

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AGREGADOS POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Iuri Sidney Bessa
Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos

RESUMO

É de conhecimento geral que o desempenho de misturas asfálticas com relação aos principais defeitos em pavimentos está diretamente ligado às propriedades de forma dos agregados que as constituem. A metodologia de caracterização tradicional de agregados pode se tornar dispendiosa e não fornecer resultados precisos, pois muitas vezes combina mais de uma propriedade em apenas um ensaio e traz uma média de valores que pode não representar adequadamente os materiais estudados. Já existem técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) para uma caracterização mais completa e realista dos agregados. Uma delas é o uso do equipamento *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), desenvolvido para analisar características de forma, angularidade e textura superficial de agregados graúdos e miúdos, através de diferentes métodos: (i) análise tridimensional das partículas para a caracterização da forma; (ii) método do gradiente para a obtenção da angularidade e (iii) método das *wavelets* para a caracterização da textura. O objetivo do presente trabalho é avaliar os processos de produção de diferentes agregados e verificar a influência dos mesmos nas propriedades de forma destes materiais. Foram obtidos e caracterizados agregados provenientes de três pedreiras distintas do estado do Ceará. Os agregados foram analisados no AIMS e os resultados obtidos foram comparados entre si, possibilitando indicações com relação ao comportamento de misturas que serão constituídas pelos mesmos.

ABSTRACT

It is general consensus that the performance of asphalt mixtures, in relation to the main pavement distresses, is directly related to aggregate shape properties. The traditional methodology can be time consuming and may not provide precise results, because oftentimes it combines results from more than one property, and provides average values that may not be representative. Several digital image processing techniques propose a complete and more realistic aggregates' characterization. One of them is the *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), an equipment developed to analyze properties, such as: percentage of flat and elongated particles, angularity, and superficial texture of coarse and fine aggregates, through different methods: (i) tridimensional analysis of the aggregate particles for the flatness and elongation parameters; (ii) gradient method to obtain angularity values; and (iii) wavelets method to characterize the superficial texture. The main objective of this work is to evaluate the aggregates production processes with respect to their influence on shape properties. Aggregates from three different quarries in the State of Ceará - Brazil, were obtained and characterized. The aggregates were analyzed on AIMS and the results were compared, allowing predictions related to asphalt mixture performance.

1. INTRODUÇÃO

As características físicas (forma, angularidade e textura) dos agregados graúdos e miúdos estão relacionadas às propriedades dos materiais utilizados em serviços de pavimentação. Entre essas propriedades estão a resistência ao cisalhamento, a resistência à deformação permanente, o trincamento por fadiga, a trabalhabilidade e a durabilidade das misturas asfálticas. Consequentemente, estas propriedades possuem papel fundamental no desempenho de pavimentos. As características de forma, angularidade e textura estão entre algumas das propriedades que mais afetam o desempenho de misturas asfálticas, e de materiais utilizados em camadas granulares. Há, portanto, uma necessidade de se desenvolver métodos que possam quantificar estas propriedades de maneira rápida e precisa (Al Rousan, 2004). Não há atualmente no Brasil métodos normatizados de ensaios laboratoriais que possam ser usados na medição objetiva e direta da angularidade e da textura superficial de agregados. Os métodos da prática apresentam diversas limitações: costumam ser trabalhosos, subjetivos e/ou

limitados quando se relacionam com parâmetros de desempenho, como rigidez e resistência ao cisalhamento (Fletcher *et al.*, 2003). As limitações, que incluem ainda baixa precisão e repetibilidade, levam a especificações que sub ou supervalorizam as propriedades dos agregados, o que faz com que sejam exigidos materiais inadequados (Al Rousan, 2004). Recentemente, avanços têm sido feitos em relação à caracterização de agregados através de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI). Pesquisadores vêm utilizando metodologias desde as mais simples e artesanais, como o uso de *scanners* e *softwares* computacionais, até técnicas mais avançadas como o uso de equipamentos específicos e até mesmo de análises realizadas com o uso de tomografia de raio-X. Algumas das técnicas mais consagradas internacionalmente incluem o *Aggregate Image Analyzer* da Universidade de Illinois, o *Laser Based Aggregate Analysis System*, o *UD-40 Video Grader* e o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar agregados produzidos em três diferentes pedreiras localizadas no estado do Ceará. Além disso, mostrar a metodologia de análise proposta pelo AIMS. Os agregados serão caracterizados em relação às propriedades de forma, angularidade e textura, a partir dos diferentes parâmetros que o AIMS é capaz de fornecer. A partir da metodologia adotada neste trabalho, espera-se que haja uma contribuição no que diz respeito a uma caracterização mais prática e precisa dos agregados, bem como a possibilidade de fazer correlações entre suas propriedades de forma e o desempenho de misturas asfálticas compostas por eles.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os aspectos que constituem a geometria dos agregados podem ser expressos em termos de três propriedades independentes: forma, angularidade (ou arredondamento) e textura superficial (Barrett, 1980). De acordo com Al Rousan (2004), a forma reflete variações nas proporções ou dimensões de uma partícula. A angularidade está ligada às variações nos cantos ou quinas. Por fim, a textura superficial é usada para descrever as irregularidades ou rugosidades da superfície de uma partícula em uma escala pequena demais para afetar o formato da mesma. Qualquer uma dessas três propriedades pode variar sem que as outras duas sejam afetadas.

