

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADO A CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS QUANTO À FORMA

Francisco Evangelista Junior

Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará - UFC

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP

Leonardo Tavares de Souza

Universidade Federal do Ceará - UFC

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP

RESUMO

A geometria dos agregados desempenha um importante papel na resistência do pavimento à deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico. Este artigo descreve a utilização do método de processamento digital de imagens (PDI) para a análise da geometria dos agregados. O PDI consiste em converter imagens reais em uma forma digital e, aplicando procedimentos matemáticos, extrair informações significativas da imagem. O presente trabalho visa à comparação entre os resultados realizados pelas normas correntes (ASTM D 5821 01, ASTM D 4791 99 e ME 086/94) e pela aplicação do PDI. De uma maneira geral, tenta-se analisar as principais vantagens e desvantagens de cada método de ensaio quando comparados com as técnicas de automação de imagem. Os resultados apontam um bom desempenho das técnicas de PDI quanto ao tempo de análise e eliminação das limitações dos ensaios correntes tais como a subjetividade da avaliação e medição indireta da forma das partículas.

ABSTRACT

The geometry of aggregates plays an important role in the strength of pavements to rutting, fatigue and thermal cracking. This paper describes the use of digital image processing (DIP) for analyses of aggregate geometry. The DIP consists of converting real images into a digital media and applying some mathematical procedures to extract significant information of the image. The work aims the comparison between results carried through current tests (ASTM D 5821 01, ASTM D 4791 99 and ME 086/94) and the application of the DIP. It is attempted to analyze the main advantages and disadvantages of each test method when compared with the automated image techniques. The results show a good performance of DIP techniques with respect to the duration of the analysis and also the elimination of limitations related to the subjectivity of the evaluations and indirect measures on particle shape.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade dos pavimentos asfálticos é condição imprescindível para o desenvolvimento sócio-econômico de uma região ou de um estado. Esta qualidade passa necessariamente pelo projeto e execução de um revestimento durável a partir de uma dosagem correta da mistura asfáltica utilizada no projeto. A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na escolha de materiais a fim de se determinar, através de procedimentos experimentais, uma correta proporção de agregados e uma quantidade de ligante, denominada de teor de projeto. O objetivo é obter uma mistura que garanta uma durabilidade do pavimento, uma estabilidade suficiente da mistura para demanda de tráfego num nível aceitável de deformações, uma quantidade de vazios suficiente na mistura compactada de modo a permitir a expansão térmica do asfalto e uma boa trabalhabilidade (DNER, 1997).

Nos revestimentos das principais rodovias do Brasil são usadas misturas em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). O CBUQ é por natureza uma mistura heterogênea constituída de asfalto cimento, agregado graúdo e agregado miúdo (Manual de Asfalto, 2002). Cada material constituinte possui propriedades físicas distintas e comportamentos mecânicos bastante diferentes, tornando de fundamental importância a caracterização desses constituintes. Além disso, é bem reconhecido que a microestrutura formada por estes materiais desempenha

um importante papel na resistência do pavimento à deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico (Monismith, 1991; Vinson *et al.*, 1999; Soares e Freitas, 2003).

Os agregados graúdos têm um papel fundamental na estabilidade e capacidade de suporte dos pavimentos (El Hussein *et al.*, 1994; Manual de Asfalto, 2002). Na metodologia Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*) o conhecimento de algumas propriedades de forma dos agregados, tais como lamelaridade e angularidade, foi incluído em ensaios de laboratório. No Brasil, apesar de não normatizada, esta caracterização já é recomendada por órgãos públicos mesmo com a não utilização da metodologia Superpave para a dosagem da mistura.

Apesar do uso de equipamentos simples, a análise das características de forma dos agregados graúdos é dispendiosa, devido a dificuldade associada com a medição quantitativa manual de cada partícula de uma amostra representativa. Além disto, os ensaios correntes para as diversas medidas de forma dos agregados graúdos envolvem a determinação de um índice global que reflete a proporção de agregados que excede um critério pré-estabelecido em norma. Isto seguramente é menos descritivo que um estudo estatístico exploratório mostrando a frequência de partículas por vários critérios (Masad *et al.*, 2004).

Recentes avanços da informática permitem que imagens sejam processadas e analisadas, servindo como uma poderosa ferramenta para medir as características dos componentes de uma imagem digital. Desta forma o presente trabalho viabiliza uma análise quantitativa e qualitativa das características de forma dos agregados comumente utilizados em misturas asfálticas no estado do Ceará. São definidas forma, lamelaridade e angularidade dos agregados graúdos, utilizando uma técnica de Processamento Digital de Imagens (PDI). Os resultados são comparados com os ensaios requeridos pela metodologia Superpave quanto a angularidade e lamelaridade do agregado graúdo. Também é comparado o ensaio do Índice de Forma do DNIT.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Caracterização de agregados quanto à forma

Com a metodologia Superpave, uma importância maior foi dada aos agregados, uma vez que correspondem geralmente de 90 a 95% em peso e 75 a 85% em volume de uma mistura. No desenvolvimento das especificações Superpave, os especialistas consultados chegaram ao consenso geral das propriedades mais importantes dos agregados que influenciam na deformação permanente: (i) angularidade do agregado graúdo e miúdo, (ii) lamelaridade das partículas e (iii) teor de argila (SHRP, 1994). Observa-se que duas dessas propriedades estão relacionadas com a forma geométrica dos agregados.

