

AVALIAÇÃO DE AGREGADOS UTILIZADOS EM OBRAS VIÁRIAS NO ESTADO DE SÃO PAULO ATRAVÉS DO ENSAIO DE ANGULARIDADE DA FRAÇÃO FINA

Lilian Taís de Gouveia

José Leomar Fernandes Júnior

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

RESUMO

O problema de deformação permanente em pavimentos brasileiros de concreto asfáltico tem-se tornado significativo nos últimos anos, principalmente em razão das maiores solicitações impostas pelo tráfego. A solução do problema depende não só de um método de dosagem capaz de simular as condições de campo, mas também da utilização de materiais capazes de suportar as solicitações do tráfego. A importância dos agregados, particularmente da fração fina, para a resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas justifica a necessidade de um rigoroso controle de qualidade, baseado em propriedades fundamentais, relacionadas diretamente com o desempenho. Este artigo apresenta uma avaliação dos resultados obtidos através do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA), adotado pelo Método Superpave, utilizando amostras de agregados empregados em obras viárias no Estado de São Paulo. Também são apresentados resultados de ensaios de cisalhamento direto. Os resultados dos ensaios de FAA de todos os agregados ensaiados, com exceção de uma areia natural, atenderam aos requisitos Superpave para volume de tráfego alto. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto indicam que um agregado fino com maior valor de FAA não apresenta, necessariamente, maior resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

The problems caused by rutting of asphalt concrete pavements in Brazil have become significant in the last years, mainly due to the heavier traffic loads. The solution of the problem depends on a design method able to simulate the field conditions and also on the utilization of good materials, able to support the traffic. The importance of the aggregates to the shear resistance, particularly the fine fraction, highlights the necessity of a rigid quality control, based on fundamental properties directly related to the performance. This paper presents a laboratory evaluation of the Fine Aggregate Angularity (FAA) test. It is also presented results of direct shear tests performed on samples of fine aggregate used in paving construction in the State of São Paulo, Brazil. The results show that all tested samples, excluding a natural sand, have FAA value above the Superpave limit for heavy traffic. The results of direct shear tests indicate that a fine aggregate presenting higher FAA not necessarily presents higher shear strength.

1. INTRODUÇÃO

O acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda é uma das principais formas de deterioração dos pavimentos flexíveis. Quando da PICR (Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos Rodoviários - GEIPOT, 1982), na década de 70, a deformação permanente não era um grave problema para os pavimentos brasileiros. Atualmente, em função do aumento do volume de tráfego e, principalmente, da evolução tecnológica da modalidade rodoviária, que permitiu maiores cargas por eixo, maiores pressões de enchimento dos pneus e novos tipos de pneus e de rodagem (pneus extralargos), a deformação permanente tem merecido toda a atenção quando do dimensionamento e dosagem de misturas asfálticas e condicionado muitos projetos de reabilitação de pavimentos.

A deformação permanente desenvolve-se gradualmente com as solicitações do tráfego, manifestando-se geralmente sob a forma de depressões longitudinais nas faixas de rodagem (trilhas de roda), acompanhadas ou não de elevações laterais ao longo dessas faixas. A variação longitudinal da magnitude da deformação permanente causa irregularidade longitudinal no pavimento, que proporciona desconforto aos usuários e aumento dos custos de operação dos veículos. A água da chuva acumula-se nas depressões longitudinais das faixas de rodagem, resultando em redução da resistência à derrapagem, aumento do potencial de aquaplanagem e formação de “spray” que reduz a visibilidade.

Embora a deformação permanente possa ocorrer em uma ou mais camadas do pavimento (inclusive no subleito), este artigo trata exclusivamente da deformação que ocorre na camada asfáltica de revestimento. A deformação permanente é causada pela ação combinada de:

- densificação: compactação adicional da camada de concreto asfáltico causada pelo tráfego. Uma adequada compactação das misturas asfálticas é necessária para a obtenção de resistência à deformação permanente desde o início da vida em serviço;
- cisalhamento: deformação plástica lateral à trilha de roda que ocorre em misturas que não possuem resistência ao cisalhamento suficiente.

Estudos realizados por Parker e Brown (1992) mostraram que a pressão de enchimento dos pneus dos caminhões e, conseqüentemente, a pressão de contato destes com o pavimento tem aumentado drasticamente, estando muito acima dos 550 kPa (75 psi), que é o valor de referência do *AASHO Road Test*. A média de pressão dos pneus utilizada atualmente é de 700 kPa (100 psi), com uma grande parcela de caminhões utilizando pressões de pneus ainda maiores, de 900 a 960 kPa (entre 120 e 130 psi).

Uma alternativa, considerando que o volume de tráfego de caminhões, as cargas por eixo e a pressão dos pneus não irão decrescer, é aumentar a rigidez do concreto asfáltico à deformação permanente. A solução do problema depende não só de um método de dosagem que simule as condições de campo, mas também da utilização de materiais capazes de suportar as tensões impostas pelo tráfego.

