

36.^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – 36.^a RAP_v

CURITIBA/PR - BRASIL - 24 a 26 de agosto de 2005

Local: Auditório I da Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP)

EFEITOS DA ABSORÇÃO DE LIGANTE PELOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Lilian Taís de Gouveia¹; José Leomar Fernandes Júnior²

¹ Afiliação: Doutoranda – Departamento de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590 – São Carlos – SP – Tel.: 16-3373-9613; Fax: 16-3373-9602; e-mail: ltgouveia@yahoo.com.br

² Afiliação: Professor – Departamento de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590 – São Carlos – SP – Tel.: 16-3373-9598; Fax: 16-3373-9602; e-mail: leomar@sc.usp.br

RESUMO

As propriedades volumétricas das misturas asfálticas são requisitos necessários para um desempenho adequado dos pavimentos. Para agregados que não apresentam absorção, valores corretos dos parâmetros volumétricos das misturas (Volume de Vazios, V_v ; Vazios do Agregado Mineral, VAM e Relação Betume-Vazios, RBV) podem ser facilmente calculados, pois os valores das densidades do agregado (aparente, real e efetiva) são teoricamente iguais. Entretanto, quando o agregado possui algum grau de absorção, o valor obtido para cada parâmetro volumétrico passa a depender da densidade utilizada e da quantidade de asfalto absorvido pelo agregado. Ao fazer uso das densidades do agregado incorretamente, pode-se assumir que uma porção ou toda a porosidade do agregado está inclusa no V_v da mistura, o que ocorre quando se utiliza a densidade real, ou que o asfalto absorvido está preenchendo os vazios entre as partículas de agregados na mistura, o que ocorre quando se utiliza a densidade aparente para o cálculo do V_v . A densidade do agregado e a absorção de asfalto exercem grande efeito nos parâmetros volumétricos, além de influenciar diretamente o teor de asfalto efetivo da mistura, sendo, portanto, imperativo que esses dois fatores sejam cuidadosamente considerados nos projetos de misturas, para que os parâmetros utilizados como critério de projeto sejam calculados corretamente. Como a maior dificuldade está na seleção do valor da densidade que deve ser empregada, este artigo traz uma visão global entre as relações de densidades e propriedades volumétricas, mostrando o real significado de se utilizar uma ou outra densidade do agregado e a dimensão dos erros cometidos no cálculo dos parâmetros volumétricos de misturas asfálticas ao se negligenciar a absorção de asfalto. Apresenta-se, também, um método de cálculo dos parâmetros volumétricos mediante utilização das densidades aparente e efetiva do agregado e com a consideração da absorção de asfalto.

PALAVRAS-CHAVE: misturas asfálticas; propriedades volumétricas; agregados; densidades.

ABSTRACT

The volumetric properties of asphalt mixtures are associated to the pavement performance. For non-absorbing aggregates, volumetric parameters, such as Air Voids (V_v), Voids in the Mineral Aggregate (VMA), and Voids Filled with Asphalt (VFA), can be easily calculated, since the aggregate densities (bulk, real and effective) are theoretically equal. However, if the aggregate is absorptive the value of each volumetric parameter depends on the density used for the calculation. The use of incorrect density can lead to the assumption that a portion or the whole porosity of the aggregate is part of the Air Voids (V_v), what happens when the real density is used, or that the absorbed asphalt is filling the voids between the particles, what happens when the bulk density is used for the calculation of V_v . The aggregate absorption and the density play a very important role in the volumetric parameters calculation, besides directly influencing the effective asphalt content of the mixture and, for this reason, they must be carefully considered in asphalt mixture design, so the volumetric parameters can be correctly calculated. Since the biggest difficulty is the selection of the density to be used, this paper shows a global view of the relationships between densities and volumetric properties. It also shows the real meaning of choosing one or another density and the dimension of the errors associated to the negligence of the asphalt absorption. It is also shown a method of calculus of volumetric parameters through the use of bulk and effective densities and the consideration of asphalt absorption.

KEY WORDS: asphalt mixtures; volumetric properties; aggregates; densities.

INTRODUÇÃO

As propriedades volumétricas das misturas asfálticas são sugeridas como requisitos necessários para assegurar um desempenho adequado dos pavimentos. Em 1905, Richardson [1] reconhece a importância das proporções relativas, por volume, dos componentes das misturas asfálticas em relação ao desempenho dos pavimentos. Marshall, na década de 40, incorpora os conceitos de volume de vazios e de grau de saturação dos vazios da mistura por asfalto (relação betume-vazios) e McLeod [2] [3], na década de 50, propaga o conceito de vazios do agregado mineral e ressalta a necessidade da utilização dessa propriedade para assegurar a durabilidade do pavimento.

