



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

LARA MARQUES DIÓGENES

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BRITAGEM NAS PROPRIEDADES DE FORMA
DE AGREGADOS POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

FORTALEZA

2015

LARA MARQUES DIÓGENES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BRITAGEM NAS PROPRIEDADES DE FORMA DE
AGREGADOS POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Transportes do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- D622a Diógenes, Lara Marques.
Avaliação da influência da britagem nas propriedades de forma de agregados por meio do processamento digital de imagens / Lara Marques Diógenes.– 2015.
92 f.: il., color.
- Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2015.
Orientação: Profa. Dra. Verônica Franco Castelo Branco.
1. Asfalto. 2. Agregados. 3. Brita. I. Título.

LARA MARQUES DIÓGENES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BRITAGEM NAS PROPRIEDADES DE FORMA DE
AGREGADOS POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Transportes do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 14 / 10 / 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Membro interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.c Iuri Sidney Bessa (Membro externo)
Universidade de São Paulo (USP)

Eng. Abdias Veras Neto (Membro externo)
Sindibrita/CE

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana Cleire e João Carlos, e à minha irmã, Carla, por todo o carinho, por todos os ensinamentos e pelo incessante apoio em cada passo da minha vida.

Ao meu namorado, Davi, pelo amor, pelo companheirismo e por todos os dias de estudo compartilhados.

À professora Verônica pela sua orientação impecável, pelo incentivo em todos os momentos e por ser um inquestionável exemplo de professora.

Ao professor Eduardo Cabral por ter despertado em mim o interesse pelo estudo dos materiais de construção e por me ter oportunizado a pesquisa nessa área. Aos demais professores que contribuíram de alguma maneira para meu crescimento dentro da Universidade.

A todo o pessoal do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, em especial ao Rômulo, laboratorista, que esteve sempre pronto a ajudar na realização dos ensaios.

À empresa Hugo A. Mota Consultoria e Engenharia de Projetos por me ter proporcionado um ambiente de constante aprendizado no exercício prático da profissão.

Ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica concedidas ao longo da graduação.

À Capes pela oportunidade de participar do programa Ciência sem Fronteiras, experiência que tanto contribuiu para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

A todos os amigos e colegas de faculdade, em especial às amigas Lana, Lívia, Luciana, Luiza, Maria Ailza e Nádia, pela cumplicidade cotidiana e por tornarem os dias e noites de estudo mais leves.

Às três pedreiras que se disponibilizaram a contribuir para esta pesquisa, recebendo visitas, fornecendo dados e materiais necessários. Ao Sindibrita pela presteza em ceder as informações solicitadas.

Aos avaliadores do presente trabalho, Jorge Soares, Iuri Bessa e Abdias Veras pela prontidão com que aceitaram participar da minha banca.

RESUMO

As propriedades de forma dos agregados, que incluem a forma propriamente dita, a angularidade e a textura superficial, afetam diretamente o comportamento das misturas asfálticas, por influenciarem as interações entre as próprias partículas e entre estas e o ligante asfáltico. Dos diversos fatores que podem influir na forma dos agregados, o processo de britagem é o que possui maior possibilidade de ser controlado, por meio dos tipos de britadores e dos parâmetros do processo utilizado. Os métodos tradicionais de avaliação das propriedades de forma são criticados por adotarem alguns ensaios indiretos e qualitativos, que demandam muito tempo e trabalho e que fornecem apenas valores médios, os quais podem não representar bem o material analisado. Devido a essas limitações referentes aos ensaios tradicionais, diversos pesquisadores têm trabalhado com o intuito de desenvolver técnicas alternativas para realizar uma caracterização mais eficaz dessas propriedades, como a utilização do equipamento *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), que analisa forma, angularidade e textura de agregados por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI). O presente trabalho objetiva analisar, por meio do PDI, como o processo de britagem influencia as propriedades de forma dos agregados, a partir de um estudo de caso realizado na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Foram realizadas visitas a três pedreiras, sendo, em cada uma, registradas informações sobre o processo de britagem e coletadas amostras de agregados, os quais foram analisados posteriormente por meio do ensaio brasileiro tradicional de índice de forma e por meio do PDI, com a utilização do AIMS. A partir dos resultados obtidos, foram realizadas comparações entre agregados produzidos por diferentes processos, entre partículas de diferentes tamanhos de um mesmo agregado e entre os dois métodos de caracterização utilizados. A análise efetuada por meio do PDI mostrou-se superior à análise realizada pelo método tradicional, revelando, com maior precisão, que processos divididos em maior quantidade de estágios de britagem tendem a produzir partículas graúdas com forma mais cúbica, tendência que não foi constatada para partículas de agregados miúdos. Foi verificado que a lamelaridade eleva-se à medida que se diminui o tamanho das partículas. A angularidade dos agregados graúdos sofreu leve influência dos diferentes processos de britagem, diminuindo com o aumento do número de estágios utilizados. Observou-se, ainda, que a textura mostrou estar relacionada à mineralogia do material e não à britagem.

Palavras-chave: Agregados. Propriedades de Forma. Processo de Britagem. Processamento Digital de Imagens.

ABSTRACT

Aggregate shape properties, which include form, angularity and superficial texture, affect directly asphalt mixtures' behavior, as they influence the interactions between the particles themselves and between the particles and the asphalt. Among several factors that may impact on the aggregate shape properties, the crushing process is the one with the greatest possibility to be controlled, by choosing the types of crushers used and by changing the process parameters. The traditional methods of characterizing aggregate shape are often criticized for adopting some indirect, qualitative, time-consuming and laborious materials testing, that provide average values, which do not always represent well the material. Due to these traditional methods' limitations, various researchers have been working with the goal of developing alternatives techniques to provide more effective characterization of these properties, as the use of the equipment Aggregate Image Measurement System (AIMS), which analyzes shape, angularity and texture, by the Digital Image Processing (DIP) technique. In this way, this research aims to analyze, by using the DIP, how the crushing process influences the aggregates shape properties, based on a case study performed in Fortaleza metropolitan region. Three stone quarries were visited and, in each one, information about the crushing process were registered, and material samples were collected, which were characterized, subsequently, by the Brazilian traditional shape index test and by the DIP, using AIMS. Based on the results, comparisons were made between aggregates produced by different processes, between particles with different sizes, and between the two shape methods used. The analyses made by the DIP showed, more accurately than the traditional test, that the processes divided in larger number of stages tend to produce more cubic coarse aggregate particles. For fine aggregate, however, this trend was not observed. It was perceived that flatness and elongation increases as the size of the particles decreases. Particles angularity suggested a small influence of the different crushing processes, being reduced as the number of crushing stages increased. The texture showed to be related to the material mineralogy and not rushing process.

Keywords: Aggregates. Shape properties. Crushing Process. Digital Image Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Propriedades de forma de uma partícula de agregado	19
Figura 2 – <i>Aggregate Imaging Measurement System</i> (AIMS)	22
Figura 3 – Classificação da forma de agregados	24
Figura 4 – ATR × Tempo de carregamento	24
Figura 5 – Diagrama esquemático geral de um processo de britagem	28
Figura 6 – Britador de mandíbulas	29
Figura 7 – Britador cônico	30
Figura 8 – Carregamento simples (esquerda) e multiponto (direita)	31
Figura 9 – Relação entre a porcentagem de partículas lamelares e o tamanho das partículas para diferentes parâmetros de britagem	33
Figura 10 – Tipos de carregamento aplicados nos corpos-de-prova	34
Figura 11 – Fluxograma da metodologia do presente trabalho	36
Figura 12 – Visualização dos estágios de britagem da Pedreira 1	38
Figura 13 – Britador de mandíbulas da Pedreira 2	39
Figura 14 – Britadores utilizados nas britagens secundária e terciária da Pedreira 2	39
Figura 15 – Outras instalações da Pedreira 2	40
Figura 16 – Britadores utilizados nas britagens primária e secundária da Pedreira 3	42
Figura 17 – Britadores utilizados nas britagens terciária e quaternária da Pedreira 3	42
Figura 18 – Telas utilizadas na Pedreira 3	43
Figura 19 – Fluxograma do processo de britagem da Pedreira 1	44
Figura 20 – Fluxograma do processo de britagem da Pedreira 2	44
Figura 21 – Fluxograma do processo de britagem da Pedreira 3	45
Figura 22 – Curvas granulométricas dos agregados	46
Figura 23 – Crivos para a realização do ensaio de Índice de Forma (IF).....	47
Figura 24 – Posicionamento de agregados na bandeja do AIMS	49
Figura 25 – Imagens capturadas pelo AIMS	49
Figura 26 – Dimensões de uma partícula	50
Figura 27 – Ângulos de orientação dos pontos do contorno da partícula	50
Figura 28 – Resumo dos processos de britagem dos agregados graúdos coletados	53
Figura 29 – Resumo dos processos de britagem dos agregados miúdos coletados	54
Figura 30 – Resultados de Índice de Forma (IF)	56

Figura 31 – Índice de Forma (IF) × esfericidade	58
Figura 32 – Distribuição da esfericidade das frações de 19mm	61
Figura 33 – Distribuição da esfericidade das frações de 12,5mm	62
Figura 34 – Distribuição da esfericidade das frações de 9,5mm	62
Figura 35 – Distribuição da esfericidade das frações 4,75mm	63
Figura 36 – Distribuição da angularidade das frações de 19mm	65
Figura 37 – Distribuição da angularidade das frações de 12,5mm	65
Figura 38 – Distribuição da angularidade das frações de 9,5mm	66
Figura 39 – Distribuição da angularidade das frações de 4,75mm	66
Figura 40 – Distribuição da textura das frações de 19mm	67
Figura 41 – Distribuição da textura das frações de 12,5mm	67
Figura 42 – Distribuição da textura das frações de 9,5mm	68
Figura 43 – Distribuição da textura das frações de 4,75mm	68
Figura 44 – Angularidade × forma 2D de agregados miúdos	70
Figura 45 – Distribuição da forma 2D das frações de 2,36mm	72
Figura 46 – Distribuição da forma 2D das frações de 1,18mm	72
Figura 47 – Distribuição da forma 2D das frações de 0,6mm	73
Figura 48 – Distribuição da forma 2D das frações de 0,3mm	73
Figura 49 – Distribuição da forma 2D das frações de 0,15mm	74
Figura 50 – Distribuição da forma 2D das frações de 0,075mm	74
Figura 51 – Distribuição da angularidade das frações de 2,36mm	76
Figura 52 – Distribuição da angularidade das frações de 1,18mm	76
Figura 53 – Distribuição da angularidade das frações de 0,6mm	77
Figura 54 – Distribuição da angularidade das frações de 0,3mm	77
Figura 55 – Distribuição da angularidade das frações de 0,15mm	78
Figura 56 – Distribuição da angularidade das frações de 0,075mm	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do ensaio de granulometria	46
Tabela 2 – Critérios de classificação dos agregados por meio da utilização do AIMS	52
Tabela 3 – Resultados de Índice de Forma (IF)	57
Tabela 4 – Resultados gerais das propriedades de forma de agregados graúdos	57
Tabela 5 – Resultados das propriedades de forma de agregados graúdos por fração	59
Tabela 6 – Porcentagens de partículas com razão de lamelaridade maior que 5:1	64
Tabela 7 – Resultados gerais das propriedades de forma de agregados miúdos	69
Tabela 8 – Resultados das propriedades de forma de agregados miúdos por fração	70
Tabela 9 – <i>Ranking</i> estabelecido entre os agregados graúdos para cada propriedade analisada com o uso do AIMS	79
Tabela 10 – <i>Ranking</i> estabelecido entre os agregados miúdos para cada propriedade analisada com o uso do AIMS	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
APF	Abertura de saída na Posição Fechada
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento da Trilha de Roda
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CV	Coefficiente de Variação
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
GR	Grau de Redução
IF	Índice de Forma
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
PDI	Processamento Digital de Imagens
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFC	Universidade Federal do Ceará
UI-AIA	<i>University of Illinois Aggregate Image Analyser</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações Iniciais	12
1.2	Problema de Pesquisa	14
1.3	Objetivos	15
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>15</i>
1.4	Estrutura do trabalho	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Caracterização de agregados	17
2.2	Propriedades de forma das partículas	18
<i>2.2.1</i>	<i>Ensaio tradicional</i>	<i>19</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Processamento Digital de Imagens (PDI)</i>	<i>20</i>
2.3	Influência das propriedades de forma dos agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas	23
2.4	Britagem das partículas	26
<i>2.4.1</i>	<i>Tipos de britadores utilizados na RMF</i>	<i>28</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Influência da britagem nas propriedades de forma das partículas</i>	<i>31</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Visitas às unidades de britagem e coletas de agregados	37
<i>3.1.1</i>	<i>Pedreira 1</i>	<i>37</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Pedreira 2</i>	<i>38</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Pedreira 3</i>	<i>41</i>
3.2	Fluxogramas representativos dos processos de britagem	43
3.3	Ensaio de granulometria	45
3.4	Ensaio de Índice de Forma	47
3.5	Ensaio utilizando o Processamento Digital de Imagens	48
<i>3.5.1</i>	<i>Procedimento de utilização do AIMS</i>	<i>48</i>
<i>3.5.2</i>	<i>Parâmetros obtidos por meio do AIMS</i>	<i>49</i>
<i>3.5.3</i>	<i>Crêrios utilizados para a classificação das propriedades de forma</i>	<i>51</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Resultados de propriedades de forma para agregados graúdos	55
<i>4.1.1</i>	<i>Resultados do ensaio tradicional de Índice de Forma</i>	<i>55</i>

4.1.2	<i>Resultados das propriedades de forma obtidas com o uso do AIMS.....</i>	57
4.1.2.1	<i>Esfericidade</i>	60
4.1.2.2	<i>Razões de Lamelaridade.....</i>	63
4.1.2.3	<i>Angularidade.....</i>	64
4.1.2.4	<i>Textura</i>	66
4.2	Resultados de propriedades de forma de agregados miúdos	69
4.2.1	<i>Forma 2D</i>	71
4.2.2	<i>Angularidade.....</i>	75
4.3	Resumo geral dos resultados	79
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE BRITAGEM	89
	APÊNDICE B – RAZÕES ENTRE AS DIMENSÕES DOS AGREGADOS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O custo relacionado ao transporte de cargas e passageiros, no Brasil, é fortemente influenciado pelas más condições em que se encontra grande parte dos pavimentos rodoviários. De acordo com pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2015), por meio da qual foram avaliados mais de 100.000km de rodovias brasileiras pavimentadas, 48,6% dos pavimentos apresentaram algum tipo de deficiência, sendo classificados como regulares, ruins ou péssimos. A partir desse fato, percebe-se a urgência de se buscarem maneiras de melhorar a qualidade dos pavimentos das estradas brasileiras.

Em 95% das rodovias brasileiras pavimentadas, de acordo com Bernucci *et al.* (2010), é utilizado revestimento do tipo asfáltico, o qual, assim como as outras camadas que constituem o pavimento, pode ser responsável pelos defeitos apresentados. Segundo Gouveia (2006), as misturas asfálticas são compostas de 80 a 90%, em volume, por agregados. Conseqüentemente, as propriedades desses componentes afetam o desempenho do compósito, sendo responsáveis pelo aumento da estabilidade do revestimento, uma vez que formam um esqueleto granular com considerável resistência ao cisalhamento.

As propriedades de forma, de angularidade e de textura de agregados (sendo o conjunto chamado simplesmente de propriedades de forma no presente trabalho) influenciam diretamente as interações entre as próprias partículas e as interações entre as partículas e o ligante asfáltico, causando variações em propriedades da mistura asfáltica como trabalhabilidade, resistência à tração e ao cisalhamento, rigidez e durabilidade (AL ROUSAN, 2004). De acordo com Masad (2005a), a forma de um agregado está ligada às suas dimensões, enquanto a angularidade relaciona-se aos cantos existentes, e a textura, às irregularidades da superfície em uma escala menor, que não afeta as duas primeiras propriedades. Bessa (2012) concluiu que a forma e a angularidade devem estar mais relacionadas ao processo de britagem pelo qual passou o material, enquanto a textura é mais dependente da mineralogia da rocha de origem do agregado.

Os métodos tradicionais de avaliação das propriedades de forma dos agregados são, atualmente, criticados por uma série de fatores, como: não há ligação entre propriedades de agregados graúdos e miúdos; resultados de uma propriedade sofrem influência de outras; alguns ensaios são qualitativos e demandam muito tempo e trabalho e as medidas das propriedades são indiretas (AL ROUSAN, 2004). Devido às questões previamente citadas,

existem técnicas alternativas sendo estudadas e desenvolvidas para sugerir procedimentos de caracterização de agregados, tais como o uso do Processamento Digital de Imagens (PDI) (BESSA, 2012). Várias metodologias podem ser utilizadas a partir dessa técnica, entre elas o uso do equipamento *Aggregate Image Measurement System* (AIMS).

