EFEITOS DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO SOBRE O VAM E O RBV DE MISTURAS ASFÁLTICAS

José Leomar Fernandes Júnior[1], Lilian Taís de Gouveia[2]

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no **18° Encontro de Asfalto**, realizado no período de 23 a 25 de maio de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Organizador do Evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetidos pelo(s) autor(es).

Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do **18° Encontro de Asfalto**.

Resumo

Este trabalho teve sua origem na seguinte indagação: "estariam as misturas produzidas com agregados brasileiros sendo subestimadas quanto às suas potencialidades mecânicas, devido ao uso de energias de compactação inferiores ao que realmente seria necessário para promover um arranjo entre partículas mais próximo e produzir misturas com esqueleto estrutural mais resistente?" Nesse sentido, avaliam-se os efeitos do aumento da energia de compactação sobre as propriedades volumétricas de misturas asfálticas produzidas com agregados de gabro e basalto, com utilização do compactador Marshall, que é o disponível na grande maioria dos laboratórios de pesquisa brasileiros, e energias de compactação de 75, 110 e 155 golpes por face do corpo de prova. A variação dos Vazios do Agregado Mineral (VAM) com o aumento da energia de compactação, obtida neste trabalho, é uma evidência de que, para alguns agregados brasileiros, 75 golpes por face podem resultar em uma densidade muito aquém da adequada. Além disso, os resultados obtidos mostraram que a elevação da energia de compactação não resultou, como poderia ser imaginado inicialmente, em quebra de partículas significativa e que, considerando-se as características dos agregados brasileiros estudados, que possuem angularidades elevadas e texturas superficiais bastante rugosas, os valores de Relação Betume-Vazio (RBV) especificados pelo Superpave estão inadequados.

Abstract

This paper was originated from the following question: “were the asphalt mixtures produced with Brazilian aggregates being underestimated in terms of their potentialities, due to the use of compaction energies below the necessary to promote a denser arrangement and mixtures with a more resistant mineral skeleton?” In this work it is evaluated the effects of the increasing in compaction energy, from 75 to 110 and 155 blows on each side of the specimen, on volumetric properties of asphalt mixtures produced with gabro and basalt aggregates, using the Marshall compactor, which is the most used in Brazilian research laboratories. The variation in Voids in Mineral Aggregate (VMA) as a function of compaction energy, obtained in this work, is evidence that, for some Brazilian aggregates, 75 blows can result in a density much below the one that could be considered adequate. Other obtained results showed that the compaction energy increasing did not result, as could be suspected initially, in significant broken particles, and that considering Brazilian aggregates characteristics, such as very high angularity and surface texture very rough, the interval for Voids Filled with Asphalt (VFA) established by the Superpave Specification is inadequate.

[1] Doutor, Professor, Departamento de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos – USP
[2] Mestre, Doutoranda, Departamento de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos – USP

1. Introdução

A função dos Vazios do Agregado Mineral (VAM) tem mudado desde sua introdução como critério de projeto de misturas asfálticas. Inicialmente, alguns projetistas tentaram minimizar o VAM para aumentar a estabilidade das misturas. Outros, alteravam o VAM na tentativa de garantir a durabilidade da mistura. Na década de 1950, o VAM era um parâmetro periférico e não muito enfatizado, a ponto do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos especificar valores para a Relação Betume-Vazios (RBV), em projetos de misturas Marshall, mas não para o VAM.

No período entre 1955 e 1962, Norman McLeod, em vários artigos publicados, mostrou a necessidade de utilização de um VAM mínimo como critério de projeto. Em 1962, o Instituto do Asfalto dos Estados Unidos passou a adotar a sugestão de McLeod quanto à utilização do VAM como critério de projeto.

Atualmente, com a implementação do Superpave, novas pesquisas sobre o VAM vêm sendo desenvolvidas, com abordagem principal às dificuldades de se alcançar o VAM mínimo especificado. Alguns pesquisadores, como Anderson & Bahia (1997), ressaltam que o processo de avaliação e seleção da granulometria, com o objetivo de alterar o VAM para enquadrá-lo nas especificações Superpave, é bastante difícil, além do grande tempo consumido no processo. Outros, como Hinrichsen & Heggen (1996), salientam que as especificações para o VAM mínimo são muito restritivas e muitas vezes impedem projetos de misturas econômicas, com desempenho aceitável.