A lamelaridade é um parâmetro de forma que procura determinar se as partículas são alongadas (lamelares) ou não. Admitindo o agregado como uma partícula tridimensional, como ilustra a Figura 1, com um valor de diâmetro em cada eixo: (i) comprimento (l), definido como o maior valor dos três diâmetros; (ii) largura (w), como o maior valor de diâmetro perpendicular ao comprimento e (iii) espessura (t), o diâmetro restante. A lamelaridade é a maior dentre as razões l por w ou w por t .

Partículas lamelares são indesejáveis na mistura asfáltica, pois têm a tendência de quebrarem durante a construção ou por ação do tráfego. Desta forma, partículas alongadas ou chatas de agregados, para alguns usos construtivos, podem interferir na consolidação da mistura em

campo (Masad *et al.*, 2004). Para isto o ensaio de lamelaridade do agregado graúdo avalia a porcentagem em peso ou em número de agregados graúdos que tem a lamelaridade maior que um valor especificado. A norma utilizada para a determinação da lamelaridade de agregados graúdos é a ASTM D 4791 99 - *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate* (ASTM, 1999).

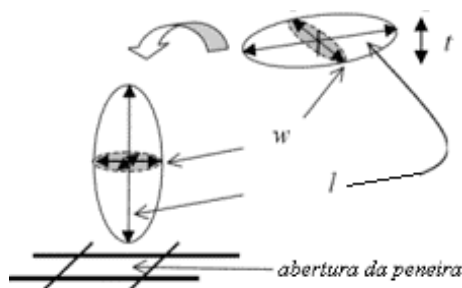


Figura 1: Definição dos diâmetros dos agregados graúdos (comprimento, largura e espessura)

A angularidade dos agregados graúdos é uma outra medida de forma e também de textura superficial que assegura que exista um alto grau de atrito interno entre agregados e boa resistência à deformação na mistura asfáltica. Desta forma, a angularidade do agregado influencia na resistência à deformação permanente de uma mistura, uma vez que, em partículas irregulares ou angulares, existe um maior entrosamento e uma resistência ao deslocamento entre as mesmas quando ocorre a compactação (Massad e Button, 2000; Maerz & Lusher, 2001; Manual de Asfalto, 2002).

Esta avaliação é feita nos agregados maiores que 4,75 mm que tenham uma ou mais faces fraturadas, definida como sendo qualquer superfície fraturada que ocupe mais do que 25% da área do agregado visível nesta orientação. Como ilustrado na Figura 2, a partícula será considerada fraturada se a projeção da área fraturada (A_f) for maior que 25% da projeção máxima visível da partícula (A_{MAX}). Desta forma, devido à tridimensionalidade das partículas de agregados, podem existir partículas com nenhuma, uma, duas ou até mais faces fraturadas. Muitas normas aconselham a determinação da angularidade, segundo o número de partículas com uma e/ou duas faces fraturadas.

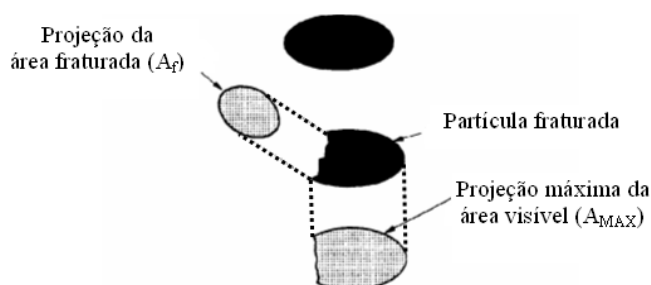


Figura 2: Esquema de uma partícula com uma face fraturada (ASTM, 2001)

A norma amplamente utilizada para a determinação da angularidade de agregados graúdos é a ASTM D 5821 01 - *Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate* (ASTM, 2001). Esta envolve a contagem manual de partículas a fim de determinar as faces fraturadas. Os requisitos mínimos para a angularidade de agregados graúdos são em função do volume de tráfego e espessura do pavimento.

A determinação de fatores ou índices que classifiquem as partículas de agregados quanto a sua esfericidade é na maioria das vezes realizada indiretamente. No caso brasileiro, o DNIT possui o ME 086/94 - *Índice de Forma de Agregado* (DNER, 1994). Neste procedimento, os agregados passam por crivos circulares e redutores de aberturas diferentes ilustrados na Figura 3, onde o material retido em cada crivo é pesado. O Índice de Forma (f) determinado varia de 0 a 1. Valores próximos a 1 indicam ótima cubicidade ou esfericidade, enquanto que valores próximos a 0 revelam agregados lamelares (achatados ou alongados). As especificações exigem um $f \geq 0,50$ para os agregados testados.



