vez em ebulição, e deixado lá por 30 minutos. Depois é pesado e sua massa anotada como um percentual da massa quando saturado, no início do ensaio. Este percentual equivale à coesão a alta temperatura, também denominada de integridade. O corpo-de-prova é então seco ao ar por 24 horas e examinado para averiguar o percentual de partículas de filler que está totalmente encoberto com asfalto. Este percentual é considerado como a adesão.

Cada uma destas propriedades (absorção, perda por abrasão, integridade e adesão) possui um peso estipulado para identificar o melhor asfalto para cada jazida de agregados. A International Slurry Surfacing Association (ISSA) recomenda um mínimo de 11 pontos para considerar a combinação asfalto-agregado como aceitável.



(a) Corpo-de-prova dentro do tubo com água



(b) Tubo sendo colocado no equipamento



(c) Vista geral do equipamento

Figura 5.39 Exemplo de equipamento para ensaio Schulze-Breuer e Ruck

5.7.2 Dosagem de microrrevestimento

Segundo a DNER-ES 389 (1999), a dosagem adequada de microrrevestimento asfáltico a frio é realizada com base nos ensaios recomendados pela ISSA (TB 100, TB 109 e TB 114). Um ajuste de dosagem dos componentes pode ser feito nas condições de campo, antes do início dos serviços. A composição granulométrica da mistura de agregados deve satisfazer os requisitos da Tabela 5.26.

TABELA 5.26 REQUISITOS PARA AGREGADOS USADOS EM MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO (DNIT 035/2005-ES)

| Peneira | | Porcentagem em peso, passando | | | Tolerância* |
|---|-------|-------------------------------|--|--|-------------|
| ASTM | (mm) | I | II | III | |
| 1/2" | 12,50 | – | – | 100 | – |
| 3/8" | 9,50 | 100 | 100 | 85 – 100 | ±5 |
| Nº 4 | 4,76 | 90 – 100 | 70 – 90 | 60 – 87 | ±5 |
| Nº 8 | 2,36 | 65 – 90 | 45 – 70 | 40 – 60 | ±5 |
| Nº 16 | 1,18 | 45 – 70 | 28 – 50 | 28 – 45 | ±5 |
| Nº 30 | 0,60 | 30 – 50 | 19 – 34 | 19 – 34 | ±5 |
| Nº 50 | 0,33 | 18 – 30 | 12 – 25 | 14 – 25 | ±5 |
| Nº 100 | 0,15 | 10 – 21 | 7 – 18 | 8 – 17 | ±3 |
| Nº 200 | 0,075 | 5 – 15 | 5 – 15 | 4 – 8 | ±2 |
| Asfalto residual, % em peso do agregado | | 7,5 – 13,5 | 6,5 – 12,0 | 5,5 – 7,5 | ±0,3 |
| Fíler, % em peso do agregado | | 0 – 3 | 0 – 3 | 0 – 3 | – |
| Polímero, % em peso do asfalto residual | | 3 mín. | 3 mín. | 3 mín. | – |
| Taxa de aplicação, kg/m ² | | 5 – 19 | 8 – 16 | 15 – 30 | – |
| Espessura, mm | | 4 – 15 | 6 – 20 | 12 – 37 | – |
| Utilização | | Áreas urbanas e aeroportos | Rodovias de tráfego pesado e trilhas de roda | Regularização de rodovias e rodovias de tráfego pesado | |

*As tolerâncias constantes na tabela são permitidas desde que os limites da faixa não sejam ultrapassados.

No que diz respeito aos agregados deste tipo de revestimento, ainda segundo a DNIT-035/2005-ES, devem ser constituídos de areia, pó-de-pedra, ou mistura de ambos. Suas partículas devem ser resistentes e apresentar moderada angulosidade, livre de torrões e argila, substâncias nocivas e apresentar as seguintes características:

- abrasão Los Angeles ≤ 40% (DNER-ME 035);
- durabilidade, perda < 12% (DNER-ME 089);
- equivalente de areia ≥ 55% (DNER-ME 054);
- adesividade.

Exemplo – Dosagem de microrrevestimento

O presente exemplo contém a dosagem de um microrrevestimento de uma forma executada na prática por uma empresa nacional. Primeiramente, determinam-se os teores dos agregados de modo a enquadrar o micro numa faixa específica, neste exemplo na Faixa II do DNIT. A Tabela 5.27 apresenta a composição dos agregados, suas respectivas proporções e o devido enquadramento da faixa de projeto na faixa desejada.