O problema abordado pelos pesquisadores estadunidenses é sempre a dificuldade de se encontrar o VAM mínimo especificado (Kandhal et al., 1998), associado ao aumento do esforço de compactação devido ao uso do compactador giratório. No entanto, os resultados desta pesquisa ressaltaram um problema inverso, em que as misturas apresentaram VAM bastante altos, resultando em valores de RBV acima dos especificados pelo Superpave.

Faz-se, então, a seguinte indagação: "estariam as misturas produzidas com agregados brasileiros sendo subestimadas quanto às suas potencialidades mecânicas, devido ao uso de energias de compactação inferiores ao que realmente seria necessário para promover um arranjo entre partículas mais próximo e produzir misturas com esqueleto estrutural mais resistente?"

O ideal seria que o esforço de compactação pudesse ser fixado em função tanto do tipo quanto das características de superfície dos agregados, além do clima da região e do nível de tráfego. Pretende-se, neste trabalho, dar uma contribuição avaliando-se os efeitos do aumento da energia de compactação sobre as propriedades volumétricas de misturas asfálticas produzidas com agregados de gabro e basalto, com utilização do compactador Marshall, que é o disponível na grande maioria dos laboratórios de pesquisa brasileiros.

2. Vazios do Agregado Mineral

Foi realizada extensa revisão bibliográfica sobre os fatores que influenciam o VAM, destacando-se os seguintes:

- características de superfície do agregado, como forma, angularidade e textura superficial;
- arranjo entre partículas e grau de compactação;
- granulometria;
- proporção entre agregados grossos e finos na mistura;
- proporção e características superficiais dos agregados finos;
- teor de fíler.

Vários estudos foram desenvolvidos enfocando de maneira direta ou indireta o VAM das misturas. Destacam-se as seguintes considerações, muitas delas defendendo pontos de vista conflitantes:

- minimizar o VAM é uma forma de conseguir granulometrias adequadas e de aumentar a estabilidade das misturas (Hudson & Davis, 1965);
- não é aconselhável estabelecer limites para o VAM, considerando aplicações universais, devido à versatilidade das aplicações dos materiais betuminosos e dos vários tipos e granulometrias de agregados (Marshall, 1949);
- os agregados finos são os componentes mais críticos para o controle do VAM e os que mais contribuem para a estabilidade das misturas. Deve-se, sempre, utilizar agregados finos angulares, com textura superficial rugosa e com distribuição granulométrica adequada (Lefebvre, 1957);
- em misturas densas, os valores do VAM controlam a quantidade de asfalto que pode ser incorporada à mistura (McLeod, 1956).

3. Vazios do Agregado Mineral e Energia de Compactação

Considerando-se uma mesma granulometria, o VAM depende do grau de compactação e das características de superfície dos agregados, que, por sua vez, influenciam o arranjo entre partículas. VAM mais elevados são encontrados quando misturas com agregados bastante angulares e com textura superficial rugosa são utilizados para a produção de misturas (Kandhal & Cooley Jr., 2001). Anderson & Bahia (1997) também mostraram que quanto mais angulares e com textura superficial mais rugosa forem os agregados usados na mistura, maior será a resistência à compactação.

Os resultados desta pesquisa apresentam valores de VAM elevados, devido às características de forma e angularidade dos agregados de gabro e basalto utilizados. Portanto, decorre a hipótese de que, para uma mesma granulometria (neste trabalho, acima da zona de restrição, AZR), misturas produzidas com agregados que possuem resistências mais elevadas à compactação (gabro e basalto), devessem ser mais compactadas na tentativa de diminuir o VAM, melhorando dessa forma o arranjo entre partículas e aumentando a estabilidade das misturas.

De acordo com Anderson & Bahia (1997), uma energia de compactação mais elevada pode ser encarada de duas maneiras:

- um esforço de compactação maior resulta em misturas com teores de asfalto menores;
- um esforço de compactação maior resulta em misturas com uma estrutura granular mais resistente.