Diversos pesquisadores já investigaram como as propriedades de forma dos agregados influenciam o comportamento de misturas asfálticas, mas esta não é uma questão fácil de ser respondida, devido à grande quantidade de outras variáveis que também interferem no desempenho desse material, e, por isso, os resultados encontrados muitas vezes não concordam entre si. Chen, Lin e Chang (2005) concluíram que partículas cúbicas de agregados graúdos proporcionam às misturas asfálticas uma maior resistência ao Afundamento de Trilha de Roda (ATR) se comparadas a misturas asfálticas compostas por partículas alongadas, além de estas serem mais susceptíveis à quebra. De uma forma geral, para utilização em misturas asfálticas, considera-se que agregados adequados são aqueles que possuem forma aproximadamente cúbica, alta angularidade, para favorecer o intertravamento das partículas, e superfície com textura rugosa, aumentando a aderência com o ligante asfáltico.

As propriedades de forma de agregados podem ser influenciadas por diferentes fatores. A mineralogia da rocha de origem, o processo produtivo desses agregados, o processo construtivo do revestimento asfáltico e, até mesmo, a posterior utilização dessa camada são determinantes das propriedades de forma e de suas modificações ao longo do tempo. Bern (1997) destacou que a melhor maneira de se conseguir o tamanho e o formato desejado do produto é a partir do projeto adequado da planta de britagem, que inclui, de maneira geral, a quantidade de estágios utilizados, os tipos de britadores e os seus parâmetros, como, por exemplo, o tamanho da abertura pela qual sai o material e a relação entre as dimensões do material que entra no equipamento e do material gerado por este. Briggs e Evertsson (1998) analisaram como variações no processo de britagem podem influenciar a forma e o tamanho das partículas produzidas e constataram que a distribuição das cargas de compressão e a relação entre o tamanho das partículas antes e depois do processo afetam diretamente o formato do produto.

Cavalcanti e Parahyba (2012), em documento produzido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), dividiram o processo de produção dos agregados nas seguintes etapas: lavra, beneficiamento, estocagem e embarque. O beneficiamento divide-se em: (i) cominuição, isto é, redução das dimensões das partículas com o uso de britadores e (ii) classificação realizada por meio de peneiras. Na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF),

das doze unidades de britagem em operação, todas fazem uso de britadores de mandíbula de um eixo no primeiro estágio. Na britagem secundária, britadores de mandíbula são usados apenas por duas empresas, enquanto as outras utilizam britadores do tipo cônico. Duas unidades operam com quatro estágios de britagem, oito com três e duas realizam apenas dois estágios (CAVALCANTI; PARAHYBA, 2012). Os tipos de equipamentos utilizados, portanto, são basicamente os mesmos; entretanto, as quantidades de estágios e os parâmetros de redução dos britadores variam.

1.2 Problema de Pesquisa

O fato de as propriedades de forma dos agregados influenciarem o comportamento de misturas asfálticas já é suficientemente compreendido para que essas variáveis sejam consideradas na seleção desses materiais para compor o revestimento asfáltico. Contudo, esses atributos dos agregados, muitas vezes, ainda não recebem a devida atenção, especialmente no Brasil.

As pedreiras localizadas na RMF realizam o controle tecnológico das características de seus produtos com base nas normas existentes e nos critérios exigidos pelos seus clientes. Com relação à forma, à angularidade e à textura, a primeira é a mais controlada, na prática. Esse controle é feito por meio dos ensaios tradicionalmente utilizados no Brasil, normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) ou pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Entretanto, os ensaios e critérios normatizados baseiam-se em valores médios, isto é, não consideram a distribuição estatística das propriedades das partículas. Esses resultados, portanto, podem não representar adequadamente todas as partículas de um determinado material, a depender de sua variabilidade.

Nesse sentido, agregados produzidos a partir de processos de britagem distintos podem ser considerados semelhantes em relação à forma, pelas normas e pelos critérios utilizados atualmente, mas, na realidade, serem diferentes o bastante para provocarem comportamentos distintos em misturas asfálticas. Essa diferença de comportamento, caso não seja prevista, pode ser responsável por reduzir a qualidade dos revestimentos asfálticos, por meio do aceleramento da evolução de defeitos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar como os diferentes processos de britagem utilizados em pedreiras localizadas na RMF influenciam as propriedades de forma dos agregados graúdos e miúdos produzidos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Comparar as propriedades de forma de partículas de diferentes tamanhos produzidas a partir de um mesmo processo de britagem;
- b) Verificar a influência do tipo de britador, da quantidade de estágios e dos parâmetros de britagem nas propriedades de forma dos agregados minerais gerados;
- c) Comparar os resultados do parâmetro de forma obtidos por meio de um ensaio tradicional normatizado pelo DNIT e por meio da utilização do PDI;
- d) Sugerir como a qualidade dos agregados produzidos pode ser melhorada, com relação às suas propriedades de forma, para aplicação em misturas asfálticas, a partir da observação dos processos de britagem investigados.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi organizado em 5 capítulos, cujos conteúdos estão descritos a seguir:

Capítulo 1: introduz o tema, apresenta as considerações iniciais, o problema de pesquisa e os objetivos geral e específico, os quais deverão ser atingidos ao final do trabalho.

Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica que traz informações relativas aos principais temas tratados no trabalho, como propriedades de forma de agregados e sua influência no comportamento mecânico de misturas asfálticas, PDI, britagem das partículas e influência do processo de britagem nas propriedades de forma.

Capítulo 3: traz informações sobre a metodologia do trabalho e sobre os materiais utilizados, o que inclui: visitas às pedreiras, informações obtidas sobre os processos de britagem, agregados coletados e ensaios realizados.

Capítulo 4: traz os resultados de propriedades de forma dos agregados obtidos por meio do método tradicional e por meio do PDI, assim como as discussões e as comparações entre os diversos resultados encontrados.

Capítulo 5: apresenta os principais pontos que puderam ser concluídos a partir da realização deste trabalho e as sugestões de temas para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização de agregados

O termo agregado é definido pela NBR 9935 (ABNT, 2011) como “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”. De acordo com alguns autores, como Paraguassú (1996 *apud* CAVALCANTI; PARAHYBA, 2012), a aplicação desse material é mais abrangente, sendo descrita simplesmente como a utilização em obras de engenharia civil.

Os agregados podem ser classificados de acordo com sua natureza como naturais, artificiais ou reciclados (BERNUCCI *et al.*, 2010):

- (a) Naturais: provenientes do desmonte de rochas, de escavação e de dragagem em depósitos marinhos, continentais, rios ou estuários. Exemplos: pedregulho, brita, areia de rio, etc;
- (b) Artificiais: produtos ou resíduos de processos industriais. Exemplos: argila calcinada, argila expandida, escória de alto forno, etc.
- (c) Reciclados: já utilizados anteriormente em outros materiais. Exemplos: resíduos de construção civil e demolição, fresado de revestimentos asfálticos.

Com relação ao tamanho, os agregados podem ser classificados como: graúdo, material retido na peneira de nº 10, logo, com dimensões maiores do que 2,0mm; miúdo, material retido na peneira de nº 200 e passante na peneira de nº 10, ou seja, com dimensões entre 0,075mm e 2,0mm e filer, material do qual 65% ou mais das partículas passa na peneira de nº 200, com abertura de 0,075mm (DNIT, 2006). Alguns sistemas, como o descrito pela NBR 9935 (ABNT, 2011), utilizam a peneira de nº 4, em vez da de nº 10, para diferenciar agregados miúdos e graúdos.

Uma terceira classificação por ser feita, em relação à distribuição dos grãos, por meio da análise granulométrica, descrita pela norma DNER-ME 083 (1998). Por esse procedimento, o agregado pode apresentar: graduação densa ou bem-graduada; graduação aberta; graduação uniforme ou graduação com degrau ou descontínua.

Os agregados possuem características, físicas e químicas, que devem ser levadas em consideração no momento de sua seleção, a qual vai depender, também, da disponibilidade, do custo e da aplicação que será dada ao material. Várias dessas propriedades possuem ensaios normatizados no Brasil para determiná-las e possuem faixas de valores nas quais o material deve se enquadrar, dependendo de sua aplicação. O DNIT define critérios

referentes à utilização dos mesmos em misturas asfálticas. Os ensaios normatizados pelo DNIT mais utilizados na caracterização de agregados para aplicação em misturas asfálticas tratam das seguintes propriedades: distribuição granulométrica, absorção, equivalente de areia, determinação da abrasão Los Angeles, adesividade, sanidade, massa específica e Índice de Forma (IF) (BERNUCCI *et al.*, 2010). A ABNT também apresenta diversos ensaios normatizados para a caracterização de agregados, tanto para utilização em pavimentação como para outras aplicações.

Alguns ensaios e sistemas de classificação internacionais são utilizados no Brasil, apresentando grande destaque nesse tema o *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave), um agrupamento de estudos realizados pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP). O Superpave concentrou-se, inicialmente, no desenvolvimento de uma série de métodos de análise de ligantes asfálticos e de misturas asfálticas. Posteriormente, devido à percepção da importância que os agregados possuem na análise dessas misturas, os pesquisadores do SHRP realizaram estudos com o intuito de determinar as propriedades mais relevantes de agregados para aplicação em pavimentação e de desenvolver métodos de ensaios para esses materiais.

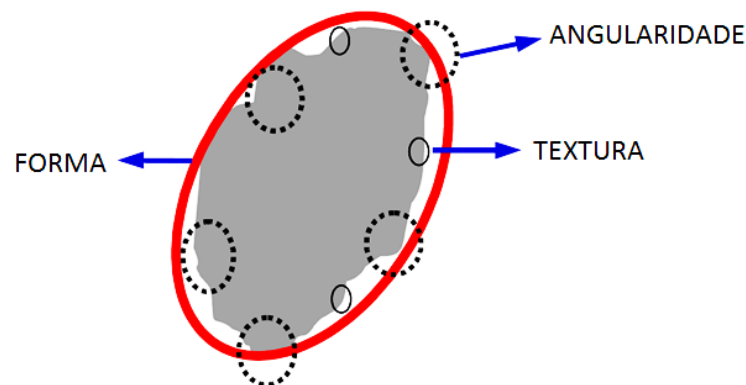
As propriedades de agregados definidas pelo Superpave foram divididas em: propriedades de consenso e propriedades de origem. As primeiras receberam essa denominação por ter havido um consenso entre especialistas com relação aos valores-limites de adequação do material para compor misturas asfálticas. São essas: angularidade do agregado graúdo, angularidade do agregado miúdo, partículas planas e alongadas e finos plásticos. Já as segundas foram consideradas igualmente importantes, entretanto, não houve um consenso com relação a seus valores críticos, pelo fato de dependerem da origem do material, de forma que foi decidido que os departamentos rodoviários de cada estado americano deveriam estabelecer seus próprios limites. As propriedades de origem são: resistência à abrasão, sanidade e percentual de materiais deletérios (GOUVEIA, 2006).

2.2 Propriedades de forma das partículas

A forma propriamente dita, a textura e a angularidade dos agregados são propriedades de forma completamente independentes, isto é, variações em qualquer uma das três podem ocorrer sem necessariamente afetar as outras, pois estão relacionadas a escalas distintas. A forma representa as relações entre as dimensões da partícula, tratando de cubicidade (ou esfericidade), achatamento, alongamento e lamelaridade. A angularidade

descreve variações nas suas quinas e a textura está relacionada às irregularidades superficiais, em uma menor escala, se comparada à angularidade (MASAD, 2005a). Na Figura 1, pode-se observar a representação de uma partícula com a indicação de cada uma dessas três propriedades. A seguir, serão apresentados os métodos, tradicionais e modernos, mais utilizados para caracterizar agregados com relação às propriedades de forma no Brasil.

Figura 1 – Propriedades de forma de uma partícula de agregado



Fonte: Adaptado de Masad (2005a).

2.2.1 Ensaios tradicionais

Os ensaios normalmente utilizados para caracterizar as propriedades de forma dos agregados, no Brasil, são os normatizados pelo DNIT, pela ABNT e pelo Superpave. O ensaio de IF descrito pela norma brasileira DNER-ME 086 (1994), que determina a forma de um agregado graúdo, é realizado passando o material por crivos redondos e redutores, de aberturas específicas, a depender do tamanho do agregado. A NBR 7809 (2006), normatizada pela ABNT, descreve um método de ensaio de determinação do IF com a utilização de um paquímetro para medir as dimensões das partículas. O ensaio de porcentagem de partículas fraturadas para agregados graúdos (ASTM D 5821, 2013) propõe uma análise visual das partículas, selecionando as que possuem faces fraturadas. Um procedimento para determinar o alongamento e a lamelaridade dos agregados graúdos é descrito pela ASTM D 4791 (2010), com o uso de um paquímetro dimensional para determinar as relações entre largura e comprimento e entre comprimento e espessura. Já para agregados miúdos, a ASTM C 1252 (2006) estabelece uma forma de medida indireta de sua angularidade, por meio da determinação dos vazios não compactados entre partículas. Os três últimos ensaios citados são adotados pelo Superpave e estão relacionados às propriedades de consenso. A textura de

agregados não possui ainda, no Brasil, um procedimento descrito em norma para a sua avaliação.

Uma série de desvantagens, entretanto, vem sendo apontada a esses ensaios por diversos pesquisadores. Briggs e Evertsson (1998) utilizaram um método usado pelas empresas suecas na época, semelhante ao da atual NBR 7809 (2006), para comparar a forma de partículas geradas por compressão, variando parâmetros, mas ressaltaram que seria mais eficaz obter uma distribuição das propriedades do que confiar em um único valor médio. Segundo Bessa (2012), a caracterização dessas propriedades utilizando somente valores médios não é ideal, pois esse autor concluiu, por meio do uso de uma técnica de PDI, que, em uma mesma amostra, podem ocorrer variações significativas, de maneira que a média nem sempre a representa adequadamente. Rao, Tutumluer e Kim (2002) observaram que o ensaio que propõe a contagem de faces fraturadas das partículas, descrito pela norma ASTM D 5821 (2013), para determinar a angularidade dos agregados graúdos não somente é bastante dispendioso com relação ao tempo e ao trabalho, como é subjetivo. Gouveia (2006) constatou, tratando desse mesmo método, que ele não permite que seja avaliada, de fato, a angularidade dos agregados graúdos, pois considera somente a quantidade de faces fraturadas, não se referindo ao grau de angularidade das quinas das partículas.

2.2.2 *Processamento Digital de Imagens (PDI)*

Diante dos problemas existentes com relação aos ensaios tradicionais para a caracterização da forma e da angularidade dos agregados e da dificuldade de se analisar a textura das partículas, vários pesquisadores vêm buscando desenvolver métodos alternativos para sanar essas deficiências. Muitos desses métodos são baseados no PDI, que tem mostrado vantagens em relação aos métodos convencionais, ligadas à precisão e à facilidade de uso.

Rao, Tutumluer e Kim (2002) descreveram o desenvolvimento, a validação e a aplicação de um procedimento de análise de imagens para caracterizar agregados graúdos com relação à angularidade, elaborado para ser adicionado ao sistema já existente chamado *University of Illinois Aggregate Image Analyser (UI-AIA)*, que mede com precisão tamanho, volume, lamelaridade e alongamento de partículas. O parâmetro de angularidade formulado mostrou-se eficaz e insensível ao tamanho e à orientação das partículas, conforme era esperado.

Bessa, Castelo Branco e Soares (2012) utilizaram uma técnica simples de PDI para caracterizar diferentes tipos de agregados, capturando fotos em posições determinadas

com uma câmera digital e tratando as imagens com o *software ImageTool*. Os autores concluíram que o ensaio tradicional realizado por meio do paquímetro dimensional (ASTM D 4791, 2010), para determinar a quantidade de partículas alongadas e planas, demandou maior tempo e trabalho, mas forneceu resultados mais realísticos se comparado ao método de PDI utilizado, pois este não era capaz de captar a profundidade das partículas, mas apenas duas dimensões destas. Por outro lado, esses autores ressaltaram que o método de PDI apresenta uma distribuição das propriedades, enquanto o tradicional resulta em valores médios. O material granítico apresentou uma tendência a possuir partículas mais planas e alongadas com relação à forma, e mais angulosas com relação à angularidade, se comparado aos resíduos de construção e demolição e à escória de aciaria.

Masad (2005a) desenvolveu um sistema de simples configuração para realizar a caracterização da forma e da angularidade de agregados graúdos e miúdos, e da textura de agregados graúdos, o AIMS. A textura superficial de agregados miúdos não pode ser medida diretamente por esse sistema, entretanto, Masad *et al.* (2001) haviam mostrado a existência de uma correlação com coeficiente de determinação (R^2) de 0,51 entre a textura desses agregados determinada a partir de uma técnica de PDI, utilizando um microscópio óptico acoplado a uma câmera digital, e a sua angularidade medida pelo ensaio adotado pelo Superpave. Relacionando essas duas propriedades com o valor de angularidade determinado pela técnica de PDI utilizada, o autor encontrou um R^2 de 0,63. Essas duas relações são descritas pelas Equações 1 e 2.

$$FAA = 38,77 + 0,009 \times TI \quad (1)$$

$$FAA = 29,89 + 2,08 \times AI + 0,0063 \times TI \quad (2)$$

Onde: FAA = angularidade do agregado miúdo determinada pelo método tradicional adotado pelo Superpave; AI = angularidade determinada por meio do PDI; TI = textura determinada por meio do PDI.