Figura 3: Crivos utilizados no ensaio do índice de forma (DNER, 1994)

É comum também expressar a forma dos agregados graúdos através de medidas diretas de cubicidade (Barrett, 1980). Geralmente estes fatores ou índices expressam o quanto a partícula do agregado se aproxima de uma partícula perfeitamente esférica. Estes índices de forma seriam determinados a partir da área projetada do agregado tridimensional em análise. Contudo, torna-se difícil medir manualmente a área e o perímetro dos agregados de uma amostra representativa.

2.2. Processamento digital de imagem aplicado à caracterização de forma de agregados

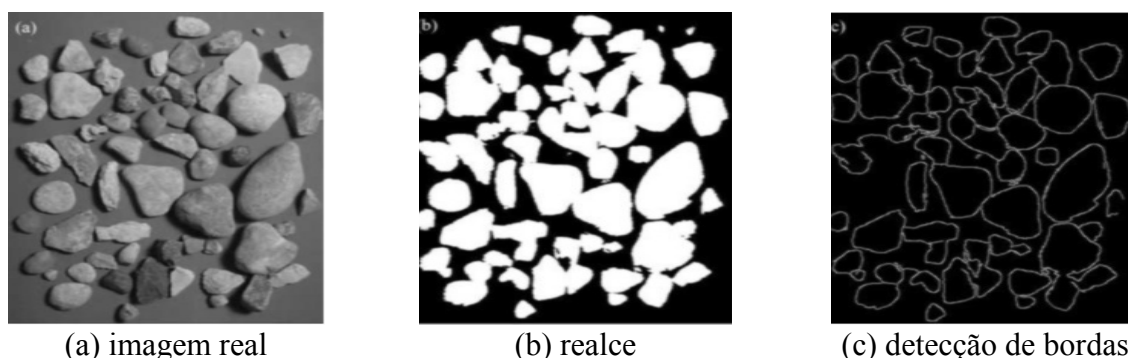
O termo imagem refere-se a uma função bidimensional de intensidade luminosa $f(x,y)$, onde x e y são coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x,y) é proporcional ao nível de cinza da imagem neste ponto (Gonzáles e Woods, 1993). Portanto, a imagem digital é uma representação de uma imagem real na qual é feita uma discretização tanto das coordenadas espaciais quanto dos níveis de cinza. Uma imagem digital pode ser definida como uma matriz onde a posição de seus elementos identifica um ponto da imagem e o correspondente valor do elemento identifica o nível de cinza daquele ponto.

O PDI consiste em converter imagens reais em uma forma digital e, aplicando vários procedimentos, extrair informações significativas da imagem. A Figura 4 mostra esquematicamente uma análise de misturas asfálticas pelo PDI. O PDI envolve os seguintes tópicos principais: (i) digitalização, (ii) realce, (iii) restauração e (iv) segmentação. A digitalização cobre os aspectos relacionados à conversão de imagens, ou seja, a amostragem das coordenadas espaciais e a quantificação dos níveis de cinza. A etapa de realce procura acentuar certas características da imagem para posterior análise ou visualização. As técnicas de restauração procuram reverter o processo de degradação sofrido por uma imagem através do processo de modelagem de fenômenos que causaram tal degradação para que seja efetuada a restauração à situação original. Segmentação é o processo de identificação e rotulação de regiões ou objetos em uma imagem para que possam ser identificados e tratados separadamente.



Figura 4: Esquema do processamento digital de imagens

Como parte do processo de segmentação, a detecção de bordas é a identificação de regiões em uma imagem, sendo uma das mais usuais operações realizadas no processamento de uma imagem. Isto significa que se uma imagem pode ser identificada criteriosamente, todos os objetos contidos nela podem ser localizados, ou seja, suas propriedades (área, perímetro, orientação e forma) podem ser identificadas. Tecnicamente, a detecção de bordas é o processo de localização dos *pixels* que separam os objetos a serem identificados dentro da imagem de fundo (*background*). A Figura 5 apresenta uma aplicação do PDI a uma amostra de agregados.



(a) imagem real

(b) realce

(c) detecção de bordas

Figura 5: Aplicação do PDI em uma amostra de agregados (Kim *et al.*, 2003)

O PDI e suas técnicas de análises já foram aplicados em vários problemas com materiais geológicos, incluindo estudos da microestrutura de argilas (Adamcewicz *et al.*, 1997); quantificação da anisotropia de diversos tipos de areia e determinação da distribuição espacial dos vazios em solos (Bhatia e Solimam, 1990), análise da evolução da estrutura interna de misturas asfálticas durante a compactação (Massad *et al.*, 1999); granulometria (Cheng, 2001), textura dos agregados (Sharma, 2001), formas do agregado (Yue *et al.*, 1995); esfericidade, homogeneidade e volume de vazios (Shashidhar, 1999). Embora o PDI seja largamente utilizado nestas áreas, tem sido limitada a sua aplicação em substituição aos ensaios correntes.