No Brasil, tem-se utilizado o Método Marshall para dosagem de misturas asfálticas. As tensões que ocorrem durante o ensaio para determinação da estabilidade e fluência são de difícil interpretação. Além disso, há diversidade de procedimentos de preparação das amostras e, conseqüentemente, a dispersão dos resultados é muito grande (Motta *et al.*, 1993). O Método Marshall parece não ser capaz de reproduzir em laboratório as solicitações que ocorrem no campo e alguns estudos indicam que seus corpos-de-prova não representam adequadamente o material que se tem nas pistas, após a compactação pelos processos usuais de campo. Fatores como a orientação e o entrosamento das partículas dos agregados, o grau do contato entre essas partículas, a quantidade e a estrutura dos vazios devem ser, tanto quanto possível, reproduzidos em laboratório.

A resistência ao acúmulo de deformação permanente de um concreto asfáltico depende das características dos materiais constituintes (ligante asfáltico e agregados pétreos) e de propriedades das misturas asfálticas. Muitos fatores influem na resistência à deformação permanente das misturas de concreto asfáltico. Para os agregados, objeto de estudo deste trabalho, destacam-se a forma das partículas, a angularidade e a textura superficial, o diâmetro nominal máximo, a granulometria e a dureza do material. Quanto ao ligante, tem maior importância a rigidez sob altas temperaturas. Na análise das misturas, têm maior influência o teor de ligante, o volume de vazios, os vazios dos agregados minerais e o método de compactação.

De uma maneira geral, misturas com volume de vazios menor que 2,5% tendem a apresentar deformação permanente acentuada, independentemente das outras propriedades da mistura, pois nessas condições os agregados têm pequeno efeito na estabilidade. Para volume de vazios acima de 2,5%, misturas com maior quantidade de faces fraturadas e com maior angularidade do agregado fino possuem maior estabilidade (Cross e Brown, 1992).

Vários pesquisadores têm apresentado resultados que demonstram que as propriedades dos agregados são essenciais para a capacidade da mistura de resistir à deformação permanente. Para Roberts *et al.* (1991), o aumento da resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica pode ser alcançado através do uso de agregados com maiores diâmetros nominais máximos, angularidade e rugosidade. A estrutura granular formada pelos agregados também é um dos principais responsáveis pela estabilidade de um concreto asfáltico.

Roberts *et al.* (1991) e Sanders e Dukatz (1992) afirmam que a viscosidade (rigidez) do cimento asfáltico tem um papel relativamente pequeno na rigidez do concreto asfáltico quando comparada à influência dos agregados minerais, embora uma correta seleção do cimento asfáltico ajude a minimizar a deformação permanente. Parker e Brown (1992) afirmam que mudanças nas propriedades dos agregados são alternativas mais indicadas para garantir maior estabilidade aos revestimentos asfálticos.

Cross e Brown (1992), em estudos para identificar as propriedades dos agregados que contribuem para a produção de misturas com desempenho satisfatório, afirmam que misturas com maior quantidade de faces fraturadas e com maior angularidade do agregado fino têm maior estabilidade. Estudos de Button *et al.* (1990) sobre a influência dos agregados no desempenho dos pavimentos de concreto asfáltico concluem que a forma e a textura das partículas dos agregados afetam a rigidez (estabilidade) da mistura. Eles mostram que misturas asfálticas contendo areia natural (arredondada), deformam-se plasticamente sob cargas estáticas ou dinâmicas muito mais rapidamente que misturas de granulometria similar, contendo somente partículas britadas (angulares).

De acordo com Ahlrich (1996), as especificações estaduais e federais dos Estados Unidos para propriedades dos agregados usados em obras de pavimentação asfáltica são subjetivas e baseadas principalmente na experiência. Basicamente, essas especificações requerem que as frações grossa e fina dos agregados possuam uma porcentagem mínima de faces britadas (fraturadas) e que o agregado miúdo tenha uma limitação na quantidade de areia natural.

Os agregados desempenham um papel muito importante para a resistência à deformação permanente de um concreto asfáltico. Há necessidade, portanto, de um rigoroso controle de qualidade, baseado em propriedades fundamentais, relacionadas diretamente com o desempenho no campo, capaz de avaliar e selecionar agregados para pavimentos de concreto asfáltico. Visando suprir essa necessidade, o método Superpave de dosagem de misturas asfálticas adotou o ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA, *Fine Aggregate Angularity*) para avaliar a angularidade e a textura dos agregados e identificar agregados que possam proporcionar misturas com baixa capacidade de resistir à deformação permanente.