TABELA 5.27 COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS PARA MICRORREVESTIMENTO

| Peneira | Pó-de-pedra | Pedrisco | Cal CH1 | Faixa de projeto | | | FAIXA II DNIT 035/2005-ES | |
|---------|-------------|----------|---------|------------------|--------|--------|---------------------------|-------|
| | 69,0% | | | 30,0% | 1,0% | %mín. | Alvo | %máx. |
| 3/8" | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,0 | 100,0 |
| Nº 4 | 99,5 | 18,7 | 100,0 | 70,27 | 75,27 | 80,27 | 70,0 | 90,0 |
| Nº 8 | 74,5 | 2,2 | 100,0 | 48,07 | 53,07 | 58,07 | 45,0 | 70,0 |
| Nº 16 | 51,1 | 1,6 | 100,0 | 31,74 | 36,74 | 41,74 | 28,0 | 50,0 |
| Nº 30 | 36,4 | 1,3 | 100,0 | 21,51 | 26,51 | 31,51 | 19,0 | 34,0 |
| Nº 50 | 26,5 | 1,1 | 98,8 | 15,60 | 19,60 | 23,60 | 12,0 | 25,0 |
| Nº 100 | 18,5 | 0,9 | 95,1 | 10,99 | 13,99 | 16,99 | 7,0 | 18,0 |
| Nº 200 | 12,2 | 0,6 | 89,6 | 7,49 | 9,49 | 11,49 | 5,0 | 15,0 |

O equivalente de areia do agregado foi determinado de acordo com DNER-ME 054, sendo igual a 70,8%. Foi realizado então o ensaio de azul-de-metileno na fração fina do agregado, de acordo com a norma da ISSA-TB 145 (NBR 14949/2003), sendo o resultado 4,0mg/g de agregado.

A partir da composição determinada, e considerando-se 0,5% de aditivo, definiram-se então cinco teores (% em massa) de uma emulsão asfáltica com polímero com resíduo igual a 62,09%. No exemplo, estes teores são 8,0; 9,0; 10,0; 11,0 e 12,0%.

Em seguida, realizaram-se os ensaios mecânicos descritos anteriormente: (i) desgaste por abrasão úmida – WTAT (ISSA-TB 100, NBR 14746/2001) e (ii) adesão de areia – LWT (ISSA-TB 109, NBR 14841/2002). Os resultados são mostrados na Tabela 5.28 e na Figura 5.40. O ponto resultante do cruzamento das duas curvas é o teor ótimo, neste caso 9,2%, correspondendo a um WTAT e a um LWT de 270,3g/m², conforme indicado no gráfico.

TABELA 5.28 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS EM MICRORREVESTIMENTO

| Teor de emulsão, % em massa | 8,0 | 9,0 | 10,0 | 11,0 | 12,0 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Desgaste, WTAT, g/m ² | 520,1 | 294,8 | 167,3 | 88,1 | 26,7 |
| Adesão de areia, LWT, g/m ² | 231,7 | 261,4 | 319,8 | 382,9 | 455,2 |

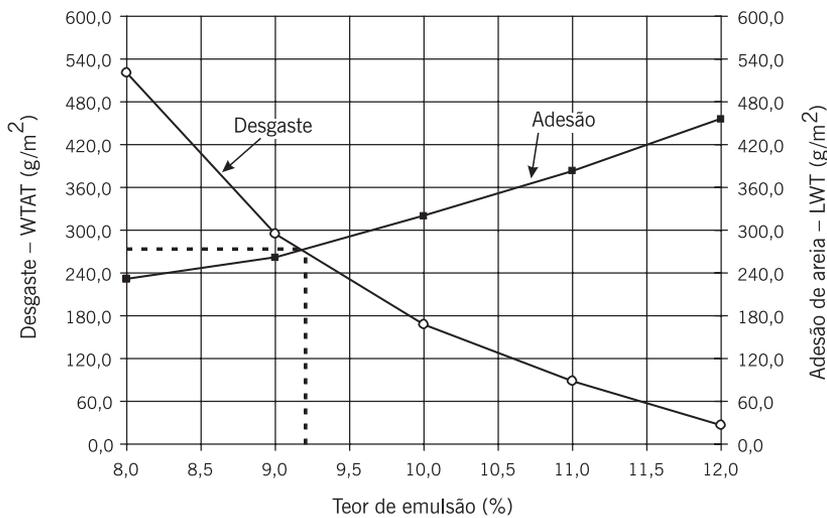


Figura 5.40 Definição do teor ótimo do microrrevestimento

Além dos dois referidos ensaios ainda foram utilizados os seguintes procedimentos de dosagem nos cinco teores de emulsão:

- ISSA-TB 109: deslocamento vertical (D_v) e deslocamento lateral (D_l); no exemplo não foram encontrados deslocamentos;
- ISSA-TB 114: teste de deslocamento úmido (*Wet Stripping Test* – WST), cujo resultado foi 98% nos cinco teores;
- NBR 14757 – determinação da adesividade de mistura.