2.1. Forma

Segundo Janoo (1998), desde 1930 os petrologistas têm descrito a forma das partículas através da medição das dimensões dos agregados (espessura, largura e comprimento). A forma dos agregados pode ser quantificada em termos de razões de lamelaridade. A lamelaridade pode ser dividida entre achatamento (razão entre as dimensões menor e intermediária de uma partícula) e alongamento (razão entre as dimensões intermediária e maior de uma partícula). Uma grande porcentagem de agregados achatados e alongados em misturas asfálticas pode favorecer sua quebra durante os processos de compactação, o que faz com que a composição granulométrica da mistura se altere. Os agregados planos também possuem uma tendência a repousar no pavimento de forma a facilitar a derrapagem e a reduzir o intertravamento. Nascimento (2008) verificou que misturas com agregados mais lamelares apresentaram valores de Vazios no Agregado Mineral (VAM) bastante elevados, necessitando assim de uma quantidade maior de ligante asfáltico, a fim de se obter o Volume de vazios (Vv) desejado. De acordo com Furlan *et al.* (2004), as propriedades de forma dos agregados influenciam diretamente na resistência ao dano por umidade da mistura, afirmando que a forma ideal dos agregados para o uso em misturas asfálticas é a cúbica.

2.2. Angularidade

Angularidade é uma característica associada ao grau de amaciamento dos cantos ou quinas dos agregados (Cunha *et al.*, 2004). Valores elevados representam partículas com cantos mais agudos ou angulares e valores próximos de zero representam partículas bem arredondadas. Wedding e Gaynor (1961) mostraram o efeito de agregados mais angulares em misturas asfálticas de graduação densa. O uso desses agregados aumentou a estabilidade da mistura em comparação a misturas compostas por agregados menos angulares. Os resultados de Foster (1970) indicaram que o desempenho das misturas asfálticas contendo agregados graúdos angulares e não angulares foi praticamente o mesmo, concluindo que a resistência às tensões induzidas pelo tráfego está mais relacionada com a angularidade do agregado miúdo, quando se considera misturas de composição granulométrica densa. Furlan *et al.* (2004) concluíram que agregados com cantos mais agudos ou mais angulares produzem um melhor atrito e intertravamento entre si, o que fornece uma estrutura mais resistente e estável. Porém, os mesmos agregados angulares podem causar uma perfuração indesejada no filme de ligante, possibilitando assim a entrada de água na mistura.

2.3. Textura superficial

Terzaghi e Peck (1967) sugeriram expressões qualitativas para classificar materiais, como lisos e rugosos. Al Rousan (2004) descreveu a textura como sendo a irregularidade da superfície do agregado em uma escala que é pequena demais para afetar a forma geral do agregado. A forma em que os agregados se juntam é influenciada diretamente pela textura de suas partículas. Uma textura mais rugosa gera maior atrito entre os agregados, tornando a mistura mais resistente à compactação. Para um dado número de giros na compactação, a mistura contendo agregados rugosos não irá compactar o suficiente e o Vv tende a ser mais alto. Uma textura mais lisa, em contraste, não gera tanto atrito entre os agregados. Assim, para um dado número de giros, a mistura contendo partículas mais lisas irá compactar mais facilmente, e o Vv será menor. Kim *et al.* (2002) mostraram que agregados com textura superficial rugosa promovem uma ligação mais forte entre o ligante e o agregado.

2.4. Influência dos agregados no desempenho de misturas asfálticas

Vários estudos já foram realizados para tratar da influência das propriedades de forma dos agregados no desempenho das misturas asfálticas. Testes têm sido conduzidos com o objetivo de avaliar a influência de agregados miúdos, graúdos e o efeito combinado dos dois nas propriedades mecânicas e no desempenho de misturas asfálticas (Masad *et al.*, 2005). Souza (2009) estudou o efeito da angularidade dos agregados no desempenho de misturas asfálticas, através de ensaios de simulação e de energia de fratura, e mostrou que valores elevados aumentam diretamente a resistência à deformação permanente e indiretamente a vida de fadiga das mesmas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Agregados

Nesta pesquisa, foram utilizados três agregados provenientes de diferentes pedreiras do Ceará, escolhidas por produzirem materiais com diferentes composições mineralógicas. Na divulgação dos resultados, foram designados códigos para cada uma das pedreiras a fim de se preservar a identidade das mesmas. Os agregados foram caracterizados através dos ensaios convencionais: abrasão Los Angeles (DNER-ME 35/98), adesividade (DNER-ME 78/94), absorção e densidade do graúdo (DNER-ME 81/98), densidade do miúdo (DNER-ME 84/95) e índice de forma (DNER-ME 86/94). Os resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos agregados

Características	Fonte		
	Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3
Abrasão Los Angeles (%)	44,2	40,7	19,8
Adesividade	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória
Absorção – Graúdo (%)	0,91	0,55	1,00
Densidade Real – Graúdo	2,66	2,67	2,48
Densidade Aparente – Graúdo	2,60	2,63	2,43
Densidade Real – Miúdo	2,64	2,72	2,49
Índice de Forma	0,66	0,77	0,78

Foram realizadas visitas às pedreiras em estudo para que se pudesse observar os processos de produção dos agregados e coletar outras informações pertinentes sobre eles. Informações relacionadas à produção, tamanho e tipo dos agregados produzidos e tipos de britadores utilizados foram obtidas. A princípio, obteve-se a informação de que tipo de rocha vem sendo desmontada em cada pedreira: (i) pedreira 1: granito; (ii) pedreira 2: gnaiss e (iii) pedreira 3: fonolito.