A redução do teor resulta em uma diminuição da espessura do filme de asfalto, que é um elemento chave para a durabilidade de mistura asfálticas, pois pode ocorrer falta de coesão entre as partículas de agregado e a mistura sofrer mais rapidamente os efeitos da oxidação do ligante. No caso desta pesquisa, no entanto, pode-se encarar a diminuição da película de asfalto, devido à elevação da energia de compactação, de uma maneira salutar para as misturas, pois, com os VAM altos encontrados e, conseqüentemente, RBV acima dos valores especificados, há a preocupação quanto à ocorrência de excesso de asfalto. Portanto, neste estudo, a maneira mais apropriada de analisar uma energia de compactação mais elevada é considerar que esse esforço de compactação adicional resultará em misturas com estruturas granulares mais resistentes.

4. Experimentos Laboratoriais

Utilizando-se uma curva granulométrica que passa acima da zona de restrição do Superpave (AZR) para produzir misturas com agregados de gabro (AZRg) e de basalto (AZRb), foram moldados corpos-de-prova Marshall com energias de compactação de 75, 110 e 155 golpes por face, sendo determinados os teores de projeto para cada nível de compactação.

A Figura 1 ilustra como foi o procedimento de escolha das energias de compactação correspondentes a 110 e 150 golpes por face do corpo de prova. Pode-se verificar que foi mantida a mesma proporção de aumento dos níveis de energia de compactação já adotada no Método Marshall.

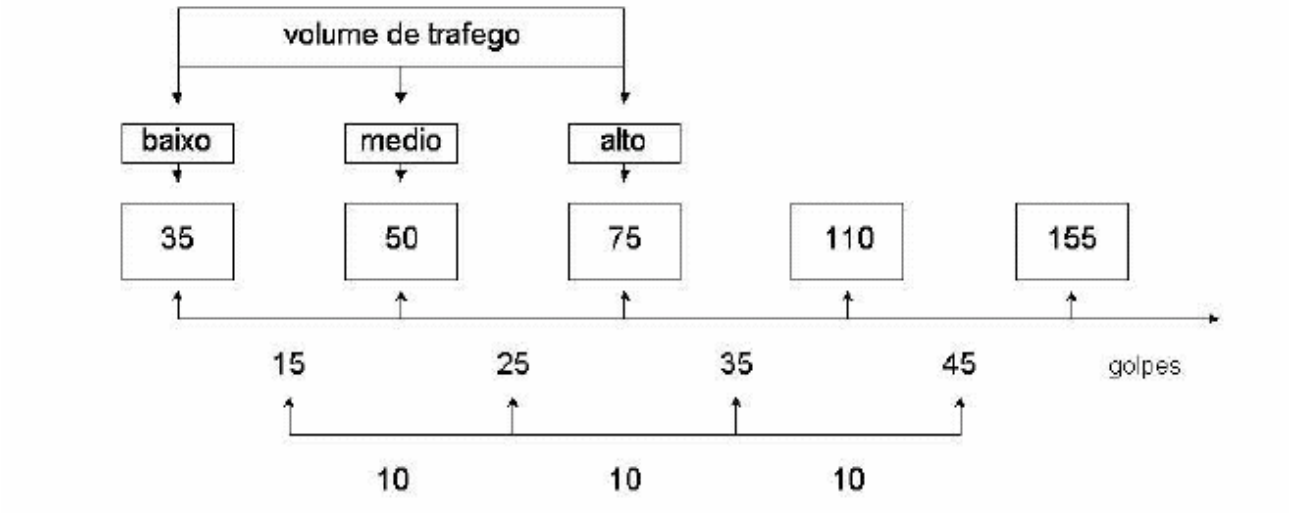

Figura 1. Procedimento para escolha de maiores energias de compactação

Com o propósito de verificar a ocorrência de quebra de partículas durante a compactação, avaliou-se a granulometria das misturas após a compactação, através da extração de asfalto com posterior peneiramento do agregado, no mesmo conjunto de peneiras utilizado neste estudo. Os cálculos foram realizados considerando as diferenças entre a granulometria encontrada após a compactação Marshall e a granulometria original, em todas as peneiras.

