

# LIMITAÇÕES DO ENSAIO DE ANGULARIDADE DO AGREGADO FINO (FAA) PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Lilian Taís de Gouveia

José Leomar Fernandes Júnior

Departamento de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos - USP

## RESUMO

O desempenho das misturas asfálticas de graduação densa é predominantemente influenciado pelas características de forma, angularidade e textura superficial dos agregados finos. O objetivo deste trabalho é verificar se o ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA), adotado pelas Especificações Superpave, é capaz de identificar materiais com melhores condições para utilização em misturas asfálticas. São realizados, além do ensaio FAA, análise visual da forma, angularidade e textura superficial, ensaio de cisalhamento direto em amostras de agregado fino e ensaio Marshall em amostras de misturas asfálticas produzidas com diferentes agregados finos. Os resultados obtidos indicam que o ensaio FAA não separa os efeitos de angularidade e forma das partículas, que um agregado fino com maior FAA não apresenta, necessariamente, uma maior resistência ao cisalhamento, que não há correlação entre estabilidade e valores de FAA e, portanto, o ensaio FAA parece não ser capaz de identificar agregados que proporcionam misturas asfálticas com melhor desempenho.

## ABSTRACT

The performance of dense asphalt mixtures is mainly influenced by shape, angularity and surface texture of fine aggregates. This work aims at verifying if the Fine Aggregate Angularity test (FAA), adopted by Superpave Specifications, is able to identify materials with better conditions for use in asphalt mixtures. Besides the FAA test, other tests are carried out: visual analysis of shape, angularity and surface texture, direct shear test in samples of fine aggregates and Marshall test in samples of asphalt mixtures produced with different fine aggregates. Obtained results indicate the FAA test does not separate the effects of particles angularity from the effects of shape, a fine aggregate with a higher FAA does not necessarily present larger shear strength and there is no correlation between Marshall stability and FAA values. Therefore, the FAA test seems to be unable to identify aggregates which provide mixtures with better performance.

## 1. INTRODUÇÃO

A deformação permanente, o trincamento por fadiga e o desgaste destacam-se como os principais mecanismos de deterioração dos pavimentos rodoviários brasileiros. Nos últimos anos, o aumento da deformação permanente deve-se, entre outros fatores, ao aumento do volume de tráfego e da evolução tecnológica rodoviária, que possibilita que caminhões trafeguem com maiores cargas por eixo e com pressões de enchimento dos pneus muito acima dos 550 kPa (75 psi), valor de referência do *AASHO Road Test*.

Muitos esforços têm sido despendidos na tentativa de conter esse aumento de deformação permanente através da utilização de materiais capazes de suportar as maiores solicitações impostas pelo tráfego. Para misturas de graduação densa, as características da fração fina do agregado, tais como, forma, angularidade e textura superficial das partículas têm influência predominante na estabilidade.

Kim *et al.* (1992) apresentam uma avaliação dos efeitos do tipo do agregado e da granulometria na resistência à deformação permanente das misturas de concreto asfáltico, onde os seguintes fatores são investigados: tipo do agregado, granulometria, tipo de asfalto (maior e menor suscetibilidade térmica), teor de asfalto, volume de vazios, temperatura e nível de tensão aplicada. Os resultados obtidos indicam que o tipo de agregado utilizado tem efeito direto na estabilidade da mistura e que o melhor intertravamento entre as partículas mais angulares resultam em menores deformações permanentes.

Os resultados também mostram que mudanças nas proporções das frações fina e grossa dos agregados, com um mesmo tamanho nominal máximo, não afetam a deformação permanente e que os efeitos das outras variáveis (tipo de ligante asfáltico, volume de vazios e temperatura) na estabilidade são maiores em misturas contendo agregados arredondados e com textura superficial lisa. Segundo os autores, isso ocorre, provavelmente, porque a capacidade de carga suportada pelas misturas com fraco intertravamento entre as partículas de agregados arredondados e com textura superficial lisa dependem muito mais da viscosidade do cimento asfáltico que misturas com melhor intertravamento entre partículas de agregados mais angulares.