Os processos de exploração da rocha ocorrem de maneira semelhante para as três pedreiras, através de explosivos ou dinamites. Em relação aos processos de britagem utilizados, a pedreira 1 utiliza em sua britagem primária um britador de mandíbula do tipo C160 (que significa uma abertura para a entrada de material de 160cm de lado). Nesse britador, existem duas mandíbulas, sendo uma fixa e outra móvel. Os britadores secundários (no total, três), também de mandíbula, funcionam com o objetivo de britar as partículas que foram produzidas no primário, para que estas possam ser reduzidas a tamanhos menores. Esses britadores secundários possuem uma abertura de 62 por 40cm. Os agregados gerados nessas duas primeiras britagens possuem forma mais lamelar. Após esses processos, existe a possibilidade de se utilizar um terceiro britador giroscópico para que os agregados tomem uma forma mais cúbica. Além disso, esse britador tem a capacidade de detectar e retirar possíveis resíduos de ferro provenientes dos britadores.

A pedreira 2 utiliza o britador primário do tipo mandíbula C125 (com abertura de 1m por 1,25m) e britadores cônicos de diferentes potências para as demais etapas da britagem. Entre a estocagem do material no pulmão (local onde se empilham os agregados produzidos após a passagem pelo britador primário) e os processos seguintes da britagem, os equipamentos são capazes de retirar possíveis impurezas no material. Existe ainda nesta pedreira um equipamento chamado de rompedor hidráulico, capaz de quebrar os pedaços de rochas explodidos cujos tamanhos são grandes demais para caber no britador. As malhas utilizadas nesta pedreira são feitas de borracha, que custam 10 vezes mais do que as de ferro, mas facilitam o encaixe nos equipamentos e aumentam a duração. Por fim, a pedreira 3 possui dois processos de britagem, com a britagem primária consistindo em duas etapas. A primeira etapa utiliza um britador de mandíbula do tipo C80 (abertura de 80cm), e a segunda sendo feita em um britador cônico. A britagem primária gera agregados de até 7". Os agregados maiores são retirados para o uso em alvenaria e outros fins, enquanto que aqueles de tamanho entre 2 e 4" retornam ao britador. Os agregados menores, de até 2", seguem para a britagem secundária, realizada em outro britador cônico, que gera sete tamanhos de material, sendo dois tipos de areia (grossa e fina) e cinco tamanhos de brita (1", 3/4", 1/2", 3/8" e 3/16").

Em relação ao controle de qualidade e a forma de armazenamento, a pedreira 2 realiza o controle da granulometria e da densidade real de seus agregados diariamente, obtendo resultados que pouco variam a cada novo ensaio. A pedreira 3 controla o seu material através da determinação da granulometria, que é feita duas vezes por semana. A pedreira 1 não faz nenhum tipo de controle dos materiais.

3.2. Metodologia de análise do AIMS

A análise dos agregados graúdos inclui parâmetros de forma tridimensional, angularidade, textura e razões de achatamento e alongamento (lamelaridade). Os agregados graúdos considerados pelo equipamento são aqueles retidos na peneira #4. Quando o ensaio é iniciado, a bandeja com os agregados gira dentro do equipamento, e a imagem de cada partícula é capturada. Em seguida, a bandeja gira novamente para que a altura dos agregados seja obtida e, assim, todas as dimensões, incluindo a profundidade, são adquiridas. Uma terceira digitalização é feita para que os níveis de textura sejam obtidos. Os agregados miúdos, ou seja, passantes na peneira #4 e retidos na peneira #200, devem ser espalhados na bandeja opaca, que é utilizada para todos os tamanhos de agregados miúdos. Uma amostra de aproximadamente 50g de material, para cada tamanho, deve ser espalhada uniformemente na bandeja. Nesse caso, apenas uma digitalização é feita. O equipamento avalia as imagens de maneira que as partículas de agregados que estejam em contato não sejam analisadas e não afetem, assim, o resultado.

A utilização do AIMS requer um passo a passo indicado na Figura 1. Primeiramente, cada material deve ser quarteado e em seguida passado pela série de peneiras cujos tamanhos de partículas retidas são analisadas pelo equipamento (1", 3/4", 1/2", 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100 e #200). Em seguida, os agregados devem ser posicionados na bandeja adequada para cada tamanho, de forma que suas partículas estejam separadas umas das outras. Após a preparação da amostra na bandeja, deve-se selecionar no *software* o tipo de análise a ser feita, bem como o tamanho do agregado. As portas do equipamento devem ser fechadas e, enfim, o ensaio é iniciado. Após as digitalizações, a bandeja retorna à sua posição inicial, e então são gerados os resultados e gráficos em planilhas do MS *Excel*. O tempo de análise para cada amostra é de cerca de 20 minutos para os agregados graúdos e 10 minutos para os miúdos.

