

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS CONVENCIONAIS E ALTERNATIVOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Iuri Sidney Bessa

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia de Transportes

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos

RESUMO

A qualidade dos pavimentos asfálticos passa pelo projeto e execução de um revestimento durável, necessitando, entre outros aspectos, da escolha adequada dos materiais a serem utilizados. O desempenho de misturas asfálticas está diretamente relacionado às propriedades de forma dos agregados. O conhecimento de propriedades como angularidade e lamelaridade já está incluído em testes de laboratório. A análise dessas características utiliza equipamentos simples, mas apresenta dificuldade na medição manual de cada unidade de agregado. Este trabalho visa comparar resultados provenientes de uma técnica de Processamento Digital de Imagens (PDI) com ensaios de laboratório para caracterização de agregados com relação à: (i) angularidade, (ii) lamelaridade e (iii) índice de forma. Nessa pesquisa, foram utilizados 3 agregados para os ensaios de caracterização: agregado granítico, escória de aciaria e Resíduo de Construção e Demolição (RCD). Também foram feitas análises para a obtenção da distribuição e orientação desses agregados em misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA).

ABSTRACT

The quality of asphalt pavements is related to the design and construction of durable layers, which requires an adequate selection of materials. Hot Mixture Asphalt (HMA) performance is directly related to aggregate shape properties. The knowledge of certain properties such as angularity and shape has already been included in laboratory tests. The analysis of these characteristics uses simple equipments, but it brings difficulties in the manual measurement of each unity of aggregate. This research compares results from a Digital Image Processing (DIP) technique to conventional laboratory tests for the characterization of aggregates relative to: (i) angularity, (ii) flat and elongated particles and (iii) roundness. Three different aggregates were investigated: natural aggregates, steel slag and Construction and Demolition Residue (CDR). Other analyses were made to obtain the distribution and orientation of those aggregates in Asphalt Concrete (AC) mixtures.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos devem possuir uma qualidade mínima para que estejam adequados às necessidades de seu uso. Para isso, devem ser combinadas, corretamente, diferentes etapas dos processos de projeto e execução dos mesmos. Deve ser realizada a confecção de um revestimento durável, a partir de uma dosagem adequada da mistura asfáltica. A dosagem de uma mistura asfáltica é feita por meio da escolha de materiais que, por meio de procedimentos laboratoriais, se combina em uma correta proporção de agregados e quantidade de ligante. Essa proporção de ligante é chamada de teor de projeto. O objetivo da dosagem é obter uma mistura que garanta durabilidade para o pavimento asfáltico, além de uma estabilidade suficiente de acordo com a demanda de tráfego em um nível aceitável de deformações para uma mistura compactada (DNER, 1997).

Nos revestimentos das principais rodovias do Brasil, são usadas misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA), constituído de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), agregados graúdos, agregados miúdos e fíler. Por possuírem propriedades distintas entre si, é fundamental a caracterização desses constituintes. Sabe-se que a microestrutura formada por esses materiais desempenha importante papel na resistência do pavimento com relação à

deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico (Monismith, 1991; Vinson *et al.*, 1999; Bernucci *et al.*, 2007).

Por possuírem papel fundamental na estabilidade e na capacidade de suporte de carga dos pavimentos, os agregados graúdos devem ser caracterizados quanto a propriedades de forma, como lamelaridade, angularidade e índice de forma. A metodologia de dosagem Superpave prevê ensaios de laboratório que fornecem tais características. Dentre as desvantagens dos métodos tradicionais, que seguem a metodologia Superpave, para a avaliação das propriedades de forma de agregados, citam-se: (i) falta de conexão entre as propriedades de agregados graúdos e miúdos, (ii) resultados influenciados por mais de uma propriedade de forma do agregado, (iii) alguns ensaios além de qualitativos são dispendiosos, (iv) medidas indiretas de propriedades de forma (Castelo Branco *et al.*, 2006; Souza, 2009).

A análise das características relacionadas à forma do agregado utiliza equipamentos simples, porém demanda muito tempo, por ser necessária a medição quantitativa manual de cada unidade de uma amostra considerada representativa. Além disso, os ensaios em laboratório determinam um índice global baseado em médias ao invés da utilização de distribuição cumulativa de propriedade (Masad, 2004).

Com o avanço da informática, hoje já é possível que imagens sejam processadas e analisadas a ponto de se medir as características dos componentes que fazem parte delas. Isso acaba servindo como uma ferramenta importante para que se dependa menos da análise manual das características relacionadas à forma dos agregados. O presente trabalho tem como objetivo mostrar uma forma prática de análise dos agregados quanto a algumas propriedades, como: lamelaridade e angularidade, além de comparar os resultados obtidos através de ensaios realizados com diferentes tipos de agregados. É utilizada uma técnica de Processamento Digital de Imagens (PDI) de duas formas: (i) análise dos agregados soltos, dispostos em um plano e (ii) análise das faces internas de um corpo-de-prova (cp) serrado. A primeira análise tem como objetivo extrair as informações dos agregados que estão relacionadas com a forma, enquanto a segunda é feita para se obter a distribuição dos agregados em uma mistura asfáltica. Os resultados extraídos do PDI são comparados com os resultados de ensaios laboratoriais exigidos pela metodologia Superpave: ASTM D 4791 99 – *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*; ASTM D 5821 01 – *Standard Test Method for Determining the percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*; e DNER-ME 086/94 – Agregados - Índice de Forma de Agregado. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.

