

CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DAS PROPRIEDADES DE CONSENSO DO SUPERPAVE PARA AGREGADOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Lilian Tais de Gouveia
José Leomar Fernandes Júnior

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Este artigo faz uma análise crítica dos ensaios especificados pelo Superpave para avaliar as propriedades de consenso: angularidade do agregado grosso, angularidade do agregado fino, partículas planas e alongadas e finos plásticos. Apresenta uma descrição de cada ensaio, com comentários sobre a experiência de utilização deles com agregados brasileiros. Pode-se concluir, com base nos resultados apresentados, que o ensaio de determinação de porcentagens de faces fraturadas, adotado pelo Superpave para avaliação da angularidade do agregado grosso (ASTM D 5821), avalia apenas o número de faces fraturadas da partícula, não fazendo menção ao grau de angularidade dessas fraturas, portanto, mostra-se não adequado ao objetivo ao qual se propõe. Também o ensaio de angularidade do agregado fino (ASTM C 1252) não se mostrou capaz de diferenciar agregados com formas mais apropriadas à pavimentação daqueles menos adequados. Os resultados obtidos através do ensaio de determinação de partículas planas e alongadas de agregados grossos (ASTM D 4791) mostram que a avaliação das partículas através da proporção de 3:1 e utilização de formas definidas (plana ou alongada) permite julgar mais realisticamente as formas dos agregados. O ensaio de equivalente de areia (DNER ME 054), indicado pelo Superpave para avaliar a presença de finos plásticos, permite a determinação da quantidade de frações argilosas, no entanto, não possibilita a determinação exata da composição dessa fração.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the laboratory tests used by the Superpave Specification to evaluate the consensus properties: coarse aggregate angularity, fine aggregate angularity, flat and elongated particles and sand equivalent. It describes each test, including commentaries on the use of them with Brazilian aggregates. Based on test results, it can be concluded that the test for determination of the percentage of fractured faces, adopted by the Superpave for the evaluation of coarse aggregate angularity (ASTM D 5821), does not indicate the degree of angularity of the corners and, therefore, it is adequate to achieve the objective it is proposed for. The fine aggregate angularity test is not capable to differentiate aggregate with more appropriate shapes from the less adequate ones. The Superpave establishes, in its standard test method for flat particles, elongated particles or flat and elongated (ASTM D 4791), that a maximum percentage exceeding the 5:1 maximum to minimum dimension ratio is 10% by weight, however, the results show that testing flat and elongated particles at the 3:1 ratio provides a better indication of particle shape and should be used for a quicker identification in shape changes due to crushing processes. The sand equivalent test, used by the Superpave to evaluate plastic fines in aggregates, can determine the amount of clay fractions; however, it does not make possible the determination of the composition of this fraction.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos do SHRP (*Strategic Highway Research Program*), agrupados e patenteados sob a denominação Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), desenvolveram métodos de análise de ligantes asfálticos e de misturas asfálticas, não havendo, de início, esforços de pesquisa específicos para os agregados. Devido à importância fundamental dos agregados para o estudo das misturas asfálticas, os pesquisadores do SHRP perceberam que teria de ser tomada alguma providência. Para conseguir informações relevantes, em um curto espaço de tempo e com um mínimo de pesquisa bibliográfica e experimental, decidiram por realizar uma abordagem consensual entre um grupo de 14 especialistas, mediante utilização do método de Delfos modificado.

O método de Delfos original, desenvolvido por Brown (1968) e Dalkey & Helmer (1951), tem como principal aspecto o anonimato dos participantes, para evitar o efeito negativo que pode resultar de um grupo dinâmico, em tomadas de decisões conjuntas. O SHRP modificou esse

método, permitindo o encontro face-a-face entre os membros do grupo durante o processo (Smith, 1992). O procedimento do Delfos modificado foi aplicado em cinco etapas, onde a primeira, a quarta e a quinta etapas foram conduzidas via correio. A segunda e a terceira etapas foram conduzidas em Washington, durante um encontro dos especialistas.

Esses 14 especialistas selecionaram as propriedades que consideraram as mais importantes e que deveriam ser controladas para a obtenção de materiais adequados ao propósito da pavimentação. As propriedades selecionadas foram classificadas dentro de duas categorias: propriedades de consenso e propriedades de origem. Foram classificadas como propriedades de consenso a angularidade do agregado grosso, a angularidade do agregado fino, as partículas planas e alongadas, assim como, a presença de frações argilosas (finos plásticos) no agregado, estabelecendo-se limites máximos ou mínimos para cada uma das propriedades.

Este artigo apresenta uma análise crítica dos critérios estabelecidos pelo SHRP para selecionar, avaliar e estabelecer limites das propriedades ditas de consenso, assim como traz a descrição de cada ensaio para avaliação dessas propriedades, com comentários sobre a experiência de utilização desses ensaios com agregados brasileiros. Para tanto foram selecionados três tipos de agregados representativos dos utilizados em obras de pavimentação no país: gabro (Pedreira São Roque, Limeira-SP), basalto (Pedreira Santa Isabel, Ribeirão Preto-SP) e areia natural (fração grossa, Rio Moji-Guaçu, Rincão-SP e fração fina, areia natural de cava da Mineradora Jundu, Analândia-SP).