O AIMS, apresentado pela Figura 2, consiste em uma câmera e em dois tipos diferentes de iluminação e apresenta dois módulos de utilização, de acordo com o tamanho do agregado a ser caracterizado. O primeiro módulo destina-se à análise de agregados miúdos, menores que 4,75mm, e utiliza apenas imagens em preto e branco, capturadas usando uma luz de fundo que gera um contraste entre o agregado e a bandeja e acentua o contorno do material. Já o segundo módulo aplica-se aos agregados graúdos, maiores que 4,75mm. Nesse

módulo, que se baseia em uma análise 3D das partículas, possibilitando a avaliação da lamelaridade e do alongamento, são capturadas imagens tanto em preto-e-branco como em escala de cinza.

Figura 2 – *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*



Fonte: Próprio autor (2015).

Castelo Branco *et al.* (2006) utilizaram o AIMS para caracterizar um tipo de brita granítica e dois tipos de escória de aciaria, de diferentes origens, com relação às propriedades de forma, angularidade e textura. Os autores concluíram que as escórias apresentaram valores de esfericidade muito próximos entre si, enquanto a brita apresentou-se o agregado menos esférico. Com relação à angularidade, a brita mostrou-se menos angular que as duas escórias, que apresentaram distribuições dessa propriedade próximas entre si. Pela análise da textura, a brita mostrou-se a mais rugosa. Os autores chamam a atenção para o fato de que a média não representou bem a distribuição das propriedades.

Bessa, Castelo Branco e Soares (2011) usaram o AIMS para propor uma metodologia de análise da resistência ao polimento e à degradação de agregados provenientes de três fontes localizadas no Ceará. Os autores analisaram a angularidade e a textura das partículas antes e depois de terem alterado essas propriedades por meio do equipamento de abrasão Los Angeles, para quantificar as perdas de angularidade, resultantes da abrasão, e de rugosidade, resultantes do polimento. Araújo *et al.* (2013) fizeram uma análise das propriedades de forma de agregados fresados coletados na cidade de Fortaleza, Ceará, utilizando o AIMS, e avaliaram a interferência da velocidade da fresadora nas propriedades de forma dos agregados.

Araújo, Bessa e Castelo Branco (2014) apresentaram um método de análise de textura de misturas asfálticas, com o uso do AIMS, variando parâmetros como granulometria e propriedades de forma dos agregados. Os autores concluíram que uma maior quantidade de finos reduz a macrotextura do revestimento asfáltico. Já com relação às propriedades de forma

dos agregados, não foram observadas variações suficientes para influenciar a microtextura das misturas asfálticas.

Alves (2014) utilizou o AIMS para analisar as variações de forma de agregados provenientes de três pedreiras da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, após submetê-los a ensaios de desgaste à abrasão Los Angeles, relacionando as variações com suas características geológicas. O autor ressaltou, com base em seus resultados, o cuidado que se deve ter ao comparar propriedades de resistência entre agregados de tamanhos diferentes, pois partículas miúdas tendem a apresentar um comportamento diferente das graúdas com mesma composição mineral e que tenham passado pelos mesmos tipos de esforços mecânicos. Analisando essa observação, pondera-se que esse cuidado pode ser importante em um estudo que trate da britagem de agregados.

2.3 Influência das propriedades de forma dos agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas

Apesar de as características dos agregados influenciarem diretamente o comportamento das misturas asfálticas, dado que eles compõem de 80 a 90% desse compósito, em volume, não é tarefa fácil descrever essas relações, nem prever o desempenho dessas misturas a partir do conhecimento das propriedades dos agregados (GOUVEIA, 2006). Essa dificuldade se dá pela elevada quantidade de parâmetros que afetam o comportamento de uma mistura asfáltica, sendo difícil manter todos constantes, variando somente o que será avaliado.

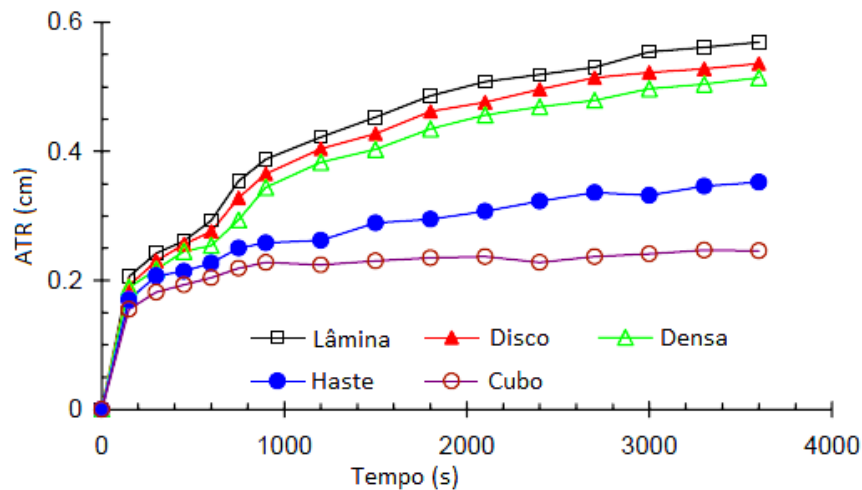
Chen, Lin e Chang (2005) analisaram misturas asfálticas de graduação aberta compostas por agregados graúdos de quatro diferentes formatos denominados de disco, cubo, lâmina e haste; e uma de graduação densa composta por agregados cúbicos, sendo esses formatos de partícula apresentados na Figura 3. A relação de achatamento é a razão entre a menor dimensão e a dimensão intermediária, já a relação de alongamento é a razão entre a dimensão intermediária e a maior dimensão. Os autores verificaram que, à medida que se eleva a cubicidade das partículas, melhora-se a resistência ao ATR de amostras de misturas asfálticas, como pode ser observado pela Figura 4.

Figura 3 – Classificação da forma de agregados



Fonte: Adaptado de Chen, Lin e Chang (2005).

Figura 4 – ATR × Tempo de carregamento



Fonte: Adaptado de Chen, Lin e Chang (2005).

Aragão (2007) também investigou a resistência ao ATR, comparando misturas asfálticas contendo agregados graúdos com 75% e com 90% de partículas fraturadas, propriedade medida pelo ensaio descrito pela norma ASTM D 5821 (2013). O ensaio era parado quando a mistura atingisse 12mm de deformação ou quando se chegasse a 8.000 ciclos de carregamento, o que ocorresse primeiro. Considerando a média do número de ciclos em que a mistura atingia 12mm, as amostras de misturas asfálticas compostas por agregados com 75% de partículas fraturadas apresentaram um valor de 5.890, enquanto as misturas compostas por agregados com 90% de partículas fraturadas apresentaram um valor de 6.097 ciclos. Com relação a agregados miúdos, foram comparadas misturas asfálticas compostas por agregados com valores de angularidade de 41 e 43, sendo essa propriedade medida pelo ensaio tradicional ASTM C 1252 (2006). As misturas asfálticas testadas compostas por agregados miúdos de menor angularidade apresentaram uma média de 5.902 ciclos, enquanto

as misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com maior angularidade apresentaram uma média de 6.097 ciclos ao atingir a deformação de 12mm. O autor considerou que esses resultados indicaram que valores mais baixos de angularidade dos agregados podem ser um fator que eleva o ATR, mas ressaltou que novas investigações, mais completas, seriam necessárias para se obter conclusões mais sólidas.

Masad *et al.* (2011) investigaram a relação existente entre a forma dos agregados e as propriedades mecânicas de misturas asfálticas, utilizando agregados oriundos de treze fontes distintas. Os autores observaram que um aumento na porcentagem de partículas planas elevou a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, o que foi atribuído ao fato de que as partículas alongadas tenderam a se orientar com seu maior eixo próximo ao plano horizontal, criando um maior número de pontos de contato na direção vertical, ou seja, conferindo à mistura asfáltica um caráter mais anisotrópico. Dessa forma, o autor sugere que essas misturas asfálticas com elevada quantidade de partículas lamelares podem apresentar menor resistência à deformação permanente em outros planos, o que seria percebido se fossem testadas em outras direções. O autor ressalta, ainda, que partículas planas e alongadas possuem a desvantajosa tendência a quebrar durante a compactação e o uso do revestimento asfáltico.

Singh, Zaman e Commuri (2012) observaram a importância da textura superficial dos agregados para a rigidez de misturas asfálticas. Esses autores constataram, a partir de uma análise do módulo dinâmico de misturas asfálticas compostas por agregados de diferentes propriedades de forma, que a superfície rugosa das partículas ajuda a desenvolver uma força de atrito entre as partículas, que propicia à mistura asfáltica estrutura mais estável em relação àquelas constituídas por agregados com superfícies mais polidas. A partir desse estudo, os autores observaram, também, que o módulo dinâmico de uma mistura asfáltica, considerado um importante parâmetro para previsão de desempenho do revestimento asfáltico com relação a algumas propriedades, aumenta à medida que se elevam os parâmetros de angularidade e de esfericidade dos agregados.

Onofre (2012) avaliou a influência da textura superficial dos agregados em misturas asfálticas por meio do ensaio de *creep* dinâmico, utilizando dois tipos de agregado, um basáltico e um granítico, com esfericidade, angularidade e forma 2D semelhantes, determinadas por meio do AIMS. O agregado basáltico apresentou 100% de suas partículas classificadas como de alta textura superficial, enquanto 75% das partículas do agregado granítico apresentaram textura superficial média e 25% apresentaram textura superficial baixa. A deformação acumulada da mistura com agregado basáltico a 4.000 ciclos,

determinada a partir do ensaio de *creep* dinâmico, foi aproximadamente cinco vezes menor que a deformação da mistura com agregado granítico. Outro parâmetro analisado foi o *Flow Number*, que se elevou cerca de dezessete vezes ao se alterar o agregado de granítico para basáltico, ou seja, elevando-se a textura superficial das partículas. Essas misturas, entretanto, apresentavam variação com relação ao teor de projeto de ligante asfáltico, fator que deve ter influenciado essa alta diferença, além da textura superficial dos agregados, pois a média do teor de projeto de ligante para as misturas asfálticas produzidas com agregado granítico foi de 5,4%, enquanto o valor para as misturas compostas por agregado basáltico foi de 4,6%.

Pazos (2015) utilizou três tipos de agregados para analisar o efeito de suas propriedades morfológicas no comportamento mecânico de seis misturas asfálticas, sendo estes uma brita cúbica, uma brita lamelar e um seixo rolado. Para caracterizar os agregados com relação às propriedades de forma, o autor tanto utilizou ensaios tradicionais adotados pelo Superpave como fez uso do AIMS. Foram determinadas correlações mais fortes dos resultados de *Flow Number* das misturas asfálticas com as propriedades de agregados medidas com o uso do AIMS se comparadas com aquelas obtidas por meio de métodos convencionais, com exceção da angularidade de agregados miúdos. Outra conclusão desse trabalho foi o fato de que a resistência de misturas asfálticas ao dano apresentou melhores correlações com as propriedades dos agregados graúdos se comparadas às propriedades dos agregados miúdos. O autor ressaltou que a textura superficial dos agregados deveria ser considerada em especificações técnicas, pois essa propriedade mostrou forte influência ($R^2 = 0,84$) nos resultados de *Flow Number* de misturas asfálticas avaliadas. O parâmetro de angularidade do agregado graúdo medido com o AIMS apresentou R^2 de 0,84 com o *Flow Number*, enquanto a esfericidade apresentou um R^2 consideravelmente mais baixo, de 0,30.

2.4 Britagem das partículas

O processo produtivo de agregados possui três etapas principais: (i) lavra, na qual é realizado o desmonte do maciço rochoso, seguido do transporte de material até a usina de beneficiamento; (b) beneficiamento, que neste caso é feito por meio da cominuição e do peneiramento e (c) estocagem e embarque (CAVALCANTI; PARAHYBA, 2012). Será tratada, neste trabalho, apenas a etapa do beneficiamento e, mais especificamente, a fragmentação, ou britagem, das partículas com o uso de britadores.

A cominuição pode ser definida como o processo de redução das dimensões das partículas minerais, realizado de forma controlada, de maneira a se gerar produtos com

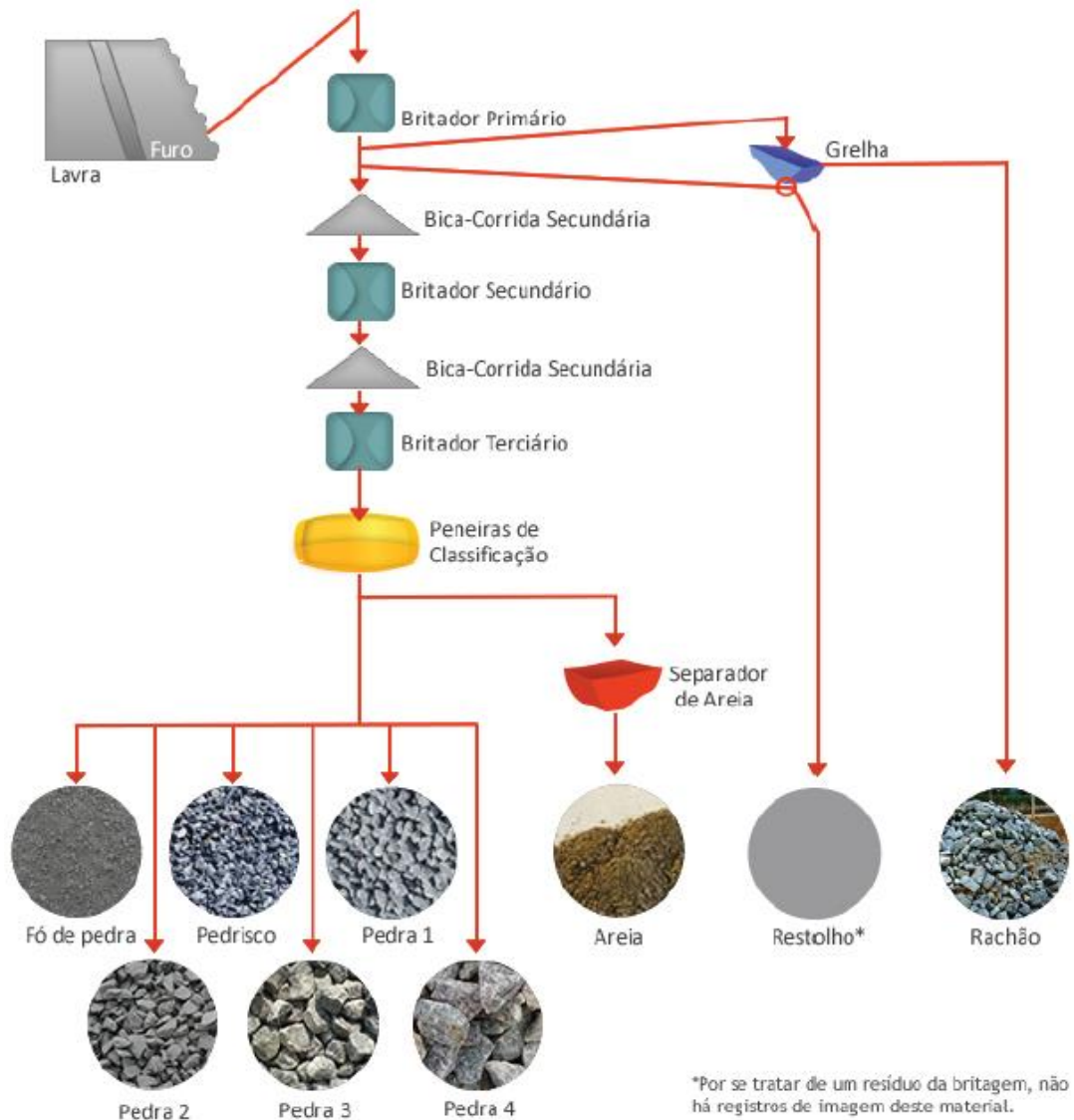
propriedades previamente estabelecidas, como o tamanho das partículas e a quantidade de finos. Esse conjunto de operações tem diversas finalidades: facilitar ou tornar possível o manuseio do material proveniente da mineração; possibilitar o transporte contínuo por meio de correias, que é mais conveniente do que, por exemplo, por meio de caminhões e proporcionar ao material dimensões apropriadas à sua futura aplicação, entre outras (CHAVES; PERES, 2012).

As duas operações que podem compor a cominuição são a britagem e a moagem, que se diferenciam pelos mecanismos de fragmentação utilizados e pelas dimensões do material em questão. Enquanto a britagem é empregada para produzir partículas maiores (de 30cm a 0,8mm, aproximadamente) e é realizada principalmente por compressão ou por impacto, a moagem é limitada a partículas mais finas (menores do que 4mm, aproximadamente) e provoca nos grãos, principalmente, a quebra de suas arestas e a abrasão. Na Figura 5 é representado um esquema geral do processo de britagem.