Foi utilizado o software de análise *Imagetool*, com o intuito de se obter as informações desejadas para a caracterização dos agregados. O programa possui diversas finalidades, mas, para esta pesquisa, foram analisadas misturas de acordo com as características de forma dos agregados e os parâmetros de orientação dos mesmos, conforme mencionado anteriormente. Dessa forma, foram avaliados e comparados agregados de diferentes origens: agregado granítico, escória de aciaria e Resíduo de Construção e Demolição (RCD), além de misturas constituídas desses agregados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A metodologia Superpave dá uma importância maior à presença dos agregados em misturas asfálticas, por estes corresponderem a aproximadamente entre 90% e 95% em peso de uma

mistura asfáltica. Ao desenvolver as técnicas utilizadas no Superpave, especialistas chegaram à conclusão de que as propriedades de angularidade dos agregados graúdo e miúdo, a lamelaridade dos agregados e o teor de argila influenciam diretamente na deformação permanente do pavimento. Observa-se, assim, que três dessas características estão relacionadas à forma geométrica dos agregados (angularidade do graúdo e do miúdo, e lamelaridade).

As propriedades dos agregados, consideradas pelas especificações Superpave como de fundamental importância para a seleção de agregados adequados à pavimentação, foram classificadas dentro de duas categorias: propriedades de consenso e propriedades de origem. O consenso do grupo de especialistas é que as propriedades de angularidade do agregado graúdo grosso, angularidade do agregado miúdo, agregados planos e alongados e finos plásticos são críticas e devem ser avaliadas, em todos os casos, a fim de demonstrar a adequabilidade ou não dos agregados para gerar misturas com desempenho satisfatório. O grupo de especialistas, selecionados pelo SHRP (*Strategic Highway Research Program*), também concordou que outras propriedades dos agregados eram críticas para o propósito da pavimentação. Entretanto, não houve consenso para os valores limites que deveriam ser estabelecidos para essas propriedades por serem muito dependentes da origem dos materiais. Assim, foi proposto que as propriedades de resistência à abrasão, sanidade e materiais deletérios, classificadas como de origem, tivessem seus valores limites estabelecidos pelos departamentos rodoviários de cada estado, por estes estarem familiarizados com os materiais próprios de cada região (Motta *et al.*, 1996).

2.1. Lamelaridade

A lamelaridade é um parâmetro geométrico que determina se os componentes dos agregados são alongados ou não. Esse parâmetro relaciona a maior razão existente entre o comprimento (maior diâmetro do agregado) e a largura (maior diâmetro perpendicular ao comprimento do agregado), ou entre a largura e a espessura (menor diâmetro perpendicular ao comprimento do agregado). A norma utilizada para ensaios em laboratório que determina a lamelaridade de agregados graúdos é a ASTM D 4791 99. Essa norma requer a utilização de um tipo de paquímetro dimensional que determina as razões entre os diâmetros de uma determinada unidade de agregado. Cada agregado deve ser medido um a um, a partir de uma amostra representativa recomendada pela norma. De acordo com a norma, os agregados podem ser (i) planos, (ii) alongados ou (iii) planos/alongados, dependendo das relações entre seus diâmetros.

A utilização de agregados com formas planas e/ou alongadas em misturas asfálticas pode causar vários problemas, dentre eles a quebra de agregados durante a compactação e a diminuição da trabalhabilidade da mistura. As especificações Superpave determinam que se avalie a forma do agregado somente quanto à sua lamelaridade, com razão dimensional de 5:1. Dessa maneira, deve ser estabelecido um limite máximo de 10% de agregados planos/alongados na produção de misturas asfálticas para pavimentos com volume de tráfego médio a alto ($N > 3 \times 10^6$) (Cunha *et al.*, 2004). Além disso, as unidades lamelares podem quebrar também por ação do tráfego. Sendo assim, agregados alongados ou chatos, para alguns usos construtivos, podem ser indesejados para utilização em misturas asfálticas em campo (Masad *et al.*, 2002).

2.2. Angularidade

A angularidade é uma característica associada ao grau de amaciamento dos cantos ou arestas dos agregados (Cunha *et al.*, 2004). É uma medida de forma e também de textura superficial que garante a existência de um alto nível de atrito interno entre os agregados de uma mistura, além da boa resistência à deformação. A avaliação dessa característica é feita em agregados maiores que 4,75mm (peneira nº 4) que tenham uma ou mais faces fraturadas. Uma face é considerada fraturada quando a projeção da fratura corresponder a mais de 25% da projeção máxima visível do agregado. Desta forma, devido à tridimensionalidade dos agregados, podem existir agregados com mais de uma face fraturada (Evangelista *et al.*, 2005). A fratura da face de um agregado pode acontecer devido a processos de britagem ou pela ação da natureza. A norma utilizada para o teste em laboratório da angularidade de agregados é a ASTM D 5821 01, que envolve a contagem manual de cada agregado um a um para verificar a existência de nenhuma, uma ou mais faces fraturadas. No entanto, o ensaio de determinação de porcentagens de faces fraturadas não permite a avaliação da angularidade dos agregados grossos, pois, solicita apenas o número de faces fraturadas não fazendo menção à avaliação do grau de angularidade (agudeza) dos cantos dessas fraturas, assim como, também não avalia a textura superficial dos agregados (Gouveia, 2006).