Shklarsky & Livneh (1964) desenvolveram um extenso estudo sobre as diferenças entre a fração grossa de agregados angulares e arredondados combinados com agregados finos angulares e arredondados, onde vários parâmetros são estudados, incluindo: estabilidade e fluência Marshall, ângulo de atrito interno e coesão, medidos através do ensaio triaxial, resistência à deformação permanente através do ensaio de trilha de rodas, resistência à fadiga e permeabilidade. Os autores concluem que, ao substituir a fração fina de areia natural (arredondada) por agregado fino britado, em uma mistura com agregado grosso arredondado, ocorre uma enorme melhora: aumento da estabilidade, redução da deformação permanente, menor susceptibilidade à umidade e elevação da qualidade da mistura para o nível de qualidade de uma mistura contendo agregados grossos e finos britados. Por outro lado, ao substituir o material grosso arredondado pelo britado nenhum efeito significativo é verificado.

Kandhal *et al.* (1992) mostram que, embora areias britadas tendam a ter maiores angularidades que as areias naturais, algumas areias naturais apresentam maior coeficiente de atrito interno, indicando uma maior habilidade de intertravamento e de formação de uma estrutura granular mais resistente. Ou seja, maiores valores de coeficiente de atrito podem ser atribuídos à forma e/ou à textura superficial mais rugosa de determinadas areias.

Todos esses trabalhos evidenciam que maiores estabilidades de misturas asfálticas podem ser obtidas através do controle das propriedades dos agregados finos. Portanto, há a necessidade de um ensaio confiável para a classificação dos agregados finos quanto à forma, à angularidade e à textura superficial de suas partículas e para a quantificação de suas características associadas diretamente ao desempenho de misturas asfálticas, visando a detecção de agregados finos que podem produzir misturas menos estáveis.

As especificações Superpave adotam o ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA, *Fine Aggregate Angularity*) para avaliar a forma, a angularidade e a textura superficial dos agregados finos, na tentativa de identificar os agregados que provavelmente proporcionam misturas com menores estabilidades. No entanto, ao longo das implementações e avaliações do método Superpave têm surgido muitos questionamentos a respeito do uso desse ensaio (Fernandes *et al.*, 2000). As dúvidas sobre o alcance e validade dos resultados do ensaio FAA motivaram este estudo, que tem por objetivo verificar se esse ensaio é mesmo capaz de diferenciar agregados finos quanto à forma, à angularidade e à textura superficial e, principalmente, se pode ser utilizado como indicador da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Inicialmente, foram selecionadas vinte amostras de agregados finos, submetidas ao ensaio FAA (método A), seguindo os critérios estabelecidos pela ASTM (1993). A angularidade do agregado fino (FAA) é avaliada através da determinação dos vazios não compactados, quando a amostra é vertida, de uma altura de queda estabelecida, dentro de um cilindro de volume conhecido. Os vazios não compactados são calculados pela diferença entre o volume do cilindro e o volume de agregado no cilindro (Equação 1):

$$U = \frac{V_c - \frac{m_a}{\rho_{ap}}}{V_c} \times 100 \quad (1)$$

onde:

- U = vazios não compactados (%);
- $m_a$  = massa do agregado contida no cilindro (g);
- $\rho_{ap}$  = densidade aparente do agregado fino;
- $V_c$  = volume do cilindro (cm<sup>3</sup>).

Maiores detalhes sobre o ensaio FAA podem ser encontrados em Gouveia & Fernandes Jr. (2001), que também avaliaram agregados finos utilizados em obras viárias no Estado de São Paulo, sem determinar, no entanto, a influência sobre o comportamento das misturas asfálticas.

Com os resultados do ensaio FAA procede-se uma hierarquização das vinte amostras de agregados finos, apresentada na Tabela 2. Através dessa hierarquização, selecionam-se três amostras de agregados finos, representativas de materiais que apresentam valores de FAA alto, médio e baixo e que possuem diferentes mineralogias (um basalto, um granito e uma areia natural).