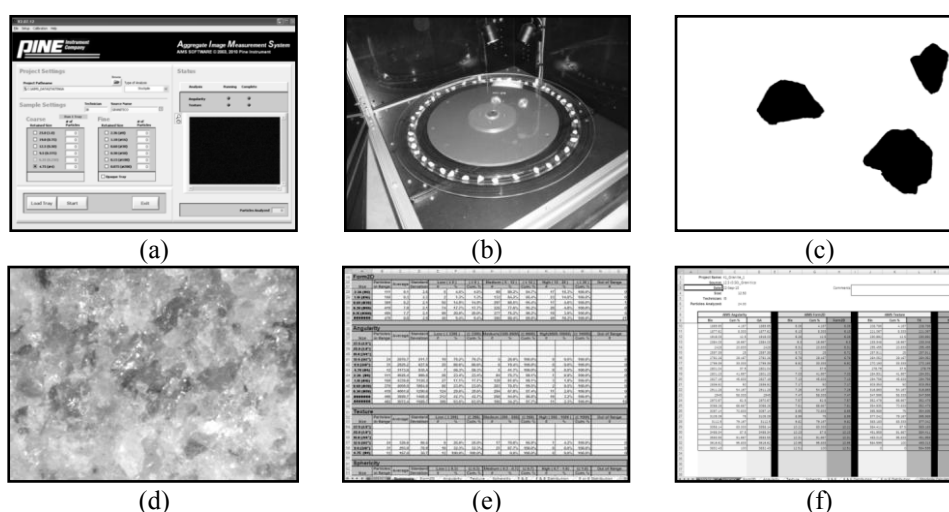


Figura 1. Passo a passo do AIMS: (a) interface do *software*; (b) agregados dispostos na bandeja; (c) análise da angularidade e forma; (d) análise da textura; (e) planilhas-resumo; (f) resultados individuais de cada partícula

3.3. Parâmetros analisados no AIMS

O AIMS é capaz de fornecer cinco diferentes propriedades, sendo três delas apenas para agregados graúdos, uma apenas para agregados miúdos e uma última para ambos os tamanhos. A partir dos valores obtidos, são feitas classificações dos agregados para cada parâmetro analisado. A forma 2D se aplica aos agregados miúdos e quantifica a forma relativa de imagens bidimensionais das partículas de agregado. O seu índice, expresso pela Equação 1, varia de 0 a 20 e quanto mais próximo de zero, mais a partícula de agregado terá a forma de um círculo perfeito. Outro parâmetro relacionado com a forma, mas utilizado para os graúdos, é a esfericidade. Descreve a forma tridimensional de uma partícula e tem uma escala relativa de 0 a 1, sendo calculado pela Equação 2. Um valor de esfericidade igual a 1 representa uma partícula de agregado totalmente cúbica, ou com suas três dimensões de mesmo tamanho.

$$\text{Forma 2D} = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (1)$$

em que R_{θ} : raio da partícula no ângulo θ e $\Delta\theta$: diferença de incremento no ângulo.

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{d_E d_L}{d_C^2}} \quad (2)$$

em que d_E : menor dimensão do agregado (espessura); d_L : dimensão intermediária do agregado (largura) e d_C : maior dimensão do agregado (comprimento).

As razões de lamelaridade são representadas pelo achatamento e alongamento dos agregados. Existem na literatura diversas traduções distintas para essas propriedades. Para este trabalho, considerou-se que achatamento é a razão entre a menor dimensão (espessura) e a dimensão intermediária (largura) do agregado, e que alongamento é a razão entre a dimensão intermediária e maior dimensão do agregado (comprimento).

A angularidade é medida através do parâmetro gradiente de angularidade, que é aplicado tanto para os agregados graúdos quanto para os miúdos. Este quantifica as mudanças ao longo das bordas das partículas e varia em uma escala de 0 a 10.000. Um círculo perfeito tem um valor muito baixo, tendendo a zero. A Equação 3 mostra como esse parâmetro é obtido.

$$\text{Gradiente de Angularidade} = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (3)$$

em que θ : ângulo de orientação dos pontos de borda; n : número total de pontos e i : i -ésimo ponto de borda da partícula.

A textura superficial dos agregados, apresentada pela Equação 4, pode ser definida como as variações nos níveis de *pixels* de uma imagem. Descreve o polimento ou a rugosidade das superfícies dos agregados graúdos, sendo analisada através do método das *wavelets*, que caracteriza a superfície dos materiais através da média e do desvio padrão dos valores de *pixels* das imagens (Castelo Branco *et al.*, 2006). Sua escala varia de 0 a 1.000, sendo um agregado polido aquele cujo valor de textura é próximo de zero.

$$\text{Textura Superficial}_n = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N \left(D_{i,j}(x,y) \right)^2 \quad (4)$$

em que D : função de decomposição; n : nível de decomposição da imagem; N : número total de coeficientes em uma imagem detalhada; i : direção da textura; j : índice *wavelet* e x,y : localização dos coeficientes no domínio transformado.