Apresenta-se neste artigo uma discussão importante para as misturas asfálticas, principalmente para as misturas bem graduadas e densas, pois as características dos agregados finos são de fundamental importância no que se refere à estabilidade dessas misturas. Considera-se como fração fina o material passante na peneira 2,36 mm (# 8) e retido na peneira 0,075 mm (# 200). Este artigo apresenta uma avaliação dos resultados obtidos através do ensaio de angularidade do agregado fino, utilizando amostras de agregados empregados em obras viárias no Estado de São Paulo. Complementarmente, com três das amostras submetidas ao ensaio FAA foram realizados ensaios de cisalhamento direto com o objetivo de avaliar o uso do ensaio FAA como indicador da resistência à deformação permanente da mistura.

2. CONSIDERAÇÃO SOBRE OS AGREGADOS FINOS NO MÉTODO SUPERPAVE

Os estudos do Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) sobre materiais utilizados em pavimentos asfálticos, realizados entre 1987 e 1993, forneceram resultados que foram agrupados e patenteados sob a denominação Superpave®. Esse programa foi estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos, com uma dotação inicial de 150 milhões de dólares. Coordenado pelos Estados Unidos, conta com a participação de 22 países, inclusive o Brasil (SHRP, 1993). As pesquisas do Programa SHRP desenvolveram métodos de análise de materiais betuminosos e de misturas asfálticas com base em propriedades fundamentais, diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos quando em serviço.

Os pesquisadores do programa SHRP concordavam que as propriedades dos agregados influenciam diretamente na resistência ao acúmulo de deformação permanente e na serventia do pavimento e que as trincas por fadiga e por contração a baixas temperaturas seriam menos influenciadas pelas características do agregado mineral. Identificaram duas categorias de propriedades de agregados que foram incorporadas ao sistema Superpave: as propriedades de consenso e as propriedades de origem. A primeira refere-se à angularidade do agregado grosso, à angularidade do agregado fino, à quantidade de partículas planas e alongadas e ao teor de argila, enquanto que a última refere-se à dureza, sanidade e materiais deletérios.

Dentre as propriedades mais importantes dos agregados identificadas pelos pesquisadores do programa SHRP destaca-se a angularidade do agregado fino. Muitos pesquisadores têm afirmado que as características da fração fina do agregado tem predominante influência na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. Griffith e Kallas (1958) mostram que a influência da angularidade e textura do agregado fino nas estabilidades Marshall e Hveem é consideravelmente maior que a influência da angularidade e textura do agregado grosso, para misturas contendo mais que 50% de agregados finos.

Schklarsky e Livneh (1964) afirmam que o agregado fino quando variado na mistura tem um efeito direto na estabilidade, enquanto a variação da fração grossa não acarreta nenhum efeito significativo para as misturas. Benson (1970) mostra que, independente do agregado graúdo usado, a estabilidade de misturas de graduação densa e aberta varia quando os agregados finos na mistura são variados. Foster (1970) apresenta resultados de dois trechos experimentais: misturas de areia-asfalto e misturas feitas com dois agregados grossos diferentes e o mesmo agregado fino usado na mistura de areia-asfalto. Após a observação do desempenho dos pavimentos, conclui que a capacidade das misturas de graduação densa de suportarem as cargas do tráfego é controlada pelas características do agregado fino.

O ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA, *Fine Aggregate Angularity*), desenvolvido pelo *National Aggregate Association*, foi introduzido no Método Superpave de modo a avaliar a angularidade e textura dos agregados finos. Kandhal e Parker (1998) efetuaram estudos com o objetivo de avaliar vários ensaios utilizados para quantificação de propriedades dos agregados finos (forma da partícula, angularidade, textura) e identificar o ensaio que melhor se relaciona com a deformação permanente e trincas por fadiga em pavimentos de concreto asfáltico. A conclusão foi que o ensaio FAA é o mais recomendado para avaliar a forma, a angularidade e a textura da fração fina. O ensaio FAA também apresentou boa correlação com resultados de deformação permanente, embora, como esperado, sem qualquer relação com as trincas por fadiga.

A hipótese que justifica a adoção do ensaio FAA pela especificação Superpave é de que agregados finos com elevados valores de FAA são angulosos e/ou com textura rugosa e possuem, portanto, maior intertravamento entre as partículas e proporcionam maior resistência à deformação permanente (estabilidade) da mistura. É ignorada a possibilidade de ocorrência de partículas lamelares, como as produzidas pela britagem de rochas basálticas, e a utilização de agregados com menor dureza, como os derivados de rochas calcárias, que também podem apresentar valores elevados de FAA mas têm menor resistência ao cisalhamento.

Estudos realizados por Fernandes *et al.* (2000), que avaliam o ensaio de FAA através do ensaio de cisalhamento direto, relatam que o FAA sozinho não é um bom indicador da resistência ao cisalhamento do agregado fino. Segundo os autores, o ensaio de cisalhamento direto pode prover parâmetros de maior relevância para avaliar os agregados finos, embora seja um ensaio mais complexo que o ensaio FAA.