Geralmente, as medidas de resistência ao cisalhamento de amostras de agregados são realizadas em laboratório através de dois tipos de ensaios: cisalhamento direto e compressão triaxial. Nesta pesquisa, o ensaio de cisalhamento direto foi o escolhido para avaliar as características de resistência das amostras por ser a maneira mais direta e adequada de se determinar a resistência ao cisalhamento de agregados finos (Terzaghi & Peck, 1967).

Os ensaios de cisalhamento direto são realizados de acordo com os critérios estabelecidos pela ASTM (1990), com as três amostras de agregados finos selecionadas. O objetivo é verificar se existe correlação entre os ensaios FAA e a resistência ao cisalhamento, considerando a hipótese de que agregados finos com altos valores de FAA apresentam suas partículas angulosas e/ou com textura superficial rugosa, o que resulta em um maior intertravamento entre as partículas e, conseqüentemente, uma maior resistência ao cisalhamento.

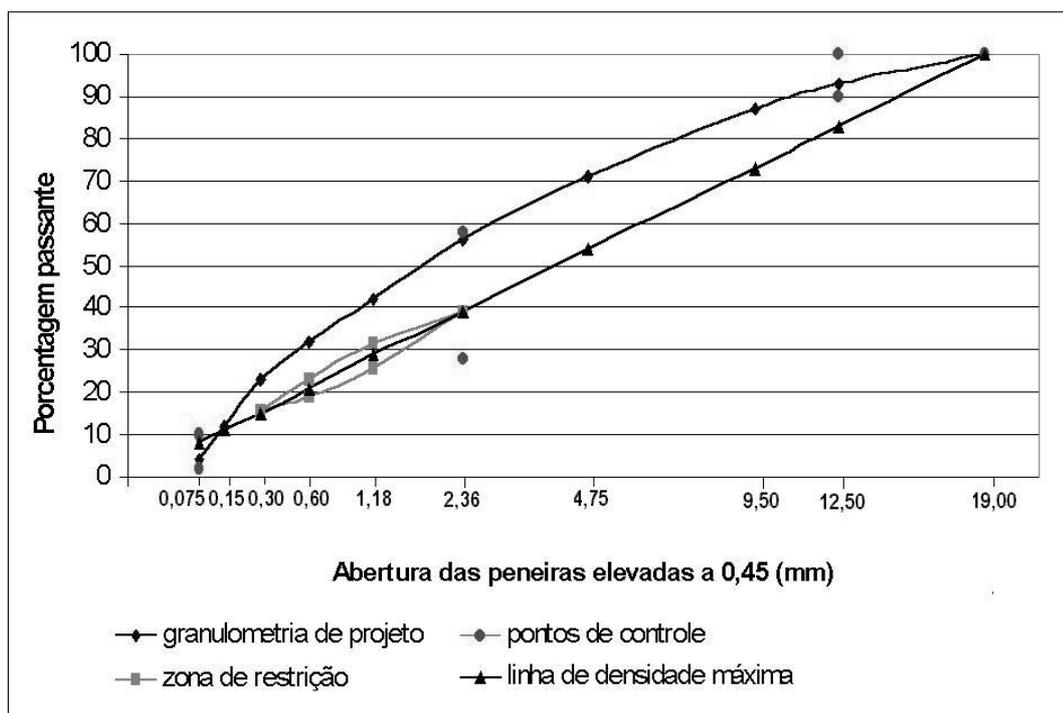
Análises por comparação visual são realizadas para avaliação da forma, angularidade e textura das partículas das três amostras selecionadas. São utilizados os métodos de análise apresentados por Suguio (1973), baseados na tabela de comparação de angularidade de Russell & Taylor (1937) e na tabela de comparação de graus de esfericidade de Rittenhouse (1943), a fim de se determinar o arredondamento (angularidade) e esfericidade (forma) dos

agregados finos. A textura superficial das partículas de agregados finos é examinada através de observações microscópicas e classificada quanto ao seu grau de rugosidade.

Misturas de agregados são preparadas para a realização do ensaio de dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall e ensaiadas para determinação da estabilidade e fluência Marshall. É utilizado um único tipo de agregado grosso combinado alternadamente com as três amostras de agregados finos selecionadas como representativas de materiais que apresentaram valores de FAA alto, médio e baixo.