Os parâmetros volumétricos das misturas podem ser calculados facilmente se utilizados agregados que não apresentam absorção, pois, nesse caso, os valores das densidades do agregado (aparente, real e efetiva) são teoricamente iguais. Entretanto, quando o agregado possui algum grau de absorção, o valor obtido para cada parâmetro volumétrico passa a depender da densidade utilizada e da quantidade de asfalto absorvido pelo agregado. Ao fazer uso das densidades do agregado incorretamente, pode-se assumir que uma porção ou toda a porosidade do agregado está inclusa no volume de vazios da mistura, o que ocorre quando se utiliza a densidade real, ou que o asfalto absorvido está preenchendo os vazios entre as partículas de agregados na mistura, o que ocorre quando se utiliza a densidade aparente para o cálculo do volume de vazios.

A densidade do agregado e a absorção de asfalto exercem grande efeito nos parâmetros volumétricos, além de influenciar diretamente o teor de asfalto efetivo da mistura, sendo, portanto, imperativo que esses dois fatores sejam cuidadosamente considerados nos projetos de misturas, para que os parâmetros utilizados como critério de projeto sejam calculados adequadamente.

Como a maior dificuldade está na seleção do valor da densidade que deve ser empregada, este artigo traz uma visão global entre as relações de densidades e propriedades volumétricas, mostrando o significado real de se utilizar uma ou outra densidade do agregado e a dimensão dos erros cometidos no cálculo dos parâmetros volumétricos de misturas asfálticas ao se negligenciar a absorção de asfalto. Apresenta-se, também, um método de cálculo dos parâmetros volumétricos mediante utilização das densidades aparente e efetiva do agregado e com a consideração da absorção de asfalto. As propriedades volumétricas das misturas asfálticas podem ser classificadas em parâmetros volumétricos primários e secundários [4], empregando-se a nomenclatura utilizada pelo *Asphalt Institute* e adotada pelo Superpave.

PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS PRIMÁRIOS

Os parâmetros volumétricos primários estão relacionados diretamente com os volumes relativos dos componentes individuais das misturas: volume de ar (V_{ar}), volume de agregados (V_{ag}), volume de asfalto (V_b). Devido ao fenômeno da absorção de asfalto pelo agregado, uma porção do agregado e do asfalto (absorvido) passam a compartilhar o mesmo espaço, ou seja, a soma dos volumes ($V_b + V_{ag}$) é maior do que os seus volumes combinados (V_{b+ag}). Isso leva a uma subdivisão dos parâmetros volumétricos primários em:

- Volume de asfalto efetivo (V_{bef}): asfalto não absorvido pelo agregado;
- Volume de asfalto absorvido (V_{ba}): asfalto dentro dos poros do agregado;
- Volume aparente do agregado (V_{ap}): inclui o volume dos poros permeáveis à água e ao asfalto (Figura 1(a));
- Volume efetivo do agregado (V_{ef}): inclui o volume dos poros permeáveis à água mas não ao asfalto (Figura 1(b));
- Volume real do agregado (V_r): não inclui o volume dos poros permeáveis à água ou ao asfalto (Figura 1(c)).

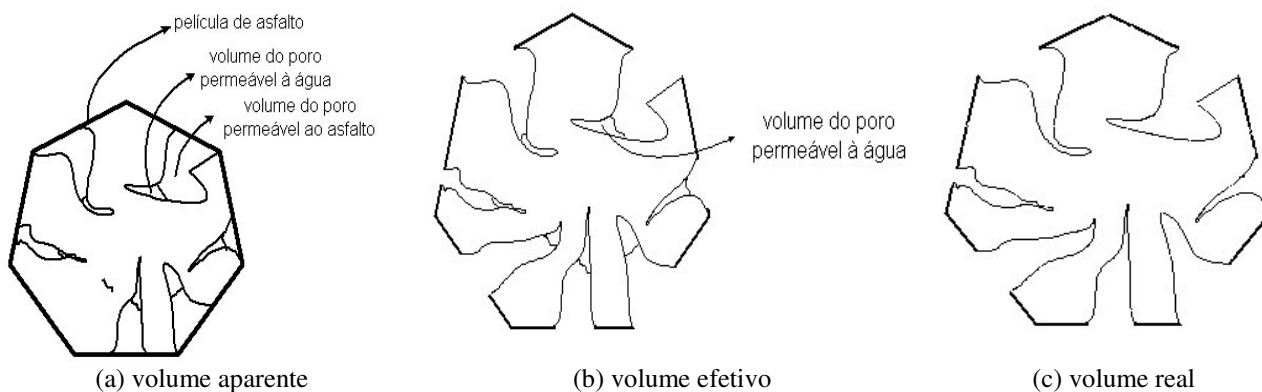


Figura 1. Volumes do agregado

PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS SECUNDÁRIOS

Desde a década de 50, outros três parâmetros volumétricos vêm sendo amplamente utilizados, classificados como parâmetros volumétricos secundários por serem calculados com base nos parâmetros volumétricos primários:

- Volume de Vazios, Vv: volume de ar (V_{ar}) existente entre as partículas do agregado envoltas pelo filme de asfalto, expresso como uma porcentagem do volume total da mistura compactada;
- Vazios do Agregado Mineral, VAM: soma do volume de vazios (Vv) e do volume de asfalto efetivo (V_{be}), expresso como uma porcentagem do volume total da mistura compactada;
- Relação Betume-Vazios, RBV: grau em que os VAM são preenchidos por asfalto, expresso em porcentagem.