3.4. Classificação dos agregados

Al Rousan (2004) fez ensaios em um grande espectro de agregados, com composições mineralógicas distintas, características de forma, angularidade e textura diferentes e tamanhos diversos para desenvolver uma metodologia de classificação dos agregados de acordo com os valores dos parâmetros fornecidos pelo AIMS. Esta classificação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Limites de classificação (Al Rousan, 2004)

Propriedade	Valores/Classificação				
Forma 2D (miúdo)	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Esfericidade (gráudo)	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado/ Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Angularidade (gráudo e miúdo)	< 2.100	2.100 – 4.000	4.000 – 5.400	> 5.400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Textura Superficial (gráudo)	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Liso	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Em relação à lamelaridade dos agregados, a metodologia Superpave exige que no máximo 10% deles tenham razão de lamelaridade de até 5:1, ou seja, que a sua maior dimensão (comprimento) seja no máximo cinco vezes maior do que a sua menor dimensão (espessura). O AIMS é capaz de fornecer valores de textura superficial para os miúdos, porém um estudo realizado por Masad *et al.* (2001) provou que existe uma correlação forte entre a angularidade e a textura superficial desses agregados. Ou seja, quanto maior for a angularidade de um agregado miúdo, mais rugosa deverá ser sua textura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 mostra um resumo dos resultados, representados através dos parâmetros estatísticos média, desvio padrão e Coeficiente de Variação (CV), para cada tipo de agregado analisado. Desconsiderou-se aqui a distribuição peneira a peneira, ou seja, os parâmetros estatísticos estão relacionados ao total de agregados. A Tabela 3 apresenta também a classificação dos agregados em relação a cada propriedade e levando em consideração as médias dos resultados de cada uma. Alguns valores de CV foram elevados, indicando que a média pode não representar bem as características de um agregado quando se leva em conta todos os tamanhos. No caso da angularidade, cuja média foi feita considerando tanto os valores obtidos para os grãos quanto para os miúdos, há uma tendência de aumento do valor dessa propriedade quando se diminui o tamanho do agregado. Já no caso da textura, acontece o contrário, com os valores diminuindo com a redução do tamanho dos agregados.

Tabela 3. Médias, desvios-padrão, CV e classificação dos resultados do AIMS

Propriedade	Agregado	Parâmetro Estatístico			Classificação
		Média	Desvio Padrão	CV(%)	
Forma 2D (miúdo)	1	8,3	2,3	27,8	Semialongado
	2	7,9	2,2	27,7	Semicircular
	3	7,9	2,1	26,5	Semicircular
Esfericidade (gráudo)	1	0,64	0,1	16,1	Pouco esférico
	2	0,66	0,1	13,5	Pouco esférico
	3	0,58	0,1	16,0	Achatado/Alongado
Angularidade (gráudo e miúdo)	1	3.731,3	1.391,5	37,3	Subarredondado
	2	3.423,2	1.338,3	39,1	Subarredondado
	3	3.333,5	1.083,3	32,5	Subarredondado
Textura Superficial (gráudo)	1	282,9	94,2	33,3	Pouco rugoso
	2	316,2	143,3	45,3	Pouco rugoso
	3	243,0	154,8	63,7	Liso

Em relação à angularidade, os três agregados foram classificados como subarredondados, porém houve diferenças nas outras propriedades. Os dois parâmetros ligados à forma (forma 2D e esfericidade) apresentaram-se diferentes para os agregados da pedra 3. Isso pode ser explicado porque o primeiro classifica apenas agregados miúdos, enquanto que o segundo classifica apenas os graúdos. Além disso, a esfericidade está relacionada às três dimensões. Ainda em relação à forma, o agregado 1 se apresenta como semialongado, diferente dos demais. No entanto, é importante ressaltar que as médias obtidas para esse parâmetro foram muito próximas para os três agregados. E, ainda, as médias para os agregados das pedras 2 e 3 estão muito próximas do limite que divide os grupos de classificação em semialongado e semicircular, o que pode indicar que os três agregados são bem parecidos em relação a essa propriedade. Os resultados da textura superficial foram mais dispersos, porém os agregados provenientes das pedras 1 e 2 foram classificados como iguais (pouco rugosos). A média dos resultados para o agregado 1 foi bem próxima do limite entre os grupos de classificação (liso e pouco rugoso), o que pode indicar grande quantidade de partículas com textura lisa.

A classificação apresentada é relevante para se ter uma idéia geral das propriedades de forma, angularidade e textura, porém, por considerar apenas a média dos valores obtidos no AIMS e, ainda, considerar os agregados de todos os tamanhos como se fizessem parte de uma mesma amostra, essa forma de classificação pode não ser realista e precisa. Sendo assim, é importante analisar as distribuições das características através dos gráficos de porcentagens acumuladas que são gerados pelo equipamento. Os agregados das três pedras estudadas neste trabalho foram analisados no AIMS e, assim, foram gerados gráficos de distribuição para todas as propriedades. Por questões de espaço, apenas um exemplo de gráfico para cada propriedade é mostrado (Figura 2), porém as conclusões apresentadas a seguir se referem aos resultados de todos os gráficos, inclusive daqueles não mostrados no presente trabalho. As linhas pretas verticais representam os limites entre as diferentes classificações existentes para cada propriedade.