Apenas no teor ótimo, 9,2% de emulsão, foi então realizado o ensaio de coesão (ISSA-TB 139, NBR 14798/2002), tendo no exemplo sido encontrados os resultados apresentados na Tabela 5.29.

TABELA 5.29 DADOS DE COESÃO NO TEOR ÓTIMO

| | | | |
|------------------------------|-----------|-----------|------|
| Tempo de cura, minutos | 30,0 | 60,0 | 90,0 |
| Coesão, kg.cm | 15,0 | 22,0 | 26,0 |
| Requisito ISSA-TB 139, kg.cm | 12,0 mín. | 20,0 mín. | – |

O resumo das informações da dosagem do microrrevestimento do exemplo em questão é fornecido na Tabela 5.30.

TABELA 5.30 CÁLCULO DOS ÍNDICES EM FUNÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE EMULSÃO

| Índices | Exemplo de dosagem |
|---|--------------------|
| Teor ótimo – emulsão, % | 9,2 |
| Teor ótimo – residual de asfalto, % | 5,7 |
| WTAT – Desgaste, g/m ² | 270,30 |
| LWT – Adesão de areia, g/m ² | 270,30 |
| WST – Deslocamento úmido, % | 98,00 |
| LWT – Deslocamento vertical, % | – |
| LWT – Deslocamento lateral, % | – |

5.7.3 Dosagem de lama asfáltica

De acordo com o DNER (1998), a dosagem de uma lama asfáltica visa determinar, para uma composição de agregados predefinida, os teores ótimos de emulsão e água a serem incorporados à mistura. As etapas do processo são descritas a seguir.

- (a) *Seleção da faixa granulométrica*: a definição da faixa a ser utilizada é orientada, basicamente, pelo estado de superfície do pavimento a ser tratado (fissuração, desgaste, deformações), ou em última instância, pela espessura e textura desejadas para a lama asfáltica.
- (b) *Composição da mistura agregado + fíler*: em função dos materiais disponíveis, deve-se estudar a composição mais favorável, tendo em vista o enquadramento na faixa granulométrica desejada. Deve-se analisar a conveniência do emprego de areia e fíler na mistura.
- (c) *Definição do teor ótimo de emulsão*: é possível estimar o teor ótimo provável a partir da aplicação da fórmula de Duriez, a qual leva em consideração a superfície específica dos agregados que compõem a mistura e um parâmetro designado módulo de riqueza, que é função da faixa selecionada. As expressões de cálculo são as seguintes:

$$E = \frac{0,33P_2 + 0,81P_1 + 2,7S_3 + 9,15S_2 + 21,9S_1 + 135F}{100} \quad (5.50)$$

$$L = k \times E^{1/5} \quad (5.51)$$

$$L_e = \frac{L}{r} \quad (5.52)$$

Onde:

- E = superfície específica da mistura de agregados + fíler, m/kg;
 P_2 = massa do material retido entre as peneiras 1/2" – N° 4;
 P_1 = massa do material retido entre as peneiras N° 4 – N° 10;
 S_3 = massa do material retido entre as peneiras N° 10 – N° 40;
 S_2 = massa do material retido entre as peneiras N° 40 – N° 80;
 S_1 = massa do material retido entre as peneiras N° 80 – N° 200;

- F = massa do material passante na peneira N° 200;
 L = teor residual de asfalto, %;
 L_e = teor de emulsão, %;
 r = resíduo de emulsão, %;
 k = módulo de riqueza, com os seguintes valores correspondentes às Faixas I ($k = 7$), II ($k = 6$), III ($k = 5$ a 6) e IV ($k = 4$).

Como orientação, o DNER (1998) apresenta os limites esperados para o teor ótimo de emulsão, expressos em relação à massa total de agregados, para cada uma das faixas da ES-P 24/91 do DER/PR – Tabela 5.31.