5. Resultados e Análise dos Resultados

5.1. Análise de Quebra de Partículas

As porcentagens de quebra das partículas foram baixas, tanto para o agregado de gabro quanto para o agregado de basalto, conforme se pode observar na Tabela 1 e na Figura 2, o que está de acordo com os bons resultados de Abrasão Los Angeles, respectivamente de 18,3% e 16,2%. Pode-se observar, também, que o aumento da energia de compactação de 110 para 155 golpes não alterou significativamente as porcentagens de quebras (de 0,9 a 1,5% para o gabro e de 1,4 para 1,6% para o basalto). Portanto, a preocupação inicial quanto a possíveis quebras de partículas, que poderiam afetar as propriedades mecânicas das misturas e, portanto, os resultados dos ensaios mecânicos realizados, fica descartada.

Tabela 1. Porcentagem de quebra de partículas para energias de compactação de 110 e 155 golpes por face

	Porcentagem que Passa (%)				
	AZRg		AZRb		
Peneira	Número de Golpes		Número de Golpes		AZR de Projeto
(mm)	110	155	110	155	
19,0	100	100	100	100	100
12,5	95	95	95	95	95
9,5	87	89	88	89	86
4,75	63	64	62	62	61
2,36	47	45	46	46	45
1,19	37	37	38	40	35
0,6	27	29	29	30	26
0,3	20	21	21	19	19
0,15	11	12	12	12	11
0,075	3,6	4	4,1	4	3,5
% de Quebra	0,9	1,5	1,4	1,6	

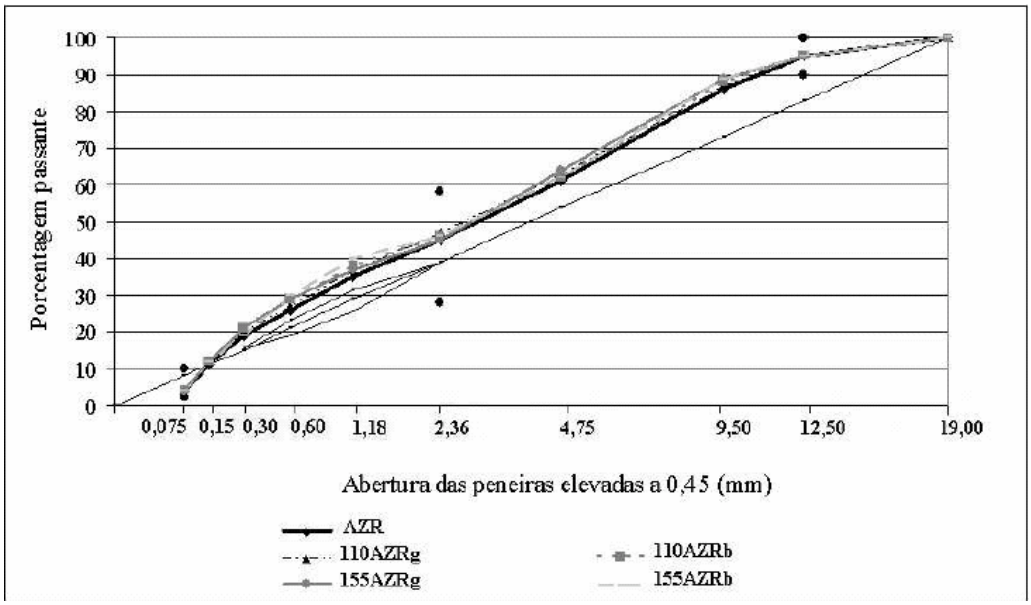

Figura 2. Curvas granulométricas AZRg e AZRb após compactação e AZR de projeto

5.2. Propriedades Volumétricas das Misturas AZR em Função da Energia de Compactação

Os resultados das propriedades volumétricas correspondem à média de aproximadamente 25 corpos de prova, compactados com 75, 110 e 155 golpes do soquete Marshall. Ao analisar os resultados de VAM, apresentados na Figura 3, pode-se perceber um decréscimo de valores conforme a energia de compactação aumenta. Os resultados indicam, também, que houve uma tendência de diminuição do RBV com o aumento do esforço de compactação (Figura 4), mas a mistura AZRb, mesmo com 155 golpes por face, continuou não se enquadrando na faixa de RBV da especificação Superpave (65 a 75%).