2. ANGULARIDADE DO AGREGADO GROSSO (AAG)

Angularidade ou arredondamento são características atribuídas segundo o grau de amaciamento dos cantos ou arestas das partículas. A angularidade das partículas dos agregados influencia diretamente a estabilidade e a trabalhabilidade das misturas asfálticas. Agregados angulares proporcionam maior intertravamento e atrito interno entre suas partículas, formando uma estrutura granular mais rígida. Já partículas com cantos arredondados, ao invés de intertravarem-se, tendem a deslizar umas sobre as outras, resultando em uma estrutura granular mais fraca e, portanto, em misturas menos estáveis.

O Superpave especifica o ensaio de Porcentagem de Partículas Fraturadas para Agregados Grossos (ASTM D 5821) para a avaliação da angularidade do agregado grosso (partículas maiores que 4,75 mm). Esse ensaio consiste em espalhar as partículas em uma superfície plana, limpa e grande o suficiente para proporcionar um exame visual cuidadoso. Cada partícula é classificada de acordo com o seu número de faces fraturadas, por exemplo, uma face fraturada (Figura 1 (a)), duas ou mais faces fraturadas (Figura 1 (b)), ou ainda, sem faces fraturadas (Figura 1 (c)). Considera-se como face fraturada a face que contém formas e bordas bem definidas e que expõem o interior da partícula através de uma área não inferior a 1/4 de sua área máxima. A face fraturada apresenta-se como uma parte quebrada, rugosa e/ou angular, criada através de processos de britagem ou pela ação da natureza.

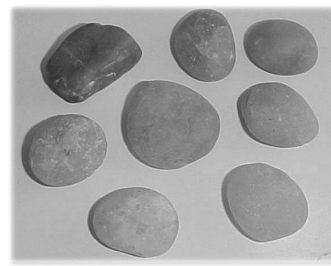
A determinação da porcentagem de partículas fraturadas é realizada através da contagem ou pesagem das partículas, com um determinado número de faces fraturadas, em relação ao número total de partículas ou da massa total da amostra. O Superpave especifica valores mínimos maiores de porcentagens de partículas fraturadas com o aumento do tráfego ou com a proximidade da camada em relação à superfície do pavimento (Tabela 1).



a) Uma face fraturada



b) Duas faces fraturadas



c) Nenhuma face fraturada

Figura 1: Ensaio de porcentagem de partículas fraturadas

Tabela 1: Especificação Superpave de valores mínimos de AAG

Tráfego (N = 10 ⁶)	Profundidade em relação à Superfície	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0,3	55/-	-/-
< 1	65/-	-/-
< 3	75/-	50/-
< 10	85/80	60/-
< 30	95/90	80/75
< 100	100/100	95/90
≥ 100	100/100	100/100

3. ANGULARIDADE DO AGREGADO FINO (AAF)

Devido à dificuldade de avaliação visual das partículas de agregados finos e ao grande tempo consumido nesses processos, o Superpave adota o ensaio do *National Aggregates Association* (Método A) para a determinação indireta da forma, da angularidade e da textura superficial das partículas. Esse ensaio é comumente encontrado na literatura inglesa sob a denominação FAA (*Fine Aggregate Angularity*), AAF (angularidade do agregado fino) em português.

A angularidade do agregado fino é avaliada indiretamente através da determinação dos vazios não compactados formados entre as partículas, ou seja, quando a amostra é vertida de uma altura de queda de aproximadamente 115 mm, dentro de um cilindro de volume de 100 cm³, como estabelece a ASTM C 1252. O ensaio consiste em deixar a amostra cair livremente no interior do cilindro, retirar o excesso de material que se acumula sobre seu topo, com o auxílio de uma espátula, tomando cuidado para não causar vibrações, para que não ocorram acomodações entre as partículas. Após, determina-se a massa do agregado contida dentro do cilindro e, sendo conhecida a densidade aparente do agregado fino, pode-se calcular a porcentagem de vazios não compactados através da diferença entre o volume do cilindro e o volume de agregado contido no cilindro.

Valores mais elevados de AAF serão encontrados quanto maior a angularidade e rugosidade das partículas, pois quando elas caem livremente umas sobre as outras, sem sofrer acomodação por compactação, suas arestas e cantos agudos fazem com que fiquem mais distantes umas das outras, aumentando o volume de vazios entre partículas. Já as partículas menos angulares (com cantos arredondados) e com textura superficial lisa, ao caírem livremente umas sobre as outras, acomodam-se com mais facilidade, diminuindo assim o volume de vazios existentes entre partículas, proporcionando valores de AAF menores. O Superpave especifica valores mínimos maiores de AAF com o aumento do nível de tráfego ou com a proximidade da camada em relação à superfície do pavimento (Tabela 2).