Vale ressaltar que, muitas vezes, as denominações dos materiais são utilizadas de maneira diferente, variando entre pedreiras. As definições dos produtos mostrados no diagrama, de acordo com a Hagemann (2011) são:

- (a) Pó de pedra: material fino, de graduação entre 0 e 4,8mm, e chega a ter 28% de material inferior a 0,075mm;
- (b) Pedrisco: ou brita 0, possui grãos variando de 4,8 a 9,5mm;
- (c) Pedra 1: ou brita 1, possui grãos variando de 9,5 a 19,0mm;
- (d) Pedra 2: ou brita 2, possui grãos variando de 19,0 a 25,0mm;
- (e) Pedra 3: ou brita 3, possui grãos variando de 25,0 a 50,0mm;
- (f) Pedra 4: ou brita 4, possui grãos variando de 50,0 a 76,0mm;
- (g) Areia de britagem: obtida a partir dos finos produzidos durante a britagem, com graduação de 0,15 a 4,8mm;
- (h) Restolho: material granular retirado do produto do britador primário, podendo conter uma parcela de solo;
- (i) Rachão: ou pedra de mão, material que passa pelo britador primário e é retirado na peneira de 76mm.
- (j) Bica corrida ou brita corrida: material no estado que sai do britador, de graduação na faixa de 0 a 300mm, se for primária, ou na faixa de 0 a 76mm, se for secundária.

Figura 5 – Diagrama esquemático geral de um processo de britagem



Bauer (2008 *apud* HAGEMANN, 2011)

A escolha do tipo de britador utilizado para cada estágio de britagem baseia-se, de acordo com Bern (1997), no tamanho máximo de alimentação do material, na capacidade do equipamento, no investimento necessário, no custo de desgaste, na granulometria desejada e no formato de partícula solicitado.

2.4.1 Tipos de britadores utilizados na RMF

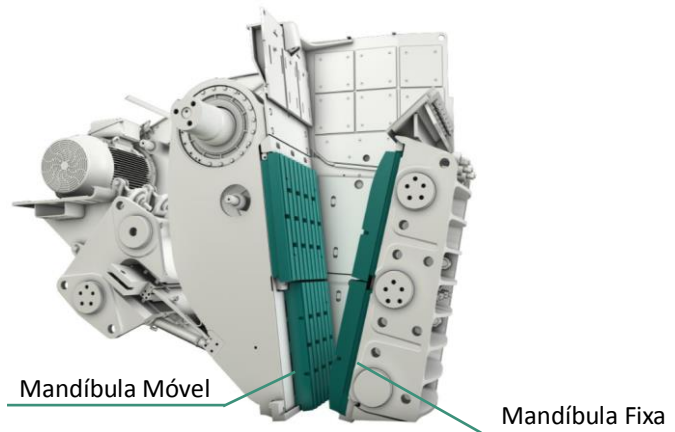
Existe, no mercado atual, uma enorme quantidade de tipos de britadores. Contudo, alguns são bem mais utilizados e merecem ser destacados. Esses tipos considerados mais importantes são divididos em quatro famílias: britadores de mandíbulas; britadores giratórios,

que podem ser giratórios propriamente ditos, cônicos ou *short head*; britadores de impacto, que incluem os de eixo horizontal, os de eixo vertical e os moinhos de martelo e, finalmente, britadores especiais, que incluem o Bradford e os britadores para carvão e minerais moles. Serão detalhadas, com base em Wills e Napier-Munn (2006) e Chaves e Peres (2012), somente as famílias de britadores que abrangem os tipos de equipamentos utilizados pelas pedreiras localizadas na RMF: britadores de mandíbulas e britadores giratórios.

2.4.1.1 Britadores de mandíbulas

O britador de mandíbulas, mostrado na Figura 6, funciona com uma mandíbula (placa metálica) móvel que se move aproximando-se e afastando-se de uma mandíbula fixa. As partículas a serem fragmentadas são inseridas entre as duas mandíbulas e esmagadas no momento da aproximação entre elas, caindo até uma posição em que fiquem presas e sejam novamente esmagadas pelo próximo movimento de aproximação das mandíbulas. Este tipo de britador trabalha, portanto, pela compressão dos fragmentos.

Figura 6 – Britador de mandíbulas



Fonte: METSO (2015).

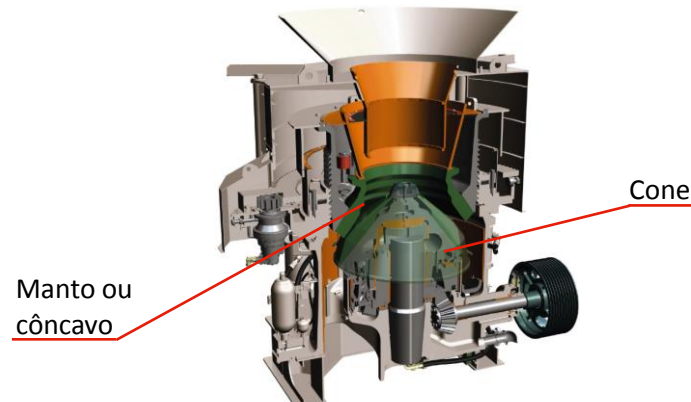
O britador de mandíbulas pode ser de um ou de dois eixos, possuindo este último apenas o movimento de abrir-fechar, enquanto a mandíbula móvel do britador de um eixo executa também um movimento circular, cuja componente ao longo do plano da mandíbula propicia o surgimento de forças de atrito desta com as partículas. Essas forças são responsáveis por um maior desgaste das mandíbulas neste tipo de britador, não sendo este indicado para uso em material abrasivo.

2.4.1.2 Britadores giratórios

Os britadores da família dos giratórios possuem um elemento fixo, o manto ou o côncavo, e um elemento móvel, o cone. O cone move-se em um movimento excêntrico, girando em torno de um eixo diferente do seu, logo, aproximando-se e afastando-se das paredes do manto. Em geral, esses equipamentos trabalham da mesma maneira que os britadores de mandíbulas, comprimindo as partículas, mas apresentam algumas diferenças que serão descritas a seguir.

Dentro da família dos britadores giratórios, estão o britador cônico, mostrado na Figura 7, o britador giratório propriamente dito e o *short head*, que se diferenciam principalmente pela relação entre a altura do cone e o diâmetro da sua base. Em comparação ao britador de mandíbula, nos britadores da família dos giratórios a fragmentação acontece em um maior volume, resultando em uma maior capacidade do equipamento. Além disso, esse tipo de britador pode trabalhar com a câmara de britagem cheia, enquanto, no britador de mandíbulas, caso a vazão com que ele é alimentado exceda um determinado valor crítico, sua capacidade de vazão de saída torna-se mínima, a não ser que se trate de um britador projetado com mandíbulas curvas. Por outro lado, os britadores de mandíbulas proporcionam, geralmente, maiores graus de redução às partículas. O Grau de Redução (GR), ou relação de redução, é definido por Valadão e Araújo (2007 *apud* CARVALHO, 2012) como a razão entre o maior tamanho de fragmento presente na alimentação e o maior tamanho de fragmento presente no material que sai do equipamento, sendo o termo maior tamanho considerado o correspondente à malha pela qual passam 80% das partículas. Outras definições de GR são também utilizadas, por exemplo, baseadas no tamanho médio (determinado a partir da composição granulométrica) dos materiais de alimentação e de saída.

Figura 7 – Britador cônico



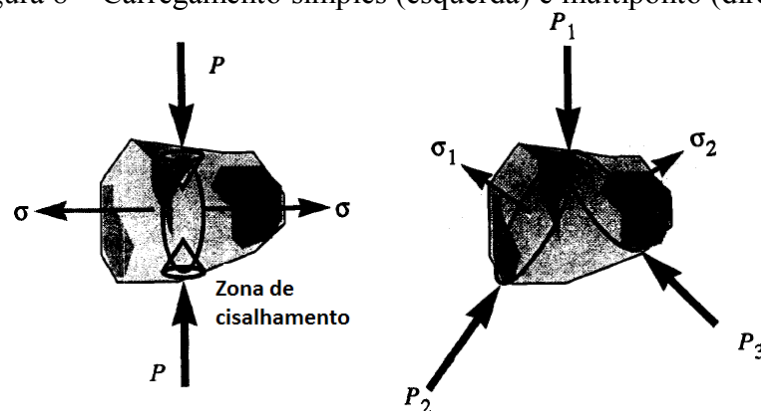
Fonte: METSO (2015).

2.4.2 Influência da britagem nas propriedades de forma das partículas

Os minerais são materiais cristalinos cuja estrutura é formada por arranjos tridimensionais de átomos que, ao sofrerem forças externas, fragmentam-se no momento em que se rompem todas as ligações interatômicas de um determinado plano. A forma como ocorre o fenômeno da fragmentação de uma partícula de rocha depende não somente da intensidade e da distribuição da força externa que esta recebe, mas, também, da sua estrutura interna, a qual é heterogênea, e das falhas pré-existent, fatores que fazem com que as pressões internas não sejam igualmente distribuídas (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

Durante o processo de britagem por compressão, cada fragmento de rocha sofre um carregamento que causará sua ruptura. Segundo Briggs e Evertsson (1998), o carregamento que cada partícula sofre durante o processo de britagem está diretamente relacionado à maneira como elas tenderão a se quebrar. No chamado carregamento simples, a partícula é forçada por apenas dois pontos de contato, em faces opostas, sofrendo compressão nesses pontos, e uma zona de cisalhamento é gerada à medida que as cargas aumentam. Normalmente, nesse caso, o fragmento parte-se em dois novos, com tamanhos semelhantes. O segundo tipo é o carregamento multiponto, no qual a partícula é submetida a mais de dois pontos de carga, distribuídos em sua superfície, de maneira que não surge um campo de tensões localizado. Esse caso tende a resultar em um fragmento maior, e em outros menores arrancados dos pontos de carregamento. Os dois tipos de carregamento descritos estão representados na Figura 8.

Figura 8 – Carregamento simples (esquerda) e multiponto (direita)



Fonte: Adaptado de Briggs e Evertsson (1998).

Briggs e Evertsson (1998) analisaram a forma de partículas geradas a partir dessas duas situações (Figura 8), utilizando um aparelho construído para simular os dois casos e para

avaliar os GR que ambos proporcionam. Os autores concluíram que um processo de britagem realizado em condições de carregamento simples possibilita um maior GR das partículas, entretanto, confere-as uma forma menos cúbica. Já o carregamento multiponto gera fragmentos mais cúbicos, porém, com uma menor relação de redução. A escolha da forma de carregamento utilizada depende, portanto, dos objetivos do processo de britagem.

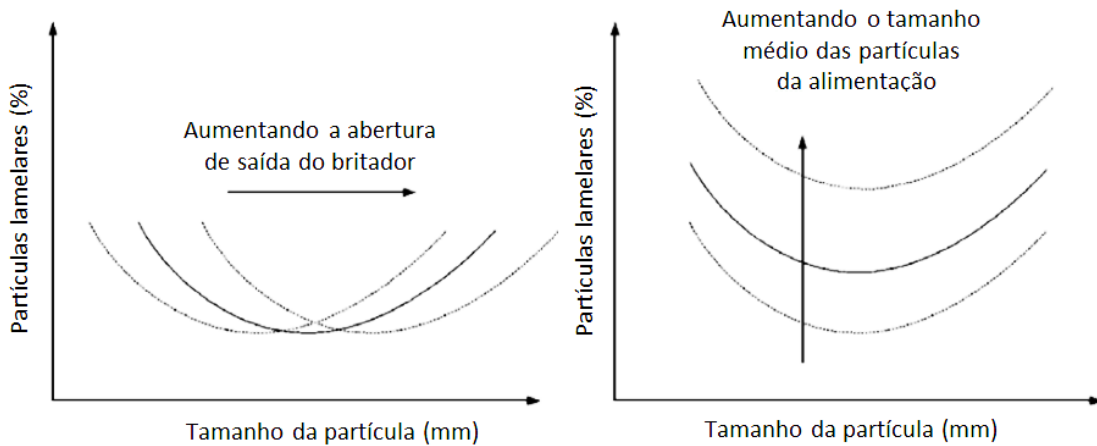
Segundo Briggs e Evertsson (1998) e Chaves e Peres (2012), operar um britador com a câmara cheia favorece o trabalho interparticular, gerando, assim, carregamentos multipontos nas partículas do material. O britador de mandíbulas, como foi mostrado anteriormente, possui um limite para a vazão de alimentação, logo, esse tipo de britador geralmente não trabalha com câmara cheia. Dessa forma, esse equipamento tende a submeter os fragmentos de rocha a carregamentos uniaxiais (simples). Tavares e Neves (2008), a partir da análise de amostras de agregados oriundos de diferentes processos, observaram que partículas geradas por carregamentos uniaxiais apresentaram-se mais alongadas se comparadas àquelas geradas por britadores cônicos.

Unland e Szczelina (2004) simularam o processo de britagem que ocorre na zona de processamento de um britador para analisar propriedades como: probabilidade de quebra, trabalho do britador em relação à massa das partículas, distribuição dos tamanhos dos fragmentos gerados e formato das partículas. Para realizar essa simulação, os autores utilizaram um equipamento que impõe um deslocamento de compressão pré-determinado ao material (uma ou mais partículas de rocha) e concluíram que um maior deslocamento do aparelho provoca a geração de uma maior quantidade de partículas alongadas. Além disso, esses autores constataram que a porcentagem de partículas alongadas é superior para os fragmentos de menor tamanho, se comparados aos fragmentos graúdos.

Bengtsson e Evertsson (2006) sugeriram um modelo empírico para prever a lamelaridade de agregados gerados por um britador cônico, a partir de dois parâmetros: o tamanho médio do material de alimentação e a abertura da saída do britador. Para isso, os autores analisaram a lamelaridade de quatorze amostras de agregados produzidos por um processo composto por três estágios, em que o último era realizado por um britador cônico. Foram retiradas amostras ao longo de um dia, com intervalos de uma hora, do material produzido e do material de alimentação, para determinar o tamanho médio dos fragmentos. Com base nos resultados obtidos, foi sugerido um modelo empírico, cuja relação entre a porcentagem de partículas lamelares e o tamanho das partículas em questão é descrita por uma parábola com concavidade para cima. À medida que se aumenta o tamanho médio das partículas na alimentação do britador, eleva-se a lamelaridade do material produzido,

independentemente do seu tamanho. Variando-se a abertura de saída do britador, a curva é movida horizontalmente, de forma que o tamanho das partículas que se apresentam mais cúbicas é mantido próximo do tamanho dessa abertura. Na Figura 9, pode-se visualizar melhor o comportamento geral do modelo.

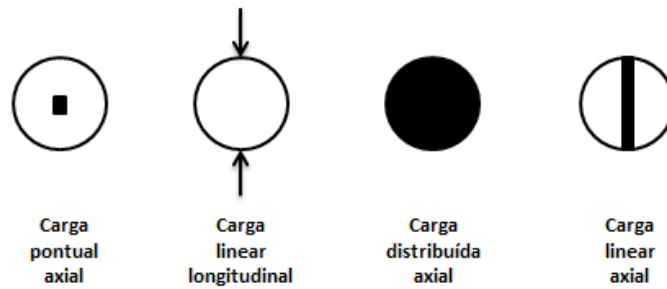
Figura 9 – Relação entre a porcentagem de partículas lamelares e o tamanho das partículas para diferentes parâmetros de britagem



Fonte: Adaptado de Bengtsson e Evertsson (2006).

Guimarães *et al.* (2007) investigaram a geração de finos (partículas menores do que 0,075mm) durante o processo de britagem. Primeiramente, os autores utilizaram corpos de prova cilíndricos de gesso misturado com areia, para simular a existência de diferentes minerais constituintes das rochas e o contraste de rigidez entre esses minerais, e os fragmentaram, comprimindo-os de quatro formas diferentes, conforme a Figura 10: com carga pontual axial, com carga linear longitudinal, com carga distribuída axial e com carga linear axial. Por meio deste ensaio, foi constatado que a porcentagem de partículas finas eleva-se conforme a área de contato de compressão é aumentada. Os autores realizaram, também, uma análise da forma dos agregados miúdos gerados ao comprimir axialmente uma amostra de areia contida em uma caixa, variando o grau de adensamento, ou empacotamento, da amostra inicial, por meio da aplicação de pequenas cargas de compressão antes do início do ensaio. Foi concluído, a partir de uma análise das partículas miúdas geradas com o uso de microscópio óptico digitalizador, que a esfericidade aumenta à medida que se eleva o grau de empacotamento da amostra inicial. Além disso, foi observado que esse parâmetro é menor para partículas de menor tamanho.

Figura 10 – Tipos de carregamento aplicados nos corpos-de-prova



Fonte: Adaptado de Guimarães *et al.* (2007).

Bessa (2012) analisou as propriedades de forma de agregados produzidos por três pedreiras da RMF. A forma e a angularidade dos materiais mostraram-se, em geral, bastante semelhantes, independentemente da sua origem, o que foi atribuído ao fato de os processos de britagem das três pedreiras serem semelhantes. Já a textura superficial apresentou uma grande variação entre os agregados avaliados, explicada pela diferença entre os tipos de rochas exploradas em cada pedreira (granítica, gnáissica e fonolítica). O autor percebeu uma tendência de aumento no parâmetro de angularidade e de redução na textura à medida que se diminui o tamanho das partículas. Além disso, foram obtidos elevados valores de Coeficiente de Variação (CV), principalmente para a textura (chegando 70,9% para uma fração isolada) fato que foi atribuído à aleatoriedade da posição de cada partícula no momento da análise juntamente à heterogeneidade da superfície das partículas.