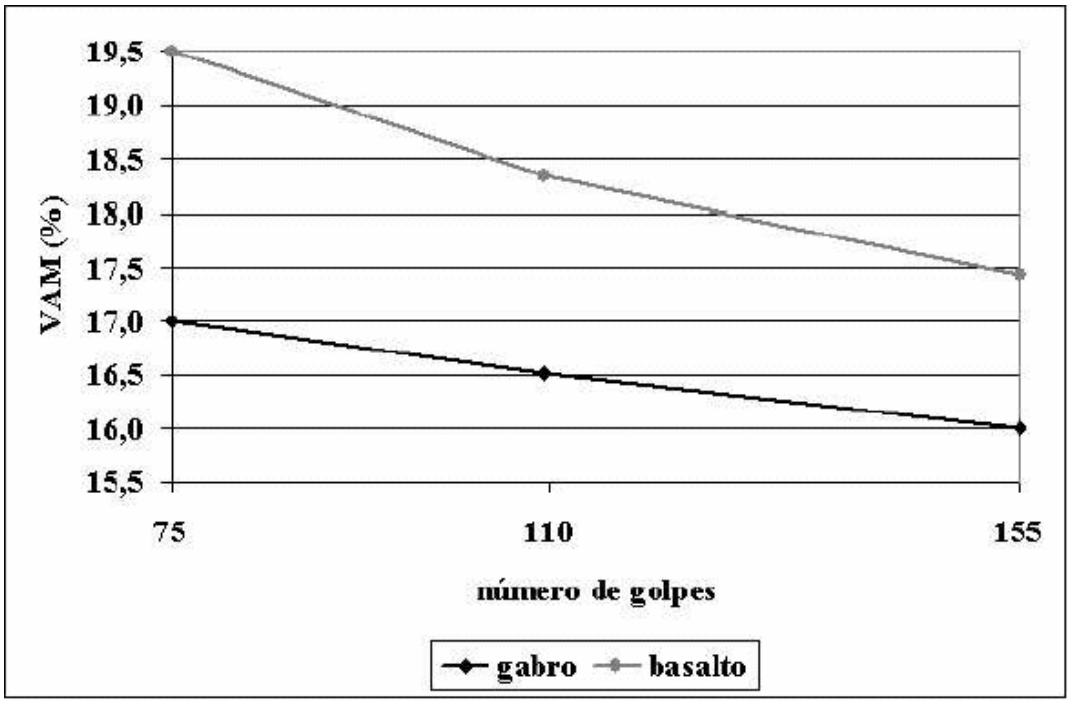

Figura 3. Vazios do Agregado Mineral (VAM) em função da energia de compactação

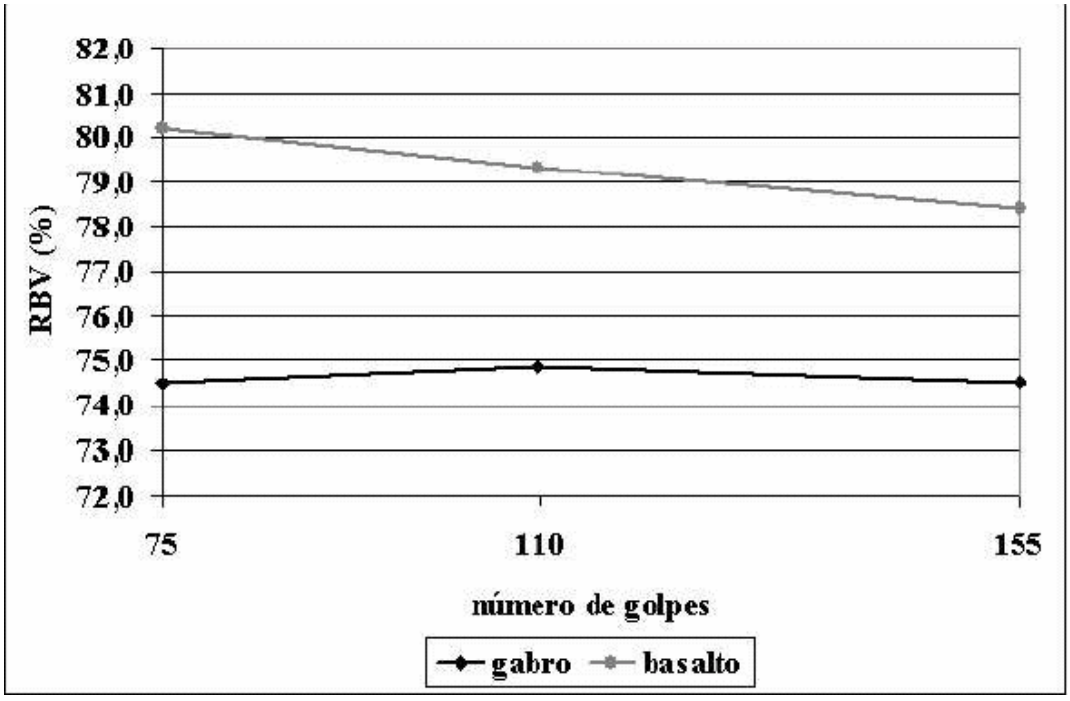

Figura 4. Relação Betume-Vazios (RBV) em função da energia de compactação

A mistura AZRb apresentou um decréscimo mais elevado do VAM, em torno de 2,1%, quando comparado com aproximadamente 1% apresentado pela mistura AZRg. Isso pode ser uma evidência de que a mistura AZRb, que inicialmente apresentou VAM bastante elevado devido à maior resistência à compactação em razão de ter partículas angulosas e rugosas, com o aumento da energia de compactação teve suas partículas arranjadas de maneira mais próxima, aumentando a densidade relativa da mistura. Já a mistura AZRg, que não apresentava VAM tão elevado quanto a mistura AZRb, teve uma aproximação entre partículas, porém, não tão acentuada como a mistura AZRb. Ou seja, pode-se inferir que a mistura AZRb estava, realmente, tendo sua capacidade de arranjo entre partículas subestimada.

Levando-se em consideração que a energia de compactação de 75 golpes por face do corpo de prova é para um tráfego pesado, seria normal que, para 110 golpes por face do corpo de prova, a mistura tivesse uma diminuição pequena do VAM, o que demonstraria que as partículas estavam arranjadas próximas do limite de maior densidade. Assim, ao aumentar a energia