Tabela 2: Especificação Superpave de valores mínimos para AAF (Método A)

Tráfego N = 10 ⁶	Profundidade em relação à Superfície	
	< 100 mm (%)	> 100 mm (%)
< 0,3	-	-
< 1	40 ¹	-
< 3	40 ¹	40 ²
< 30	45 ¹	40 ²
< 100	45 ¹	45 ²
≥ 100	45 ¹	45 ²

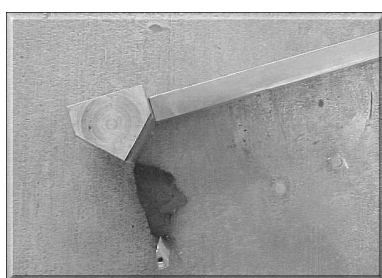
¹Valores mínimos de AAF, em função do volume de tráfego, para camadas de revestimento

²Valores mínimos de AAF, em função do volume de tráfego, para as outras camadas do pavimento

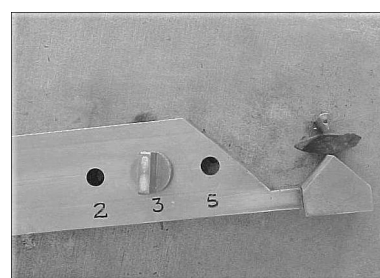
4. PARTÍCULAS PLANAS E ALONGADAS

A utilização de partículas com formas planas e/ou alongadas em misturas asfálticas pode causar vários problemas, dentre eles a quebra de partículas durante a compactação e a diminuição da trabalhabilidade da mistura. Assim, na tentativa de minimizar os problemas causados pelo uso excessivo dessas partículas, o ensaio de Partículas Planas e Alongadas em Agregados Grossos (ASTM D 4791), adaptado do ensaio *U.S. Army Corps of Engineers Method CRD-C 119*, foi adotado pelo Superpave. Esse ensaio consiste na utilização de um paquímetro dimensional para medir a razão entre largura e espessura (planificação), largura e comprimento (alongamento) e entre comprimento e espessura (lamelaridade) de uma amostra de agregados grossos. As partículas podem ser classificadas da seguinte maneira:

- partículas planas, se tiverem razão dimensional entre largura e espessura maior que proporções específicas, que no caso desta pesquisa são de 3:1 e 5:1;
- partículas alongadas, se tiverem razão dimensional entre comprimento e largura maior que 3:1 e 5:1;
- partículas planas/alongadas (lamelares), se tiverem razão dimensional entre comprimento e espessura maior que 3:1 e 5:1 (Figura 2).



(a) comprimento da partícula



(b) espessura da partícula

Figura 2: Avaliação da forma das partículas

O Superpave determina que se avalie a forma da partícula somente quanto à sua lamelaridade, com razão dimensional de 5:1, estabelecendo um limite máximo de 10% de partículas planas/alongadas na produção de misturas asfálticas utilizadas em pavimentos com volume de tráfego médio a alto ($N > 3 \times 10^6$). Porém, avaliações mais rigorosas da lamelaridade, utilizando a proporção de 3:1, foi sugerida em 1998 pelo FHWA (*Federal Highway Administration*), com base numa revisão feita pelo seu grupo de pesquisa (Cominsky *et al.*, 1998). Atualmente, vários grupos de pesquisa, como o *The Stone Matrix Asphalt Technical Working Group*, vêm

utilizando limites mais rigorosos do que o especificado pelo Superpave: limite máximo de 5% para 5:1 e de 20% para análises com razão dimensional de 3:1 (Prowell *et al.*, 2005).

Independentemente da razão dimensional da partícula, uma discussão pode ser levantada quanto à análise de suas formas. O Superpave estabelece que seja feito um levantamento apenas quanto à lamelaridade (comprimento/espessura) das partículas, entretanto, ao se tomar conhecimento da porcentagem de partículas lamelares, por exemplo, de 30%, o que isso significa? Significa que se tem 30% de partículas alongadas, que podem quebrar-se durante a compactação, ou então que 30% das partículas são planas e podem causar vários problemas, dentre eles, a diminuição da durabilidade das misturas? A determinação da lamelaridade da partícula é questionável, pois não representa o quanto as partículas são planas nem o quanto são alongadas. Em vista disso, nesta pesquisa, as partículas foram analisadas não somente quanto a quanto à sua lamelaridade, mas também quanto à sua planicidade (largura/espessura) e quanto ao seu alongamento (comprimento/largura), utilizando razões dimensionais de 5:1 e também de 3:1, impondo, dessa forma, uma avaliação mais rigorosa.

5. FINOS PLÁSTICOS

Consideram-se como finos plásticos os argilominerais ou partículas muito finas (frações argilosas) que possam, mesmo em pequenas quantidades, ser prejudiciais ao desempenho do pavimento. A quantificação dos finos plásticos ou da fração argilosa contidos no agregado pode ser feita através do ensaio do equivalente de areia (EA), desenvolvido pelo *California Division of Highways*, sob a orientação de Francis N. Hveem.