Devido à facilidade de acesso a muitas informações de forma dos agregados pelo PDI, tais como perímetro e área, índices mais realistas podem ser calculados para uma melhor caracterização da esfericidade destes agregados (Masad *et al.*, 2000). Apesar do conceito esfericidade estar ligado a natureza tridimensional da partícula, seus parâmetros são baseados em medidas bidimensionais (área e perímetro). Assim, os índices na realidade medem o quanto a partícula se aproxima de um círculo perfeito. Um dos índices mais utilizados pra

medir a esfericidade do agregado pelo PDI é a esfericidade (r) que possui valores no intervalo de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1 o resultado, mais circular é o objeto. Se o resultado da análise de um objeto for igual a 1, o objeto é um círculo perfeito. O valor de esfericidade é obtido através do uso equação (1).

$$r = \frac{4 \times \pi \times A}{P^2} \quad (1)$$

em que:

r : esfericidade;

A : área do objeto [mm^2];

P : perímetro do objeto [m].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia descrita visa à comparação entre os resultados realizados pelas normas correntes tradicionais e pela aplicação do PDI. Analisam-se as principais vantagens e desvantagens de cada método de ensaio quando comparados com as técnicas de automação de imagem. Especificamente para o ensaio de angularidade e índice de forma que estabelecem um índice de esfericidade da partícula de maneira indireta, tenta-se comparar com dois índices de esfericidade direta que podem ser determinados somente via processamento de imagem, já que estes são relacionados com o perímetro e área de cada partícula.

Os ensaios de lamelaridade, angularidade e índice de forma foram realizados para os agregados passantes na peneira de 3/8" e retidos na peneira N° 4. Para uma melhor compreensão dos resultados dos ensaios de lamelaridade e angularidade, optou-se por sua realização para cada fração de agregados retidos nas peneiras 1/2", 3/8" e N° 4. A massa amostral de cada peneira foi ponderada a partir da massa total, recomendada pelas respectivas normas, e encontram-se resumidas na Tabela 1, assim como o número de partículas em cada amostra. Para o ensaio do Índice de Forma não se utilizou a análise por cada peneira, e sim considerou-se a massa total dos agregados passantes na peneira de 3/8" e retidos na peneira N° 4 como prediz a norma. A massa total considerada para este ensaio foi de 6.011,2g. As seções seguintes descrevem cada um dos ensaios realizados e também a análise por PDI.

Tabela 1: Massa e número de partículas para os ensaios de lamelaridade e angularidade

	Lamelaridade		Angularidade	
	massa (g)	partículas (und.)	massa (g)	Partículas (und.)
1/2"	570,4	133	570,4	133
3/8"	213,6	104	213,6	104
N° 4	110,2	265	110,2	265
Total	894,2	502	894,2	502

3.1. Materiais

Foi utilizado um agregado virgem originado na cidade de Itaitinga, situada a 30 km da capital Fortaleza. Realizou-se também a granulometria do material segundo o DNER - ME 083/98 (DNER, 1998) e foi determinada a densidade real dos agregados grãos seguindo o Método de Ensaio do DNER - ME 081/98 (DNER, 1998).

3.2. Ensaios de lamelaridade, angularidade e índice de forma

O ensaio de lamelaridade do agregado grão foi feito de acordo com a norma ASTM D 4791 99 (ASTM, 1999). O procedimento utiliza um paquímetro especial, ilustrado na Figura 6,

conhecido como Dispositivo Caliper. O dispositivo é um gabarito que, depois de fixado para uma dimensão do agregado, gabarita a dimensão seguinte de acordo com uma proporção entre as dimensões do agregado requerido. Os requisitos Superpave recomendam a contagem das partículas para a proporção 1:5, mas por motivo de um melhor detalhamento o ensaio foi realizado para as proporções de 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5. Cada partícula da massa amostral de cada peneira foi testada e separada de acordo com o resultado em três grupos: (i) chatas; (ii) alongadas e (iii) não chatas e alongadas. Depois de realizada toda a classificação, as partículas classificadas como chatas e alongadas são pesadas juntas para a determinação de sua massa.

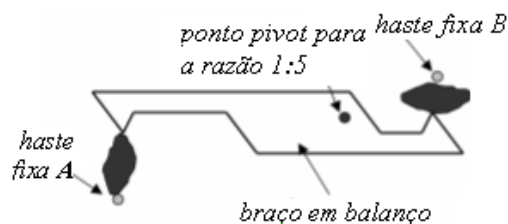


Figura 6: Dispositivo Caliper

O ensaio de angularidade foi realizado segundo a norma ASTM D 5821 01 (ASTM, 2001). Procedeu-se a inspeção visual de cada partícula e foi contabilizado o número de faces fraturadas de cada agregado para a determinação da porcentagem de partículas fraturadas em cada peneira. Os agregados analisados foram separados em grupos de acordo com o número de faces fraturadas existentes. Cada grupo foi posteriormente pesado para determinação percentual.

O ensaio de índice de forma foi realizado segundo a norma DNER - ME 086/94 (DNER, 1994). De cada fração de amostra separam-se as partículas retidas no crivo de abertura igual a metade do tamanho diretriz correspondente, anotando-se seu peso (Crivo I). O material que consegue passar pelo primeiro crivo foi então testado em um segundo crivo redutor de abertura igual a 1/3 do tamanho da fração (Crivo II). Através do somatório das percentagens retidas no Crivo I e no Crivo II pode-se calcular o índice de forma dos agregados pela fórmula:

$$f = \frac{P_1 + 0,5P_2}{100n} \quad (2)$$

em que:

f : índice de forma;

n : número de frações que compõem a graduação escolhida;

P_1 : soma das percentagens retidas nos Crivos I, de todas as frações que compõem a graduação;

P_2 : soma das percentagens retidas nos Crivos II, de todas as frações que compõem a graduação.