4.1. Forma 2D (miúdo)

A forma 2D, aplicada apenas aos agregados miúdos, está relacionada com a proximidade das partículas à forma de um círculo. Os agregados provenientes das três pedras possuem curvas praticamente sobrepostas umas às outras. No entanto, percebe-se que, para as pedras 1 e 2, os agregados retidos nas peneiras #30, #50 e #100 tiveram uma maior quantidade de partículas com baixos valores de forma 2D, ou menores do que 6,0. O agregado da pedra 1

foi classificado como sendo semialongado, porém existe uma grande quantidade de partículas circulares entre as partículas mais finas. Para aquelas retidas na #100, por exemplo, há quase 30% de partículas com valores de forma 2D abaixo de 6,5. Sendo assim, essas partículas seriam classificadas como circulares. Já os agregados provenientes das pedreiras 2 e 3, classificados como semicirculares, possuem uma quantidade significativa de suas partículas mais finas com valor maior do que 10,5 ($\approx 20\%$), ou seja, classificadas como alongadas.

4.2. Esfericidade (gráúdo)

Os agregados gráúdos foram analisados para verificar se estão próximos ou não da forma de uma esfera. Foi observada uma mesma tendência para os materiais das pedreiras 2 e 3. Os agregados maiores (retidos nas peneiras de 12,5 e 9,5mm) têm distribuições de propriedades bem próximas umas das outras, enquanto que aqueles retidos na peneira #4 possuem uma maior porcentagem acumulada de agregados com valores mais baixos, quando se compara com os outros tamanhos. Nenhuma partícula da pedreira 3 e apenas uma pequena porcentagem ($\approx 10\%$) de agregados das outras duas pedreiras possuem valor de esfericidade maior do que 0,8, o que está a favor do valor médio obtido, uma vez que este foi mais baixo para os agregados da pedreira 3, o que levou esses agregados a serem classificados como achatados/alongados. Os resultados mostram que há uma grande quantidade de agregados da pedreira 1 retidos na peneira #4 com valor de esfericidade abaixo de 0,6 ($\approx 60\%$). Eles seriam classificados como achatados/alongados, porém os valores dos outros tamanhos elevaram a média, a ponto do conjunto de agregados ser considerado pouco esférico.

4.3. Angularidade (gráúdo e miúdo)

Para a angularidade, tanto os agregados gráúdos como os miúdos foram estudados. Os resultados das pedreiras 1 e 2 indicam uma diferença nas distribuições cumulativas quando se compara agregados gráúdos e miúdos. As curvas referentes aos gráúdos estão mais deslocadas para a esquerda, indicando que esses agregados possuem um valor de angularidade mais baixo se comparados com os miúdos. Isso não acontece com os agregados provenientes da pedreira 3, uma vez que todas as suas curvas de distribuição praticamente se sobrepõem umas às outras, ou seja, os diferentes tamanhos de agregados dessa pedreira tendem a se comportar da mesma maneira em relação à angularidade. Os três agregados foram classificados, pelas suas médias, como subarredondados, porém para os três materiais, existe uma grande quantidade de miúdos com angularidade maior do que 4.000, ou seja, subangulares ou angulares. As menores partículas (retidas na #200) dos três agregados apresentam um comportamento diferente dos outros tamanhos de agregados miúdos, com as curvas referentes a essa peneira localizada um pouco mais à esquerda em relação às demais curvas.

4.4. Textura superficial (gráúdo)

Foram obtidos gráficos com as distribuições de valores cumulativos para os níveis de textura superficial referentes aos agregados gráúdos. Pode-se concluir que os três agregados se comportam de maneiras distintas em relação à textura superficial. O agregado da pedreira 1 possui todas as suas partículas retidas na peneira #4 com valores muito baixos (menores ou próximos a 200). Aproximadamente, metade dessas partículas seria classificada como polida, enquanto a outra metade como lisa. A média para todos os tamanhos desse agregado o classificou como pouco rugoso. Os agregados da pedreira 2, também classificados como pouco rugosos, possuem uma quantidade significativa de partículas com valores de textura superficial superiores a 350 quando se trata daquelas retidas nas peneiras de 12,5 e 9,5mm. Isso também ocorre com os agregados da pedreira 3, que possuem mais de 40% de suas

partículas com rugosidade moderada ou alta. Esse fato e as médias individuais para cada tamanho indicam que quanto menor for o tamanho dos agregados, mais polida deverá ser sua superfície.

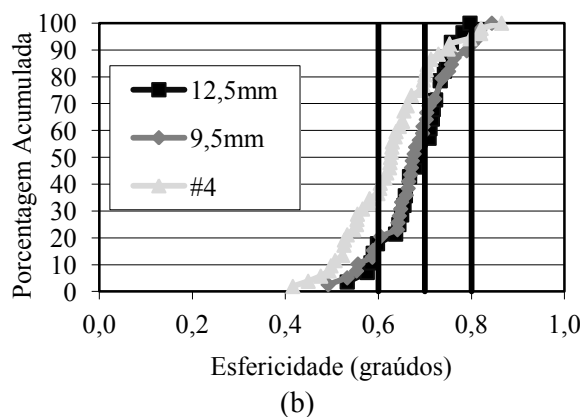
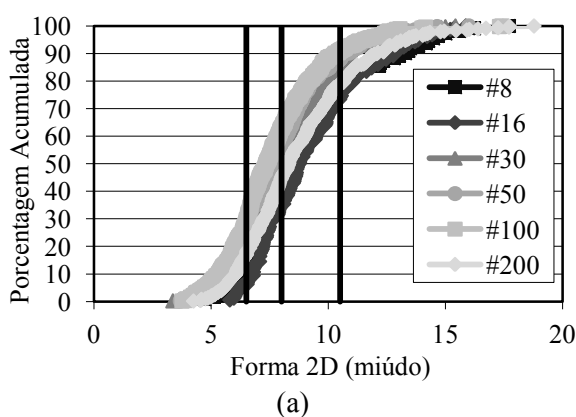
4.5. Partículas achatadas e alongadas (grãos)