O EA é uma relação volumétrica correspondente à razão entre as alturas do nível superior da areia e do nível superior da suspensão argilosa de uma amostra de solo ou de agregado fino, numa proveta, em condições estabelecidas no método. O método consiste em agitar a amostra de agregados, composta por material passante na peneira de 4,75 mm, numa proveta graduada contendo solução floculante, de modo a soltar as partículas de argilominerais ou da fração argilosa, aderidas ao agregado. A solução floculante força o material argiloso ou a fração argilosa a formar uma suspensão sobre o material granular, para, após um período de sedimentação, ser determinada a altura da argila suspensa e da areia parcialmente sedimentada, determinando-se, assim, a relação entre volumes de areia e de argila (Figura 3).

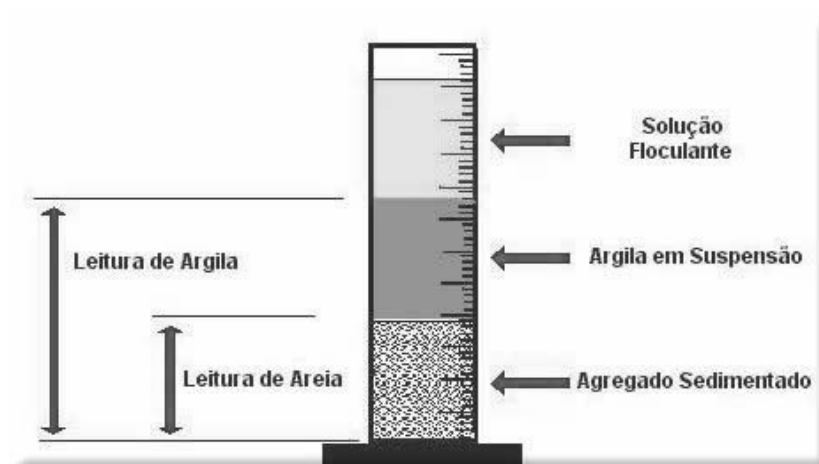


Figura 3: Ensaio do equivalente de areia

O primeiro passo da realização do ensaio é transferir a solução flocculante para a proveta, até atingir o traço de referência a 10 cm da base. Em seguida, coloca-se a amostra de agregado na proveta, dando algumas batidas com a palma da mão em seu fundo para deslocar bolhas de ar e ajudar a molhar a amostra. Então, a proveta é deixada em repouso durante 10 minutos. Passados os 10 minutos, a proveta é tapada com uma rolha e agitada horizontalmente, num movimento alternado. Após a retirada da rolha, as paredes da proveta são lavadas, com o auxílio do tubo lavador, para desprender as partículas de agregados aderidas. Então, o tubo lavador é posicionado no fundo da proveta, permitindo que a solução flocculante flua para o seu interior, até atingir o traço de referência superior. Então, a proveta é deixada em repouso, sem perturbação, durante 20 minutos. Após o período de 20 minutos, é feita a leitura da altura do nível superior da argila em suspensão, para em seguida, ser introduzido o pistão na proveta, até assentá-lo sobre a amostra, promovendo um pequeno giro em sua haste, até que um de seus parafusos de ajustagem torne-se visível. O nível do parafuso de ajustagem é adotado como leitura correspondente ao nível superior da amostra. O EA pode ser então calculado através da razão entre a leitura no topo da areia e a leitura no topo da argila.

Durante a realização do ensaio, é usual anotar, além da leitura da altura da areia com o pistão, a leitura correspondente à altura da areia visível. Amostras mais grossas ou mais finas, com quantidades apreciáveis de partículas angulares, tendem a apresentar leituras visíveis ou com o pistão muito próximas. Porém, se a amostra for muito fina, no momento em que o pistão de 1 kg assenta sobre seu topo, este pode afundar consideravelmente. A escolha de Hveem por um pistão de peso relativamente elevado pode ter sido proposital, para tentar limitar o emprego de agregados com quantidades grandes de finos e com partículas arredondadas, em obras de pavimentação (Medina, 1962).

Na década de 1950, os valores mínimos do EA, especificados pelo CDH (*California Division of Highways*) variavam em relação ao tipo de camada na qual o agregado seria utilizado. Atualmente, o método Superpave estabelece valores mínimos do EA considerando apenas o volume de tráfego (Tabela 3).

Tabela 3: Valores mínimos de EA em função do tipo de camada e do tráfego

CDH		Superpave	
Tipo de camada	EA mínimo (%)	Tráfego (N=10 ⁶)	EA mínimo (%)
Base de agregado mineral britado ou natural	30	< 0,3	40
Tratamentos betuminosos	35	< 30	45
Concreto asfáltico	55	≥ 30	50
Misturas de areia/asfalto	80		
(Hveem, 1953)		(Cominsky <i>et al.</i> , 1998)	

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Porcentagem de Partículas Fraturadas

Na Tabela 4, encontram-se as porcentagens de faces fraturadas das partículas dos agregados grossos de gábro, de basalto e de areia natural estudados. O agregado de gábro, assim como o agregado de basalto, possui todas as suas partículas com duas ou mais faces fraturadas. Portanto, ambos poderiam ser utilizados em todas as camadas do pavimento, inclusive na capa asfáltica de rodovias com volume de tráfego alto. Já o agregado de areia natural possui 50% de suas partículas com uma face fraturada e apenas 35% de suas partículas com duas ou mais

faces fraturadas. Essas porcentagens de faces fraturadas não são suficientes, segundo a especificação Superpave, para garantir que as partículas apresentem intertravamento e atrito interno adequados. Portanto, o agregado de areia natural não deve ser utilizado como parte integrante de misturas asfálticas, mesmo em rodovias com volume de tráfego baixo.