TABELA 5.31 LIMITES DO TEOR DE EMULSÃO PARA FAIXAS DO DER/PR

| Faixa | I | II | III | IV |
|--------------------|---------|---------|---------|--------|
| Teor de emulsão, % | 16 – 20 | 14 – 18 | 12 – 16 | 8 – 12 |

- (d) *Definição do teor ótimo de água:* a quantidade ótima de água deve ser aquela que permita o máximo em trabalhabilidade, sem ocorrência de escorrimento. Um exagerado teor de água tende a provocar a sedimentação dos finos e a flotação da emulsão asfáltica, resultando em superfície exsudada e altamente derrapante sob condições chuvosas. O teor de água está, também, vinculado ao tempo da cura da massa na pista, uma quantidade maior de água implicando maior tempo de cura. A definição do teor ótimo de água é procedida pela análise da trabalhabilidade/consistência da massa, executando-se misturas com o teor teórico da emulsão previamente determinado e diversos teores de água.
- (e) *Definição do teor ótimo de emulsão:* o ajuste da dosagem e a consequente definição de teor ótimo de emulsão são efetuados pelo emprego do WTAT, de acordo com a seguinte seqüência:
1. Moldar três corpos-de-prova, na umidade ótima predefinida para o teor ótimo teórico de emulsão e para teores 1% e 2%, acima e abaixo deste teor.
 2. Submeter cada um dos corpos-de-prova ao WTAT, calculando a média das perdas por desgaste obtidas para cada teor.
 3. Mediante análise visual das condições de envolvimento, textura e trabalhabilidade, e da exigência de obtenção de perdas por desgaste no WTAT iguais ou inferiores a $0,10\text{g/cm}^2$, definir o teor ótimo de emulsão.
- (f) *Apresentação da dosagem:* a composição final da mistura deverá ser apresentada considerando-se a mistura agregados + fíler como sendo 100%, e indicando os teores de água e emulsão asfáltica a adicionar.

Como exemplo, o DNER (1998) apresenta o resumo da dosagem de uma lama asfáltica, conforme indica (i) a composição da mistura (em massa) abaixo e (ii) a granulometria do projeto e faixa de trabalho apresentadas na Tabela 5.32.

Areia = 50,0%; Pó-de-pedra = 42,0%; Cimento Portland = 8,0%; Total (1) = 100,0%
 Água a adicionar = 8,0%; Emulsão RL-1C = 18,0%; Total (2) = 126,0%

TABELA 5.32 GRANULOMETRIA DO PROJETO E FAIXA DE TRABALHO

| Peneira | | Porcentagem em massa, passando | | |
|---------|-------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|
| ASTM | mm | Mistura | Faixa de trabalho | Faixa III (DNER-ES 314/97) |
| 3/8" | 9,50 | 100 | 100 | 100 |
| Nº 4 | 4,80 | 92 | 86 – 98 | 90 – 100 |
| Nº 8 | 2,40 | 76 | 70 – 82 | 65 – 90 |
| Nº 16 | 1,20 | 58 | 52 – 64 | 45 – 70 |
| Nº 30 | 0,60 | 40 | 34 – 46 | 30 – 50 |
| Nº 50 | 0,30 | 22 | 16 – 28 | 18 – 30 |
| Nº 100 | 0,15 | 15 | 12 – 18 | 10 – 21 |
| Nº 200 | 0,075 | 8 | 5 – 11 | 5 – 15 |

Exemplo – Dosagem de lama asfáltica

Procedimento semelhante ao do microrrevestimento é usado para a dosagem de uma lama asfáltica, conforme é mostrado no exemplo a seguir, também obtido da experiência prática de empresa nacional. Determinam-se os teores dos agregados de modo a enquadrar agora a lama numa faixa específica. Neste exemplo uma composição de pó e pedrisco apenas é suficiente para o enquadramento na Faixa IV do DAER-ES-P 20/91. A Tabela 5.33 apresenta as informações relativas à granulometria.