A forma ou angularidade do agregado influencia na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, uma vez que, em agregados irregulares ou angulares, existem maiores entrosamento e resistência ao deslocamento entre as mesmas quando ocorre a compactação (Masad *et al.*, 2000; Maerz *et al.*, 2001). Agregados angulares proporcionam maiores intertravamento e atrito interno entre si, formando uma estrutura granular mais rígida. Com relação a agregados com cantos arredondados, ao invés de se intertravarem, tendem a deslizar umas sobre as outras, resultando em uma estrutura granular mais fraca e, portanto, em misturas menos estáveis (Cunha *et al.*, 2004). No que diz respeito à trabalhabilidade da mistura, unidades arredondadas apresentam vantagem quando comparadas a unidades angulares, uma vez que misturas com agregados arredondados requerem menos esforço na compactação, para se obter a densidade desejada. Por outro lado, a facilidade na compactação de misturas com agregados arredondados pode ser desvantajosa, uma vez que a compactação pode continuar devido ao tráfego, causando o aumento da densidade, e, por isso, problemas de deformação permanente aconteceriam (Roberts *et al.*, 1996). As especificações Superpave indicam valores mínimos de porcentagens de agregados fraturados crescentes com o tráfego ou com a proximidade da camada em relação à superfície do pavimento (Tabela 1).

Tabela 1: Requisitos Superpave de angularidade de agregado graúdo (Bernucci *et al.*, 2007)

| Tráfego (10 ⁶) | Espessura do pavimento | |
|----------------------------|------------------------|----------|
| | < 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 |

Nota: “85/80” significa que 85% dos agregados graúdos possuem uma superfície fraturada e 80% possuem duas superfícies fraturadas.

Souza (2009) investigou o efeito da angularidade na vida de fadiga de uma mistura através do ensaio de energia de fratura. O resultado mostrou que o aumento da angularidade do agregado graúdo faz com que a vida de fadiga diminua. Mostrou também que, para o campo, agregados com elevados valores de angularidade podem ser utilizados para aumentar a resistência à deformação permanente.

2.3. Índice de forma

O índice de forma é o parâmetro que classifica os agregados quanto à sua esfericidade. O procedimento de ensaio DNER-ME 086/94 – Índice de Forma de Agregado – especifica que os agregados devem passar por crivos circulares e redutores, sendo registrada a massa retida em cada crivo. O índice de forma é um parâmetro adimensional que varia entre 0 e 1, levando-se em conta que agregados com índices próximos a 1 possuem ótima esfericidade e que agregados com índices próximos a 0 possuem baixa esfericidade, ou seja, são mais lamelares do que esféricas. A metodologia Superpave recomenda que os agregados de uma mistura asfáltica devam possuir índice de forma igual ou maior a 0,50.

2.4. Caracterização de agregados por meio do PDI

A técnica PDI envolve a digitalização de uma imagem real e a análise de seus componentes para a obtenção de parâmetros relacionados à forma e à orientação das mesmas. Esta técnica consiste de algumas etapas até que os dados requeridos sejam extraídos. O *software Imagetool* é uma ferramenta que pode ser utilizada para a análise de imagens e processamento de dados, sendo possível alterar a resolução de imagens e converter seu formato.

Para a análise dos parâmetros relacionados à orientação das unidades de agregados, primeiro deve ser realizada a etapa de digitalização, ou seja, o processo de transformação da imagem real de um objeto físico em uma imagem digital que possa ser manipulada em um computador. Em seguida, há a etapa de realce, onde os agregados presentes na imagem ficam melhor distintos uns dos outros, podendo ser separadas através da detecção das bordas de cada uma.

A etapa de restauração procura corrigir os defeitos e as imperfeições que possivelmente possam ter aparecido devido ao processo de digitalização da imagem. Finalmente, há a segmentação, que é um procedimento de identificação e rotulação de regiões ou objetos em uma imagem, por meio da detecção de bordas da mesma. Esta técnica permite a subdivisão de uma imagem em suas partes ou objetos constituintes para que possam ser identificados e tratados separadamente (Souza *et al.*, 2006). O nível dessa subdivisão deve ser realizado dependendo do objetivo que se quer alcançar (Gonzalez *et al.*, 1993). Assim, se uma imagem pode ser identificada criteriosamente, todos os objetos e subimagens dentro dela podem ser localizados, permitindo a determinação de propriedades como área, perímetro, orientação, forma, dentre outras. Tecnicamente, a detecção de bordas é o processo de localização dos *pixels* que separam os objetos a serem identificados dentro da imagem do *background*, ou seja, todo o resto (Evangelista *et al.*, 2005).

A utilização do PDI permite o acesso mais fácil a características de forma dos agregados, como perímetro e área, o que possibilita o cálculo de maneira mais precisa de parâmetros como a esfericidade, apresentando uma caracterização mais realista dos agregados (Masad *et al.*, 2000). Com o PDI, a esfericidade pode ser medida por meio do parâmetro *roundness*, que possui valores no intervalo entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1 for o resultado, mais

circular é o objeto. Se o resultado da análise for igual a 1, o objeto terá o formato de um círculo perfeito. O valor do *roundness* (r) é obtido através da Equação 1.