As misturas de concreto asfáltico são preparadas de acordo com o método de dosagem Marshall através dos critérios estabelecidos pela norma NBR 12891 - ABNT (1993). São moldados 15 corpos-de-prova (tréplicas para cinco teores de ligante asfáltico), executados com 75 golpes por face. A curva granulométrica utilizada encaixa-se na faixa C do DNER, passando acima da linha de densidade máxima e da zona de restrição especificadas pelo Superpave, respeitando-se a limitação imposta pelos pontos de controle (Figura 1).

Na peneira 2,36 mm a quantidade passante de material é maximizada, pois assim tem-se uma maior quantidade de material fino em relação ao material grosso na mistura, o que potencializa os efeitos do agregado fino. Segundo Tayebali *et al.* (1998), o fíler (material passado na peneira de 0,075 mm) não afeta as características de desempenho da mistura se a quantidade utilizada não ultrapassar aproximadamente 4%. Estipula-se, portanto, 4% de fíler na granulometria de projeto.



**Figura 1:** Granulometria de projeto segundo a representação utilizada pelo Superpave

### 3. MATERIAIS

#### 3.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico empregado nesta pesquisa é um cimento asfáltico tipo CAP-20 com densidade real de 1,020 e com propriedades satisfazendo às exigências contidas no Regulamento Técnico DNC n.º 01/92 - Rev. 02, de 24/03/1993, do Departamento Nacional de Combustíveis (Tabela 1).

**Tabela 1:** Características físicas do CAP-20 utilizado

Ensaio	Resultados	DNC 01/92	Métodos
Viscosidade absoluta a 60 °C (poise)	3200	2000 a 3500	MB-827
Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C (s)	120	120 mín.	MB-517
Viscosidade Saybolt Furol a 177 °C (s)	38	30 a 150	
Índice de suscetibilidade térmica	-0.45	-1,5 a +1,0	-
Penetração, 25 °C, 100g, 5s (0,1mm)	48	50 mín.	MB-107
Ponto de fulgor (°C)	262	235 mín.	MB-50

#### 3.2 Materiais Granulares

##### Agregados Finos

Na Tabela 2 apresenta-se as vinte amostras de agregados finos utilizadas e a classificação dessas amostras que constituem um conjunto representativo dos materiais utilizados em obras de pavimentação no Estado de São Paulo.

##### Agregado Grosso

O agregado grosso utilizado para a composição das misturas asfálticas é um agregado britado, de natureza basáltica, proveniente da Pedreira Bandeirantes, localizada em São Carlos – SP.

#### 3.3 Misturas

São estudados três tipos de misturas, produzidas com a mesma granulometria de projeto (Figura 1) e variando-se apenas o tipo de agregado fino. Para a fração grossa dessas misturas é utilizado apenas um tipo de agregado, de natureza basáltica. Para a fração fina consideram-se as amostras dos três agregados finos selecionados como representativas de materiais que apresentam valores de FAA alto, médio e baixo, apresentados no item 4.1. As misturas denominam-se MB, MG e MA, correspondendo respectivamente aos agregados finos de Basalto, de Granito e de Areia natural.

### 4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a comparação dos resultados são realizadas análises estatísticas baseadas no teste de hipóteses para diferenças entre médias de amostras pequenas e independentes utilizando a variável t-Student.

#### 4.1 Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA)

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios FAA, correspondentes à média entre três determinações, e a densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) dos agregados finos. Destacam-se as três

amostras de agregados finos selecionadas como representativas de materiais que possuem valores de FAA alto, médio e baixo.