DENSIDADES

Para um melhor entendimento conceitual das densidades do agregado, pode-se fazer um paralelo com as densidades da mistura asfáltica. Uma partícula de agregado possui vazios superficiais e vazios internos, assim como as misturas asfálticas. A densidade aparente do agregado, ρ_{ap} , é a razão entre a massa seca do agregado, M_a , pelo seu volume aparente multiplicado pela densidade da água, como mostra a Equação 1. O volume aparente da partícula do agregado, V_{ap} , inclui o volume dos vazios superficiais permeáveis à água e ao asfalto, assim como os vazios internos (vazios impermeáveis).

$$\rho_{ap} = \frac{M_a}{V_{ap} \times \rho_{agua}} = \frac{M_a}{V_{ap} \times 1,000} = \frac{M_a}{V_{ap}} \quad (1)$$

A densidade aparente da mistura asfáltica, d , é a massa total da mistura, M_t , dividida por seu volume aparente, que pode ser determinado por métodos de flutuabilidade ou por medidas, como apresentado na Equação 2.

$$d = \frac{M_t}{V_{ap} \times \rho_{agua}} = \frac{M_t}{V_{ap} \times 1,000} = \frac{M_t}{V_{ap}} \quad (2)$$

A densidade real do agregado, ρ_r , corresponde à razão entre a massa seca da partícula do agregado, M_a , pelo seu volume real (Equação 3). O volume real, V_r , da partícula, inclui os vazios impermeáveis somente, ou seja, por definição não inclui o volume de qualquer poro ou capilar preenchido com água após 24 horas de imersão (vazios permeáveis).

$$\rho_r = \frac{M_a}{V_r \times \rho_{agua}} = \frac{M_a}{V_r \times 1,000} = \frac{M_a}{V_r} \quad (3)$$

Comparativamente à densidade real do agregado está a densidade máxima teórica, DTM, da mistura, que é a razão entre a massa total da mistura, M_t , que compreende a soma das massas do asfalto e do agregado utilizadas na mistura, pelo volume dos sólidos, V_s , que corresponde ao volume do agregado mais o volume de asfalto na mistura. O volume dos sólidos é geralmente calculado com as densidades dos constituintes da mistura.

$$DTM = \frac{M_t}{V_s \times \rho_{agua}} = \frac{M_t}{V_s \times 1,000} = \frac{M_t}{V_s} \quad (4)$$

A densidade efetiva do agregado, ρ_{ef} , é a razão entre a massa seca do agregado, M_a , pelo seu volume efetivo, multiplicado pela densidade da água, como mostra a Equação 5. O volume efetivo da partícula do agregado, V_{ef} , inclui o volume dos vazios superficiais permeáveis à água mas não ao asfalto, assim como os vazios internos (vazios impermeáveis).

$$\rho_{ef} = \frac{M_a}{V_{ef} \times \rho_{agua}} = \frac{M_a}{V_{ef} \times 1,000} = \frac{M_a}{V_{ef}} \quad (5)$$

Analogamente à ρ_{ef} , tem-se a densidade máxima medida (DMM), da mistura asfáltica, que é a densidade máxima teórica determinada através de ensaio laboratorial. Essas propriedades são interdependentes e ambas levam em consideração a absorção de asfalto pelo agregado.

Como a absorção de água pelo agregado relaciona-se com a porosidade da partícula [5 e 6], a absorção de água pode ser calculada pela diferença entre a densidade real e a densidade aparente, como mostra a Equação 6. E o volume de vazios

da mistura compactada pode ser determinado pela diferença entre a densidade máxima teórica e a densidade aparente da mistura (Equação 7), quando o agregado não apresenta nenhum grau de absorção de asfalto.

$$Abs_{agua} = \frac{\rho_r - \rho_{ap}}{\rho_r} \times 100 \quad (6)$$

$$V_v = \frac{DTM - d}{DTM} \times 100 \quad (7)$$

A dificuldade, no entanto, está na seleção do valor da densidade do agregado que deve ser empregada no cálculo dos parâmetros volumétricos secundários, para que valores realísticos sejam encontrados. Deve-se ter em mente que a densidade não pode ser vista apenas como uma variável isolada, porque o valor escolhido para esse fator tem um grande efeito nos parâmetros volumétricos secundários e influencia diretamente o teor de asfalto efetivo da mistura. O processo de escolha da densidade não é simples, pois uma densidade do agregado não é suficiente para o cálculo dos parâmetros volumétricos e, analisando-se o volume ocupado pelo agregado, percebe-se que utilizar apenas uma ou outra densidade pode levar a valores incorretos de V_v , VAM e RBV .