de compactação, estava-se investigando a possibilidade de um arranjo ainda mais compacto e estável para a mistura. E a variação do VAM com o aumento da energia de compactação, obtida neste trabalho, é uma evidência de que, para alguns agregados brasileiros, 75 golpes por face podem resultar em uma densidade muito aquém da adequada.

Deve-se destacar que não foi utilizada uma energia de compactação ainda mais elevada que 155 golpes porque, mesmo que a mistura continuasse a compactar, provavelmente sua rigidez seria tão elevada que poderia prejudicar o comportamento quanto à vida de fadiga.

5.3 Asfalto Efetivo e Espessura do Filme de Asfalto em função da Energia de Compactação

A mistura AZRb, com o aumento da energia de compactação de 75 para 110 golpes, teve uma diminuição do asfalto efetivo de 0,5%, e de 110 para 155 golpes teve uma diminuição de 0,4%. Já para a mistura AZRg, essa diminuição foi menor, de 0,1% para energias de compactação entre 75 e 110 golpes e de 0,2% para energias entre 110 e 155 golpes.

Para a mistura AZRb, os decréscimos de espessura do filme de asfalto foram de 0,8µm, para energias entre 75 e 110 golpes, e de 0,5µm para energias entre 110 e 155 golpes. Na mistura AZRg, os decréscimos de espessura do filme de asfalto foram de 0,3µm para energias entre 75 e 110 golpes e de 0,2µm para energias entre 110 e 155 golpes.