3.3. Processamento digital das imagens

Para a aplicação do processamento digital das imagens, foram seguidos os seguintes procedimentos:

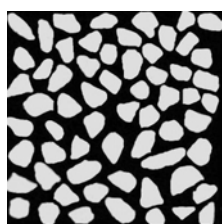
- Separação dos agregados por peneira (1/2", 3/8" e N° 4);
- Fotografia vertical dos agregados de cada peneira por meio de uma câmera fotográfica digital convencional. Para este procedimento os agregados foram dispostos sobre um fundo branco e separados de tal forma que não houvesse contato entre as partículas. O número de

partículas fotografadas para cada peneira encontram-se resumidos na Tabela 2. É importante observar que não foram estabelecidas condições especiais para iluminação e sombras já que se realizaria um tratamento posterior da qualidade da imagem. Apenas cuidados com relação a verticalização da foto foram assumidos de modo a evitar problemas com a escala da imagem;

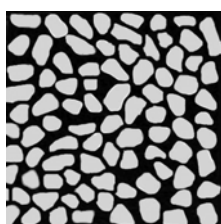
Tabela 2: Número de partículas digitalizadas para o PDI

	Partículas (und.)
1/2"	831
3/8"	337
Nº 4	1476
Total	2.644

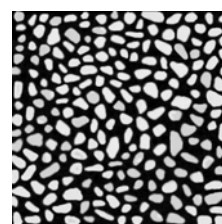
- Digitalização das imagens através de *scanner* convencional;
- Tratamento das imagens adquiridas pelo *software Adobe Photoshop™*. Neste procedimento foram retirados ruídos, sombras e outros possíveis defeitos de iluminação. Após este tratamento preliminar as imagens coloridas foram transformadas em imagens binárias como ilustra a Figura 7.



(a) peneira 1/2"



(b) peneira 3/8"



(c) peneira Nº 4

Figura 7: Fotos transformadas em imagens binárias para o processamento digital

- Processamento digital das imagens através do *software Wipfrag Image* (Palangio e Maerz, 1999). Os agregados foram caracterizados em relação a sua esfericidade e lamelaridade a partir das imagens binárias geradas (Figura 7). Como mencionado anteriormente, com a esfericidade é possível analisar a proximidade do agregado com uma circunferência e através do valor da lamelaridade obtêm-se as relações entre comprimento e largura dos agregados.

É importante observar que o resultado do ensaio de angularidade por meio da contagem de faces fraturadas dos agregados é uma medida indireta de quanto a partícula se aproxima da forma de uma círculo. Desta forma, este ensaio produz resultados com dados discretos que representam o número de faces fraturadas. Em contrapartida, as técnicas de processamento de imagem avaliam a angularidade de forma direta, onde a aproximação da partícula para a circunferência é sua esfericidade (r) dada pela equação (1). Neste caso, os resultados são valores contínuos entre 0 e 1. Devido a isto, a comparação entre o ensaio de laboratório e as técnicas de PDI aplicadas no cálculo de angularidade não podem ser avaliadas de maneira quantitativa e sim apenas qualitativa.

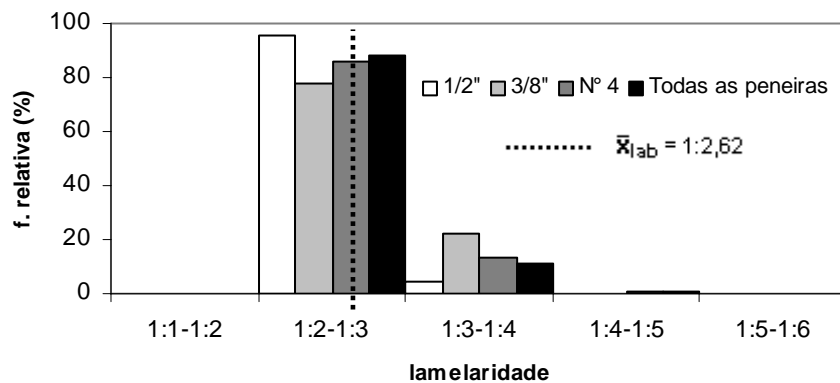
Com relação a comparação entre o índice de forma (f) e a esfericidade (r) pode-se ter uma comparação quantitativa pois apesar de f também ser uma medida indireta de angularidade, é

representado por um valor contínuo entre 0 e 1, em que sua magnitude tenta expressar a mesma aproximação com um círculo.