Essa afirmação pode ser melhor explicada através de um exemplo prático, com uma mistura asfáltica de concreto betuminoso usinado a quente, satisfazendo às exigências da norma [7] e utilizando a curva granulométrica apresentada na Tabela 1. A mistura é composta por agregado de gabo e asfalto CAP 20. Foi mantida na temperatura de compactação, durante duas horas [8], antes da compactação com 75 golpes por face do corpo-de-prova, para que o processo de absorção de asfalto pelo agregado fosse concluído. Os dados necessários para o cálculo dos parâmetros volumétricos secundários da mistura estão apresentados na Tabela 2.

Os valores dos parâmetros volumétricos secundários (Tabela 3) correspondem à média de três corpos-de-prova, calculados utilizando-se apenas uma das densidades do agregado (ou aparente, ou efetiva, ou real) e empregando-se a Densidade Máxima Teórica (DMT) da mistura. Dos nove valores listados, apenas o valor do VAM , calculado com base na densidade aparente do agregado (17,1%), e o V_v , calculado com base na densidade efetiva do agregado (4,3%), estão corretamente calculados, os outros valores não correspondem à realidade.

Tabela 1. Curva granulométrica utilizada

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passada (%)
19,0	100
12,5	95
9,50	86
4,75	61
2,36	46
1,18	35
0,60	26
0,30	19
0,15	11
0,075	3,5

Tabela 2. Dados necessários para o cálculo dos parâmetros volumétricos secundários da mistura

Agregado de gabo	
Densidade aparente, (ρ_{ap})	2,742
Densidade efetiva, (ρ_{ef})	2,808
Densidade real, (ρ_r)	2,875
Porcentagem de asfalto absorvido, (A_{abs})	0,9
Asfalto CAP 20	
Densidade, (ρ_b)	1,02
Mistura asfáltica compactada	
Teor de asfalto adicionado à mistura, (P_b)	6,2
Densidade aparente, (d)	2,423

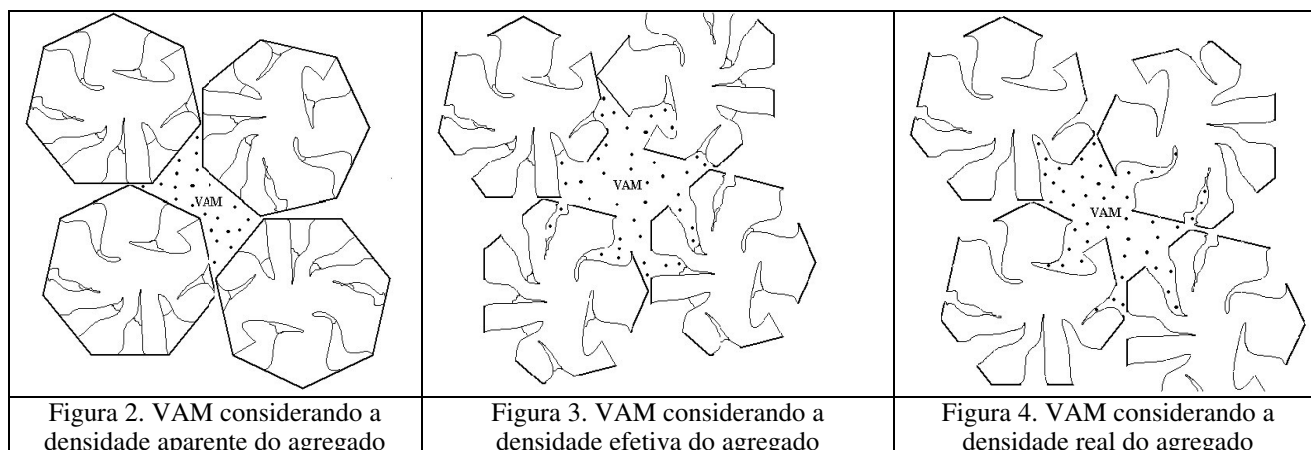
Tabela 3. Parâmetros volumétricos secundários da mistura

Densidades do agregado	DTM	VAM	Vv	RBV
Densidade aparente	2,482	17,1	2,4	86,1
Densidade efetiva	2,533	19,1	4,3	77,2
Densidade real	2,583	20,9	6,2	70,3

O VAM só pode ser calculado corretamente quando utilizada a densidade aparente do agregado pois, dessa forma, assegura-se que o volume do agregado considerado corresponde à soma dos volumes dos poros permeáveis à água e ao asfalto, ou seja, nenhuma porosidade da partícula é tomada como parte do volume de vazios entre as partículas do agregado (Figura 2).