Uma das conclusões de Alves (2014), em seus estudos sobre a resistência à degradação mecânica de agregados provenientes da região metropolitana do Rio de Janeiro, por meio da utilização do AIMS, foi que as partículas de tamanho menor que 4,8mm apresentam um comportamento diferente das partículas de graduação maior com relação à angularidade, sendo as primeiras bem mais angulares. Esse fato foi justificado pelo autor pela maneira como os grãos menores são gerados, isto é, as partículas menores são formadas pela quebra dos ângulos das partículas maiores e, por isso, apresentam maior angularidade. A questão da influência de diferentes processos de britagem nas propriedades de forma das partículas não foi investigada pelo citado autor, pois este utilizou materiais provenientes de duas pedreiras com processos de britagem bastante parecidos e não obteve informações sobre o beneficiamento realizado na terceira pedreira.

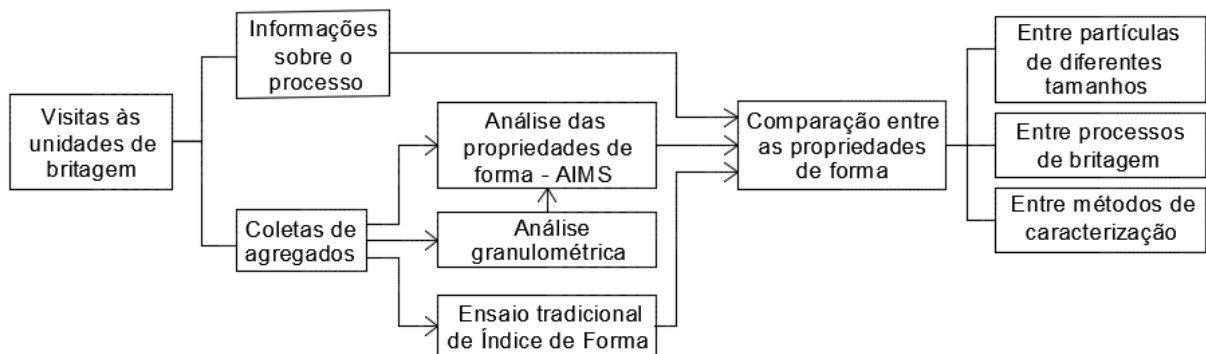
O Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC) vem realizando diversas pesquisas para contribuir na caracterização de materiais minerais para a composição de misturas asfálticas e na análise do comportamento destas.

Iniciou-se a utilização do PDI, no LMP, em 2009, com uma análise das propriedades de forma de agregados convencionais (brita granítica) e alternativos (escórias de aciaria). Realizaram-se estudos sobre a influência do método de compactação e da natureza dos agregados na estrutura interna de misturas asfálticas; sobre o processo de produção de agregados e sobre a resistência ao polimento e à degradação de agregados naturais e de escória de aciaria utilizando o ensaio de abrasão Los Angeles, todos com o uso do equipamento AIMS. Foram analisadas, também, a utilização do PDI para caracterização de material fresado; a influência do tamanho nas propriedades de forma dos agregados; a influência das propriedades de forma dos agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas e a textura de misturas asfálticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma visão geral da metodologia utilizada para a realização do presente trabalho é apresentada na Figura 11. Foram utilizados, para o desenvolvimento deste trabalho, agregados provenientes de três pedreiras distintas, localizadas na RMF. As pedreiras foram escolhidas com base em informações documentadas sobre seus processos de britagem, retiradas de Cavalcanti e Parahyba (2012) e Costa *et al.* (2014), de forma a buscar os processos que mais se distinguíssem entre si. Apesar de os tipos de britadores utilizados nas unidades de britagem da RMF serem, em geral, os mesmos (britador de mandíbulas no primeiro ou nos dois primeiros estágios e britador cônico a partir do segundo ou do terceiro estágio de britagem), verificam-se diferenças importantes nos parâmetros desses equipamentos e na quantidade de estágios de britagem realizados nas unidades selecionadas, conforme será descrito a seguir.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia do presente trabalho



Fonte: Próprio autor (2015).

As pedreiras escolhidas para a realização do estudo foram codificadas em 1, 2 e 3, para manter o sigilo das empresas, e localizam-se nos municípios de Itaitinga, Caucaia e Maracanaú, respectivamente. Foram feitos inicialmente contatos telefônicos com os representantes das empresas a fim de informar sobre o trabalho a ser realizado e solicitar permissão para executar as visitas e as coletas de material. Todas as amostras coletadas nas 3 pedreiras foram de, no mínimo, 12kg, e os materiais foram armazenados em sacos plásticos resistentes e com identificação.

3.1 Visitas às unidades de britagem e coletas de agregados

A cada uma das três pedreiras escolhidas foi realizada uma visita com o intuito de caracterizar o processo de britagem, coletando informações sobre: tipo de rocha do maciço, equipamentos utilizados, etapas de britagem, produtos gerados, mercado atingido, controle de qualidade do material, entre outras. Além das informações anotadas, baseadas no formulário apresentado no Apêndice A, foram feitos registros fotográficos dos locais e foram coletadas amostras de material para posterior análise. Decidiu-se por coletar amostras de agregado graúdo (brita 3/4”) e de agregado miúdo (pó de pedra ou areia de britagem) em cada pedreira, com base nos materiais que estavam sendo produzidos no momento de cada visita. A seguir, serão apresentadas as informações, as imagens e os fluxogramas das sequências de britagem de cada pedreira visitada. Vale ressaltar que os processos podem sofrer algumas variações para atender a diferentes demandas de clientes. Essas modificações se dão, principalmente, nas aberturas de saída dos britadores e nas grelhas e nas peneiras utilizadas.

3.1.1 Pedreira 1

Na Pedreira 1, explora-se um maciço rochoso granítico e, assim como as outras duas, essa pedreira tem seus produtos vendidos normalmente para concreteiras, indústrias de pré-moldado, construtoras e empresas do ramo da pavimentação. Seu processo de britagem é composto por dois estágios.

O primeiro estágio é realizado por um britador de mandíbulas Furlan, modelo JC 1200, cujas dimensões da boca de entrada são 120×80cm e cuja Abertura de saída na Posição Fechada (APF), isto é, o menor tamanho da saída do britador durante o movimento de abrir e fechar da mandíbula móvel, é de aproximadamente 20cm. O equipamento recebe os fragmentos de rocha oriundos do desmonte do maciço rochoso e, após a britagem, os conduz a grelhas que separam o material em: maior que 76mm, que segue para a pilha do produto pedra de alvenaria; entre 76mm e 20mm, que segue para a pilha pulmão secundária, ou seja, pilha de material a ser conduzido para o britador secundário, e menor que 20mm, que segue para a pilha do produto chamado pó preto, com grande quantidade de finos. O transporte do material entre os dois estágios de britagem é feito por correias transportadoras.

O material segue da pilha pulmão para a britagem secundária, na qual se utiliza um britador cônico Metso, modelo HP 200, que opera com APF normalmente de 25 ou 19mm, a depender do tamanho da maior brita demandada no momento. Ao sair do equipamento, o material britado é conduzido às peneiras de classificação e, em seguida, as frações são transportadas às pilhas de produtos finais: brita 1", brita 3/4", brita 1/2", brita 3/8", cascalho e pó de pedra. As partículas maiores que a APF retornam ao equipamento para serem rebitadas. Foram coletadas, nessa pedreira, uma amostra de brita 3/4" e uma amostra de pó de pedra. Na Figura 12, são mostradas imagens dos britadores primário e secundário da Pedreira 1.

Figura 12 – Visualização dos estágios de britagem da Pedreira 1



(a) Alimentação do britador primário

(b) Britagem secundária

Fonte: Próprio autor (2015).

3.1.2 Pedreira 2

A Pedreira 2 explora um maciço rochoso do tipo gnáissico e realiza a sequência de cominuição em 3 estágios. O processo começa com um britador de mandíbulas Nordberg com abertura de entrada de 120×130cm e cuja APF mede 20cm. Do britador primário, mostrado na Figura 13, o material segue para grelha com abertura de 50mm, na qual a parte passante é empilhada e classificada como brita corrida com alto percentual de finos e a parte retida segue para a pilha pulmão para ser encaminhada à britagem secundária.

Figura 13 – Britador de mandíbulas da Pedreira 2



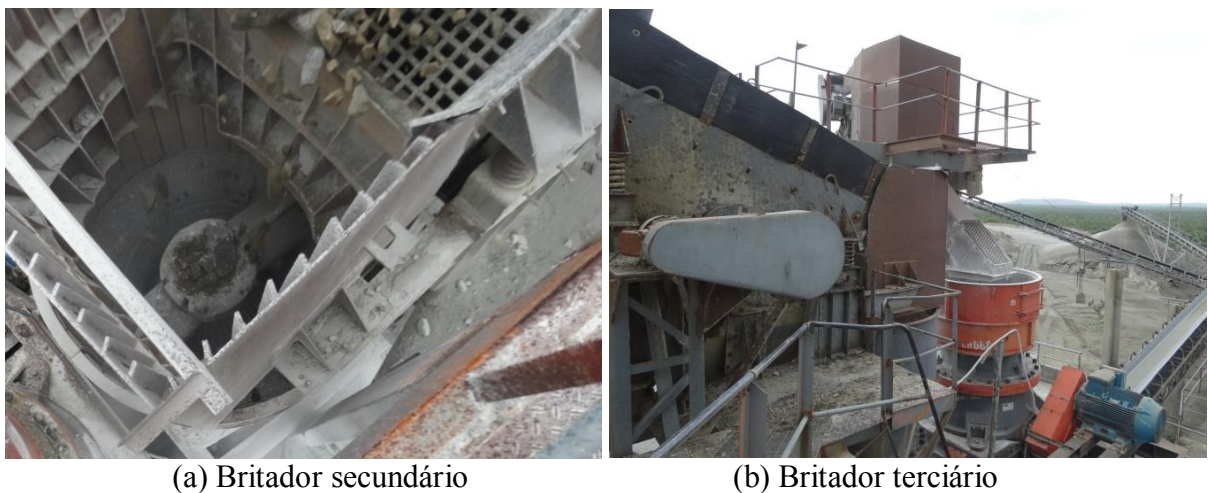
(a) Material de alimentação

(b) Entrada

Fonte: Próprio autor (2015).

O material armazenado na pilha pulmão para o estágio secundário segue para o britador hidrocônico Sandvick S4800, cuja APF varia de 38 a 48mm. Ao sair do equipamento, o material é classificado em um conjunto de peneiras em série, em brita 1", brita ¾", brita ½", brita 3/8" e pó de pedra. A parcela de agregados maior que 25mm segue para a pilha pulmão terciária. Na Figura 14, observa-se uma vista de cima da entrada do britador secundário e uma vista lateral do britador terciário.

Figura 14 – Britadores utilizados nas britagens secundária e terciária da Pedreira 2



(a) Britador secundário

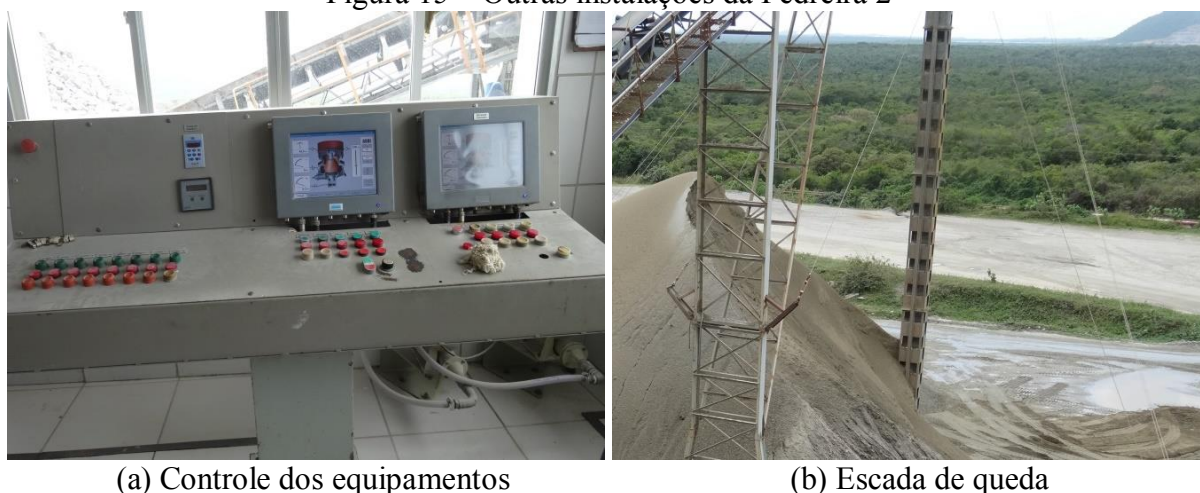
(b) Britador terciário

Fonte: próprio autor (2015).

O terceiro estágio de britagem é realizado por um britador do tipo hidrocone Sandvick modelo CH 660, que recebe o material da pilha pulmão terciária e fragmenta as partículas, as quais saem por APF de no mínimo 18mm. O material passante na peneira de

19mm segue para o conjunto de peneiras em série, para ser classificado e, em seguida, empilhado, enquanto o material retido retorna ao britador terciário para ser rebitado. Esteiras, britadores, peneiras e grelhas vibratórias, nessa pedreira, são controlados por meio de um painel, por meio do qual os britadores hidrocônicos podem inclusive ter parâmetros, como a APF, alterados de forma automática. Uma particularidade dessa pedreira é a utilização de uma espécie de escada na chegada do material nas esteiras para formação de pilhas, com o objetivo de suavizar sua queda e evitar, assim, a quebra de arestas das partículas, o que poderia provocar alterações tanto na granulometria como na forma e na angularidade dos produtos. Ao final da visita, foram coletadas duas amostras: uma de brita $\frac{3}{4}$ " e uma de pó de pedra. Na Figura 15, são apresentadas imagens do controle dos equipamentos e da escada de queda do material.

Figura 15 – Outras instalações da Pedreira 2



Fonte: Próprio autor (2015).

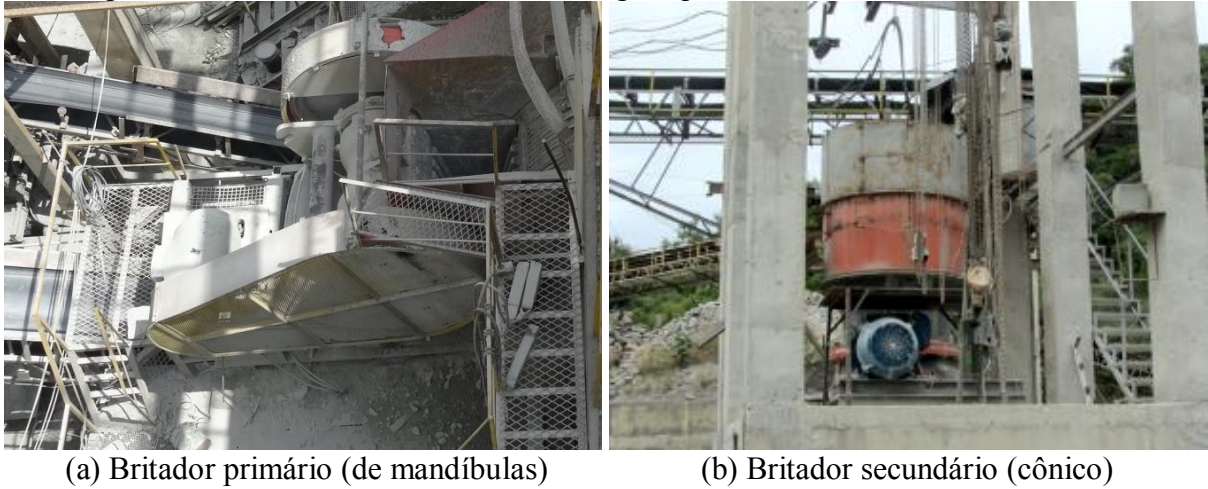
A Pedreira 2 adquiriu recentemente um britador de impacto vertical e pretende realizar a instalação do equipamento até o final do ano de 2015. O equipamento deverá ser alocado ao final do processo para ser utilizado, principalmente, na produção de areia de britagem, com o intuito de melhorar o formato das partículas de agregado miúdo produzidas, isto é, torná-las mais esféricas para clientes que exigem essa característica. Além disso, esse tipo de britador trabalha lançando rocha contra rocha, o que diminui o desgaste do equipamento e provoca a fragmentação das partículas nas zonas frágeis já existentes. O equipamento pode ter sua velocidade de rotação regulada para variar o mecanismo de redução (abrasão, atrito, clivagem e impacto), alterando, também, o GR proporcionado ao material.

3.1.3 Pedreira 3

Na Pedreira 3, é explorado um maciço rochoso do tipo granítico e é realizado um processo de britagem dividido em 4 estágios. No primeiro estágio de britagem, são utilizados, em paralelo, dois britadores de mandíbulas Furlan modelo 12080 em cotas diferentes, com entrada de 120×80cm, com o objetivo de reduzir as distâncias percorridas em aclives, diminuindo os custos de transporte. Antes de chegar ao britador primário, mostrado na Figura 16, o material proveniente da lavra passa por trilhos com aberturas de 70mm, que retira parte desses fragmentos mais finos e com maior quantidade de estéreis, ou seja, materiais sem interesse comercial. O material que segue para o britador é triturado, sai por uma APF de 170mm, valor que pode variar, e segue para o processo de classificação com relação ao tamanho. Os fragmentos maiores que 70mm seguem para a pilha pulmão da britagem secundária, enquanto aqueles de tamanho entre 70mm e 19mm seguem direto para pilha de britagem terciária, e aquelas partículas menores que 19mm são empilhadas, já sendo tratadas como produto, chamado de brita corrida com alto percentual de finos. Existe um sistema de aspersão para abatimento da poeira gerada nesse estágio, que pode ser excessiva em períodos mais secos.