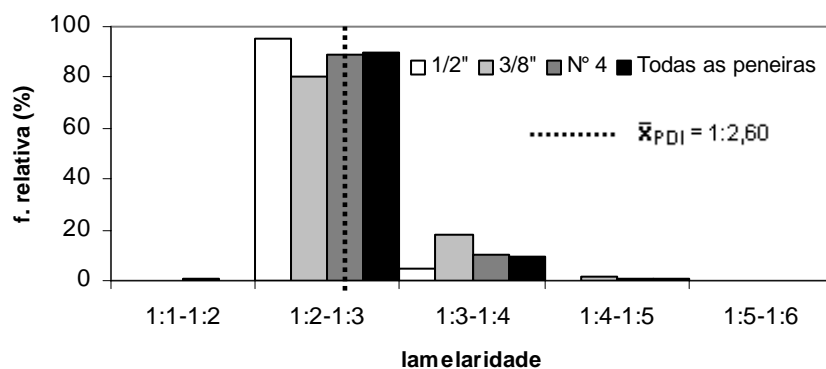
4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Lamelaridade do agregado graúdo

A Figura 8(a) apresenta os histogramas de frequência relativa para os valores de lamelaridade obtidos em laboratório para as maiores dimensões (comprimento: l e largura: w), enquanto que a Figura 8(b) apresenta os resultados oriundos do PDI. Nas figuras são mostrados os valores de lamelaridade de todas as peneiras investigadas individualmente e o valor de todos os agregados juntos, caso fosse realizado o ensaio sem diferenciação entre as peneiras dos agregados graúdos. Isto foi realizado para um melhor detalhamento das proporções de lamelaridade para as peneiras 1/2", 3/8" e Nº 4. Desta forma consegue-se perceber alguma flutuação significativa dos valores de lamelaridade dos agregados em peneiras diferentes.



(a)



(b)

Figura 8: Histogramas de lamelaridade para os (a) resultados das análises de laboratório e para os (b) resultados das análises do PDI

Analisando os histogramas podemos observar que há uma tendência assimétrica à esquerda de todas as peneiras, e que existe uma notável frequência de valores de lamelaridade entre 1:2 e 1:3 tornando este intervalo como a classe modal. Pode-se também observar que tanto o ensaio como o PDI mostraram uniformidade dos valores de lamelaridade para as 3 frações estudadas individualmente. Conseqüentemente, a consideração de todas as peneiras juntas conduz a

resultados semelhantes sem perda de informação para as amostras analisadas. É importante ressaltar que, ao determinar a proporção de partículas chatas e/ou alongadas para mais 4 proporções além da 1:5 o tempo do ensaio quadruplicou, enquanto o tempo de análise das imagens manteve-se inalterado.

Na Figura 8 também foram grafadas linhas verticais tracejadas nos valores das médias amostrais encontradas pelos dois processos. Em uma avaliação quantitativa percebemos uma mínima diferença entre as médias encontradas em laboratório e pelo PDI. Pelos valores destas médias amostrais exibidos nas Figura 8 ($\bar{x}_{LAB} = 1:2,62$ e $\bar{x}_{PDI} = 1:2,60$) vemos que os valores são bem semelhantes mostrando que o PDI conseguiu a mesma caracterização de laboratório com uma diferença relativa de apenas 0,7%.

A Tabela 3 apresenta o valor da porcentagem encontrada para os diversos valores de lamelaridade. A porcentagem de partículas de proporção 1:5 indica um percentual nulo que é abaixo do máximo de 10% permitido pelas especificações Superpave para um tráfego com número de repetições maior que 10^6 . Observamos também que as duas metodologias utilizadas obtiveram o mesmo resultado.

Tabela 3: Resultados para o ensaio de lamelaridade obtidas em laboratório e pelo do PDI

Proporção	Laboratório (%)	PDI (%)
1:1 – 1:2	0	0
1:2 – 1:3	88	90
1:3 – 1:4	11	9
1:4 – 1:5	0	1
1:5 – 1:6	0	0

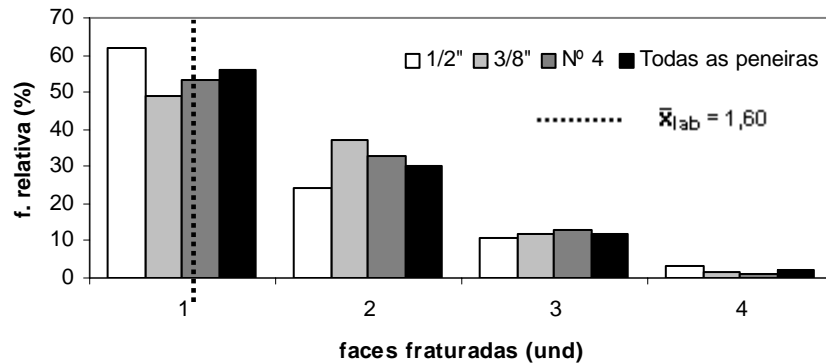
4.2. Angularidade

A Figura 9(a) apresenta o histograma de dados discretos do número de faces fraturadas a partir de resultados dos ensaios de laboratório. A partir dele pode-se notar que há uma maioria de resultados com número de faces fraturadas igual a 1 e uma tendência decrescente da frequência relativa destes com o aumento do número de faces fraturadas. Assim, a maioria das partículas possuem uma boa proximidade com a forma esférica, já que quanto menor o número de faces fraturadas maior a esfericidade da partícula segundo as estudos Superpave.