3. MATERIAIS ENSAIADOS E MÉTODOS ADOTADOS

3.1 – Materiais

Para a realização dos ensaios FAA foram coletadas amostras em vinte pedreiras, formando um conjunto representativo dos agregados utilizados em pavimentação de rodovias no Estado de São Paulo (Tabela 1). A classificação dos agregados foi realizada através de mapas geológicos do Estado de São Paulo.

Tabela 1: Localização e classificação das amostras coletadas para realização do Ensaio FAA

Amostras	Origem	Classificação
01	Pedreira Basalto 05 - Rodovia Campinas - Monte Mor - Km 23	Gnaisse
02	Pedreira Santa Isabel - Ribeirão Preto	Basalto
03	Pedreira São Jerônimo - Valinhos	Granito
04	Pedreira São Roque - Santa Bárbara D'Oeste	Granito
05	Pedreira Fazenda Velha-Obra Prolongamento Rod. Bandeirantes	Granito
06	Pedreira Contil - Itatiba/Bragança Paulista	Gnaisse
07	Pedreira Bonato - Santa Bárbara D'Oeste	Basalto
08	Pedreira Basalto - Americana	Basalto
09	Pedreira Galvani - Paulínia	Basalto
10	Pedreira Basalto 6 - Campinas/Indaiatuba - Estrada Velha	Basalto
11	Pedreira Basalto - Jaguariuna	Gnaisse
12	Pedreira Edispel - Ribeirão Preto	Basalto
13	Pedreira Bandeirantes - São Carlos	Basalto
14	Rio Moji Guaçú - Areia britada - Rincão (Fazenda Mandi)	Areia natural britada
15	Pedreira 52.304 - próxima do Sistema Anchieta-Imigrantes	Granito
16	Pedreira 52.232 - próxima do Sistema Anchieta-Imigrantes	Granito
17	Pedreira 52.314 AM:01 - próxima do Sist. Anchieta-Imigrantes	Granito
18	Pedreira 52.314 AM:02 - próxima do Sist. Anchieta-Imigrantes	Granito
19	Pedreira 52.414 - próxima do Sistema Anchieta-Imigrantes	Granito
20	Rio Moji Guaçú - Areia natural - Rincão (Fazenda Mandi)	Areia natural

3.2 – Ensaio de Angularidade da Fração Fina (FAA)

O projeto adaptado do equipamento utilizado para o ensaio FAA foi realizado (Figura 1a) no Departamento de Transportes e construído na oficina mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, de acordo com a norma ASTM C1252 (1994).

A angularidade do agregado fino é avaliada através da determinação dos vazios não compactados (Figura 1b), quando a amostra é vertida, de uma altura de queda estabelecida, dentro de um cilindro de volume conhecido (100 cm^3). O material em excesso sobre o topo do cilindro é retirado delicadamente com uma espátula, para não causar compactação (acomodação de partículas) por vibração. Determina-se a massa de agregado fino dentro do cilindro, sendo o volume de agregado calculado usando-se a massa específica aparente, determinada de acordo com a norma ASTM C128 (1993). 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);

ρ_{ap} = massa específica aparente do agregado fino (g/cm^3);

V_c = volume do cilindro (cm^3).