**Tabela 2:** Resultados dos ensaios de FAA

Pedreiras do Estado de São Paulo	Classificação	$\rho_{ap}$	FAA (%)
01. Pedreira Santa Isabel	Basalto	2,830	51,1
02. Pedreira Fazenda Velha	Granito	2,890	50,4
03. Pedreira Contil	Gnaiss	2,709	49,7
04. Pedreira São Jerônimo	Granito	2,596	49,1
05. Pedreira Basalto - Americana	Basalto	2,917	49,0
06. Pedreira Bonato	Basalto	2,903	48,7
07. Pedreira São Roque	Granito	2,732	48,3
08. Pedreira Bandeirantes	Basalto	2,835	48,3
09. Pedreira Basalto 6	Basalto	2,690	48,2
10. Pedreira 52.314 AM:02	Granito	2,701	48,2
11. Pedreira 52.314 AM:01	Granito	2,654	47,9
12. Pedreira Basalto - Jaguariuna	Gnaiss	2,891	47,8
13. Pedreira 52.414	Granito	2,660	47,8
14. Pedreira Galvani	Basalto	2,974	47,4
15. Pedreira Basalto 05	Gnaiss	2,941	47,0
16. Pedreira 52.232	Granito	2,630	47,0
17. Pedreira Edispel	Basalto	2,818	46,9
18. Pedreira 52.304	Granito	2,738	46,8
19. Rio Moji Guaçú	Areia natural britada	2,632	46,7
20. Rio Moji Guaçú	Areia natural	2,632	44,0

O agregado basáltico, proveniente da Pedreira Santa Isabel, localizada na cidade de Ribeirão Preto, foi selecionado por apresentar valor de FAA igual a 51%, ou seja, o maior valor de FAA encontrado entre as amostras ensaiadas. A areia natural, proveniente do Rio Moji Guaçú, localizado em Rincão (Fazenda Mandi), foi selecionada por apresentar valor de FAA igual a 44%, ou seja, o menor valor de FAA entre as amostras ensaiadas e também por ser a única amostra a apresentar FAA menor do que o valor mínimo de 45% especificado pelo Superpave para rodovias com volume de tráfego alto. Para a amostra representativa de valor de FAA médio, calculou-se a média dos valores de FAA das amostras restantes e optou-se pela amostra granítica da pedreira São Roque, localizada em Santa Bárbara D'Oeste, por ter mineralogia distinta das amostras anteriormente selecionadas.

Pode-se verificar, com base nos resultados apresentados na Tabela 3, que todos os agregados ensaiados, com exceção da areia natural do Rio Moji Guaçú, atendem aos requisitos Superpave para volume de tráfego alto, cujo valor de FAA mínimo é de 45%. A areia natural do Rio Moji Guaçú apresenta valor de FAA inferior a 45%, não sendo recomendada para a pavimentação de rodovias com volume de tráfego alto. Porém, essa areia natural é

considerada aceitável para as misturas asfálticas utilizadas na pavimentação de rodovias com volume de tráfego médio, por apresentar seu valor de FAA entre 40 e 45%.

#### 4.2 Análise Visual da Forma, Angularidade e Textura dos Agregados Finos

A Tabela 3 mostra os valores médios obtidos para a análise visual da forma, angularidade e textura superficial das partículas de agregados finos, realizadas com as amostras basáltica, granítica e de areia natural. Na realização do ensaio, um total de 200 partículas de cada amostra de agregado fino são separadas nas frações de tamanhos utilizadas no ensaio FAA, método A, onde as comparações são feitas para cada fração granulométrica da amostra, pois alguns agregados finos possuem grãos com diferentes graus de arredondamento e de esfericidade em função do tamanho da partícula.

**Tabela 3:** Resultados dos ensaios de forma, angularidade e textura superficial

	Angularidade	Forma	Textura
Areia Natural	arredondada	0,84	lisa
Granito	subangular	0,84	rugosa
Basalto	angular	0,65	rugosa

As partículas do agregado fino basáltico são classificadas como angulares, segundo a tabela de classificação de Russell & Taylor, apresentando cantos agudos, sem sinais de desgaste. Essas partículas possuem esfericidade média de 0,65, de acordo com a tabela de classificação de Rittenhouse, o que representa uma forma plana e alongada, e textura superficial rugosa.

As partículas do agregado fino granítico são classificadas como subangulares, com cantos apresentando incipiente desgaste. Essas partículas possuem esfericidade média de 0,84, o que representa uma forma arredondada, e textura superficial rugosa.