Ao ser empregada a densidade efetiva do agregado, considera-se que o VAM corresponde à soma dos vazios entre as partículas do agregado mais o volume dos poros do agregado permeáveis ao asfalto, como mostra a Figura 3. A inclusão errônea dos espaços porosos do agregado permeáveis ao asfalto como parte do VAM justifica o valor mais elevado (19,1%), em comparação com o VAM de 17,1% corretamente calculado.

Da mesma maneira, ao ser empregada a densidade real, considera-se como parte do VAM o volume dos poros das partículas permeáveis à água e ao asfalto (Figura 4). Tem-se, também, a inclusão errônea dos espaços porosos dos agregados permeáveis à água e ao asfalto no VAM, que explica o valor mais elevado encontrado de 20,9% em relação ao valor de 17,1% calculado corretamente.

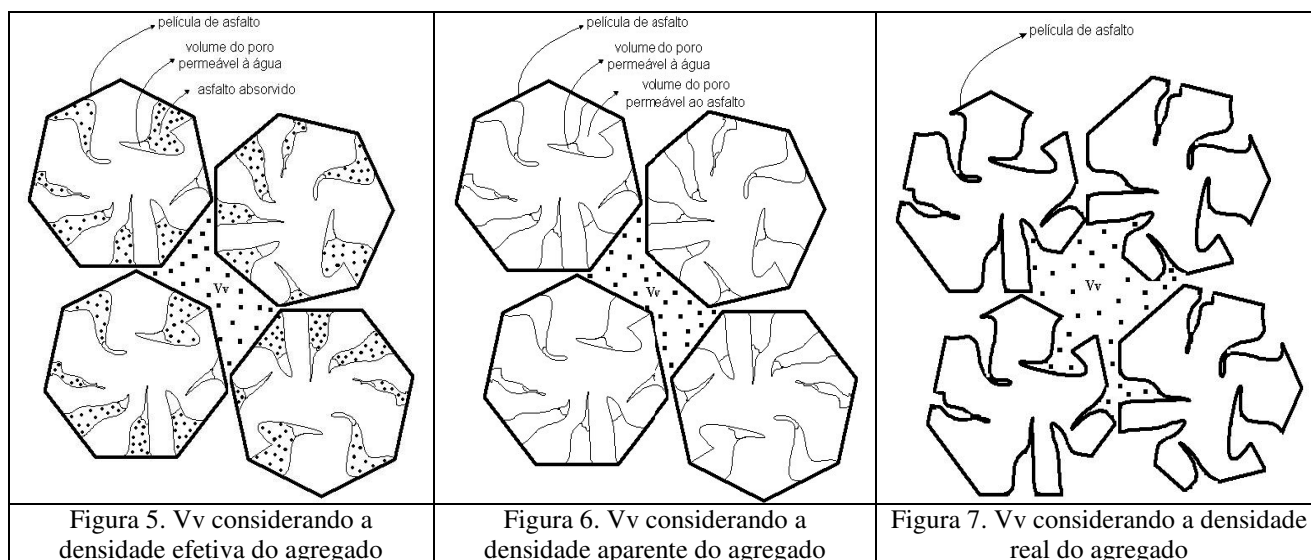


O Vv só pode ser adequadamente calculado através da densidade efetiva do agregado (4,3%), pois somente dessa forma pode-se considerar que parte da quantidade do asfalto adicionado à mistura é absorvido pelo agregado e, portanto, apenas a quantidade não absorvida (efetiva) do asfalto pode preencher os vazios entre as partículas dos agregados (Figura 5).

Ao se empregar a densidade aparente no cálculo do Vv, considera-se que toda a quantidade de asfalto adicionada à mistura está preenchendo os vazios entre os agregados, ou seja, que nenhuma quantidade de asfalto é absorvida, fato que explica o menor valor de Vv (2,4%) em relação aos outros, como ilustra a Figura 6.

Por outro lado, ao se empregar a densidade real no cálculo do Vv, considera-se que os poros permeáveis à água e ao asfalto fazem parte do Vv das misturas, embora somente os vazios entre as partículas de agregado cobertas por asfalto deveriam ser considerados (Figura 7), o que explica os valores elevados de Vv (6,2%), quando comparados aos outros valores mostrados na Tabela 3.

Como a relação betume-vazios é função do VAM e do teor de asfalto efetivo na mistura, depreende-se que nenhum dos três valores apresentados na Tabela 3 pode estar corretamente calculado, pois não há como se obter valores corretos de VAM e Vv com base em uma única densidade. O valor correto de RBV, de 74,7%, e sua demonstração de cálculo estão apresentados no item Método Prático, Equação 37 deste trabalho. Deve-se notar que, particularmente, com a utilização da densidade real dos agregados, valores incorretos são encontrados para as três propriedades volumétricas secundárias (VAM, Vv e RBV).