O material da pilha pulmão da britagem secundária é encaminhado para britador cônico Sandvik modelo S-440 C que opera geralmente com APF em torno de 90mm, e, após triturado, é transportado para a pilha pulmão do terceiro estágio, de onde segue para alimentar um britador hidrocônico Sandvik modelo CH-430 EC, cuja APF é de 50mm (Figura 17a). O produto desse estágio segue para a classificação em peneiras de aberturas de 25mm, 19mm e 4,8mm: o material maior que 25mm é transportado para a pilha da britagem quaternária; enquanto o material entre 19mm e 25mm segue para classificação como produto final em uma série de peneiras vibratórias (britas 19mm, 16mm, 12,5mm, 9,5mm, 6mm e pó de pedra). A parte menor que 4,8mm segue para o empilhamento, também, como produto final (pó de pedra).

Figura 16 – Britadores utilizados nas britagens primária e secundária da Pedreira 3



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 17 – Britadores utilizados nas britagens terciária e quaternária da Pedreira 3



Fonte: Próprio autor (2015).

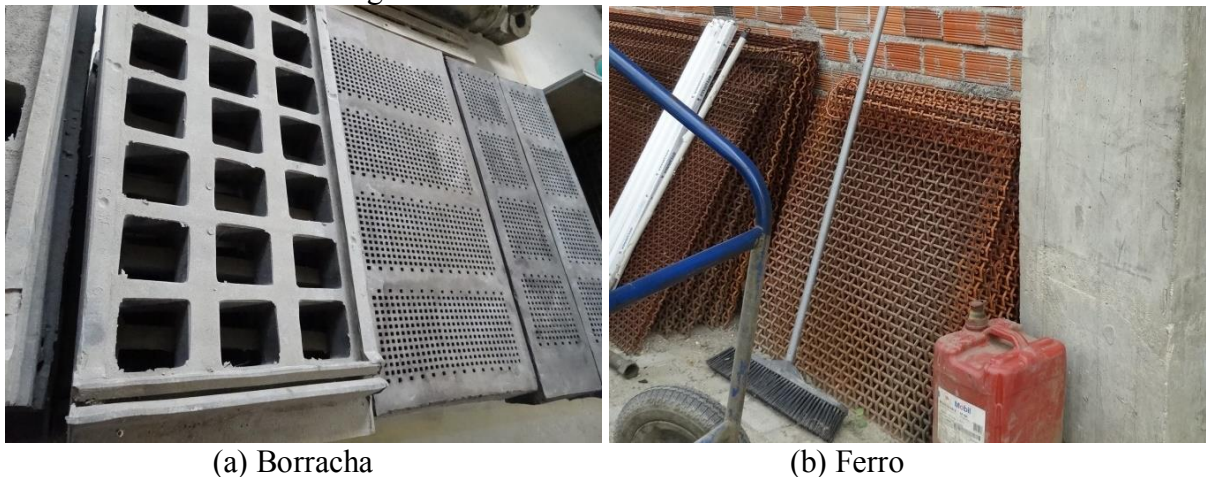
A britagem quaternária é realizada por um britador do tipo hidrocone Sandvik modelo CH-430 MC, mostrado na Figura 17b, cuja APF é normalmente de 25mm. O material triturado segue para classificação, pela qual a parte maior que 19mm retorna para a britagem quaternária, a parte menor que 19mm e maior que 12,5mm é empilhada como produto final, a parte menor que 12,5mm e maior que 3,8mm segue para classificação na série de peneiras vibratórias descrita anteriormente e, por fim, a parte menor que 3,8mm segue para empilhamento e é classificado como areia de britagem.

Nas britagens terciária e quaternária, existe um sistema de controle aprimorado da alimentação do material, realizado por meio da velocidade do motor da calha vibratória, de forma a garantir que os britadores trabalhem sempre com câmara cheia, possibilitando que a

fragmentação ocorra de maneira interparticular (cargas multiponto). Na britagem quaternária, especificamente, a técnica de britagem rocha contra rocha atinge o ponto máximo.

Nessa pedreira, as telas de ferro estão sendo substituídas por telas de borracha. Estas, apesar de apresentarem a desvantagem de perder área útil à medida que se reduzem as aberturas, como se pode perceber na Figura 18, reduzem significativamente o ruído, apresentam maior praticidade de encaixe e de desencaixe e possuem uma maior vida útil. Na Pedreira 3, foram coletadas quatro amostras de agregados: brita $\frac{3}{4}$ " proveniente dos britadores terciário e quaternário; brita $\frac{3}{4}$ " proveniente exclusivamente do britador quaternário; areia de britagem e brita corrida com grande quantidade de finos.

Figura 18 – Telas utilizadas na Pedreira 3



(a) Borracha

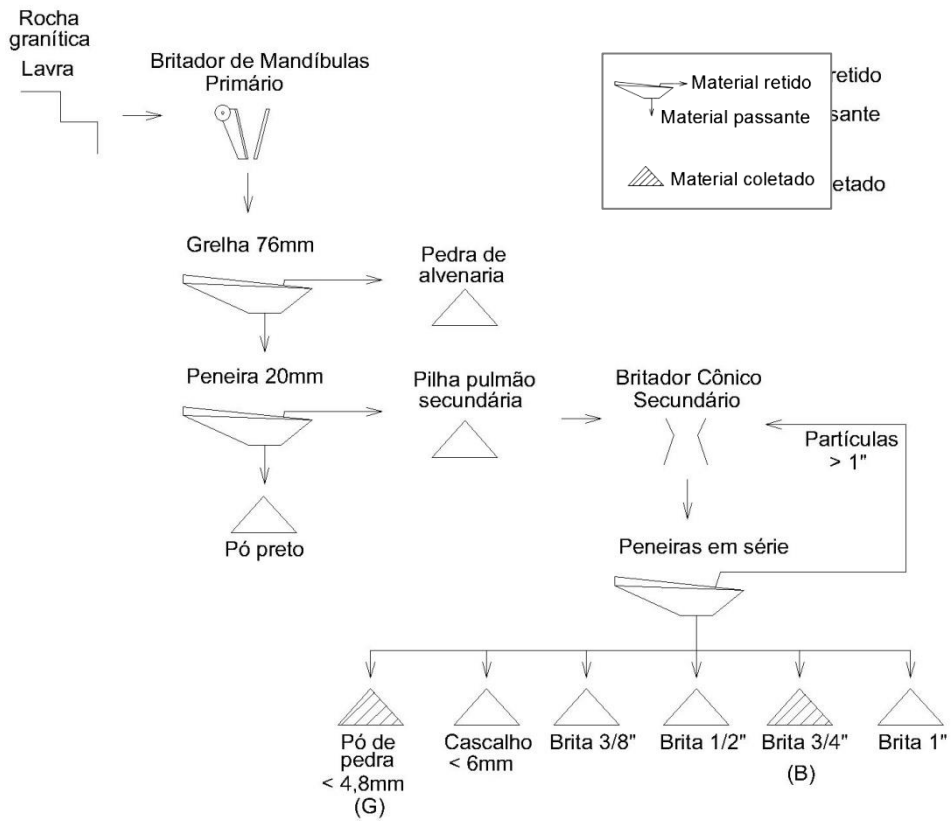
(b) Ferro

Fonte: Próprio autor (2015).

3.2 Fluxogramas representativos dos processos de britagem

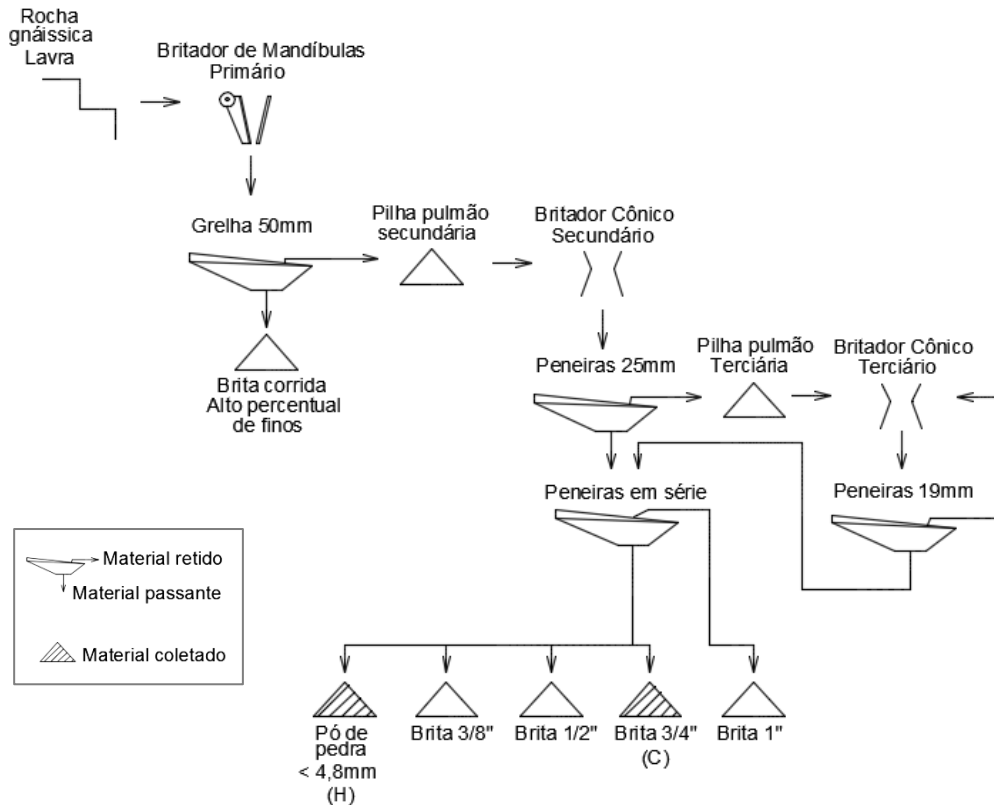
Após a realização das visitas, foram elaborados fluxogramas dos processos de britagem de cada pedreira, os quais serão apresentados a seguir (Figuras 19, 20 e 21). As denominações dos produtos foram utilizadas de acordo com o que é usado nas próprias pedreiras. Encontram-se hachurados, em cada fluxograma, os produtos dos quais foram retiradas as amostras para a análise das propriedades de forma em laboratório. Entre parênteses, em cada um desses materiais coletados, é indicada a denominação utilizada (A a J), que será explicada e utilizada mais adiante, na apresentação dos resultados.

Figura 19 – Fluxograma do processo de britagem da Pedreira 1



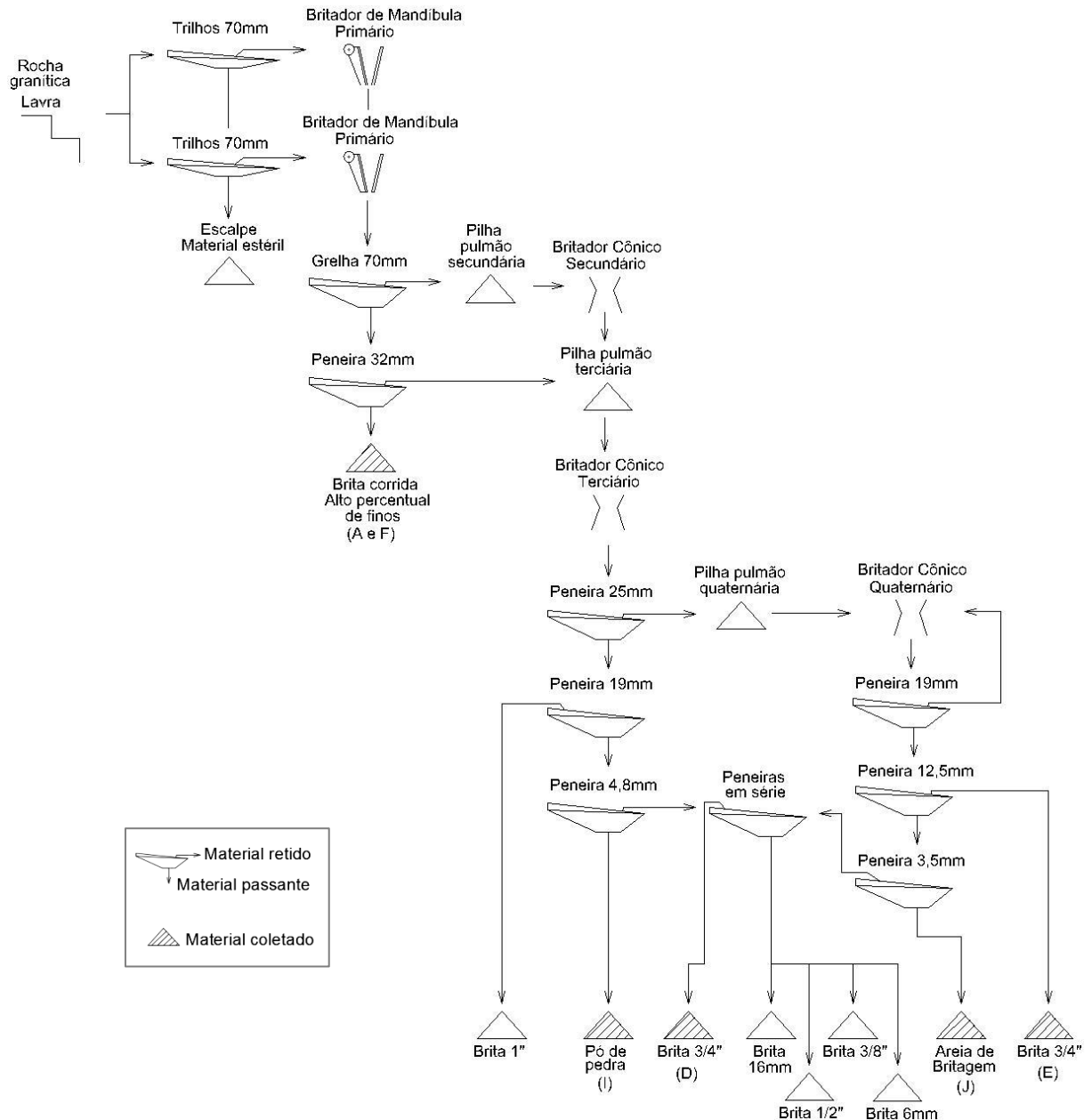
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 20 – Fluxograma do processo de britagem da Pedreira 2



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 21 – Fluxograma do processo de britagem da Pedreira 3



Fonte: Próprio autor (2015).

3.3 Ensaio de granulometria

Realizou-se o ensaio de granulometria para determinar a distribuição, por tamanho, das partículas de cada material e, assim, obter as médias das propriedades analisadas com o uso do AIMS. Foi utilizada a série de peneiras americana, da AASHTO, pois esta é a série adotada para o fracionamento requerido para o uso do AIMS. Na Tabela 1, são apresentados os resultados de granulometria e, na Figura 22, são mostradas as curvas

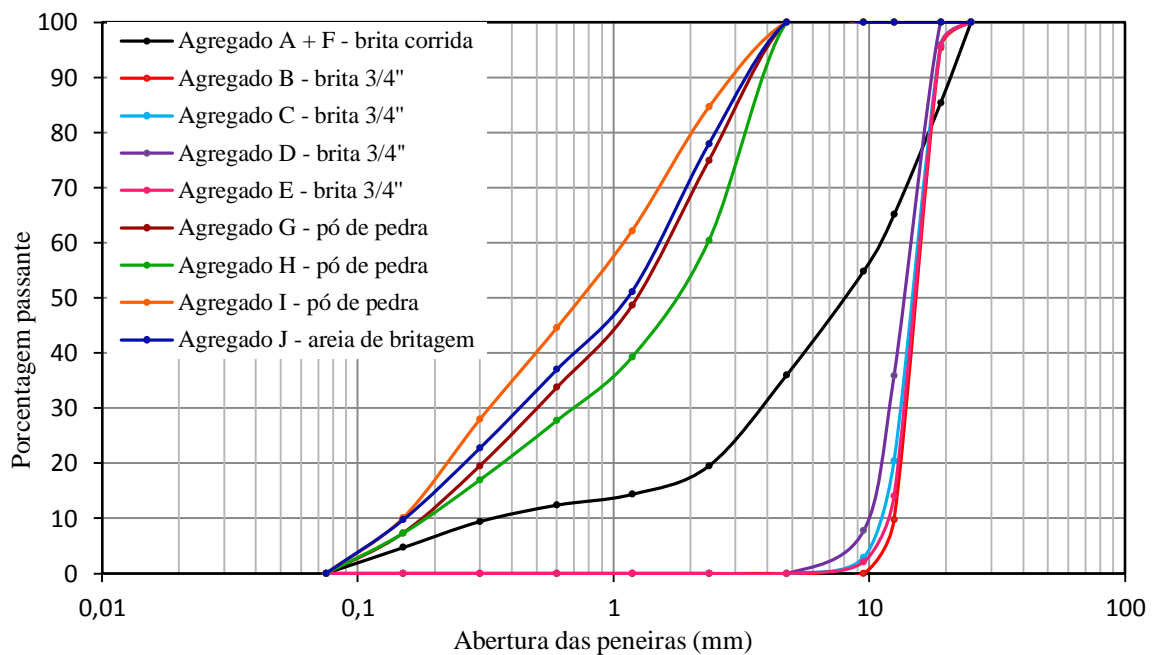
granulométricas. Os agregados denominados de A e F são provenientes do mesmo material, brita corrida com grande quantidade de finos proveniente da Pedreira 1, da qual a parte graúda foi denominada A e a parte miúda foi chamada de F, pois, como alguns parâmetros de agregados graúdos e miúdos são diferentes, esses materiais serão tratados separadamente na apresentação dos resultados.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de granulometria

Peneira (mm)	% passante acumulada								
	A + F	B	C	D	E	G	H	I	J
25	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19	85,31	95,28	95,86	100,00	95,71	100,00	100,00	100,00	100,00
12,5	65,08	9,76	20,40	35,84	14,03	100,00	100,00	100,00	100,00
9,5	54,82	0,00	2,88	7,70	2,07	100,00	100,00	100,00	100,00
4,75	35,96	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2,36	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00	74,93	60,41	84,61	77,94
1,18	14,34	0,00	0,00	0,00	0,00	48,58	39,21	62,15	51,12
0,6	12,39	0,00	0,00	0,00	0,00	33,74	27,72	44,57	36,97
0,3	9,40	0,00	0,00	0,00	0,00	19,52	16,96	27,94	22,72
0,15	4,66	0,00	0,00	0,00	0,00	7,31	7,25	10,03	9,68
0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 22 – Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Próprio autor (2015).