A determinação das porcentagens de partículas fraturadas não permite que seja feita uma avaliação real da angularidade dos agregados grossos, mas, apenas, do número de faces fraturadas desses agregados, que são dados insuficientes para se ter conhecimento do grau de angularidade (agudeza) dos cantos e arestas das fraturas. Há modos mais eficientes de avaliar a angularidade do agregado grosso, um deles é a análise visual comparativa das partículas. Portanto, nesta pesquisa, optou-se por avaliar também visualmente as partículas, utilizando para tanto a tabela de comparação de angularidade de agregados finos, desenvolvida por Russel & Taylor (1937), que permite classificar as partículas com cinco diferentes graus de angularidade: angular, subangular, subarredondado, arredondado e altamente arredondado.

A avaliação visual da angularidade do agregado grosso (agudeza de seus cantos) foi realizada concomitantemente à avaliação da porcentagem de faces fraturadas do agregado grosso. Como, normalmente, para a realização do ensaio de determinação do número de faces fraturadas as partículas já são avaliadas uma a uma, não foi despendido muito mais tempo do que já é necessário para a realização do ensaio adotado pelo Superpave.

Outra característica dos agregados bastante importante, não avaliada pelo ensaio especificado pelo Superpave, é a textura superficial. Essa característica também poderia ser facilmente determinada durante o processo de avaliação das faces fraturadas, pois, rapidamente, poder-se-ia constatar aspereza superficial ou não das partículas através da visualização e do toque. Nesta pesquisa, além das análises visuais de angularidade, também foi avaliada a textura superficial, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5. A textura superficial foi classificada como lisa ou rugosa, em função da presença de sulcos, estrias, micro crateras, projeções e desigualdades observadas na superfície das partículas.

Tabela 4: Resultado da análise de partículas fraturadas

Agregado	Faces fraturadas (%)
Gabro	100/100
Basalto	100/100
Areia natural	50/35

Tabela 5: Resultado da análise visual das partículas

Agregado	Grau de arredondamento	Textura superficial
Gabro	subangular	rugosa
Basalto	angular	rugosa
Areia natural	Altamente arredondada	lisa

Devido às deficiências do ensaio adotado pelo Superpave para avaliar a angularidade do agregado grosso, somente após as análises visuais é que se pôde obter dados mais esclarecedores quanto à angularidade dos agregados e sua textura superficial. Agora, pode-se dizer que o agregado de gabro possui todas as suas partículas com duas ou mais faces fraturadas (Tabela 4), com cantos e arestas apresentando desgaste incipiente (partículas subangulares) e textura superficial rugosa (Tabela 5). Já o agregado de basalto apresenta todas as suas partículas com duas ou mais faces fraturadas, porém, com cantos e arestas agudos e

não apresentando sinais de desgaste (partículas angulares) e textura superficial rugosa. Também, com base nesse processo de análise, pode-se dizer que o agregado de areia natural possui 50% de suas partículas com uma face fraturada e 35% com duas ou mais faces fraturadas, com cantos e arestas bem desgastados e textura superficial lisa.

É importante destacar que esse processo de avaliação mais completo permite que se faça distinção entre a angularidade das partículas do agregado de gábro e basalto, o que é impossível somente informando o número de faces fraturadas desses agregados. Ou seja, o ensaio de avaliação da porcentagem de faces fraturadas não atende ao propósito de avaliar a angularidade do agregado grosso.

6.2. Angularidade do Agregado Fino

Os valores médios dos resultados de três determinações de AAF (Método A - ASTM C 1252) foram: 48,3% para o gábro, 51,1% para o basalto e 40,7 para a areia natural. Análises visuais comparativas da forma, angularidade e textura superficial das partículas, utilizando a tabela de comparação de graus de arredondamento de Russel & Taylor (1937), também foram utilizadas com o intuito de estabelecer comparações com o ensaio AAF. Para a determinação da forma da partícula utilizou-se a tabela de comparação de graus de esfericidade de Rittenhouse (1943) e classificou-se a textura superficial como lisa ou rugosa.

Esfericidade e arredondamento são medidas de duas propriedades de superfície das partículas muito diferentes. A esfericidade está relacionada com a forma da partícula e o arredondamento com a angularidade e textura superficial. Segundo Suguio (1973), a esfericidade é uma grandeza que tenta expressar numericamente o grau de aproximação da forma de uma partícula qualquer com a de uma esfera perfeita. A tabela de Rittenhouse classifica graus de esfericidade numericamente de 0,45 até 0,97, sendo que quanto mais próximo de 1 mais próxima de uma esfera será a forma da partícula. A esfericidade é essencialmente mais sensível ao alongamento da partícula e o arredondamento está mais relacionado à agudeza das saliências da partícula (Figura 4).