As partículas de areia natural são classificadas como arredondadas, apresentando cantos suavemente desgastados. As partículas de areia natural possuem esfericidade média de 0,84, o que representa uma forma arredondada. A textura superficial dessas partículas mostra-se preponderantemente lisa, mas com sinais de corrosão em alguns pontos.

#### 4.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto são realizados com as três amostras de agregados finos selecionados. Admitindo-se que as características principais que interferem na resistência ao cisalhamento dos agregados são a compactação, o tamanho nominal máximo, a granulometria, a resistência mecânica, a forma, a angularidade e a textura superficial das partículas, ao serem realizados ensaios de cisalhamento com amostras na mesma compactação, mesmo tamanho de partículas e mesma granulometria, está-se analisando as características de forma, de angularidade e de textura superficial dessas partículas.

A Tabela 4 apresenta os valores médios das resistências ao cisalhamento máximas obtidos para as réplicas de corpos-de-prova de amostras graníticas, basálticas e de areia natural. Através da análise estatística dos resultados verifica-se que a areia natural apresenta menor valor de resistência ao cisalhamento em relação às amostras graníticas e basálticas para todas as tensões normais ensaiadas. Para as tensões normais de 191 e 500 kPa os valores de

resistência ao cisalhamento máxima das amostras graníticas e basálticas podem ser considerados semelhantes. Para uma tensão normal de 383 kPa, as amostras graníticas apresentam maiores valores de resistência ao cisalhamento que as amostras basálticas.

**Tabela 4:** Resultados das médias das resistências ao cisalhamento máximas

Tensões Normais (kPa)	Materiais		
	Areia Natural (kPa)	Granito (kPa)	Basalto (kPa)
191	207	242	234
383	380	445	425
500	481	566	559

O menor valor de resistência ao cisalhamento máxima da amostra de areia natural deve-se, provavelmente, ao fato de possuir partículas menos angulares (cantos arredondados) e com textura superficial lisa, que resulta um menor intertravamento entre suas partículas.

O valor ligeiramente maior de resistência ao cisalhamento máxima da amostra granítica é, provavelmente, devido ao fato de possuir partículas de formas cúbicas, subangulares e com textura superficial rugosa, que resulta num maior intertravamento entre suas partículas, enquanto as partículas basálticas, apesar de mais angulares que as graníticas e de possuírem textura superficial similar, apresentam forma plana e alongada.

Das curvas tensão-deformação são tomados os valores máximos das tensões cisalhantes que, conjugados com as tensões normais correspondentes, permitem a definição de pontos num diagrama tensão de cisalhamento versus tensão normal. O ajuste de uma reta entre os pontos obtidos no diagrama permite definir a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb e, assim, os parâmetros  $c$  (intercepto de coesão) e  $\phi$  (ângulo de atrito interno) do agregado fino ensaiado.

Na Tabela 5 apresenta-se o ângulo de inclinação médio das amostras ensaiadas, que representa o ângulo de atrito interno entre as partículas das amostras compactadas, e o intercepto de coesão. Pode-se observar que o ângulo de atrito interno da amostra de areia natural é menor do que os das amostras graníticas e basálticas e que os agregados graníticos e basálticos apresentam ângulos de atrito aproximadamente iguais.

**Tabela 5:** Resultados das envoltórias de resistência

Amostras	Intercepto de coesão (c)	Angulo de atrito interno ( $\phi$ )	Coefficiente de determinação ( $R^2$ )
Areia Natural	38,05	41,6	0,99
Granito	41,98	46,4	1,00
Basalto	31,48	46,3	0,99

Os ângulos de atrito mais elevados das amostras graníticas e basálticas em relação às amostras de areia natural indicam uma maior habilidade dos agregados graníticos e basálticos de intertravarem-se e criar, assim, uma estrutura granular mais resistente. Portanto, os maiores

valores do ângulo de atrito podem ser atribuídos à maior angularidade e à textura superficial mais rugosa das amostras graníticas e basálticas em relação à amostra de areia natural. Porém, não há distinção entre os ângulos de atrito interno das amostras graníticas e basálticas, embora possuam forma e angularidade distintas. Os resultados evidenciam a importância relativa da textura superficial e, eventualmente, da resistência mecânica das partículas para a resistência ao cisalhamento.