3.4 Ensaio de Índice de Forma

Os agregados graúdos coletados foram caracterizados com relação à forma pelo método da determinação do IF, descrito pela norma DNER-ME 086/94. Define-se em que classe de graduação o material se encaixa, a partir da sua granulometria, e verificam-se quais crivos circulares e redutores deverão ser utilizados. Separa-se a amostra em frações pré-determinadas, com o uso dos crivos circulares, e, em seguida, testa-se o material no primeiro crivo redutor (crivo I), anotando-se o peso da porção que ficou retida. A porção passante, por sua vez, deve ser testada no segundo crivo redutor (crivo II), pesando-se novamente o material retido. Por fim, utiliza-se a Equação 3 para calcular o valor do IF.

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

Onde: f = Índice de Forma; P_1 = somatório das porcentagens retidas no crivo I das frações que compõem a graduação; P_2 = somatório das porcentagens retidas no crivo II das frações que compõem a graduação; n = número de frações que compõem a graduação.

O IF pode variar de 0,0 a 1,0 sendo mais cúbico o agregado quanto mais próximo de 1,0 for o valor do índice. O limite mínimo para aceitação de agregados, segundo o DNIT, para uso em serviços de pavimentação, é de 0,5. A Figura 23 mostra os crivos utilizados nesse ensaio.

Figura 23 – Crivos para a realização do ensaio de Índice de Forma (IF)



(a) circular

(b) redutor

Fonte: Próprio autor (2015).

3.5 Ensaio utilizando o Processamento Digital de Imagens

3.5.1 Procedimento de utilização do AIMS

A análise das propriedades de forma dos agregados feita com o uso do AIMS baseia-se em parâmetros de esfericidade, de angularidade, de textura e de razões de lamelaridade para agregados graúdos, que, para o sistema desse equipamento, são as partículas que ficam retidas na peneira #4 (de abertura 4,75mm). Estes agregados, antes de analisados, devem ser fracionados utilizando uma série de peneiras específica: 25,4mm, 19,0mm, 12,5mm, 9,5mm e 4,75mm. Já para os agregados miúdos, passantes na peneira de 4,75mm (#4) de abertura e retidos na peneira de 0,075mm (#200), os parâmetros analisados são forma 2D e angularidade. Esse material deve ser fracionado utilizando a seguinte série de peneiras: 2,36mm, 1,18mm, 0,60mm, 0,30mm, 0,15mm e 0,075mm. Os parâmetros utilizados serão mais bem descritos a seguir.

Realizado o peneiramento de uma amostra, cada fração deve ser lavada para retirar as partículas restantes menores do que a abertura da peneira e, em seguida, o material deve ser seco em estufa. Feito esse procedimento inicial, pode-se iniciar a utilização do AIMS.

Após ligar o equipamento e iniciar o *software*, as partículas de cada fração devem ser postas em uma bandeja específica para o tamanho da abertura da peneira na qual ficaram retidas. Utilizam-se, no mínimo, 50 partículas de agregado graúdo ou 150 partículas de agregado miúdo, para cada fração. Agregados graúdos devem ser posicionados espaçados de aproximadamente 1cm, enquanto agregados miúdos devem ser polvilhados na bandeja, evitando-se concentrações de partículas, conforme ilustra a Figura 24. Seleciona-se, então, no *software*, o tamanho das partículas da fração que se deseja analisar, além da pasta no computador em que deverão ser salvos os arquivos dos resultados, e inicia-se a análise.

Para agregados graúdos, a bandeja gira uma vez capturando imagens em preto e branco, utilizadas para calcular a angularidade e as duas primeiras dimensões de cada fragmento. Em seguida, a bandeja gira a segunda vez para capturar as alturas das partículas e, uma terceira vez, na qual o equipamento captura imagens em escala de cinza, para analisar a textura. Já para os agregados miúdos, é realizada apenas uma captura das imagens, em preto e branco, a fim de mensurar a forma 2D e a angularidade das partículas, como mostra a Figura 25.

Figura 24 – Posicionamento de agregados na bandeja do AIMS

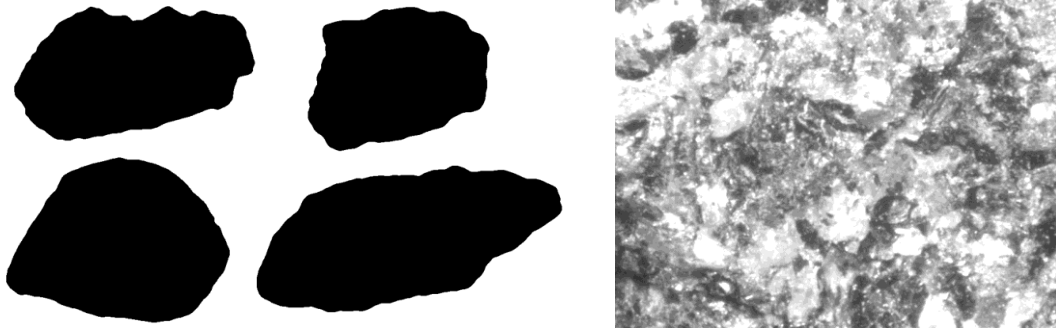


(a) Agregados graúdos

(b) Agregados miúdos

Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 25 – Imagens capturadas pelo AIMS



(a) Imagens em preto e branco

(b) Imagem em escala de cinza

Fonte: Próprio autor (2015).

3.5.2 Parâmetros obtidos por meio do AIMS

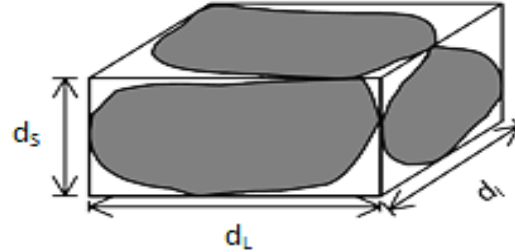
O AIMS calcula cinco diferentes propriedades, como já mencionado, sendo três exclusivamente para agregados graúdos, uma apenas para agregados miúdos e uma para ambos. A seguir, serão descritas essas propriedades, e apresentadas as expressões utilizadas para calculá-las, de acordo com Masad (2005a).

A esfericidade representa as relações entre as 3 dimensões da partícula, ou seja, descreve sua forma tridimensional, conforme apresentado na Figura 26. Seu valor pode variar de 0,0 a 1,0 de maneira que quanto maior for esse parâmetro, mais cúbica é a partícula. Essa propriedade é calculada pela Equação 4 e é utilizada para agregados graúdos.

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{d_s d_l}{d_L^2}} \quad (4)$$

Onde: d_s = menor dimensão; d_i = dimensão intermediária e d_L = maior dimensão da partícula.

Figura 26 – Dimensões de uma partícula



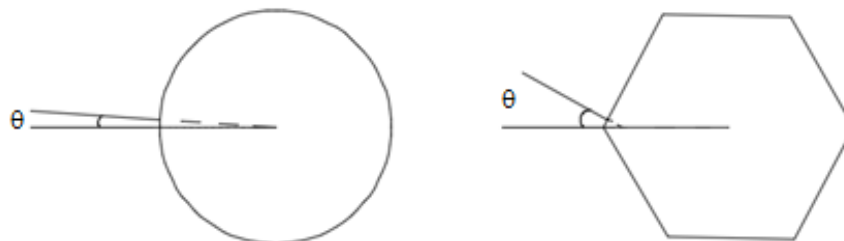
Fonte: Masad *et al.* (2005b).

A angularidade, propriedade utilizada para agregados tanto grãos como miúdos, é medida por meio do método do gradiente, o qual quantifica as alterações de direção existentes ao longo do contorno da partícula, conforme representado na Figura 27. Esse parâmetro, calculado pela Equação 5, pode variar de 0 a 10.000, de forma que quanto menor for seu valor, menos angular deve ser o agregado.

$$Angularidade = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (5)$$

Onde: θ = ângulo de orientação dos pontos do contorno; n = número total de pontos e i = i -ésimo ponto do contorno da partícula.

Figura 27 – Ângulos de orientação dos pontos do contorno da partícula



Fonte: Adaptado de Masad *et al.* (2005b).

A textura superficial, aplicada a agregados grãos, descreve a polidez ou a rugosidade da superfície da partícula e é calculada pelo método das *wavelets*, pelo qual se quantificam as variações nos níveis de *pixels* da imagem (BESSA, 2012). Seu valor varia de 0

a 1.000, sendo mais rugosa a superfície de um agregado à medida que esse número cresce, e é calculado pela Equação 6.

$$Textura\ Superficial_n = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x, y))^2 \quad (6)$$

Onde: n = nível de decomposição da imagem; N = número de coeficientes em uma imagem detalhada; D = função de decomposição; i = direção da textura (1, 2 ou 3); j = índice *wavelet* e x,y = localização dos coeficientes no domínio transformado.

A forma 2D descreve a relação entre as dimensões de agregados miúdos a partir de imagens 2D, variando de 0 a 20. A forma do agregado aproxima-se de um círculo perfeito à medida que o parâmetro de forma 2D diminui, calculado pela Equação 7.

$$Forma\ 2D = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (7)$$

Onde: R_{θ} = raio da partícula no ângulo 0° e $\Delta\theta$ = variação de incremento no ângulo.

São analisadas, também, com o AIMS, o achatamento e o alongamento dos agregados graúdos. O achatamento de uma partícula é obtido pela razão entre a menor dimensão (espessura) e a dimensão intermediária (largura), enquanto o alongamento é a relação entre a dimensão intermediária e a maior dimensão (comprimento). A metodologia Superpave exige que, no máximo, 10% das partículas de um agregado tenham razão de lamelaridade (razão entre a maior e a menor dimensão) acima de 5:1.

3.5.3 Critérios utilizados para a classificação das propriedades de forma

Al Rousan (2004) desenvolveu uma metodologia de classificação de agregados em relação às propriedades de forma obtidas pelo AIMS, a partir de uma grande quantidade de ensaios realizados em materiais de diferentes mineralogias, tamanhos, características de forma, de angularidade e de textura. Esses critérios de classificação, os quais serão utilizados neste trabalho para a análise dos materiais coletados, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios de classificação dos agregados por meio da utilização do AIMS

Propriedade	Valores-limite				
Forma 2D	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Angularidade	< 2.100	2.100 – 4.000	4.000 – 5.400	> 5.400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Esfericidade	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado / Alongado	Baixa Esfericidade	Esfericidade Moderada	Alta Esfericidade	-
Textura Superficial	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Macio	Baixa Rugosidade	Rugosidade moderada	Alta Rugosidade

Fonte: Al Rousan (2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados do ensaio tradicional de IF para agregados graúdos, assim como os resultados de características de forma, de angularidade e de textura obtidos a partir do PDI com a utilização do AIMS, para todas as amostras analisadas. As Figuras 28 e 29 nomeiam as amostras coletadas de agregados graúdos e miúdos, respectivamente, e trazem um resumo dos processos de britagem referentes a cada material, além do GR de cada estágio pelo qual passaram. Como não se possuíam informações sobre a distribuição granulométrica dos materiais de alimentação e de saída de cada britador, o GR de cada estágio de britagem foi calculado pela razão entre a APF do britador anterior ao estágio em questão e a APF do britador do estágio em questão, pois esse parâmetro é um indicador do tamanho das partículas que saem do equipamento para efeitos de comparação entre os processos. No caso dos estágios primários, o GR foi calculado pela razão entre a maior dimensão da abertura de entrada e a APF do britador de mandíbulas.

Figura 28 – Resumo dos processos de britagem dos agregados graúdos coletados

Agregado	Material Pedreira	Processo de britagem				GR	Última APF (mm)			
A	Granito 3	Britador de Mandíbulas 1200×800mm 170mm	Brita corrida 1" com alto % de finos Parte graúda (>4,75mm)		7	170				
B	Granito 1	Britador de Mandíbulas 1200×800mm 200mm	Peneira 76mm Peneira 20mm	Britador Cônico 19mm Brita 3/4"	6 ↓ 4	19				
C	Gnaíse 2	Britador de Mandíbulas 1300×1200mm 200mm	Peneira 50mm	Britador Cônico 43mm	Peneira 25mm	Britador Cônico 18mm	Brita 3/4"	6,5 ↓ 4,6 ↓ 2,4	43; 18	
D	Granito 3	Britador de Mandíbulas 1200×800mm 170mm	Peneira 70mm Peneira 32mm	Britador Cônico 90mm	Britador Cônico 50mm	Peneira 25mm	Britador Cônico* 25mm	Brita 3/4"	7 ↓ 1,9 ↓ 1,8 ↓ 2	50; 25
E	Granito 3	Britador de Mandíbulas 1200×800mm Saída:170mm	Peneira 70mm Peneira 32mm	Britador Cônico 90mm	Britador Cônico 50mm	Peneira 25mm	Britador Cônico* 25mm	Brita 3/4"	7 ↓ 1,9 ↓ 1,8 ↓ 2	25

Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 29 – Resumo dos processos de britagem dos agregados miúdos coletados

Agregado	Material Pedreira	Processo de britagem				GR	Última APF (mm)		
F	Granito 3	Britador de Mandíbulas 1200×800mm 170mm	Brita corrida 1" com alto % de finos Parte fina (<4,75mm)			7	170		
G	Granito 1	Britador de Mandíbulas 1200×800mm 200mm	Peneira 76mm Peneira 20mm	Britador Cônico 19mm	Pó de pedra		6 ↓ 4	19	
H	Gnaíse 2	Britador de Mandíbulas 1300×1200mm 200mm	Peneira 50mm	Britador Cônico 43mm	Peneira 25mm Britador Cônico 18mm	Pó de pedra		6,5 ↓ 4,6 ↓ 2,4	43; 18
I	Granito 3	Britador de Mandíbulas 1200×800mm 170mm	Peneira 70mm Peneira 32mm	Britador Cônico 90mm	Britador Cônico 50mm	Pó de pedra		7 ↓ 1,9 ↓ 1,8	50
J	Granito 3	Britador de Mandíbulas 1200×800mm Saída: 170mm	Peneira 70mm Peneira 32mm	Britador Cônico 90mm	Britador Cônico 50mm	Peneira 25mm Britador Cônico* 25mm	Brita 3/4"	7 ↓ 1,9 ↓ 1,8 ↓ 2	25

Fonte: Próprio autor (2015).

Vale ressaltar, como se pode observar pelas Figuras 28 e 29, que a composição de um agregado pode conter partículas que não passaram por todos os estágios de britagem. Por exemplo, para o agregado D, uma parte do material não passou pelo segundo britador, e uma parte não passou pelo quarto britador. Não são conhecidas, entretanto, as porcentagens de material que passam pelos diferentes estágios. É importante observar, também, a relação entre a APF do último britador pelo qual o material passou e o tamanho das partículas do produto. Os agregados D e E, por exemplo, apesar de terem sido submetidos aos mesmos GR, diferenciam-se quanto a esse parâmetro, pois do agregado D, uma parte do material saiu, ao fim do processo, por uma APF de 50mm e outra parte saiu por APF de 25mm. Já do agregado E, todo o material saiu ao final do processo por APF de 25mm (Figura 28).

A denominação dos agregados foi escolhida com base no número de estágios do processo de britagem, fator que impacta nos graus de redução a que as partículas são submetidas em cada britador. Enquanto o agregado A passou por um britador, o agregado E

passou por quatro. Destaca-se, além disso, que o agregado A diferencia-se dos demais materiais por outro fator: ele é retirado diretamente do material que sai do britador de mandíbulas (início da sequência de britagem), enquanto os agregados B a E passam pelos processos completos (obrigatoriamente por pelo menos um britador cônico). Portanto, suas características serão comparadas às dos demais produtos com relação à adequação a misturas asfálticas, porém, seu processo não deve ser comparado da mesma maneira que os demais, por não constituir um processo completo que fornece os produtos nas quantidades e nos tamanhos desejados, já que o agregado A é apenas a menor fração de um material com fragmentos de tamanho bem maior. O mesmo pode ser considerado para o agregado miúdo F, que foi retirado do mesmo material que o A.