5.4 RBV sob Nova Ótica

A especificação Superpave, quanto ao RBV, pode ser analisada de maneira inversa: considerando-se um volume de vazios de 4%, qual deveria ser o valor do VAM das misturas asfálticas quando se deseja obter valores de RBV entre 65 e 75%? Assim, misturas com 4% de Vv e que queiram conservar um RBV de 65%, deverão ter um VAM mínimo de 11%. Já misturas com 4% de Vv e que queiram manter o RBV em 75%, deverão ter um VAM máximo de 16%. Portanto, para a obtenção de misturas com RBV entre 65 e 75%, o intervalo de VAM seria entre 11 e 16%.

A NBR 12891 (1993), norma desenvolvida com base na experiência adquirida através da produção de misturas asfálticas com agregados brasileiros, especifica como faixa limite do RBV valores entre 75 e 82%, limite bem mais elevado do que o praticado nos EUA, de 65 a 75%, para misturas Marshall projetadas para tráfego alto. Isso vem reforçar a idéia de que as propriedades dos agregados nacionais são superiores às dos agregados estadunidenses. Portanto, considerando-se as características dos agregados brasileiros estudados, que possuem angularidades elevadas e texturas superficiais bastante rugosas, os valores de RBV especificados pelo Superpave estão inadequados.

Apesar da importância do VAM para o controle da densidade relativa das misturas (arranjo estrutural entre partículas) e do teor de asfalto efetivo, o VAM ainda não faz parte da norma brasileira de dosagem de misturas pelo Método Marshall, ainda tão utilizada no Brasil. No entanto, para estipular valores limites para o VAM e RBV, como propõe o Superpave, faz-se necessário estudo com amostragens amplas de agregados brasileiros, considerando o VAM em função das características dos agregados e também em função do grau de compactação empregado.

6. Conclusões

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

- a elevação da energia de compactação, com aumento do número de golpes por face do corpo de prova de 75 para 110 e 155, não resultou, como poderia ser imaginado inicialmente, em quebra de partículas significativa;
- considerando-se as características dos agregados brasileiros estudados, que possuem angularidades elevadas e texturas superficiais bastante rugosas, os valores de RBV especificados pelo Superpave estão inadequados;
- o aumento da energia de compactação resultou em diminuição do VAM, que foi mais acentuada para a mistura AZRb, indicando que as partículas angulosas e rugosas do agregado basáltico arranjaram-se de maneira mais

densa, contrariando o pressuposto estabelecido com a adoção de 75 golpes por face do corpo de prova no caso de misturas asfálticas sob tráfego pesado.

Como preâmbulo às considerações finais deste trabalho, deve-se salientar que os especialistas do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) fizeram considerações quanto às propriedades volumétricas das misturas que deveriam ser consideradas e incorporadas pelo Superpave. A média das notas dadas pelos especialistas e publicadas por Cominsky et al. (1994) (SHRP A-408) destaca que o VAM foi considerado como uma propriedade importante das misturas asfálticas, enquanto o RBV não. O Vv e o VAM tiveram aceitação forte, porém o RBV e a porcentagem de fíler tiveram aceitação neutra e a espessura do filme de asfalto teve aceitação baixa.

A experiência adquirida nesta pesquisa mostra que se fosse utilizado o critério do RBV, a mistura AZRb não seria adequada aos propósitos de pavimentação por possuir excesso de asfalto. Mesmo aumentando a energia de compactação, ainda assim a mistura AZRb continuaria apresentando excesso de asfalto, sob a ótica do RBV. Se fosse utilizado o critério de espessura do filme de asfalto, essa mistura seria considerada adequada, pois apresentou, mesmo para 75 golpes, espessura de 8,9µm, apropriada para uma mistura densa.