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

em que r : *roundness*; A : área; P : perímetro

O arranjo dos agregados, em termos da distribuição espacial, distribuição direcional e pontos de contato, é responsável pela formação do esqueleto mineral. Essas distribuições resultam do proporcionamento e das propriedades dos materiais, além da forma de compactação. A diferença nas propriedades de uma mesma mistura imposta a diferentes métodos de compactação deve-se principalmente às diferenças na estrutura, em particular à distribuição e orientação dos agregados graúdos. A microestrutura das misturas asfálticas vem sendo cada vez mais associada às suas propriedades mecânicas, bem como a resistência aos defeitos comumente encontrados em campo: deformação permanente, fadiga, trincas a baixas temperaturas, etc (Vasconcelos *et al.*, 2005; Souza, 2009).

Com a utilização da técnica de PDI, é possível também obter a orientação dos agregados existentes em uma mistura. A orientação de um agregado é o ângulo existente entre o maior comprimento da mesma e a linha horizontal da imagem. De acordo com Masad *et al.* (1999), o maior comprimento de uma unidade de agregado é aquele que define a maior distância entre dois *pixels* dos limites de contorno de um agregado. O vetor magnitude (Δ) é um parâmetro que relaciona a orientação dos agregados pode ser obtido por meio da Equação 2.

$$\Delta = \left(\frac{1}{N} \right) \times \sqrt{\left(\sum \text{sen} \theta_k \right)^2 + \left(\sum \text{cos} \theta_k \right)^2} \quad (2)$$

em que Δ : vetor magnitude; θ : ângulo de um agregado isolado, com a horizontal; N : número de agregados analisados na imagem.

A anisotropia é um comportamento causado pela orientação preferencial de agregados não esféricos de acordo com a microestrutura do material. Quando as agregados não estão distribuídas aleatoriamente por completo, o comportamento do material é anisotrópico. O vetor magnitude descreve a orientação preferencial do agregado medida em imagens bidimensionais e é função da forma do agregado e propriedades de distribuição. Teoricamente, o valor do vetor magnitude varia entre 0 e 1. Um valor muito próximo de 0 indica que os agregados estão distribuídos completamente de forma aleatória, o que é análogo aos materiais isotrópicos; e um valor próximo de 1 indica que todos os agregados estão orientados em uma única direção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Agregados

Os agregados naturais, de origem granítica, utilizados nesse trabalho foram retirados da Pedreira de Itaitinga-CE que fica localizada a aproximadamente 30km de Fortaleza. O RCD utilizado foi fornecido pela Usina de Reciclagem de Fortaleza (USIFORT), localizada na Rodovia BR-116, em Fortaleza. Este RCD se caracteriza por ser constituído apenas de concreto puro. A escória de aciaria utilizada foi obtida na Multiserv Ltda., empresa localizada no município de Maracanaú, no Estado do Ceará. Ensaios de caracterização, como abrasão Los Angeles (DNER-ME 35/98), adesividade (DNER-ME 078/94), densidade do agregado miúdo e graúdo (DNER-ME 81/98 e DNER-ME 84/95), equivalente de areia (DNER-ME

054/94) e granulometria (DNER-ME 083/98), foram realizados em cada um dos três tipos de agregados.

Tabela 2: Características dos agregados

| Características | Agregado | | | |
|--|--------------|------------|-------------|--------------|
| | Brita 3/4" | Brita 3/8" | Pó de pedra | Escória |
| Abrasão <i>Los Angeles</i> (%) | | 42 | - | 20 |
| Absorção – gráudo (%) | 0,62 | 1,20 | - | 1,04 |
| Massa específica real (g/cm ³) | 2,66 | 2,66 | 2,67 | 3,63 |
| Massa específica aparente (g/cm ³) | 2,62 | 2,58 | - | 3,35 |
| Adesividade | Satisfatória | | - | Satisfatória |
| Índice de forma | 0,66 | | - | 0,80 |

3.2. Ligante

O ligante utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) caracterizado por penetração como CAP 50/70, de acordo com as especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2005). O ligante é oriundo do campo Fazenda Alegre, localizado no estado do Espírito Santo. O CAP 50/70 foi cedido pela Lubnor (Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste), refinaria da Petrobrás situada na cidade de Fortaleza.

3.3. Dosagem das misturas asfálticas

Para essa pesquisa, foram dosadas três misturas do tipo CA, todas utilizando o CAP 50/70, seguindo a metodologia Superpave. A premissa principal da dosagem Superpave é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros de projeto. Caso isso não ocorra, faz-se uma estimativa do teor de ligante que atenderia a tal premissa. Nessa pesquisa, foram feitas dosagens para misturas com três diferentes composições de agregados. A mistura I foi composta apenas por agregados graníticos; a mistura II, composta pela substituição de 50% do agregado granítico por RCD; e a mistura III, composta pela substituição de 50% do agregado granítico por escória.