TABELA 5.33 COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS PARA LAMA ASFÁLTICA

| Peneira | Pó-de-pedra + pedrisco | Faixa IV – DAER-ES-P 20/91 | |
|---------|------------------------|----------------------------|-------|
| | | %mín. | %máx. |
| 3/8" | 100,00 | 100 | 100 |
| Nº 4 | 98,40 | 82 | 100 |
| Nº 8 | 92,70 | 70 | 95 |
| Nº 16 | 56,40 | 40 | 64 |
| Nº 30 | 40,60 | 28 | 50 |
| Nº 50 | 26,30 | 15 | 30 |
| Nº 100 | 18,60 | 8 | 20 |
| Nº 200 | 13,40 | 5 | 15 |

O equivalente de areia do agregado foi determinado, encontrando-se 67,1%. O ensaio de azul-de-metileno apontou 9,0mg/g de agregado. Definiram-se então cinco teores (% em massa) de uma emulsão asfáltica, no exemplo, uma emulsão RL-1C sem qualquer aditivo, nos teores 9,0; 10,0; 11,0; 12,0 e 13,0%.

Os resultados de WTAT e LWT são mostrados na Tabela 5.34 e na Figura 5.41, sendo o ponto de intersecção das duas curvas o teor ótimo, neste caso 11,1%, correspondendo a um WTAT e a um LWT de 390g/m². Estes resultados estão de acordo com a ISSA (2005b), que recomenda um máximo de 538g/m² para a adesão de areia no LWT e um máximo de 807g/m² para o desgaste após uma hora no WTAT.

TABELA 5.34 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS EM LAMA ASFÁLTICA

| | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teor de emulsão, % em massa | 9,0 | 10,0 | 11,0 | 12,0 | 13,0 |
| Desgaste, WTAT, g/m ² | 865,0 | 578,2 | 398,4 | 301,0 | 244,5 |
| Adesão de areia, LWT, g/m ² | 300,2 | 333,8 | 386,4 | 440,8 | 486,7 |

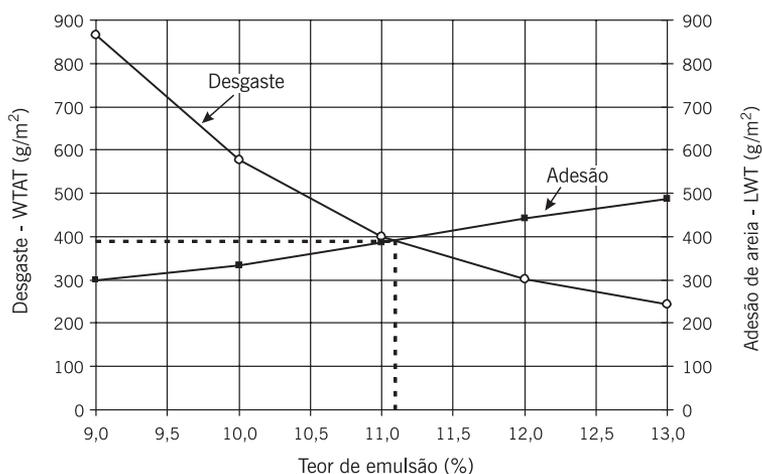


Figura 5.41 Definição do teor ótimo da lama asfáltica

Além desses dois ensaios, ainda é realizado o teste de deslocamento úmido (*Wet Stripping Test* – WST), cujo resultado foi 98% nos cinco teores. Este resultado está também de acordo com o recomendado pela ISSA (2005b) que é um mínimo de 90%. O resumo das informações de dosagem da lama asfáltica do exemplo em questão é fornecido na Tabela 5.35.

TABELA 5.35 CÁLCULO DOS ÍNDICES EM FUNÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE EMULSÃO

| Índices | Exemplo de dosagem |
|---|--------------------|
| Teor ótimo – emulsão, % | 11,1 |
| WTAT – Desgaste, g/m ² | 390,0 |
| LWT – Adesão de areia, g/m ² | 390,0 |
| WST – Deslocamento úmido, % | 98,00 |
| LWT – Deslocamento vertical, % | – |
| LWT – Deslocamento lateral, % | – |

BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA

- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. T 305: *determination of draindown in uncompacted asphalt mixtures*. USA, 1997.
- _____. PP 35: *practice evaluation of Superpave gyratory compactor*. USA, 1998.
- _____. T 209: *standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*. USA, 1999.
- _____. T 166: *bulk specific gravity of compacted bituminous mixtures using saturated surface-dry specimens*. USA, 2000.
- _____. T 283: *standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage*. USA, 2003.
- _____. T 319: *quantitative extraction and recovery of asphalt binder from asphalt mixtures*. USA, 2003.
- _____. T 312: *preparing and determining the density of the hot-mix asphalt (HMA) specimens by means of the Superpave Gyratory Compactor*. USA, 2003.
- ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. *Manual básico de emulsões asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12891: *dosagem de betuminosas pelo método Marshall*. Rio de Janeiro, 1993.
- _____. NBR 14746: *microrrevestimentos a frio e lama asfáltica: determinação de perda por abrasão úmida (WTAT)*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. NBR 14757: *microrrevestimentos e lamas asfálticas: determinação da adesividade de misturas*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. NBR 14798: *microrrevestimentos asfálticos: determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro*. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. NBR 14841: *microrrevestimentos a frio: determinação do excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT*. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. NBR 14949: *microrrevestimentos asfálticos: caracterização da fração fina por meio da absorção de azul-de-metileno*. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 15087: *misturas asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 15140: *misturas asfálticas: determinação do desgaste por abrasão Cantabro*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 14594: *emulsões asfálticas catiônicas: especificação*. Rio de Janeiro, 2005.
- ALDIGUERI, D.R.; SILVEIRA, M.A.; SOARES, J.B. Estudo comparativo entre compactação manual e automática de misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis. *Anais...* Rio de Janeiro: ABPv, 2001. v. 1, p. 804-813.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. Portaria DNC n. 5, de 18 de fevereiro de 1993.
- APRG. *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, 1997.
- ASPHALT INSTITUTE. *The asphalt handbook*. Manual Series, n. 4 (MS-4), College Park, 1956. p. 46-8.
- _____. *Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types*. Manual series n. 2, 1995.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 127: *standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*. USA, 1988.

- _____. D 5002: *standard test method for density and relative density of crude oils by digital density analyzer*. USA, 1994.
- _____. D 1856: *standard test method for recovery of asphalt from solution by Abson method*. USA, 1995.
- _____. C 128: *standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregates*. USA, 1997.
- _____. C 1252: *standard test method for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture, and grading)*. USA, 1998.
- _____. D 4791: *standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate*. USA, 1999.
- _____. D 2041: *standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*. USA, 2000.
- _____. D 2726: *standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures*. USA, 2000.
- _____. D 2172: *standard test methods for quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures*. USA, 2001.
- _____. D 5581: *standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus (6 inch-diameter specimen)*. USA, 2001.
- _____. D 1188: *standard test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using paraffin-coated specimens*. USA, 2002.
- BUCHANAN, M.S.; BROWN, E.R. Effect of Superpave gyratory compactor type on compacted hot mix asphalt density. In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 80., 2001, Washington.
- BUKOWSKI, J.R. *Guidelines for the design of Superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavements (RAP)*. March 1997. Disponível em: <<http://www.utexas.edu/research/superpave/articles/rap.html>>. Acesso em: 01 ago. 2006.
- CASTELO BRANCO, V.T.F.; ARAGÃO, F.T.S.; SOARES, J.B. Caracterização mecânica de misturas asfálticas dosadas em laboratório e em uma usina do tipo drum mixer. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., 2004, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABPv, 2004.
- CASTRO NETO, A.M. Determinação da densidade máxima teórica de misturas betuminosas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. *Anais...* Salvador: ABPv, 1996. v. 1, p. 35-60.
- CASTRO NETO, A.M. *Proposta de dosagem de concreto betuminoso reciclado a quente*. 2000. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- COELHO, W.; SÓRIA, M.H.A. Variabilidade dos resultados do método Marshall. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 11., 1992, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBP, 1992.
- DAER RS – DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO RIO GRANDE DO SUL. EL 108/01: *determinação do índice de lameridade*. Porto Alegre, 2001. 4p.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 089: *agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. ME 107: *mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica: ensaio Marshall*. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. ME 117: *mistura betuminosa: determinação da densidade aparente*. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. ME 043: *misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall para misturas betuminosas*. Rio de Janeiro, 1995.