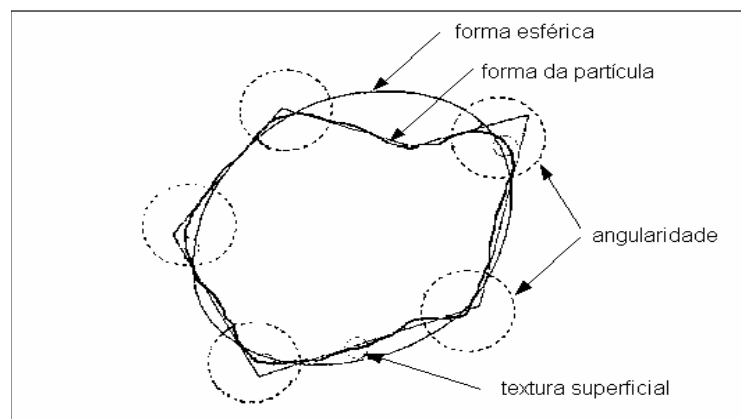


Figura 4: Forma, angularidade e textura superficial

A Tabela 6 apresenta os resultados das análises visuais comparativas quanto à angularidade, à forma e à textura superficial realizadas para os agregados estudados. O agregado de gábro apresentou subangularidade em suas partículas, sinalizada por seus cantos e arestas suavemente desgastados, tendo apresentado, também, esfericidade de 0,84, que indica forma arredondada e textura superficial rugosa. Já as partículas de basalto apresentaram-se angulares

(cantos e arestas agudos), com valor de esfericidade de 0,65, indicando forma alongada e textura superficial rugosa. As partículas do agregado de areia natural apresentaram angularidade baixa (cantos e arestas bem desgastados), com esfericidade igual à do agregado de gábro (0,84), indicando forma arredondada e textura superficial lisa.

Tabela 6: Análise comparativa visual quanto à angularidade, forma e textura superficial

Agregado	Grau de arredondamento (angularidade)	Grau de esfericidade (forma)	Textura superficial
Gabro	subangular	0,84	rugosa
Basalto	angular	0,65	rugosa
Areia natural	arredondada	0,84	lisa

Se a angularidade fosse considerada como um fator isolado, poderia ser dito que houve correlação entre os resultados de AAF e os resultados das análises visuais, indicando sensibilidade do ensaio AAF quanto às variações de angularidade, pois o agregado de basalto, que apresentou AAF mais elevado (51,1%), também apresentou agudeza maior de seus cantos e arestas, enquanto o agregado de gábro, que apresentou valor de AAF intermediário (48,3), mostrou subangularidade de suas partículas, sendo que o agregado de areia natural, com seus cantos e arestas bastante desgastados, apresentou o valor mais baixo de AAF (40,7%). Porém, vale lembrar que os resultados obtidos através do ensaio AAF correspondem a uma mistura das características de superfície do agregado (forma, angularidade e textura superficial).

Os resultados apresentados mostram que ensaio AAF não foi capaz de diferenciar agregados com formas mais apropriadas daqueles com formas menos apropriadas ao uso em pavimentação asfáltica, pois o agregado de basalto, possuidor de partículas com formas alongadas, apresentou valor de AAF mais elevado que o agregado de gábro, possuidor de partículas com formas mais arredondadas. Esse fato indica que utilizar apenas o AAF para avaliação das características de superfície pode não ser suficiente.

6.3. Forma do Agregado Grosso

As partículas de agregados foram avaliadas quanto à forma, considerando a sugestão de classificação da norma ASTM D 4791, como planas, alongadas e nem planas nem alongadas e, considerando a especificação Superpave, como planas/alongadas (lamelares) e não lamelares. Nas Tabelas 7 e 8, encontram-se as análises de forma das partículas obtidas com as proporções de 5:1 e de 3:1, respectivamente.

Ao fazer a análise de forma utilizando a proporção de 5:1, pode-se verificar que os agregados estudados encontram-se abaixo do limite máximo de 10%. Considerando-se a classificação ASTM D 4791, aproximadamente 100% das partículas dos agregados de gábro, basalto e areia natural não são planas nem alongadas. Já a classificação Superpave indica que 2,5% das partículas do agregado de basalto, 0,5% das partículas do agregado de gábro e 0,1% das partículas do agregado de areia natural são planas/alongadas.