3.4. Ensaios de Forma

Por meio de um paquímetro especial, denominado *caliper*, foi realizado o ensaio de laterialidade para o agregado gráudo. Este ensaio foi feito baseado na norma ASTM D 4791 99. De acordo com a metodologia Superpave, esse equipamento, depois de fixado para uma dimensão do agregado, gabarita a dimensão seguinte de acordo com a proporção requerida de 1:5. Os requisitos Superpave recomendam a contagem de cada agregado para a proporção 1:5, mas por motivo de um melhor detalhamento, o ensaio foi realizado para as proporções de 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5. Cada unidade da massa amostral de cada peneira foi testada com o *caliper* com a razão requerida, separando, de acordo com o resultado, em dois grupos: (i) planas/alongadas e (ii) não planas/alongadas. Uma unidade de agregado é considerada plana ou alongada quando sua maior dimensão é pelo menos cinco vezes maior que sua menor dimensão. Após essa classificação, as unidades consideradas como planas/alongadas foram pesadas para se determinar a sua proporção dentro da amostra.

O ensaio de angularidade foi realizado segundo a norma ASTM D 5821 01. Esse ensaio foi constituído da análise visual de cada um dos agregados da amostra, para se verificar a quantidade fraturada de agregado em cada peneira (Bernucci *et al.*, 2007).

O ensaio de índice de forma foi realizado de acordo com a norma DNER - ME 086/94, onde a amostra deve ser testada no Crivo I, que possui abertura com metade do tamanho diretriz correspondente. Em seguida, a fração passante no Crivo I é testada no Crivo II, que possui abertura com um terço do tamanho da fração. O índice de forma (f) é calculado por meio da Equação 3 (Evangelista *et al.*, 2005).

$$f = \frac{P_1 + 0,5P_2}{100n} \quad (3)$$

em que f : índice de forma; n : número de frações da graduação escolhida; P_1 : soma das percentagens retidas no Crivo I, de todas as frações; P_2 : soma das percentagens retidas no Crivo II, de todas as frações.

3.5. Processamento Digital das Imagens

Os parâmetros relacionados à forma (lamelaridade e angularidade) foram analisados por meio da imagem obtida ao se tirar uma fotografia dos agregados soltos, dispostos em um plano. O fundo do plano composto pelos agregados graníticos e pelo RCD foi de cor preta, enquanto o fundo do plano composto pela escória de aciaria foi de cor branca. Esse procedimento foi adotado para uma melhor detecção das bordas de cada agregado. Em seguida, as fotografias foram transformadas em imagens em escalas de cinza e, por meio do *Adobe Photoshop*, foram submetidas às demais etapas que compõe o PDI: realce, restauração, segmentação, e detecção de bordas. Os objetos das imagens foram identificados e analisados pelo *software Imagetool*.

O procedimento adotado buscou simular o *Aggregate Imaging System (AIMS)*, que analisa diretamente as propriedades de forma de agregados, tanto graúdos quanto miúdos, baseado na aquisição e processamento de imagens. Dentre as vantagens deste sistema podemos citar: (i) sistema completamente automatizado e de fácil operação, (ii) capaz de realizar análises 2D e 3D, (iii) capaz de separar características de forma angularidade e textura, (iv) análises baseadas em métodos científicos reconhecidos, (v) utilização de distribuição cumulativa de propriedades ao invés de índices baseados em médias aritméticas (Castelo Branco *et al.*, 2006).

Na presente pesquisa, os agregados foram dispostos, em um conjunto, de maneira a se obter os valores dos comprimentos da maior e da menor face de cada um através da fotografia. Tentou-se colocar cada agregado da amostra de forma que fosse possível visualizar as duas faces requeridas, porém isso não foi sempre possível, por não ficarem na posição desejada. O número de unidades de agregado utilizadas nesses procedimentos foi de aproximadamente 77. A amostra para cada análise foi quarteada e homogeneizada a fim de se obter uma melhor representação de cada agregado.

Para a análise dos agregados em relação à sua orientação dentro de uma mistura, foram confeccionados cps, dosados por meio da tecnologia Superpave, com os diferentes tipos de agregados. Esses cps foram serrados na base e no topo, para a obtenção de quatro imagens digitalizadas, melhorando a amostragem dos resultados. Após a serragem, cada face dos cps foi digitalizada em um *scanner* convencional e, em seguida, foi dado o prosseguimento às etapas do PDI. Os dois métodos, citados acima, podem ser exemplificados através das

imagens contidas na Figura 1.