- _____. ME 084: *agregado miúdo: determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. ME 193: *materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: determinação da densidade e da massa específica*. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. *Especificações gerais para obras rodoviárias do DNER: pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
- _____. ES 310: *pavimentação: tratamento superficial triplo*. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. ES 319: *pavimentação: concreto betuminoso reciclado a quente no local*. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. ME 054: *equivalente de areia*. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. ME 153: *agregados em estado compactado seco: determinação da massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. *Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos*. Rio de Janeiro: DNER, 1998.
- _____. *Pesquisa e asfalto modificado por polímero: relatório Final, tomos I, II e III*. Rio de Janeiro: DNER, 1998.
- _____. ME 035: *agregados: determinação da abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. ME 081: *agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. ES 386: *pavimentação: pré-misturado a quente com asfalto polímero: camada porosa de atrito*. Rio de Janeiro, 1999.
- _____. ES 389: *pavimentação: microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero*. Rio de Janeiro, 1999.
- DNIT — DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2004 - ES: *pavimentação: concreto asfáltico*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. DNIT 035/2005 – ES: *microrrevestimento asfáltico*. Rio de Janeiro, 2005.
- EUROPEAN STANDARDS. EN 12697-5: *bituminous mixtures: test method for hot mix asphalt: determination of the maximum density*. 2002.
- ESPÍRITO SANTO, N.R.; REIS, R.M. Microconcreto asfáltico a frio – uma técnica alternativa para tratamento de superfície. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 12., 1994, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBP, 1994.
- FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *State of the practice, design, construction, and performance of micro-surfacing*. FHWA-SA-94-051, 1994.
- _____. *Background of Superpave asphalt mixture design and analysis*. FHWA-SA-95-003, 1995.
- FRANCKEN, L.; EUSTACCHIO, E.; ISACSSON, U.; PARTL, M.N. Recent activities of RILEM TC 152 – PBM – performance of bituminous materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENT, 8., 1997, Seattle, USA.
- HAFEZ, I.H.; WITCZAK, M.W. Comparison of Marshall and Superpave level I mix design for asphalt mixes. *Transportation Research Record*, n. 1.492, 1995.
- HARMAN, T.; BUKOWSKI, J.R.; MOUTIER, F.; HUBER, G.; MCGENNIS, R. The history and future challenges of gyratory compaction 1939 to 2001. In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 81., 2002, Washington.
- HEIDE, J.P.J.; NICHOLLS, J.C. Harmonized European test methods. Performance testing and evaluation of bituminous materials. PTEBM'03. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 6., Zurich, 2003.
- HINRICHSEN, J. A comparison of four brands of Superpave gyratory compactors. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 80., 2001, Washington.
- INSTITUTO DE ASFALTO. *Manual de asfalto*. Série do Manual n. 4 (MS-4), 1989.
- ISSA – INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. ISSA TB-145: *test method for*

- determination of methylene blue absorption value (mbv) of mineral aggregate fillers and fines. USA, 1989.
- _____. ISSA TB-100: test method number T-100 for wet track abrasion of slurry seals. USA, 1990.
- _____. ISSA TB-109: test method for measurement of excess asphalt in bituminous by use of a loaded wheel tester and sand adhesion. USA, 1990.
- _____. ISSA TB-114: wet stripping test for cured slurry seal mixes. USA, 1990.
- _____. Recommended performance guidelines for micro-surfacing – A 143 (Revised). USA, 2005a.
- _____. Recommended performance guidelines for emulsified asphalt slurry seal – A 105 (Revised). USA, 2005b.
- JACKSON, N.M.; CZOR, L.J. 100-mm-diameter mold used with Superpave gyratory compactor. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003.
- JOOSTE, F.J.; TAUTE, A.; VERHAEGHE, B.M.J.A.; VISSER, A.T.; MYBURGH, O.A. A new hot mix design method for Southern Africa. In: WORLD OF ASPHALT PAVEMENTS CONFERENCE, 2000, Sidney.
- KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R. Comparative evaluation of 4-inch and 6-inch diameter specimens for testing large stone mixes. *NCAT Rep.*, Auburn, n. 90-5, 1990.
- KANDHAL, P.S.; FOO, K.Y. *Designing recycled hot mix asphalt mixtures using Superpave technology, progress of Superpave – evaluation and implementation*. ASTM STP 1322. Robert N. Jester (Ed.), 1997.
- KANDHAL, P.S.; KOEHLER, W.S. Marshall mix design method: current practices. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions*, San Antonio, v. 54, 1985.
- LARSEN, J. *Tratamento superficial na conservação e construção de rodovias*. Rio de Janeiro: ABEDA, 1985.
- MARQUES, G.L.O. *Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória*. 2004. 480 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- MCDANIEL, R.; ANDERSON, R.M. *Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the Superpave system*. Final report for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board – National Research Council. USA, 2000.
- _____. Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual. *NCHRP Report*, n. 452, 2001.
- MCGENNIS, R.B.; ANDERSON, R.M.; PERDOMO, D.; TURNER, P. Issues pertaining to use of Superpave gyratory compactor. *Transportation Research Record*, n. 1543, Washington, p. 117-25, 1996.
- MOREIRA, H.S.; SOARES, J.B. *Reciclagem a frio em pavimentos asfálticos no estado do Ceará*. Projeto de graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. 2002.
- MOTTA, L.M.G. Contribuição para a estimativa do módulo resiliente de misturas asfálticas. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 14., 1998, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBP, 1998.
- MOTTA, L.M.G.; LEITE, L.M.F. Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTES, 11., 2000, Brasil. p. 09-19.
- MOTTA, L.M.G.; TONIAL, I.; LEITE, L.M.; CONSTANTINO, R.S. *Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas*. Rio de Janeiro: IBP, 1996.
- MOURÃO, F.A.L. *Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA*. 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado) — Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