O exemplo apresentado demonstra que, para a obtenção de valores realísticos de VAM, Vv e RBV, deve-se ter sempre em mente alguns conceitos básicos:

- em uma mistura compactada, somente os espaços entre as partículas de agregados cobertas pela película de asfalto podem ser considerados como volume de vazios;
- a porosidade da partícula de agregado não deve ser incluída como volume de vazios;
- a quantidade de asfalto absorvido não deve ser considerada como parte integrante da película de asfalto.

Com base nos conceitos volumétricos dos agregados e analisando-se o exemplo da Tabela 3, pode-se concluir que, para o cálculo correto dos parâmetros volumétricos da mistura, é necessário a utilização da densidade aparente do agregado conjuntamente com a densidade efetiva do agregado. Um método prático de cálculo dos parâmetros volumétricos secundários, que utiliza a densidade aparente e a densidade efetiva do agregado, é demonstrado, passo a passo, a seguir.

MÉTODO PRÁTICO

Apresenta-se um método prático para o cálculo dos parâmetros volumétricos secundários da mistura, que começa a partir da definição conceitual do parâmetro, seguida pela dedução, até atingir a equação simplificada utilizada.

Vazios do agregado mineral

Por definição

$$VAM = \frac{V_t - V_{ap}}{V_t} \times 100 \quad (8)$$

simplificando

$$VAM = 100 - \frac{V_{ap}}{V_t} \times 100 \quad (9)$$

substituindo o volume pela massa dividida pela densidade

$$VAM = 100 - \frac{M_a / \rho_{ap}}{M_t / d} \times 100 \quad (10)$$

substituindo

$$M_a = M_t - M_t \times P_b \quad (11)$$

e, finalmente, simplificando

$$VAM = 100 - \left(1 - \frac{d(1 - P_b)}{\rho_{ap}} \right) \times 100 \quad (12)$$

Volume de vazios

Por definição

$$V_v = \frac{V_{ar}}{V_t} \times 100 \quad (13)$$

substituindo

$$V_{ar} = V_t - V_{bef} - V_{ap} \quad (14)$$

$$V_v = \frac{V_t - V_{bef} - V_{ap}}{V_t} \times 100 \quad (15)$$

$$V_v = \left(1 - \frac{V_{bef} + V_{ap}}{V_t} \right) \times 100 \quad (16)$$

multiplicando o numerador e o denominador por M_t e simplificando

$$V_v = \left(1 - \frac{M_t / V_t}{M_t / (V_{bef} + V_{ap})} \right) \times 100 \quad (17)$$

e, finalmente, tem-se o V_v . Deve-se destacar que a densidade máxima medida (DMM) é empregada no cálculo do V_v da mistura compactada (Equação 18), pois dessa forma a absorção de asfalto pelo agregado é considerada.

$$V_v = \left(1 - \frac{d}{DMM} \right) \times 100 \quad (18)$$

Relação betume vazios

Por definição, a relação betume-vazios é a porcentagem dos vazios do agregado mineral preenchida por asfalto.

$$RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} \times 100 \quad (19)$$

Densidade efetiva do agregado

Por definição, o volume efetivo do agregado corresponde ao volume do agregado incluindo os poros externos permeáveis à água, mas não permeáveis ao asfalto. Pode-se determinar o volume efetivo do agregado através da subtração do volume total da mistura asfáltica solta (sem vazios), V_{TM} , do volume de asfalto na mistura, V_b . O V_{TM} , é obtido através do ensaio de DMM da mistura, assim como o volume do asfalto é determinado através da massa e da densidade do asfalto. Tem-se:

$$\rho_{ef} = \frac{M_a}{V_{ef}} \quad (20)$$

$$\rho_{ef} = \frac{M_t - (P_b \times M_t)}{V_{TM} - V_b} \quad (21)$$

substituindo

$$\rho_{ef} = \frac{M_t - (P_b \times M_t)}{\frac{M_t}{DMM} - \frac{M_b}{\rho_b}} \quad (22)$$

e, finalmente, simplificando

$$\rho_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{DMM} - \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (23)$$

DMM para diferentes teores de asfalto

Normalmente, a densidade máxima medida da mistura asfáltica é obtida para um teor de asfalto (preferencialmente próximo do teor de projeto) e, então, é calculada a densidade efetiva do agregado através da Equação 23. Mas é necessário que se conheça a DMM da mistura para outros teores de asfalto, para o cálculo do V_v em cada teor.