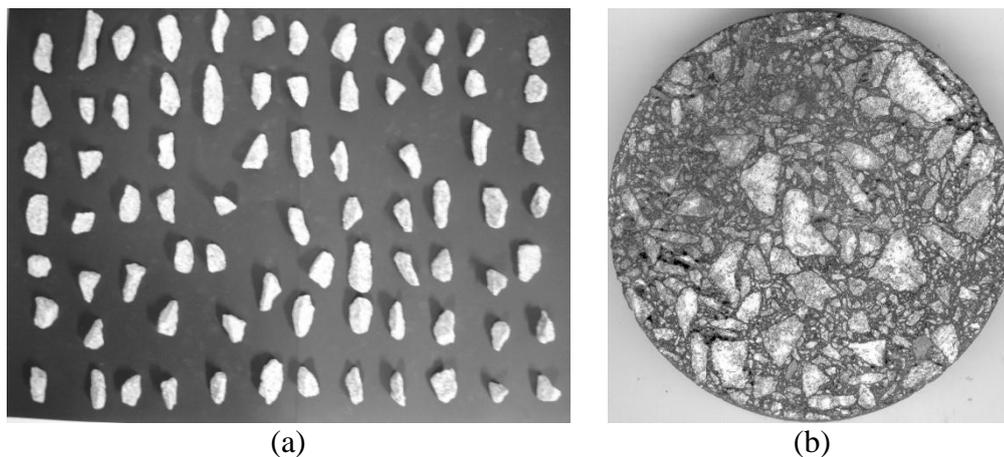


Figura 1: (a) Fotografia de agregados soltos e (b) Face de um cp serrado

4. RESULTADOS

4.1. Lamelaridade

Foram realizados ensaios de lamelaridade para os três agregados utilizados nessa pesquisa (granítico, escória e RCD). Os resultados dos ensaios e das análises de imagens são apresentados na Tabela 3. A frequência relativa significa o número de pedras de cada proporção existentes em uma amostra. Essa proporção é a razão entre o comprimento da maior face do agregado e o comprimento de sua menor face. A Figura 2 mostra os valores para os resultados obtidos por meio do PDI, em intervalos menores, com maior precisão.

O ensaio de lamelaridade realizado manualmente fornece valores mais reais pela possibilidade de se medir o comprimento de qualquer uma das direções do agregado, porém demanda muito tempo, pois as unidades de uma amostra representativa devem ser analisadas uma a uma. A diferença notável entre os valores obtidos no laboratório e os valores do PDI pode ser explicada pela metodologia adotada para a análise das imagens dos agregados. A fotografia, que foi retirada dos agregados dispostos em um plano, permite uma visão em apenas duas dimensões. A terceira dimensão (profundidade do agregado na foto) não pode ser vista e medida pelo *Imagetool*. Assim, a utilização do *AIMS*, que nos permite obter informações dos agregados em todas as direções, traria valores mais realistas de lamelaridade (razão entre a maior e a menor dimensão). A vantagem do PDI é a obtenção de valores exatos, pois é possível se obter o valor real das razões entre os comprimentos dos agregados e não apenas sua faixa de proporção, o que não acontece quando é feito o ensaio manual por meio do *caliper*.

A comparação entre os resultados de lamelaridade para os três agregados, tanto manualmente quanto utilizando o PDI, nos mostra que o agregado granítico é mais lamelar do que os agregados alternativos. A frequência de agregados graníticos que possuem lamelaridade na proporção 1:2 foi, aproximadamente, o dobro da frequência dos outros agregados. Isso mostra que o uso dos rejeitos pode melhorar o desempenho da mistura no que diz respeito à quebra dos agregados durante a compactação.

Tabela 3: Frequências relativas para o ensaio de lamelaridade (laboratório × PDI)

| Proporção | Frequência relativa (%) | | | | | |
|-----------|-------------------------|------|---------|------|------|------|
| | Agregado granítico | | Escória | | RCD | |
| | Lab. | PDI | Lab. | PDI | Lab. | PDI |
| 1:1 | 26,0 | 67,6 | 61,0 | 83,9 | 65,0 | 85,1 |
| 1:2 | 74,0 | 30,2 | 39,0 | 15,4 | 35,0 | 14,9 |
| 1:3 | 25,0 | 2,1 | 15,0 | 0,6 | 9,0 | 0,0 |
| 1:4 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 1:5 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

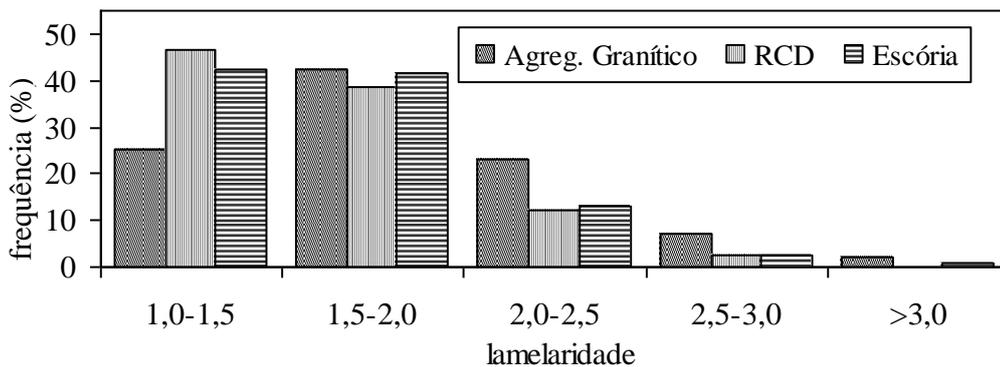


Figura 2: Lamelaridade para os três agregados (PDI)

4.2. Angularidade e Índice de forma

A partir dos resultados do ensaio de angularidade realizado manualmente foi possível verificar os agregados de acordo com o número de faces fraturadas. Os valores de esfericidade obtidos no laboratório, que se encontram na Figura 3, foram comparados com os valores de *roundness* obtidos por meio do PDI. Quanto menos faces fraturadas o agregado possuir, maior deverá ser seu valor de *roundness*, pois o agregado estaria mais próximo da forma de uma esfera.