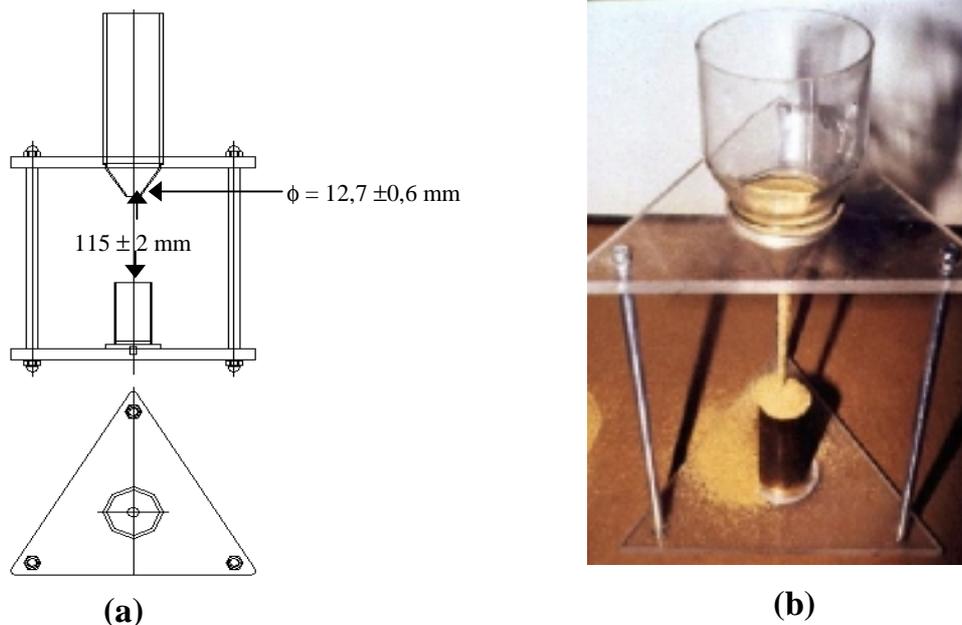


Figura 1: Equipamento do ensaio FAA

O ensaio FAA pode ser realizado de acordo com três métodos distintos (A, B ou C). No Método A é usada uma combinação de frações especificadas de agregado fino, nas quantidades apresentadas na Tabela 2. O resultado final de vazios não compactados (FAA) referentes ao agregado fino ensaiado corresponde à média entre duas determinações. O Método B utiliza frações individuais especificadas, como mostra a Tabela 2, sendo o ensaio realizado para cada fração de agregado separadamente, com o valor de FAA correspondendo à média dos três valores. No Método C a amostra ensaiada é obtida de 190 g de agregado fino passante na peneira de 4,75 mm (# 4), não havendo qualquer controle da granulometria.

Tabela 2: Frações granulométricas usadas no Método A e no Método B

PENEIRA (passando – retido)	MÉTODO A Massa (g)	MÉTODO B Massa (g)
2,36 mm - 1,18 mm	44	190
1,18 mm - 0,60 mm	57	190
0,60 mm - 0,30 mm	72	190
0,30 mm - 0,15 mm	17	-
Total	190	-

Estudos realizados por Fernandes *et al.* (2000) mostram que os métodos A, B e C resultam em valores de FAA diferentes, pois os vazios entre as partículas aumentam quando a granulometria do agregado torna-se mais uniforme. Como o Método B é executado com um tamanho único de partículas por fração de material ensaiado, resulta em um maior valor de FAA. No Método A a granulometria do material ensaiado é menos uniforme que no Método B, porém tende a ser mais uniforme do que no Método C, cuja granulometria não é controlada. Sendo assim, tem-se, geralmente, maiores valores de FAA para o Método B, seguido do Método A e por último o Método C. Apesar dos métodos apresentarem valores de FAA de magnitudes diferentes, os dois métodos que usam granulometria controlada (métodos A e B) resultam em mesma hierarquização, indicando que ambos os métodos são sensíveis às mesmas características dos agregados e que, para o propósito de classificação, são equivalentes.

Estudos sobre deformação permanente desenvolvidos pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) relacionam empiricamente a deformação permanente com valores de FAA. O valor de FAA igual a 43 divide as misturas em duas classes: de desempenho aceitável e de desempenho não aceitável quanto à capacidade de resistir à deformação permanente. Esse estudo serviu de base para a Especificação Superpave (Tabela 3), que estabelece o valor de FAA igual a 45 como mínimo admissível para rodovias com volume de tráfego alto.

Tabela 3: Especificação Superpave de valores mínimos para FAA (Método A)

Tráfego N = 10⁶	Profundidade em relação à Superfície*	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0,3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥ 100	45	45

* Profundidade da camada em relação à superfície do pavimento

O Superpave especifica maiores valores mínimos de FAA (Método A) com o aumento do nível de tráfego ou com a proximidade da superfície. Para volume de tráfego médio, foi especificado FAA igual a 40. Areias naturais foram consideradas aceitáveis para volume de tráfego médio, pois muitas apresentam o valor de FAA entre 40 e 45. Para volume de tráfego baixo não foi necessário atribuir valor para o FAA, pois areias naturais com FAA menores que 40 foram consideradas aceitáveis (Huber *et al.*, 1998).

Estudos recentes indicam que agregados finos angulares e rugosos possuem vazios não compactados (FAA) maiores que 45 e agregados finos arredondados e lisos possuem vazios não compactados abaixo de 43 (Ahlrich, 1996).

3.3 – Ensaio de Cisalhamento Direto

O Ensaio de Cisalhamento Direto, realizado de acordo com a norma ASTM D 3080-90 (1991), é provavelmente a maneira mais direta e adequada de se determinar a resistência ao cisalhamento de agregados finos. O ensaio consiste da compactação da amostra, por vibração, no dispositivo de cisalhamento direto, aplicação de uma determinada tensão normal (pressão de confinamento) e deslocamento de uma parte do dispositivo de cisalhamento direto horizontalmente, a uma taxa constante de deformação cisalhante. A força de cisalhamento é medida juntamente com os deslocamentos horizontal e vertical da amostra. A tensão de cisalhamento é obtida pela divisão da força pela área cisalhada da amostra, enquanto as deformações horizontal e vertical são determinadas a partir dos deslocamentos e das dimensões da amostra.

Para a realização dos ensaios as amostras foram acomodadas dentro de dispositivo de cisalhamento e, em seguida, submetidas a compactação por vibração. Cada amostra de agregado foi cuidadosamente compactada para se alcançar o maior nível de compactação possível. Foram utilizadas tensões normais de 192, 383 e 500 kPa para se determinar os parâmetros c (intercepto de coesão) e ϕ (ângulo de atrito interno), relativos à envoltória de resistência de Mohr-Coulomb.