Pode-se determinar a DMM da mistura para qualquer teor de asfalto, conhecida a densidade efetiva do agregado, o teor de asfalto e a densidade do asfalto, como demonstrado a seguir:

$$DMM = \frac{M_a + M_b}{V_{ef} + V_b} \quad (24)$$

substituindo

$$DMM = \frac{M_t}{\frac{M_a}{\rho_{ef}} - \frac{M_b}{\rho_b}} \quad (25)$$

$$DMM = \frac{M_t}{\frac{M_t(1-P_b)}{\rho_{ef}} - \frac{M_t \times P_b}{\rho_b}} \quad (26)$$

e, finalmente, simplificando

$$DMM = \frac{1}{\frac{1-P_b}{\rho_{ef}} - \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (27)$$

Absorção de asfalto

A taxa de absorção de asfalto pelo agregado é calculada através das densidades efetiva e aparente do agregado, assim como da densidade do asfalto. Conceitualmente, a taxa de absorção de asfalto é uma relação entre a massa do asfalto absorvido pela massa do agregado na mistura, como ilustra a Equação 28.

$$A_{abs} = \frac{M_{b_{abs}}}{M_a} \times 100 \quad (28)$$

substituindo

$$A_{abs} = \frac{V_{b_{abs}} \times \rho_b}{M_a} \times 100 \quad (29)$$

Sendo o volume de asfalto absorvido a diferença entre os volumes aparente e efetivo do agregado, tem-se:

$$A_{abs} = 100 \times \frac{(V_{ap} - V_{ef}) \times \rho_b}{M_a} \quad (30)$$

substituindo

$$A_{abs} = 100 \times \frac{\left(\frac{M_a}{\rho_{ap}} - \frac{M_a}{\rho_{ef}} \right) \times \rho_b}{M_a} \quad (31)$$

e, finalmente, simplificando

$$A_{abs} = 100 \times \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ap} \times \rho_{ef}} \times \rho_b \quad (32)$$

Apresenta-se, com os dados de entrada necessários (Tabela 4), um exemplo de utilização do Método Prático:

Tabela 4. Exemplo 1 – Dados de entrada

Propriedades	Mistura
Porcentagem de asfalto adicionado, (P _b)	6,2
Densidade do asfalto, (ρ _b)	1,02
Densidade aparente, (ρ _{ap})	2,742
Densidade aparente da mistura compactada, (d)	2,423

- Primeiro passo – cálculo da DMM da mistura asfáltica para um teor qualquer de asfalto. A DMM calculada para o teor de asfalto de 5,2%, através do método Rice, é de 2,573.

- Segundo passo – cálculo da densidade efetiva do agregado

$$\rho_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{DMM} - \frac{P_b}{\rho_b}} = \frac{1 - 0,052}{\frac{1}{2,573} - \frac{0,052}{1,02}} = 2,808 \quad (33)$$

- Terceiro passo – cálculo da DMM para um teor desejado de 6,2% de asfalto

$$DMM = \frac{1}{\frac{1 - P_b}{\rho_{ef}} - \frac{P_b}{\rho_b}} = \frac{1}{\frac{1 - 0,062}{2,808} + \frac{0,062}{1,02}} = 2,533 \quad (34)$$

- Quarto passo – cálculo dos vazios do agregado mineral

$$VAM = 100 - \left(1 - \frac{d(1 - P_b)}{\rho_{ap}} \right) \times 100 = 100 - \left(1 - \frac{2,423(1 - 0,062)}{2,742} \right) \times 100 = 17,1\% \quad (35)$$

- Quinto passo – cálculo do volume de vazios da mistura asfáltica compactada

$$V_v = \left(1 - \frac{d}{DMM} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{2,423}{2,533} \right) \times 100 = 4,3\% \quad (36)$$

- Sexto passo – cálculo da relação betume-vazios da mistura asfáltica compactada

$$RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} \times 100 = \frac{17,1 - 4,3}{17,1} \times 100 = 74,9\% \quad (37)$$

Sendo conhecidas as densidades aparente e efetiva do agregado e a densidade do asfalto, pode-se calcular a taxa de absorção de asfalto por massa do agregado:

$$A_{abs} = 100 \times \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ap} \times \rho_{ef}} \times \rho_b = 100 \times \frac{2,808 - 2,742}{2,742 \times 2,808} \times 1,02 = 0,9\% \quad (38)$$

assim como, a quantidade de asfalto efetivo na mistura.

$$A_{ef} = P_b - A_{abs} = 6,2 - 0,9 = 5,3\% \quad (39)$$

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS

A Tabela 5 apresenta os valores do VAM, Vv e RBV calculados através do método prático, que utiliza a densidade aparente e efetiva do agregado, considerando a absorção de asfalto, e os valores calculados utilizando-se apenas uma única densidade do agregado e a DTM da mistura, forma de cálculo que não considera a absorção de asfalto pelo agregado, ou seja, sempre se admite que o agregado não terá nenhum grau de absorção.