- MOUTHROP, J.S.; HICKS, R.G.; BALLOU, W.R. Emulsion: the future of pavement maintenance? *Asphalt Contractor Magazine*, Feb. 1997.
- NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *NAPA TAS-14: mix design techniques: part I: Instructors Manual*. 1982.
- . *Design and construction SMA mixtures: state of the practice*. 1999. 43p.
- NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the Superpave system*. NCHRP 9-12. 2000.
- PINHEIRO, J.H.M. *Incorporação de borracha moída de pneus em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmido e seco)*. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2004.
- PINTO, S. *Materiais pétreos e concreto asfáltico: conceituação e dosagem*. Rio de Janeiro: IME, 1996.
- . *Tratamento superficial betuminoso*. Rio de Janeiro: IME, 2004.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T.W. *Hot mix asphalt materials, mixture, design, and construction*. 2. ed. Lanham: Napa Education Foundation, 1996.
- ROBERTS, F.L.; MOHAMMAD, L.N.; WANG, L.B. History of hot mix asphalt mixture design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, July/Aug. 2002.
- SANTANA, H. *Manual de pré-misturados a frio*. Rio de Janeiro: IBP/Comissão de Asfalto, 1993.
- SHRP – STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Superior performing asphalt pavements (Superpave): the product of SHRP Asphalt Research Program*. SHRP A-410. Washington: National Research Council, 1994a.
- . *The Superpave mix design system manual of specifications, test methods, and practices*. SHRP A-379. Washington: National Research Council, 1994b.
- SILVEIRA, M.A. *Estudo de adição de polímero em areia-asfalto a frio*. 1999. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.; NÓBREGA, L.M.; LEITE, L.M.; PAIVA, J.A.A.; NOBRE JR., E.F. Estudo comparativo de cimentos asfálticos de petróleo na pista experimental do Ceará. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 12., 1998, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ANPET, 1998. v. 1, p. 590-601.
- SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.; BRANCO, J.V.C. Efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 13., 1999, São Carlos. *Anais...* São Carlos: ANPET, 1999. v. 1, p. 115-25.
- SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.; SOARES, R.F. Análise de bacias deflectométricas para o controle de construção de pavimentos asfálticos. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 14., 2000, Gramado. *Anais...* Gramado: ANPET, 2000.
- TUCHUMANTEL JR., O. Influência da umidade de compactação no PMF – denso. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 10., 1990, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBP, 1990.
- VANISCOTTE, J.C.; DUFF, M. Determination des dosages mayens en gravillons d'enduits superciales. *Bulletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n. 94, 1978a.
- . Enduits superciales – détermination rapide de dosages en granulats. *Bulletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n. 105, 1978b.
- VASCONCELOS, K.L. Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias. 2004. 149 f. Dis-

- sertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2004.
- VASCONCELOS, K.L.; SOARES, J.B.; LEITE, L.M. Influência da densidade máxima teórica na dosagem de misturas asfálticas. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 17., 2003, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ANPET, 2003. v. 1. p. 5-17.
- WANG, J.N.; KENNEDY, T.W.; MCGENNIS, R.B. Volumetric and mechanical performance of Superpave mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Aug. 2000.
- WHITE, T.D. Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions*, San Antonio, v. 54, 1985.
- WHITEOAK, D. *Shell bitumen handbook*. 1991.
- YILDIRIM, Y.; SOLAIMANIAN, M.; MCGENNIS, R.B.; KENNEDY, T.W. Comparative analyses of volumetric properties for Superpave giratory compactors. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 79., Washington, 2000. *Proceedings...*