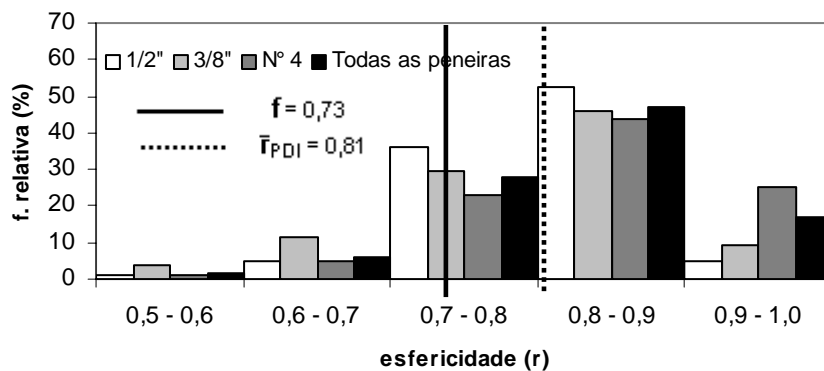
Em relação ao gráfico dos valores obtidos pelo PDI da Figura 9(b), nota-se que a maior frequência de valores de esfericidade encontra-se no intervalo de 0,8 a 0,9. A partir destes resultados conclui-se que a maioria dos agregados também possui uma boa proximidade com a forma circular, pois quanto mais próximo de 1 for o valor da esfericidade, maior será sua proximidade da forma circular, confirmando a análise de laboratório. Isto indica o potencial do PDI para a caracterização da angularidade dos agregados graúdos. Os dois métodos também indicam que análises realizadas com todas as peneiras juntas chegariam a resultados semelhantes quando comparados com o comportamento de angularidade dos diferentes tamanhos de agregados.

É importante observar que a análise realizada através do número de faces fraturadas é bastante subjetiva e demorada, já que se trata da identificação manual das partículas. Assim, existe uma dificuldade de identificação entre uma face fraturada ou não fraturada, enquanto que o

valor obtido através do PDI é mais rápido e com maior precisão. Na Figura 9 foram grafadas linhas verticais tracejadas para identificar o valor da média de cada método.



(a)



(b)

Figura 9: Histogramas de angularidade para os (a) ensaios de laboratório e para os (b) resultados do PDI

4.3. Índice de forma

No histograma da Figura 9(b) foi grafada uma linha vertical contínua representando o valor do índice de forma (f) obtido pela norma DNER (1994) para a comparação com a média dos valores de esfericidade (r) oriundos do PDI (linha vertical tracejada). A classe modal obtida com o PDI foi a do intervalo 0,8 - 0,9 enquanto que o valor de f encontra-se no intervalo 0,7-0,8. Apesar das diferentes classes modais identificadas, a análise quantitativa mostra que os dois processos atingiram valores semelhantes já que as médias de ambos ($f = 0,73$ e $\bar{r}_{PDI} = 0,83$) são numericamente próximas tendo uma diferença relativa de 10%. Isto se deve ao fato de que o \bar{r}_{PDI} encontra-se bem perto limite inferior de sua classe. O valor encontrado com a utilização do PDI caracteriza um agregado bem mais próximo do círculo do que o resultado laboratorial.

Pode-se também observar que tanto o ensaio como o PDI mostram uniformidade dos valores de lamelaridade para as 3 frações estudadas individualmente e também quando consideradas todas as peneiras juntas. É importante lembrar que o ensaio de índice de forma não avalia de

forma direta a esfericidade dos agregados, obtendo valores a partir de percentagens em massas retidas em crivos. Já os resultados do PDI são obtidos mais rápidos e de forma direta, analisando cada agregado individualmente.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios de caracterização das propriedades de consenso dos agregados graúdos pela metodologia Superpave se mostram bastante simples de serem executados uma vez que utilizam equipamentos simples de laboratório. A desvantagem destes ensaios é que a avaliação é feita em cada partícula de agregado de uma amostra representativa. Além disso, as propriedades de forma são medidas indiretamente para os ensaios do Índice de Forma e angularidade, onde este último ainda depende de análises subjetivas, e portanto, passíveis de erro humano.

As técnicas de PDI demonstraram que com a automação dos ensaios há um ganho de produtividade e uma minimização de possíveis erros humanos causados pela subjetividade das análises realizadas, principalmente na determinação da angularidade por meio da observação e contagem de faces fraturadas. Além disso, as técnicas de PDI oferecem uma operacionalização unificada em que os diversos parâmetros, determinados em ensaios distintos, são realizados em uma mesma análise. Assim, com o mesmo tempo de análise, características adicionais, tais como (i) parâmetros de forma peneira por peneira, (ii) índices quantitativos para a determinação da angularidade, (iii) proporções adicionais a 1:5 para o ensaio de lamelaridade, podem ser consideradas.

A aplicação do processamento de imagens mostrou grande praticidade pelo fato de utilizar equipamentos e *softwares* convencionais para a aquisição, tratamento, edição e processamento das imagens. As características de forma analisadas mostraram boa semelhança com as obtidas nos três testes de laboratório considerados. Devido à facilidade de acesso a muitas informações de forma dos agregados pelo PDI, tais como perímetro e área, índices mais realistas puderam ser calculados para uma melhor caracterização da esfericidade destes agregados.