As Figuras 2 e 3 mostram os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto com uma das amostras ensaiadas. Pode-se observar na Figura 2 que a resistência ao cisalhamento, após atingir o valor máximo (resistência de pico), cai e se estabiliza (resistência residual) na medida em que a condição de volume constante é alcançada (Figura 3).

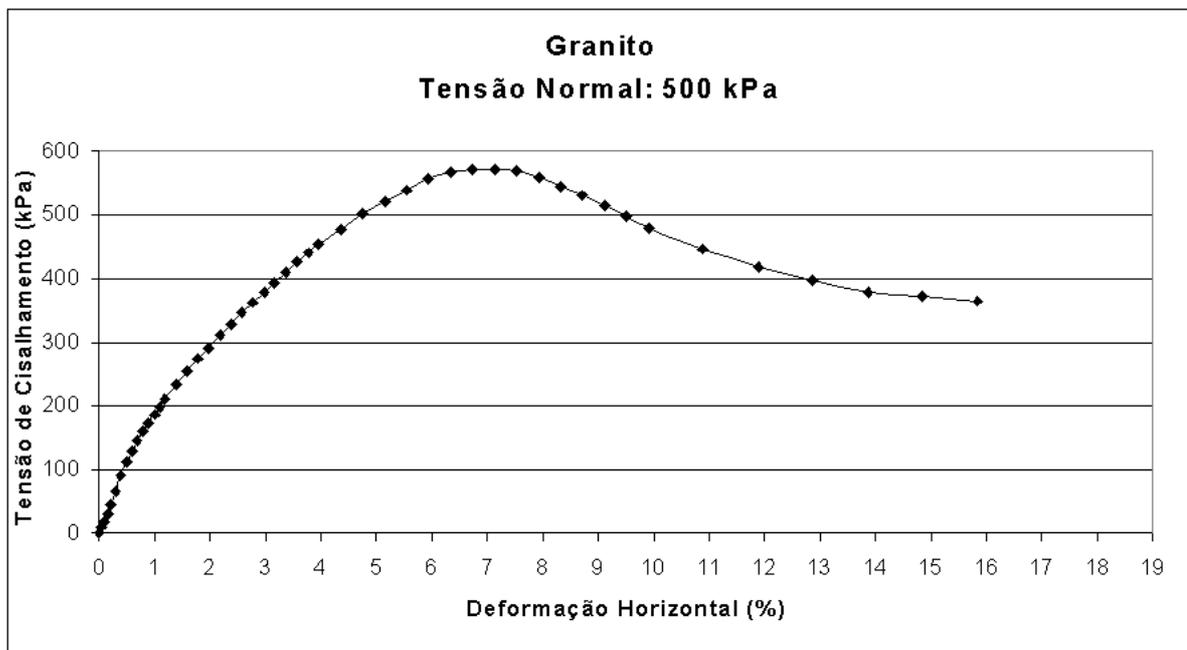


Figura 2: Cisalhamento Direto: tensão de cisalhamento versus deformação horizontal

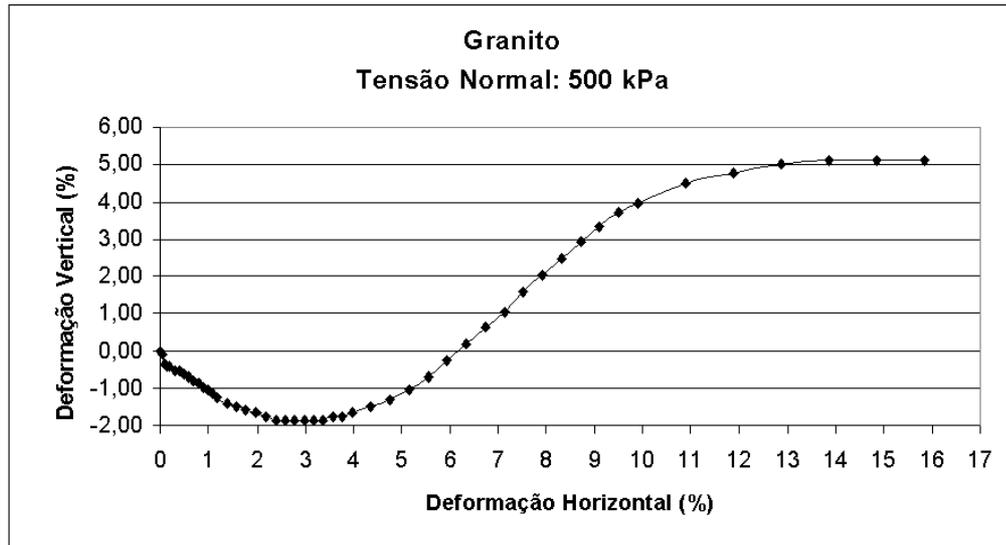


Figura 3: Cisalhamento Direto: deformação vertical versus deformação horizontal

A Figura 4 ilustra a determinação dos parâmetros de resistência segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb para outra das amostras ensaiadas: intercepto de coesão ($c = 80$ kPa) e ângulo de atrito interno ($\phi = 41,8^\circ$). Para todas as amostras ensaiadas, houve excelente correlação entre a resistência ao cisalhamento de pico e a tensão normal, como ilustra o elevado coeficiente de determinação apresentado na Figura 4 ($R^2 = 0,9987$).