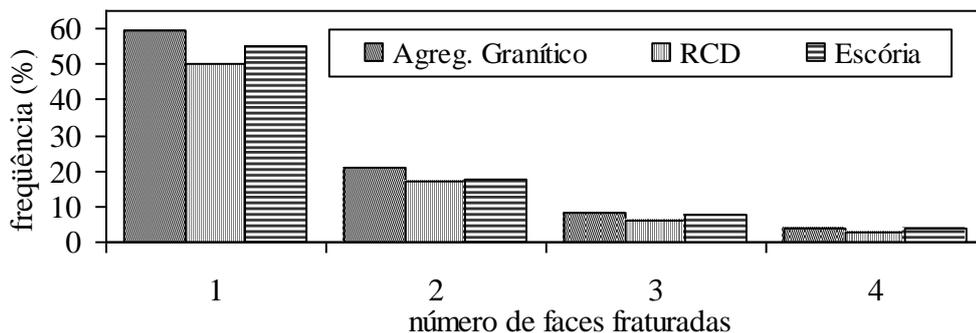


Figura 3: Angularidade para os três agregados (laboratório)

Os valores do índice de forma para os três agregados, obtidos em laboratório através do ensaio utilizando os crivos, foram: 0,66 para o agregado granítico; 0,85 para o RCD e 0,80 para a escória de aciaria. A Figura 4 apresenta os valores do parâmetro *roundness* de cada agregado, obtidos por meio da análise de imagens.

O gráfico de esfericidade (Figura 4) mostra que o agregado granítico possui um grande percentagem (aproximadamente 65%) com esfericidade menor que 0,6, enquanto que os agregados alternativos possuem uma elevada percentagem com esfericidade maior que 0,6 (75% e 65% para o RCD e a escória, respectivamente). O RCD possui uma grande quantidade de unidades de agregado com esfericidade maior que 0,7; o que demonstra que o mesmo possui uma forma mais próxima de uma esfera em relação aos outros agregados. Os valores obtidos por meio do PDI são mais precisos, além de serem valores estatísticos, permitindo um maior detalhamento da forma de cada unidade dos agregados. O valor obtido em ensaio laboratorial para o índice de forma também mostrou maior proximidade do RCD a uma esfera, porém esse valor pode não ser tão representativo, pois é obtido por meio de uma média.

Os resultados de esfericidade foram próximos daqueles apresentados por Castelo Branco *et al.* (2006), que utilizaram dois materiais estudados nessa pesquisa, provenientes do mesmo lugar: agregado granítico e escória de aciaria. As médias obtidas para esse parâmetro no referido estudo foram: 0,61 para o agregado granítico e 0,75 para a escória, valores que estão bem próximos da tendência dos gráficos apresentados anteriormente.

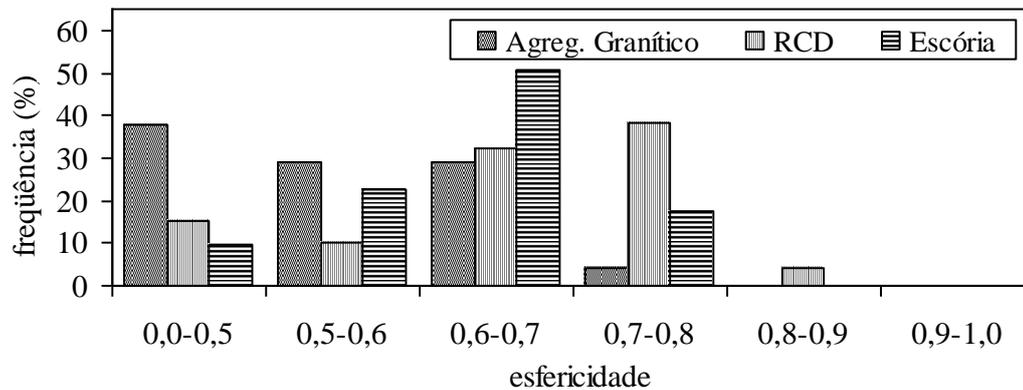


Figura 4: Esfericidade para os três agregados (PDI)

4.3. Distribuição e orientação dos agregados

Os agregados foram analisados com relação à sua distribuição nas misturas asfálticas após a compactação. As análises foram feitas em quatro faces de um cp serrado, para cada mistura, obtendo-se uma média dos valores de cada face. Devido à cor acinzentada da escória e às limitações do *software* utilizado nessa pesquisa, houve dificuldade de se diferenciar, na imagem digitalizada, os agregados de escória do ligante. Logo, não foi possível realizar esse tipo de análise para a mistura com o referido rejeito. Os parâmetros obtidos foram: vetor magnitude (Δ); e média dos ângulos com a horizontal (θ), em graus. A Tabela 4 mostra esses valores para cada uma das misturas estudadas.

Tabela 4: Parâmetros de distribuição e orientação de agregados

| Parâmetros | Mistura I | Mistura II | Mistura III |
|------------|-----------|------------|-------------|
| Δ | 0,094 | 0,087 | - |
| θ | 46,26 | 47,13 | - |

Os resultados obtidos mostram que o vetor magnitude e o ângulo médio das duas misturas analisadas foram praticamente os mesmos. Ambos os resultados de vetor magnitude foram muito baixos, com uma tendência a zero. Isso significa que os agregados nas misturas

possuem uma distribuição muito mais aleatória do que uniforme.