Com a utilização das técnicas de PDI, vê-se a oportunidade de um melhor conhecimento das características geométricas dos agregados utilizados nas misturas asfálticas e seus distintos efeitos na resposta global dos pavimentos. Desta forma, a técnica pode possibilitar uma melhor dosagem dessas misturas, utilizando-se agregados mais adequados. Como a aplicação desta metodologia é recente, principalmente no Brasil, há necessidade de maiores estudos de sua potencialidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP/DET/UFC por todo o apoio operacional concedido e à CAPES, CNPq e ANP pelas respectivas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamcewicz, A. S., Muhunthan, B. e Masad, E. (1997) Soil fabric changes during consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 20 (3), 347–56.
- ASTM D 4791 (1999) Standard Test Method for Flat particles, Elongated particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- ASTM D 5821 (2001) Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- Barrett, P. J. (1980) The shape of rock particles, a critical review, *Sedimentology*, 27, 291–303.

- Bhatia, S. K. e Soliman, A. F. (1990) Frequency distribution of void ratio of granular materials determined by an image analyzer, *Soils and Foundations*, 30 (1), 1–16.
- Chang, K.G. e Meegoda, J.N. (1997) Micro-mechanics simulation of hot mix asphalt. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 5, Maio, pp. 495-503.
- Cheng, K. (2001) Optical gradation of crushed limestone aggregates. Ph.D. Dissertation, West Virginia University, 2001.
- DNER (1997) Especificações gerais para obras rodoviárias, ES 313/97. Volume III/IV, Pavimentos Flexíveis. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994) ME 86 - Agregados - índice de forma de agregado. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.
- DNER (1998) ME 083 - Agregados - análise granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1998) ME 081 - Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- El Hussein, H. M., and Z. Q. Yue. (1994) Criteria for evaluation of rutting potential based on repetitive uniaxial compression test. In *Transportation Research Record 1454*, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Gonzalez, R.C e Woods, R.E. (1993) *Digital Image Processing*. Addison-Wesley.
- Hunter, A. E., Airey, G. D. and Collop, A. C. (2004) Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory Compacted Asphalt Samples. TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM
- Kandhal, P. S. e Cooley Jr., L. A. (2001) The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification. NCHRP Report 464 from National Cooperative Highway Research Program. National Academy Press, Washington D. C.
- Kim, H., Hass, C. T. e Rauch, A. F. (2003) 3D Image Segmentation of Aggregates from Laser Profiling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, pp 254-263
- Manual de Asfalto (1989) Instituto de Asfalto. Série do Manual Nº 4 (MS-4), Ed. 1989.
- Masad, E. A., Muhunthan, B., Shashidhar, N. and Harman, T. (1999) Quantifying laboratory compaction effects on the internal structure of asphalt concrete, *Transportation Research Board*, manuscript no. 991052.
- Masad, E. e Button, J. W. (2000) Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, pp. 273-280.
- Masad, E., Kose, S., Guler, M. e Bahia H.U. (2000) Distribution of Strains within Asphalt Binders in HMA Using Imaging and Finite Element Techniques. In *Transportation Research Board 79th Annual Meeting*.
- Masad, E. e Button, J. (2004) Implications of Experimental Measurements and Analyses of the Internal Structure of HMA. TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM.
- Maerz, N. H. e Lusher, M. (2001) Measurement of Flat and Elongation of Coarse Aggregate Using Digital Image Processing. In *Transportation Research Board 80th Annual Meeting*.
- Monismith, C. L. (1991) Summary report on permanent deformation in asphalt concrete, SHRP-A/lr-91-104, National Research Council, Washington, D.C.
- Oduroh, P.K., Mahbou, K.C e Anderson, R.M. (2000) Flat and Elongated Aggregates is Superpave Regime. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Palangio, T. C. e Maerz, N. H. (1999) Case Studies Using the Wipfrag Image Analysis System. *Proceedings, FLAGBLAST 6th International Symposium for Rock Fragmentation By Blasting*, Joannesburg, South Africa, pp. 117-120.
- Sharma, M. e Singh, S. (2001) Texture experiments with Meastex and Vistex benchmarks, *Proc. International Conference on Advances in Pattern Recognition*, Lecture Notes in Computer Science no. 2013, S. Singh, N. Murshed and W. Kropatsch (eds.), Springer.
- SHRP (1994) SHRP-A-415 – Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes. Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., Estados Unidos.
- Vinson, T. S., V. C. Janoo e R. C. G. Haas. (1999) Summary report low temperature and thermal fatigue cracking. SHRP-A/IR-90-001, National Research Council, Washington, D.C.
- Yue Z.Q., Bekking W. e Morin I. (1995) Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure. In: *Transportation Research Record 1492*. Washington (DC): Transportation Research Board, National Research Council. p. 53–60.
- Wang, L. B., Frost, J.D., Mohammad, L. e Pand, T. Y. (2002) Three-Dimensional Aggregate Evaluation Using X-ray Tomography Imaging. TRB 2002 Annual Meeting CD-ROM.