#### 4.4 Ensaio Marshall

A Tabela 6 mostra um resumo dos valores médios das características físicas e mecânicas, obtidos para as réplicas de corpos-de-prova no ensaio Marshall de misturas contendo agregados finos basáltico (MB), graníticos (MG) e areia natural (MA), com teor de ligante asfáltico correspondente a um volume de vazios de 4%.

**Tabela 6:** Resultados do ensaio Marshall para misturas preparadas com agregados finos basálticos, graníticos e areia natural, para volume de vazios de 4%

Mistura	MB	MG	MA
Porcentagem de Agregados Grossos (%)	44	44	44
Porcentagem de Agregados Finos (%)	52	52	52
Porcentagem de Fíler (%)	4	4	4
Porcentagem de Ligante Asfáltico (%)	6,0	6,0	5,0
Densidade Aparente da Mistura	2,440	2,420	2,410
Volume de Vazios (%)	4,0	4,0	4,0
Vazios do Agregado Mineral (%)	18,39	18,50	15,93
Relação Betume/Vazios (%)	78,08	76,98	74,14
Fluência Marshall (0,01")	15	15	12
Estabilidade Marshall (kgf)	1028	1445	933

Através de análises estatísticas comparam-se as misturas MB, MG e MA, realizadas com agregados finos basálticos, graníticos e de areia natural, respectivamente. Pode-se observar que os valores da densidade aparente e da relação betume-vazio da mistura MB são maiores em relação aos obtidos para a mistura MA, enquanto que podem ser considerados semelhantes entre as misturas MB e MG. Pode-se observar também que os valores dos vazios do agregado mineral (VAM) das misturas MB e MG são considerados semelhantes, porém maiores que o obtido para a mistura MA.

Os valores da fluência Marshall para as misturas MB e MG podem ser considerados iguais, porém maiores em relação ao obtido para a mistura MA. Já os valores da estabilidade Marshall mostram um melhor comportamento da mistura MG em relação à mistura MB e da MB em relação à MA.

Na NBR 12891 - ABNT (1993) as características recomendadas para as misturas de concreto asfáltico são: estabilidade Marshall mínima de 350 kgf, fluência entre 8 a 18 centésimos de polegadas, volume de vazios entre 3 a 5% e vazios preenchidos de material betuminoso (RBV) entre 75 a 82%. Pode-se verificar que as misturas MB, MG e MA atendem a todas as características recomendadas pela NBR 12891, com exceção do RBV da mistura MA, que se apresenta ligeiramente abaixo do limite inferior recomendado.

Os requisitos volumétricos de misturas asfálticas Superpave, para misturas contendo cerca de 4% de volume de vazios, são: VAM mínimo de 14% para o tamanho nominal máximo do agregado de 12,5 mm e RBV de 65 a 80% em função do volume de tráfego. Pode-se verificar que as misturas MB, MG e MA atendem ao VAM mínimo recomendado pelo Superpave para o tamanho nominal máximo de 12,5 mm, utilizado nesta pesquisa. Em relação ao RBV, as misturas atendem aos requisitos Superpave para baixo volume de tráfego, porém, para alto volume de tráfego, apenas a mistura MA atende às especificações, apresentando RBV ligeiramente abaixo do limite superior especificado.

Ressalta-se, ainda, que as misturas asfálticas MB e MG consomem uma maior quantidade de cimento asfáltico em relação à mistura MA, para um mesmo volume de vazios de 4%. Uma possível explicação é que misturas contendo agregados arredondados e de textura superficial lisa possuem menores porcentagens de vazios do agregado mineral (VAM) e, conseqüentemente, necessitam de menores quantidades de cimento asfáltico para um mesmo volume de vazios.