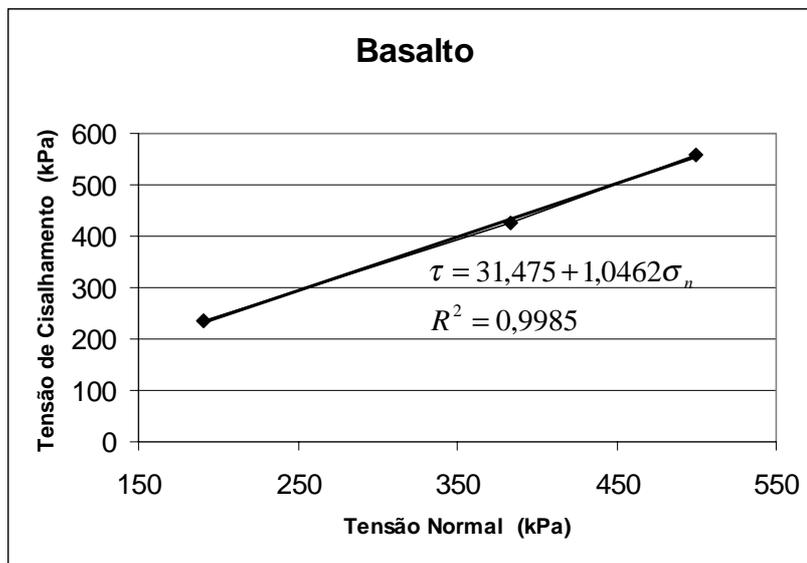


Figura 4: Ensaio de cisalhamento direto: envoltória da resistência

Como a resistência ao cisalhamento depende, geralmente, dos parâmetros de atrito interno e tensão normal, considera-se mais adequado comparar a resistência sob um determinado nível de tensão de confinamento do que comparar os parâmetros de resistência. Considera-se, portanto, a resistência ao cisalhamento para uma tensão normal de 500 kPa, pois é um valor típico das tensões normais de compressão que atuam em revestimentos asfálticos sob as cargas do eixo-padrão (eixo simples, rodas duplas, carga por eixo de 80 kN e pressão de enchimento dos pneus de 80 psi).

4. RESULTADOS

4.1 – Ensaio de Angularidade da Fração Fina (FAA)

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos ensaios FAA correspondentes à média entre três determinações e a massa específica aparente dos agregados finos (ρ_{ap} , g/cm³), determinadas, respectivamente, de acordo com ASTM C1252-93 (1994), método A, e ASTM C128 - 93 (1993).

Tabela 4: Resultados dos ensaios de FAA

PEDREIRAS DO ESTADO DE SÃO PAULO	CLASSIFICAÇÃO	ρ_{ap}	FAA (%)
01. Pedreira Santa Isabel	Basalto	2,830	51,1
02. Pedreira Fazenda Velha	Granito	2,890	50,4
03. Pedreira Contil	Gnaisse	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	Gnaisse	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	Gnaisse	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

4.2 – Ensaio de Cisalhamento Direto

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados de acordo com ASTM D 3080-90 (1991). As três amostras de agregados finos ensaiadas são representativas de materiais que apresentam FAA baixo (areia natural), médio (granito) e alto (basalto) e foram ensaiadas com a granulometria utilizada no Método A do ensaio FAA.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto

TENSÃO DE CISALHAMENTO MÁXIMA		
Amostras	Tensão Normal	Tensão de Cisalhamento
Areia Natural	192	192
	383	351
	500	499
Granito	192	271
	383	425
	500	535
Basalto	192	254
	383	417
	500	531

A Tabela 6 apresenta a média dos resultados dos ensaios de FAA e de cisalhamento direto.

Tabela 6: Resumos dos resultados dos ensaios FAA e Cisalhamento Direto

Amostras	FAA (%)	Cisalhamento Direto (kPa)*
Areia natural - rio Moji Guaçú	44,0	499
Granito - Pedreira São Roque	48,3	535
Basalto - Pedreira Santa Isabel	51,1	531

* Valores de pico da resistência ao cisalhamento direto sob tensão normal de 500 kPa.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) foi introduzido no Método Superpave para identificar agregados lisos e arredondados que podem resultar em misturas asfálticas com baixa resistência à deformação permanente. A hipótese é que agregados miúdos com baixos valores de FAA têm menor resistência ao cisalhamento (atrito interno) e, conseqüentemente, menor resistência à deformação permanente.