No entanto, uma avaliação mais rigorosa, através da razão dimensional de 3:1, permite que se faça distinção entre as características de forma dos agregados. Considerando a classificação Superpave, pode-se verificar que o agregado de basalto apresenta aproximadamente 18% de suas partículas planas/alongadas, valor bastante superior aos aproximados 6% e 4% encontrados para o agregado de gábro e areia natural, respectivamente. Porém, a avaliação da forma da partícula como plana/alongada não permite dizer se as partículas são todas planas ou são todas alongadas ou ainda se esse agregado é composto tanto de partículas planas como de

partículas alongadas. Ao classificar as partículas considerando formas definidas, essas dúvidas são esclarecidas, pois fica claro que aproximadamente 5% das partículas do agregado de basalto são planas, não sendo composto por partículas alongadas. Já o agregado de gábro é composto por 0,8% de partículas planas e 0,1% de partículas alongadas e o agregado de areia natural possui quase que 100% de suas partículas não planas nem alongadas.

Portanto, através dos dados apresentados, pode-se concluir que ao utilizar a razão dimensional de 5:1 fica difícil perceber que se trata de agregado com características bem distintas de forma, ao passo que a razão dimensional de 3:1 é capaz de ressaltar essas diferenças. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram os resultados descritos por Prowell *et al.* (2005), que mostram a insensibilidade do ensaio com razão dimensional de 5:1 para indicar mudanças de forma do agregado. Também se pode concluir que a classificação das partículas com formas definidas (planas, alongadas) torna possível uma compreensão melhor de suas características de forma, importante para prognósticos de quebras de partículas durante a compactação da mistura ou durante a vida em serviço do pavimento.

Tabela 7: Porcentagem de partículas planas, alongadas e lamelares – Proporção 5:1

Agregado	ASTM D 4791 (%)			Superpave (%)	
	planas	alongadas	não planas ou alongadas	planas/alongadas (lamelares)	não lamelares
Gabro	0,1	0,0	99,9	0,5	99,5
Basalto	0,2	0,0	99,8	2,5	97,5
Areia natural	0,1	0,0	99,9	0,1	99,9

Tabela 8: Porcentagem de partículas planas, alongadas e lamelares – Proporção 3:1

Agregado	ASTM D 4791			Superpave	
	planas	alongadas	não planas ou alongadas	planas/alongadas (lamelares)	não lamelares
Gabro	0,8	0,1	99,1	5,6	94,4
Basalto	5,2	0,0	94,8	18,3	81,7
Areia natural	0,2	0,0	99,8	3,9	96,1

É interessante notar que, o agregado de basalto poderia ter sido considerado inadequado para utilização em rodovias com volume de tráfego alto se suas partículas fossem analisadas quanto à lamellaridade e com razão dimensional de 3:1 (18% de partículas planas/alongadas). Porém, ao fazer a diferenciação entre suas formas, as mesmas partículas do agregado de basalto seriam consideradas adequadas, pois apresentam apenas 5% de partículas planas, portanto abaixo do limite de 10%. A razão disso é que a avaliação Superpave, por analisar apenas a máxima e a mínima dimensão, acaba por penalizar agregados que possuem formas ligeiramente alongadas e espessura fina, ao passo que a avaliação através de formas definidas, ou seja, planas (largura/espessura) e alongadas (comprimento/largura), permite o discernimento entre as formas, o que propicia um julgamento mais justo quanto a possíveis quebras de partículas.

Ainda não existem pesquisas conclusivas quanto ao limite máximo de partículas planas/alongadas, avaliadas com a proporção de 3:1, que podem ser utilizadas no pavimento sem prejudicar o seu desempenho. Mas, certamente, a monitorização de formas definidas das partículas na proporção 3:1 pode trazer informações mais conclusivas que as encontradas com a proporção 5:1. Alguns estados estadunidenses limitam a utilização de partículas

planas/alongadas, segundo a proporção 3:1, em 20%, enquanto outros estabeleceram um limite máximo de 10% (Prowell *et al.*, 2005). No caso brasileiro, no entanto, mais pesquisas devem ser realizadas antes que um limite máximo realístico e indicativo das características de forma seja estabelecido.

6.4. Equivalente de Areia

O agregado de gábro aparentou valor de EA de 75% e os agregados de basalto e areia natural de 100%. O valor de 75% apresentado pelo agregado de gábro, apesar de estar acima do valor mínimo de 50% estabelecido pelo Superpave, indica a presença de argilominerais, ou então, de frações argilosas no agregado. Esse agregado, ainda que possivelmente desprovido de argilominerais, pode ter apresentado valor de EA mais baixo devido à camada de pó presente sobre suas partículas e à presença excessiva de frações muito finas do próprio agregado, também indesejáveis. Porém, utilizando apenas o ensaio de EA não se pode constatar, conclusivamente, se o agregado de gábro apresenta ou não argilominerais, pois esse ensaio permite a determinação da quantidade de frações argilosas, mas não possibilita a determinação exata da composição dessa fração, levando a dúvidas quanto à presença ou não de argilominerais no agregado.

7. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos experimentos laboratoriais realizados nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- O ensaio de determinação de porcentagens de faces fraturadas não permite a avaliação da angularidade dos agregados grossos, pois avalia apenas o número de faces fraturadas, não fazendo menção à avaliação do grau de angularidade (agudeza) dos cantos dessas fraturas, assim como não avalia a textura superficial das partículas;
- Através de um processo de análise visual das partículas é possível obter informações sobre a forma, angularidade e textura superficial do agregado grosso;
- O ensaio AAF não foi capaz de diferenciar agregados com formas mais apropriadas (gábro) daqueles com formas menos apropriadas (basalto) ao propósito da pavimentação, fato que pode levar à escolha de agregados com formas menos favoráveis, ainda que apresentando valores de AAF mais elevados;
- Avaliar partículas grossas através de formas definidas (planas, alongadas) permite julgar mais realisticamente a possibilidade de quebras dessas partículas;
- Avaliar as formas das partículas utilizando a razão dimensional de 3:1 traz mais informações sobre as formas dos agregados do que a proporção 5:1;
- O ensaio de EA permite que se determine a proporção de frações argilosas, no entanto, não permite a determinação exata da composição dessa fração, levando a dúvidas quanto à presença ou não de argilominerais no agregado.

Os especialistas do SHRP identificaram propriedades dos agregados importantes para a pavimentação. Contudo, propriedades também de extrema importância para o bom desempenho dos pavimentos, tais como, forma e textura superficial do agregado grosso, densidades, porosidade e absorção não foram consideradas.

Pode-se constatar também, com base na literatura consultada, que o critério de escolha dos ensaios para análise das propriedades de consenso dos agregados foi baseado apenas nos ensaios mais comumente utilizados pelas agências rodoviárias dos Estados Unidos. Esse critério de escolha desconsidera ensaios utilizados em outros países, já consagrados por

produzirem bons resultados, que poderiam ser utilizados para a análise das mesmas propriedades de maneira mais eficaz. Como exemplos, podem ser citados os ensaios de *Flakiness Index* e *Elongation Index*, padronizados pela *British Standard 812*, muito usados na Europa e na Austrália para determinação da forma do agregado grosso (Kandhal & Parker Jr., 1998).

A determinação da forma, da angularidade e da textura superficial das partículas finas do agregado, através do ensaio AAF ou através de análises visuais, pode não trazer informações realísticas. Com base na experiência adquirida nesta pesquisa, pode-se constatar como um diferencial positivo do ensaio AAF, em relação à análise visual das partículas, sua facilidade e rapidez de execução, em comparação ao processo longo e cansativo de análise visual, com o auxílio de lupas, das partículas de agregados finos. No entanto, o ensaio AAF pode trazer informações enganosas quando utilizado para detectar a maior ou menor adequabilidade de agregados para uso em misturas asfálticas, assim como a análise visual comparativa, pois esse processo de análise de formas permite avaliações apenas em duas dimensões (2D), prejudicando a obtenção de informações quanto à planicidade das partículas.

Há muito têm sido tentadas alternativas para análise da forma, da angularidade e da textura superficial, tanto dos agregados finos quanto dos agregados grossos, através de processos mais rápidos e precisos. Atualmente, técnicas de processamento de imagens digitais já são realidade na indústria da pavimentação. Esse modo de análise das características de superfície dos agregados parece promissor e vem ganhando força nos últimos anos, por não ser subjetivo, diferentemente do método utilizado para determinação das faces fraturadas do agregado grosso, e nem indiretos, como o utilizado para a determinação da AAF, além de serem rápidos e permitirem a obtenção de resultados com maior acurácia e precisão.

Agradecimento

O desenvolvimento desta pesquisa conta com o apoio da FAPESP na forma de bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brown, B. B. (1968). *Delphi Process: A methodology used for the elicitation of opinions of experts*. Relatório Técnico P.3925, RAND Corporation, Washington.
- Cominsky, R. R.; Leahy, R. B.; Harrigan, E. G. (1994). *Level one mix design: Materials selection, compaction, and conditioning*. Relatório Técnico SHRP-A-408, Strategic Highway Research Program (SHRP).
- Dalkey N. C.; Helmer, O. (1951). *The use of experts for the estimation of bombing requirements - A project Delphi experiment*. Relatório Técnico RM.727, RAND Corporation, Washington.
- Medina, J. (1962). *O ensaio do equivalente de areia*. Relatório Técnico 07, Instituto de Pesquisas Rodoviárias.
- Prowell, B. D.; Zhang, J.; Brown, E. R. (2005). Aggregate properties and performance of Superpave-designed hot mix asphalt. *National Cooperative Highway Research Program*, n.539.
- Kandhal, P. S.; Parker Jr., F. (1998). Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements. *National Cooperative Highway Research Program*, n. 405.
- Rittenhouse, G. (1943). A visual method of estimating two dimensional sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, n. 13, p. 79-81.
- Russel, R. D; Taylor, R. E. (1937). Roundness and and shape of Mississippi River sands. *Journal of Geology*, n.45, p. 225-267.
- Suguio, K. (1973). *Introdução à Sedimentologia*. Edgard Blucher Ltda. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Lilian Tais de Gouveia: ltgouveia@gmail.com

José Leomar Fernandes Júnior: 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 Paulo, SP, Brasil

Fone: (16)3373-9585/3373-9613; Fax: (16)3373-9602