## **5. CONCLUSÕES**

As conclusões deste trabalho analisam a hipótese de que agregados finos com altos valores de FAA apresentam suas partículas angulosas e/ou com textura superficial rugosa, o que resulta em um maior intertravamento entre as partículas, promovendo maior resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, maior estabilidade da mistura. Com base nos resultados dos ensaios laboratoriais desta pesquisa, pode-se concluir:

1. Os resultados das análises visuais quanto à forma, angularidade e textura superficial das partículas indicam que o ensaio FAA não é capaz de separar os efeitos de angularidade e forma das partículas. Partículas cúbicas, que são as mais desejáveis para o propósito da pavimentação, com angularidade e textura adequadas, podem apresentar menores valores de FAA que partículas com formas lamelares.
2. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto indicam que um agregado fino com maior valor de FAA não apresenta, necessariamente, uma maior resistência ao cisalhamento.
3. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto também indicam que um agregado fino com maior valor de FAA não apresenta, necessariamente, um maior ângulo de atrito interno.
4. Os valores da estabilidade Marshall demonstram um desempenho superior da mistura com agregado fino granítico (MG), representativa do agregado fino com valor de FAA médio, em relação à mistura com agregado fino basáltico (MB) representativa do agregado fino com valor de FAA alto. A mistura com agregado fino de areia natural (MA), representativa do agregado fino com valor de FAA baixo, apresenta a menor estabilidade. Portanto, não há correlação entre os valores de FAA e as estabilidades Marshall, ou seja, o ensaio FAA parece não ser um bom indicador de agregados que proporcionam misturas com maiores estabilidades.

Os resultados dos ensaios laboratoriais deste trabalho também indicam que as misturas asfálticas produzidas com agregados finos angulares e com textura superficial rugosa (MB e MG) apresentam maiores estabilidades, maiores porcentagens de vazios do agregado mineral e consomem maiores quantidades de cimento asfáltico, quando comparadas às misturas produzidas com o agregado fino arredondado e com textura superficial lisa (MA).

#### **Agradecimentos**

Esta pesquisa contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), através da concessão de uma bolsa de mestrado.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABNT (1993) NBR 12891 - *Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ASTM (1990) D3080 - 90 – *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM (1993a) C 128 - 93 – *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM (1993b) C 1252 - 93 – *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Fernandes, J. L.; R Roque; M. Tia e L. Casanova (2000) Evaluation of uncompacted void content of fine aggregate as a quality indicator of materials used in Superpave mixtures. *79th Annual Meeting in January of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Gouveia, L. T. e J. L. Fernandes Jr (2001) Avaliação de Agregados Utilizados em Obras Viárias no Estado de São Paulo através do Ensaio de Angularidade da Fração Fina. *XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET - Campinas*, v. 1, p. 337-345.
- Kandhal, P. S.; M. A. Khatri e J. B. Motter (1992) Evaluation of Particle Shape and Texture of Mineral Aggregates and Their Blends. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 61.
- Kim, Y. R. e N. Kim e N. P. Khosla (1992) Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete. In: Meininger, R. C. (ed.) *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Rittenhouse, G. (1943) A visual method of estimating two dimensional sphericity. *Journal of Sed. Petrol.*, n.º 13, p. 79-81.
- Russel, R. D. e R. E. Taylor (1937) Roundness and Shape of Mississippi River Sands. *Journal of Geology*, n.º 45, p. 225-267.
- Schklarsky, E. e M. Livneh (1964) The Use of Gravels for Bituminous Paving Mixtures. *Association of Asphalt Pavement Technologists*, vol. 33, p. 584-610.
- Suguio, K. (1973). *Introdução à Sedimentologia*. Edgard Blucher Ltda./Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Tayebali, A. A.; G. A. Malpass e N. P. Khosla (1998) Effect of Mineral Filler Type and Amount on Design and Performance of Asphalt Concrete Mixtures. *Transportation Research Record*, n. 1609, p. 36-43.
- Terzaghi, K. e R. B. Peck (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, New York.

---

#### **Endereços:**

Lilian Taís de Gouveia  
Doutoranda em Engenharia de Transportes da EESC-USP - liliantg@sc.usp.br

José Leomar Fernandes Jr.  
Professor Doutor do Departamento de Transportes da EESC-USP - leomar@sc.usp.br

Departamento de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo  
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - CEP 13566-590 - São Carlos - São Paulo - Brasil  
Fone: (016) 273-9598; Fax: (016) 273-9602