A lamelaridade dos agregados grãos foi analisada através das razões entre suas dimensões. O achatamento foi calculado pela razão entre a espessura e a largura dos agregados, enquanto que o alongamento foi calculado pela razão entre a largura e o comprimento. Para um melhor entendimento do comportamento dos agregados em relação a esse parâmetro, foram obtidos também os valores da razão entre a maior e a menor dimensão de cada partícula. A média e os outros parâmetros estatísticos ligados a esses valores encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade

Pedreira	Parâmetro Estatístico		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
1	2,63	0,91	34,40
2	2,48	0,71	28,55
3	4,20	2,07	49,32

Os valores para os três agregados seguem a tendência de classificação em relação à esfericidade. Os agregados das pedreiras 1 e 2, classificados como pouco esféricos, possuem baixos valores de lamelaridade. No entanto, o agregado da pedreira 3 é bastante lamelar, principalmente se comparado com aqueles provenientes das outras duas pedreiras. Os gráficos mostram que os agregados das pedreiras 1 e 2 passam pelo critério Superpave (máximo de 10% de partículas lamelares), porém aqueles provenientes da pedreira 3 não passam, pois possuem cerca de 25% de partículas lamelares. Por fim, foi possível perceber que, em geral, os agregados retidos na peneira #4 são mais lamelares do que aqueles retidos nas peneiras maiores.



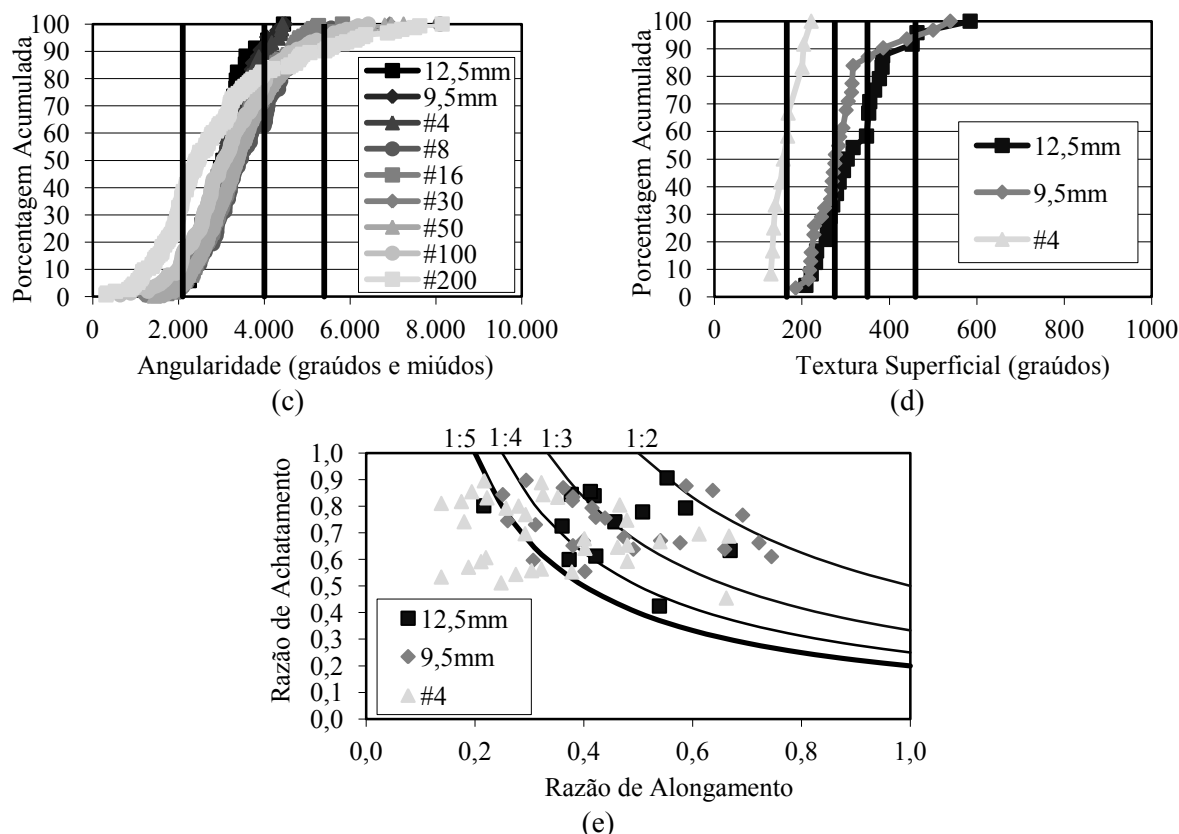


Figura 2. Exemplos de gráficos: (a) forma 2D – agregado 1; (b) esfericidade – agregado 2; (c) angularidade – agregado 3; (d) textura superficial – agregado 1; (e) lamelaridade – agregado 3