Existe muita polêmica quanto ao melhor critério a ser usado para garantir durabilidade da mistura, VAM e RBV ou espessura do filme de asfalto. Por exemplo, McLeod (1957), defensor principal do uso do VAM para durabilidade da mistura, afirma que, para uma mistura compactada com 3 a 5% de Vv, deveria ser requerido apenas um VAM mínimo de 15%, pois especificar RBV entre 75 e 85% seria muito restritivo. Vale notar que o limite de RBV que McLeod (1957) achava restritivo demais, por não permitir que uma quantidade suficiente de asfalto fosse adicionada às misturas Marshall para garantir a durabilidade, é bem superior ao especificado pelo Superpave.

Já que o propósito da utilização do VAM é propiciar que pelo menos uma quantidade mínima de asfalto seja adicionada à mistura, garantindo assim sua durabilidade, parece mais racional que seja realmente utilizada uma espessura mínima de película de asfalto, pois, dessa forma, estaria sendo considerado o que realmente interessa, ou seja, o quanto de asfalto que está envolvendo cada partícula do agregado, conforme definido por Kandhal et al. (1998).

No entanto, quão válida pode ser a espessura do filme de asfalto calculada simplesmente pela divisão da área superficial do agregado (obtida de sua granulometria) pelo teor de asfalto efetivo da mistura? É improvável que todas as partículas na mistura tenham a mesma espessura de película envolvendo-as. Partículas de agregados mais grossas podem ou não ter espessura de filme de asfalto mais finas que partículas mais finas e algumas partículas muito finas podem ser simplesmente incorporadas ao asfalto. Além de que, apesar de existirem muitas formas de estimar a área superficial dos agregados, as mais comumente utilizadas partem do pressuposto de que as partículas têm textura superficial lisa e são completamente esféricas, o que obviamente é origem de erros apreciáveis. Outras formas de estimar a área superficial dos agregados podem ser utilizadas, mas geralmente são muito complexas e/ou exigem equipamentos sofisticados. Portanto, utilizando a forma atual e mais comum de cálculo, o termo espessura do filme de asfalto é enganoso e de difícil definição, servindo apenas em termos relativos, para comparação de resultados.

Dúvidas quanto ao melhor critério a ser usado para permitir que uma quantidade suficiente de asfalto seja adicionada à mistura permanece, porém o VAM pode ser um critério adequado se, para utilizá-lo, for levado em conta as propriedades de superfície das partículas de agregado e o grau de compactação adequado a cada mistura.

7. Agradecimento

Este trabalho contou com o apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), na forma de uma bolsa de estudo.

8. Referências

ANDERSON, R. M., BAHIA, H. U. Evaluation and selection of aggregate gradations for asphalt mixtures using Superpave. *Transportation Research Record*, n. 1583, p. 91-97, 1997.

COMINSKY, R. R., LEAHY, R.B., HARRIGAN, E.G. *Level one mix design: Materials selection, compaction, and conditioning*. Technical Report SHRP-A-408, Strategic Highway Research Program, 1994.

HINRICHSEN, J.A., HEGGEN, J. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on gradation and volumetric properties. *Transportation Research Record*, n. 1545, p. 75-79, 1996.

HUDSON, S.B., DAVIS, R. L. Relationship of aggregate voidage to gradation. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 13, p. 9-40, 1965.

KANDHAL, P.S., COOLEY Jr., L. A The restricted zone in the Superpave aggregate gradation specification. *National Cooperative Highway Research Program*, v.464, 2001.

KANDHAL, P.S., FOO, K.Y., MALLICK, R.B.. Critical Revieww of voids in mineral aggregate requirements in Superpave. *Transportation Research Board*, 1998.

LEFEBVRE, J. Recent investigations of the design of asphalt paving mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 26, 1957.

MARSHALL, B.G. *The Marshall Method for the Design and Control of Bituminous Paving Mixtures*, 3rd revision, Jackson, MS, 1949.

McLEOD, N.W. Relationships between density, betumen content, and voids properties of compacted bituminous paving mixtures. *Highway Research Board*, v. 35, p. 327-404, 1956.

McLEOD, N.W. Selecting the aggregate specific gravity for bituminous paving mixtures. *Highway Research Board*, v. 36, p. 281-317, 1957.

NBR 12891. Marshall Method for Asphalt Mixture Design. *Brazilian Association for Technical Standards* , 1993. In Portuguese.