A contínua implementação e avaliação do Método Superpave tem levantado dúvidas sobre a validade desta hipótese e do uso do ensaio FAA. Vinte agregados, dentre os mais usados em obras de pavimentação no Estado de São Paulo, foram utilizados para avaliar se o ensaio FAA (vazios não compactados) é um indicador confiável da resistência ao cisalhamento do agregado fino. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com três amostras, representativas de materiais com FAA baixo, médio e alto.

Nos resultados dos ensaios de FAA, mostrados na Tabela 4, vemos 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 é considerada aceitável para volume de tráfego médio, por apresentar seu valor de FAA entre 40 e 45.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto indicam que um agregado fino com FAA elevado não apresenta, necessariamente, uma maior resistência ao cisalhamento. Isto porque, para uma mesma granulometria e condição de compactação, a resistência ao cisalhamento é função da textura superficial, da angularidade, da forma das partículas e também da dureza do material e o ensaio FAA não consegue avaliar a influência da dureza do material e não é capaz de separar os efeitos de angularidade e forma das partículas. Pode-se ter elevados valores de FAA produzidos por partículas com baixa dureza (rochas calcárias, por exemplo) ou por partículas lamelares (de basalto, por exemplo).

O ensaio FAA é simples de executar e apresenta elevada reprodutibilidade. O ensaio de cisalhamento direto, por sua vez, fornece parâmetros fundamentais para a avaliação de agregados finos, sendo, no entanto, um ensaio mais complexo do que o FAA, principalmente por depender das condições de compactação da amostra. A relação de ambos os ensaios com o desempenho de misturas asfálticas precisa ser melhor investigada.

Agradecimentos

O desenvolvimento da pesquisa que serviu de base para este trabalho conta com o apoio da CAPES na forma de uma bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahlich, R.C. (1996) Influence of Aggregate Properties on Performance of Heavy-Duty Hot-Mix Asphalt Pavements. *Transportation Research Record*, n. 1547, p. 7-14.
- ASTM (1991) D3080 - 90 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM (1993) C 128 - 93 – Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM (1994) 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.
- Benson, F.J. (1970) Effects of Aggregate Size, Shape, and Surface Texture on the Properties of Bituminous Mixtures - A literature Survey. *Highway Research Board*, SR 109, p. 12-22.
- Button, J. W.; D. Perdomo e R. L. Lytton (1990) Influence of Aggregate on Rutting of Asphalt Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, n. 1259, p. 141-152.
- Cross, S.A. e E. R. Brown (1992) Selection of Aggregate Properties to Minimize Rutting of Heavy Duty Pavements. In: Meininger, R. C. (ed.) *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. 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.
- Foster, C.R. (1970) Dominant Effect of Fine Aggregate on Strength of Dense-Graded Asphalt Mixes. *Highway Research Board*, SR 109, p.1-3.
- GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (1982) *Pesquisa do Inter-relacionamento entre Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias*. Relatório Final. Brasília, DF.
- Griffith, J.M. e B.F. Kallas (1958) Influence of Fine Aggregates on Asphaltic Concrete Paving Mixtures. In: Burggraf, F.; E. M. Ward e H. P. Orland. (eds.) *Proceedings of the Thirty-seventh Annual Meeting*. Highway Research Board. Washington, D.C., January 6-10.
- Huber, G. A.; J. C. Jones; P. E. Messersmith e M. Jackson (1998) Contribution of Fine Aggregate Angularity and Particle Shape to Superpave Mixture Performance. *Transportation Research Record*, n.1609, p.28-35.
- Kandhal, P. S. e F. Parker (1998) Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. *National Cooperative Highway Research Program*, Report 405.
- Motta, L.M.G; J. Medina e R. Scalco (1993) O Projeto Estrutural de Pavimentos Flexíveis e a Dosagem de Misturas Asfálticas - 27ª Reunião Anual de Pavimentação - ABPv - Teresina-PI - p. 523- 545.
- Parker, F. e E. R. Brown (1992) Effects of Aggregate Properties on Flexible Pavement Rutting in Alabama. In: Meininger, R. C. (ed.) *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Roberts, F. L.; P. S. Kandhal; E. R. Brown; D. Y. Lee e T. W. Kennedy (1991) *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. Ed. NAPA Education Foundation. Lanham, Maryland.
- Sanders, C. A. e E. L. Dukatz (1992) Evaluation of Percent Fracture of Hot Mix Asphalt Gravels in Indiana. In: Meininger, R. C. (ed.) *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Schklarsky, E. e M. Livneh (1964) The Use of Gravels for Bituminous Paving Mixtures. *Association of Asphalt Pavement Technologists*, Vol. 33, p. 584-610.
- SHRP (1993) Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies. *The Strategic Highway Research Program*. National Academy of Science, Washington.

Endereços:

Lilian Taís de Gouveia
Aluna de Mestrado em 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

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