5. CONCLUSÕES

Nessa pesquisa se mostrou que a utilização de técnicas de processamento digital de imagens pode facilitar a caracterização de agregados graúdos, devido à rapidez em que os parâmetros são obtidos. As análises por meio de imagens podem trazer resultados mais precisos que os ensaios laboratoriais, no que diz respeito ao índice de forma e à angularidade. Isso acontece porque os ensaios em laboratório são subjetivos, dependem do operador e são realizados agregado por agregado, além de apresentarem apenas uma média dos valores, enquanto a análise de imagens apresenta valores estatísticos para cada parâmetro. Os resultados para a esfericidade obtidos por meio do PDI mostraram a mesma tendência dos resultados realizados no laboratório, porém os valores foram mais precisos, porque a análise das imagens traz valores para cada uma das unidades de agregado, não sendo apenas uma média, como é no ensaio manual. O agregado de origem granítica apresentou valores de esfericidade menores que os rejeitos ambientais (escória e RCD).

Com relação à orientação dos agregados, após a compactação das misturas asfálticas, os parâmetros obtidos mostraram que a distribuição e a orientação dos agregados são muito similares nas três misturas estudadas. Isso mostra que, independente do agregado utilizado, a estrutura da mistura asfáltica deve ter o mesmo esqueleto no que diz respeito à posição dos agregados, para as misturas avaliadas neste estudo. Espera-se na sequência deste estudo a utilização do *AIMS*, para uma melhor caracterização dos agregados. Algumas propriedades poderão ser obtidas com mais precisão, além de tornar possível a análise de outras propriedades, como por exemplo, textura de agregados graúdos e miúdos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. (2005) Regulamento técnico Nº 3/2005. Agência Nacional do Petróleo.
- 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.
- Bernucci, L.B., L. M. Motta, J. A. P. Ceratti e J. B. Soares (2007) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ.
- Castelo Branco, V. T. F.; E. Masad; D. N. Little; J. B. Soares e L. M. G. Motta (2006) *Caracterização de Forma, Angularidade e Textura de Agregado de Brita Granítica e Escórias de Aciaria Usando o Aggregate Imaging System (AIMS)*. In: *XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*, Brasília.
- Cunha, M. B.; L. T. Gouveia; J. L. F. Júnior e L. M. G. Motta (2004). *Influência dos Agregados Sobre Propriedades Mecânicas e Volumétricas de Misturas Asfálticas: Análise do Método Bailey*. In: *XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Florianópolis, SC.
- DNER (1997) *Especificações Gerais Para Obras Rodoviárias*. Volume III/IV, Pavimentos Flexíveis. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, ES.
- DNER ME 86 (1994) *Agregados - Índice de Forma de Agregado*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER-ME 054 (1997) *Equivalente de Areia*, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-ME 35 (1998) *Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER-ME 78 (1994) *Agregado Graúdo – Adesividade ao Ligante Betuminoso*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER-ME 81 (1998) *Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.

- DNER-ME 83 (1998) Agregados – Análise Granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER-ME 84 (1995) Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- Evangelista Jr., F., L. T. Souza e J. B. Soares (2005) Processamento Digital de Imagens Aplicado à Caracterização de Agregados Quanto à Forma. *In: XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Recife, PE.
- Gonzalez, R. C. e R. E. Woods (1993) Digital Image Processing. *Addison-Wesley*.
- Gouveia, L. T. (2006) Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas. Tese de M.Sc., USP, São Carlos, SP.
- Maerz, N. H. e M. Lusher (2001) Measurement of Flat and Elongation of Coarse Aggregate Using Digital Image Processing. *In: Transportation Research Board 80th Annual Meeting*.
- Masad, E. (2004) X-ray Computed Tomography of Aggregates and Asphalt Mixes. *Materials Evaluation*, p. 775-783.
- Masad, E. e J. W. Button (2000) Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, pp. 273-280.
- Masad, E.; B. Muhunthan; N. Shashidhar e T. Harman (1999) Quantifying Laboratory Compaction Effects on the Internal Structure of Asphalt Concrete, *Transportation Research Board*, manuscript no. 991052.
- Masad, E.; V. K. Jandhyala; N. Dasgupta; N. Somadevan e N. Shashidhar (2002) Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes Using X-ray Computed Tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p 122-129.
- Monismith, C. L. (1991) Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, *SHRP-A/r-91-104*, National Research Council, Washington, D.C.
- Motta, L.M.G., Tonial, I., Leite, L.M. e Constantino, R.S. (1996) *Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas*. Tradução comentada, IBP.
- Roberts, F. L.; P. S. Kandhal e T. W. Kennedy (1996) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. National Center for Asphalt Technology, Second Edition Lanham, MD.
- Soares, J. B. e F. A. C. Freitas (2003) Crack Modeling of Asphaltic Mixtures Considering Heterogeneity of the Material. *TRB Annual Meeting CD-ROM*.
- Souza, L. T.; F. Evangelista Jr. e J. B. Soares (2006) Processamento Digital de Imagens Aplicado a Análise Micromecânica de Misturas Asfálticas. *In: 18º Encontro de Asfalto - IBP*, Rio de Janeiro, RJ.
- Souza, L. T. (2009) Investigation of Aggregate Angularity Effects on Asphalt Concrete Mixture Performance Using Experimental and Virtual Asphalt Samples. Tese de M.Sc., UNL, Lincoln, NE
- Vasconcelos, K. L.; F. Evangelista Jr. e J. B. Soares (2005) Análise da Estrutura Interna de Misturas Asfáticas. *In: XVII Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Recife, PE.
- 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.

Iuri Sidney Bessa (iuribessa@gmail.com)

Verônica T.F. Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici, s/n Bloco 703 CEP 60455-760 – Fortaleza, CE, Brasil