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal apresentar uma metodologia prática e fácil de caracterização de agregados e que fornece resultados precisos e representativos. Propriedades de forma, angularidade e textura foram analisadas para três agregados provenientes de diferentes pedreiras localizadas no estado do Ceará. Para isso, foi utilizado o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS). Os agregados graúdos provenientes da pedreira 3 possuem características diferentes daqueles oriundos das outras pedreiras, uma vez que foram classificados pela média de valores como achatados/alongados em relação à esfericidade e liso em relação à textura superficial. Além disso, foram classificados como subarredondado no que diz respeito à angularidade, assim como os outros agregados, porém obtiveram a menor média para esse parâmetro. Os agregados das pedreiras 1 e 2 foram classificados da mesma forma para todos os parâmetros, exceto forma 2D, aplicada aos miúdos. A diferença entre as médias para ambos os agregados foi muito pequena, o que indica que eles se comportam de maneira próxima, também em relação a essa propriedade. A maior diferença observada entre os três agregados foi no que diz respeito à lamelaridade. O valor foi maior para o agregado 3 quando comparado ao valor dos outros agregados ($\approx 70\%$ superior). Isso está em favor da classificação em relação ao outro parâmetro de forma, a esfericidade. Os agregados provenientes das pedreiras 1 e 2 foram considerados pouco esféricos. Aqueles oriundos da pedreira 3 foram classificados como achatados/alongados e não passaram pelo critério Superpave, que exige no máximo 10% de partículas com razão de lamelaridade 5:1. Para a forma 2D, aplicada apenas aos miúdos, concluiu-se que quanto menor o tamanho das partículas, menor o valor, ou mais circular são as partículas, exceto quando se trata das

partículas mais finas (retidas na #200).

A partir dos resultados será possível no futuro fazer uma melhor seleção da composição granulométrica de misturas asfálticas, para que estas possam ter melhor desempenho, com propriedades mecânicas mais satisfatórias. Em relação ao controle de qualidade dos agregados produzidos nas diferentes pedreiras, a obtenção de suas características de forma, angularidade e textura pode indicar se a produção está sendo realizada da melhor forma possível quando se trata do uso desses materiais para serviços de pavimentação. Algumas características são relacionadas com os tipos e mecanismos de britagem, portanto, alterações nos processos de produção dos agregados podem ser feitas, a fim de se tentar atingir características específicas desejadas para os materiais produzidos.

Agradecimentos

Agradecimentos são devidos à CAPES pelo apoio na forma de bolsa de mestrado ao primeiro autor; às pedreiras Pyla, Itaitinga (MFT) e OCS pelo fornecimento dos agregados estudados; à FINEP, ao CNPq e à Petrobras pelo financiamento da REDE ASFALTO N/NE, que possibilitou a realização dos estudos no LMP/UFC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Rousan, T. M. (2004) *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, College Station, Texas.
- Barrett, P. J. (1980) *The shape of rock particles, a critical review*. *Sedimentology*, 27: 291 – 303.
- 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 Measurement System* (AIMS). In: XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, Brasília.
- Cunha, M. B.; L. T. Gouveia; J. L. Fernandes 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-ME 86 (1994) Agregados - Índice de Forma de Agregado. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- 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 84 (1995) Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- Fletcher, T.; C. Chandan; E. Masad e K. Sivakumar (2003) *Aggregate imaging system (AIMS) for characterizing the shape of fine and coarse aggregates*. *Transportation Research Record 1832*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 67 – 77.
- Foster, C. R. (1970) *Dominant effect of fine aggregate on strength of dense-graded asphalt mixes*. *Highway Research Board Special Report 109*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1 – 3.
- Furlan, A. P.; L. T. Gouveia; G. T. P. Fabbri e J. L. Fernandes Júnior (2004) Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas. 17º Encontro de Asfalto – IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás), Rio de Janeiro, RJ.
- Janoo, V. C. (1998) *Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials*. Hanover, NH, US Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, CRREL Special Report 98-1, 22p.
- Kim, Y. R.; J. Daniel e H. Wen (2002) *Fatigue performance evaluation of WesTrack asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage approach*. Final report to Federal Highway Administration/North Carolina Department of Transportation, Report No. FHWA/NC/2002-004.
- Masad, E.; D. Olcott; T. White e L. Tashman (2001) *Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance*. In: *Transportation Research Record 1757*. *Journal of the Transportation*

- Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 148 – 156.
- Masad, E.; T. Al Rousan; J. Button; D. Little e E. Tutumluer (2005) *Test methods for characterizing aggregate shape, texture, and angularity*. Report NCHRP-555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C.
- Nascimento, L. A. H. (2008) Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Souza, L. T. (2009) *Investigation of aggregate angularity effects on asphalt concrete mixture performance using experimental and virtual asphalt samples*. Dissertação de Mestrado, UNL, Lincoln, NE.
- Terzaghi, K. e R. B. Peck (1967) *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley & Sons, New York, 729 p.
- Wedding, P. A. e R. D. Gaynor (1961) *The effect of using crushed gravel as the coarse and fine aggregate in dense-graded bituminous mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, 30, 469 – 492.

Iuri Sidney Bessa (iuri@det.ufc.br)

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

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

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Departamento de Engenharia de Transportes, UFC

Campus do Pici s/nº – Bloco 703 – 60455-760 – Fortaleza, CE, Brasil