Tabela 5. Comparação entre métodos de determinação das propriedades volumétricas da mistura

Densidade aparente e efetiva do agregado e a DMM da mistura	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)
Densidade aparente (2,742) e Densidade efetiva (2,808)	17,1	4,3	74,5
Uma densidade do agregado e a DTM da mistura			
Densidade aparente (2,742)	17,1	2,4	86,1
Densidade efetiva (2,808)	19,1	4,3	77,2
Densidade real (2,875)	20,09	6,2	70,3

Comparando-se os métodos de determinação das propriedades volumétricas secundárias de uma mistura asfáltica apresentados, pode-se concluir que mesmo com agregado de absorção média (0,9%), como é o caso do gábro utilizado neste trabalho, os valores do VAM, V_v e RBV calculados adequadamente através do método prático são expressivamente diferentes dos valores calculados utilizando-se uma única densidade para o agregado e a DMT da mistura.

O valor de VAM de 17,1%, calculado corretamente, é bastante inferior aos calculados utilizando-se a densidade efetiva (19,1%), que considera que parte da porosidade da partícula do agregado faz parte do VAM, e a densidade real, que considera que toda a porosidade da partícula integra o VAM. O valor do V_v calculado com base na densidade aparente do agregado e na DTM da mistura, de 2,4%, está muito abaixo do valor de 4,3% corretamente calculado e o valor do V_v de 6,2% calculado com base na densidade real do agregado e na DTM da mistura está muito acima. As mesmas dispersões entre valores da RBV podem ser verificadas, onde a utilização da DTM da mistura e a densidade aparente do agregado resulta em RBV de 86,1%, enquanto que com a densidade efetiva do agregado tem-se RBV de 77,2% e com a densidade real tem-se RBV de 70,3%, valores bastante diferentes de 74,5%, corretamente calculado.

CONCLUSÕES

Os exemplos de determinação das propriedades volumétricas das misturas, apresentados neste trabalho, ressaltam a necessidade de uma revisão dos métodos utilizados no Brasil para o cálculo das propriedades volumétricas das misturas asfálticas. Como demonstrado, os métodos que utilizam apenas uma única densidade do agregado e negligenciam a absorção de asfalto levam a erros apreciáveis na determinação das propriedades volumétricas das misturas, sendo que os erros atingem valores maiores quando são utilizados agregados de moderada a alta absorção de asfalto.

Para o cálculo correto das propriedades volumétricas das misturas, deve-se utilizar a densidade aparente do agregado, normalizada pelas normas da ASTM, AASHTO ou DNER, e considerar a quantidade de asfalto absorvido pelos agregados, que pode ser determinada através de vários métodos, dentre eles o utilizado nesta pesquisa, o método Rice. Outros métodos de determinação correta das propriedades volumétricas das misturas podem, também, ser utilizados, tais como o Diagrama de Componentes, adotado pelo Superpave, ou o método apresentado por McLeod (1956).

É importante notar que o uso de uma determinada densidade do agregado pode estabelecer a adequação ou não da mistura projetada às especificações requeridas em um método de dosagem. Por exemplo, se a mistura estudada fosse projetada com base na densidade real do agregado, poderia ser considerada inadequada para o propósito da pavimentação por, aparentemente, apresentar déficit de asfalto, pois o V_v está acima de 6% e o RBV abaixo do valor especificado por norma. Porém, ao se calcular as propriedades volumétricas das misturas de maneira correta, ou seja, usando a densidade aparente e efetiva do agregado, verifica-se que a mistura está adequadamente projetada. Portanto, fica bastante claro que uma mistura pode ser aceita ou não dependendo da densidade do agregado empregada e da existência ou não de asfalto absorvido pelos agregados.

REFERÊNCIAS

- [1] Richardson, C. (1905) *The Modern Asphalt Pavement*. John Wiley & Sons, 1 edição.
- [2] McLeod, N. W. (1956) Relationships between density, betumen content, and voids properties of compacted bituminous paving mixtures. *Highway Research Board*, v.35, p.327 – 404.
- [3] McLeod, N. W. (1957) Selecting the aggregate specific gravity for bituminous paving mixtures. *Highway Research Board*, v.36, p.281 – 317.
- [4] Coree, B. J. (1999) Hot-mix asphalt volumetrics revisited. *Transportation Research Record*, n. 1681, p. 50 – 58.
- [5] Gouveia, L. T.; Furlan, A. P.; Parreira, A. B.; Fernandes Jr., J. L.; Fabbri, G. T. P (2004) Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade. XVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis - Santa Catarina.
- [6] Lee, D. Y. (1969) The relationship between physical and chemical properties of aggregates and their asphalt absorption. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.38, p.242 – 275.
- [7] NBR 12891 (1993) *Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- [8] AASHTO PP2 (1990) *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*. American Association of State Highway and Transportation Officials.