4.1 Resultados de propriedades de forma para agregados graúdos

4.1.1 Resultados do ensaio tradicional de Índice de Forma

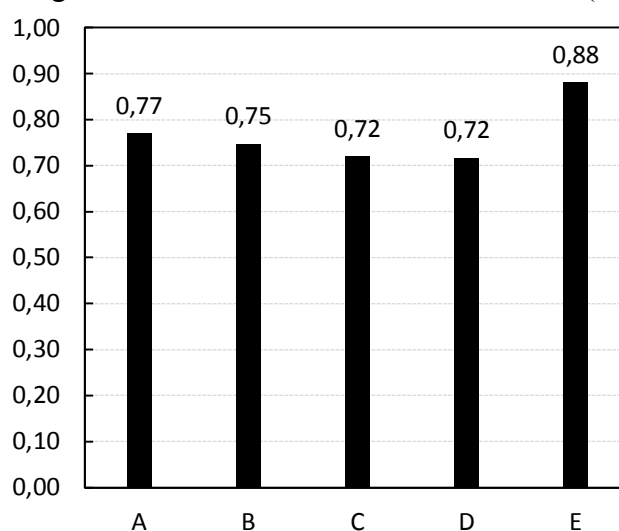
São apresentados, na Tabela 3, os resultados do ensaio de IF realizado para os agregados graúdos (A a E). Devido à grande quantidade de informações relativas aos processos de britagem, optou-se por colocar aquelas consideradas com mais impacto nas propriedades estudadas, referentes ao último estágio pelo qual o agregado passou: tipo de britador, GR a que foi submetido e APF pela qual o material saiu como produto. Observando, inicialmente, apenas os valores para os produtos de britadores cônicos, nota-se que eles se encontram bastante próximos, com exceção do agregado E, que apresenta um IF aproximadamente 20% maior que os dos outros três (B a D), demonstrando conter partículas significativamente mais cúbicas. Os parâmetros de britagem do agregado E mostram a seguinte combinação: baixa relação de redução ($GR = 2$), APF próxima ao TMN do produto analisado ($APF = 25$ e $TMN = 19$) e controle apurado da velocidade de alimentação, garantindo câmara de britagem sempre cheia. No gráfico da Figura 30, são mostrados os resultados médios de IF para cada agregado, a fim de facilitar a comparação entre eles.

Tabela 3 – Resultados de Índice de Forma (IF)

Agregado	Último britador	Último(s) GR	Última(s) APF (mm)	IF médio	CV(%)
A	De mandíbulas	7	170	0,77	1,27
B	Cônico	4	19	0,75	1,36
C	Cônico	4,6 / 2,4	43 / 18	0,72	1,07
D	Cônico	1,8 / 2	50 / 25	0,72	0,55
E	Cônico	2	25	0,88	0,77

Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 30 – Resultados de Índice de Forma (IF)



Fonte: Próprio autor (2015).

Com relação ao agregado A, retirado do produto do britador de mandíbulas com APF de 170mm, o resultado de IF de 0,77 mostra-se superior, embora próximo, aos valores de IF para os agregados B a D. Portanto, baseando-se em um valor médio, o ensaio de IF mostra que partículas com TMN de 25mm (bem abaixo da APF) do produto do britador de mandíbulas (estágio primário) apresenta partículas pelo menos tão cúbicas quanto a maior parte dos produtos finais de britadores cônicos (britas $\frac{3}{4}$ ""). Todos os agregados mostraram valores de IF acima de 0,5, atendendo ao critério estabelecido pelo DNIT. Os CV mostraram-se baixos, não apresentando significativas diferenças entre os resultados obtidos.

O ensaio de IF baseia-se em um valor médio para descrever todas as partículas do agregado, não fornecendo conhecimento da existência de possíveis variações dentro das amostras. Além disso, esse ensaio analisa a cubicidade em oposição ao achatamento, mas não considera o alongamento das partículas, ou seja, trata apenas da relação entre as duas menores dimensões do fragmento.

4.1.2 Resultados das propriedades de forma obtidas com o uso do AIMS

São expostos, na Tabela 4, os resultados médios das propriedades de cada agregado considerando sua distribuição granulométrica e os valores de CV para todas as partículas do agregado analisadas. É importante salientar que as amostras de agregado graúdo coletadas não apresentavam, em sua composição, as frações menores que 4,75mm. Além disso, algumas amostras de agregado não possuíam todas as frações graúdas em quantidade suficiente para serem analisadas pelo AIMS (fração de 19mm do agregado D e fração de 4,75mm do agregado B).

Tabela 4 – Resultados gerais das propriedades de forma de agregados graúdos

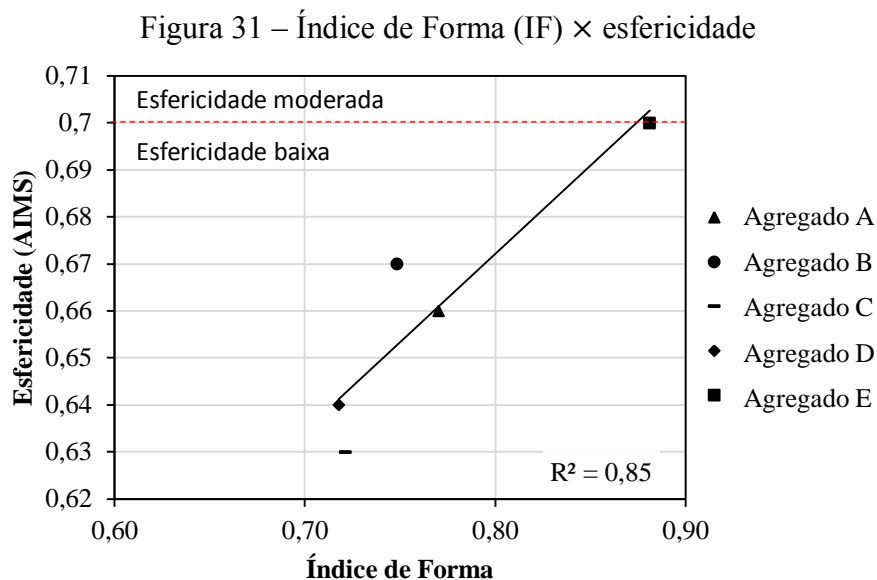
Agregado Pedreira	Último britador	Último(s) GR	Última(s) APF (mm)	Propriedade	Classificação	Média	Desvio Padrão	CV (%)
A 3	Mandíbulas	7	170	Esfericidade	Baixa	0,66	0,09	14
				Angularidade	Subarredondado	3.017	751	25
				Textura	Alta rugosidade	586	260	44
B 1	Cônico	4	19	Esfericidade	Baixa	0,67	0,12	18
				Angularidade	Subarredondado	2.858	505	18
				Textura	Baixa rugosidade	318	77	24
C 2	Cônico	4,6 / 2,4	43 / 18	Esfericidade	Baixa	0,63	0,14	22
				Angularidade	Subarredondado	2.851	643	23
				Textura	Moderada rugosidade	418	202	48
D 3	Cônico	1,8	50 / 25	Esfericidade	Baixa	0,64	0,10	16
				Angularidade	Subarredondado	2.874	711	25
				Textura	Alta rugosidade	560	276	49
E 3	Cônico	2	25	Esfericidade	Moderada	0,70	0,11	15
				Angularidade	Subarredondado	2.678	658	25
				Textura	Alta rugosidade	609	268	44

Fonte: Próprio autor (2015).

Analisando a Tabela 4, percebe-se que todos os agregados obtiveram a classificação de baixa esfericidade, com exceção do agregado E, que foi classificado na faixa de moderada esfericidade (no limite com a classe de baixa esfericidade), seguindo o comportamento observado pelo ensaio de IF, pelo qual o agregado E obteve o valor mais alto. Com relação à angularidade, todos se classificaram como subarredondados. O agregado A, que passou por um estágio de britagem, apresentou a maior angularidade (3.018), enquanto o agregado E, que passou por 4 estágios, apresentou a menor angularidade (2.678) e os outros

três (B, C e D), que passaram por números de estágios intermediários, apresentaram angularidades próximas entre si e intermediárias àqueles dois (com média de 2.861), o que pode significar que, à medida que o material passa por uma maior quantidade de estágios de britagem, de uma forma geral, ele tende a perder suas quinas na fragmentação, tornando-se menos angular. Os agregados A, D e E, granitos provenientes da Pedreira 3, classificaram-se na faixa de alta rugosidade; o agregado B, granito proveniente da Pedreira 1 foi classificado com baixa rugosidade e o agregado C, gnaisse proveniente da Pedreira 2 apresentou moderada rugosidade. Nota-se que os materiais provenientes das pedreiras 1 e 3, apesar de serem ambos graníticos, não possuem texturas superficiais semelhantes, o que pode significar que diferentes tipos de granito podem apresentar distintas rugosidades superficiais. Com relação aos CV, em geral, o parâmetro de esfericidade mostrou as menores variações (média dos CV = 17%), o parâmetro de angularidade apresentou um CV de 23%, em média, e a textura superficial apresentou os maiores CV, para todos os agregados (média de 42%).

Na Figura 31, é realizada uma comparação entre os valores de IF e os valores de esfericidade resultantes da análise do AIMS para os cinco agregados. Percebe-se que há uma boa correlação entre os resultados dos dois métodos com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,85.



Fonte: Próprio autor (2015).

Duas diferenças encontradas entre esses dois parâmetros são: o IF leva em consideração apenas a relação entre as duas menores dimensões das partículas, enquanto a esfericidade leva em conta as relações entre as três dimensões; para a realização do IF são

utilizados somente os maiores tamanhos de partículas do material, enquanto na análise da esfericidade com o emprego do AIMS, podem-se utilizar todas as frações presentes no material. Apesar desses fatores, os resultados dos dois ensaios apresentaram boa correlação.

De uma forma geral, observando-se os valores médios, pode-se dizer que o agregado E possui as características mais adequadas à utilização em misturas asfálticas tanto com relação à forma, pois este mostra partículas menos lamelares, como com relação à textura, pois apresenta superfície mais rugosa, o que pode garantir melhor aderência com o ligante asfáltico. Entretanto, com relação à angularidade, esse agregado apresentou partículas menos angulares, o que pode resultar em um menor intertravamento do esqueleto mineral.

Na Tabela 5, são apresentados os resultados por fração (peneira à peneira), dos parâmetros de esfericidade, angularidade e textura de agregados graúdos. Serão analisados os resultados com relação ao tamanho das partículas e, posteriormente, serão mostrados gráficos referentes às distribuições das propriedades de forma para facilitar a visualização do comportamento das partículas e a comparação entre os diferentes processos de britagem.

Tabela 5 – Resultados das propriedades de forma de agregados graúdos por fração

Fração (mm)	Agregado	A		B		C		D		E	
	GR	7		4		4,6 / 2,4		1,8 / 2		2	
	APF	170		19		43 / 18		50 / 25		25	
	Britador	Mandíbulas		Cônico		Cônico		Cônico		Cônico	
	Parâmetro	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
19	Esfericidade	0,67	15	0,74	13	0,77	11	-	-	0,76	9
	Angularidade	2.945	27	2.664	17	2.711	26	-	-	2.734	24
	Textura	640	39	374	21	438	36	-	-	672	32
12,5	Esfericidade	0,63	14	0,69	14	0,64	18	0,65	14	0,70	14
	Angularidade	2.908	25	2.868	17	2.841	21	2.811	25	2.622	20
	Textura	642	36	315	21	425	50	571	42	620	38
9,5	Esfericidade	0,68	12	0,55	13	0,57	18	0,62	16	0,65	15
	Angularidade	3.151	22	2.872	19	2.881	19	2.961	22	3.000	24
	Textura	637	40	316	21	395	45	561	45	522	52
4,75	Esfericidade	0,66	14	-	-	0,51	18	0,58	18	0,64	18
	Angularidade	3.119	25	-	-	3.143	20	3.083	24	2.900	23
	Textura	457	54	-	-	333	70	460	65	535	55

Fonte: Próprio autor (2015).

Analisando os resultados apresentados nas tabelas, percebe-se que os agregados que passaram por britadores cônicos (B a E) apresentam uma redução no parâmetro de esfericidade, à medida que se diminui o tamanho das partículas observadas, tendo as frações de 19mm esfericidade moderada (com média de 0,76) e as frações menores chegando até à classe de partículas lamelares e alongadas, com média de 0,58 para a fração de 4,75mm. Esse fato sugere que, quanto mais distante da APF de britadores cônicos for o tamanho da partícula produzida, menos esférica esta tende a ser. Já os resultados obtidos para o agregado A, cuja britagem foi feita apenas com o uso do britador de mandíbulas, não sugerem uma tendência de variação na esfericidade com a redução do tamanho dos fragmentos, pois os valores médios para cada fração são bastante próximos entre si. Das três propriedades aplicadas a agregados graúdos, a esfericidade foi a que apresentou menores coeficientes de variação (de 9 a 18%) por fração, o que significa que as partículas são mais uniformes com relação à essa propriedade do que com relação à angularidade e à textura.

Com relação à angularidade, todos os tamanhos dos cinco agregados têm suas partículas classificadas como subarredondadas, mas indicam, em geral, um aumento dessa propriedade com a redução do tamanho partículas, ao contrário do parâmetro de esfericidade. A média da angularidade dos agregados para a fração de 19mm é de 2.763; seguida de 2.810; 2.973 e 3.061 para as frações de 12,5mm, 9,5mm e 4,75mm, respectivamente. Os CV referentes aos resultados de angularidade para cada fração dos agregados variaram de 13 a 27%.

A textura superficial dos materiais, por sua vez, é a propriedade que apresenta maiores variações dentro de cada fração, chegando a 70% para a menor fração do agregado C. Essa propriedade mostrou uma tendência de redução à medida que se diminui o tamanho das partículas, com médias de 531; 515; 486 e 446 para as frações de 19, 12,5, 9,5 e 4,75mm, respectivamente.

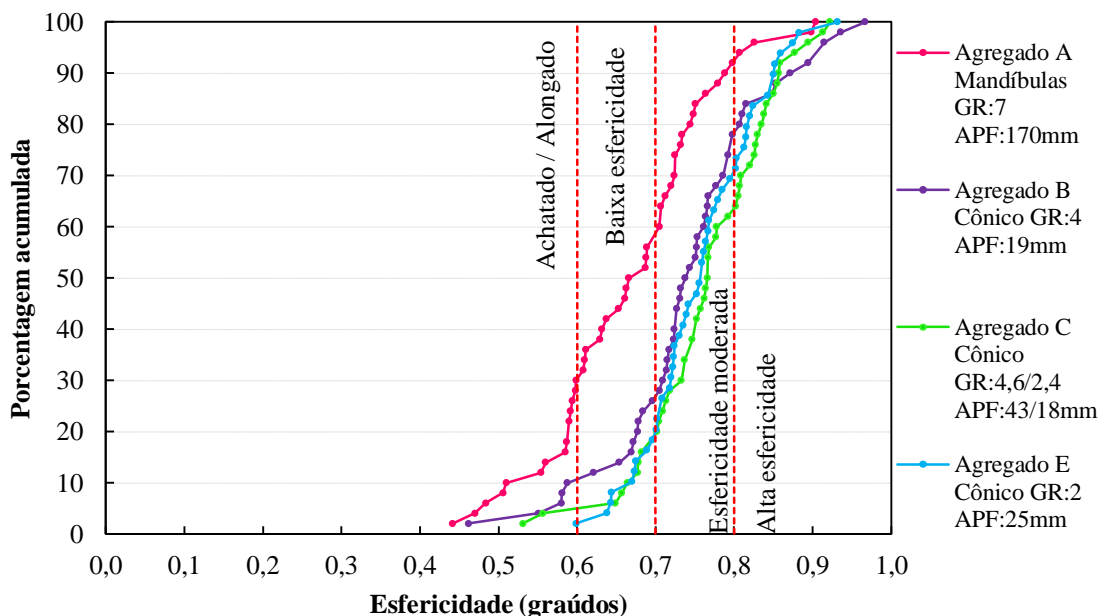
4.1.2.1 Esfericidade

As Figuras de 32 a 35, a seguir, apresentam a comparação das curvas de distribuição de esfericidade por percentual acumulado de partículas para os diferentes agregados, para as frações de 19, 12,5, 9,5 e 4,75mm, respectivamente. Observando, primeiramente, os agregados retirados das pilhas de britas $\frac{3}{4}$ " (B a E) que passaram pelo processos completos de britagem, pode-se perceber que estes apresentam curvas muito próximas para a fração de 19mm, não se estabelecendo uma diferenciação. À medida que se

diminui o tamanho das partículas, as curvas vão se afastando e mostrando comportamentos distintos. Para as frações de 9,5 e 4,75mm, percebe-se que as curvas dos agregados que passaram por processos com mais estágios de britagem e com menores relações de redução em cada estágio mantêm-se mais à direita, ou seja, suas partículas apresentam forma mais esférica.

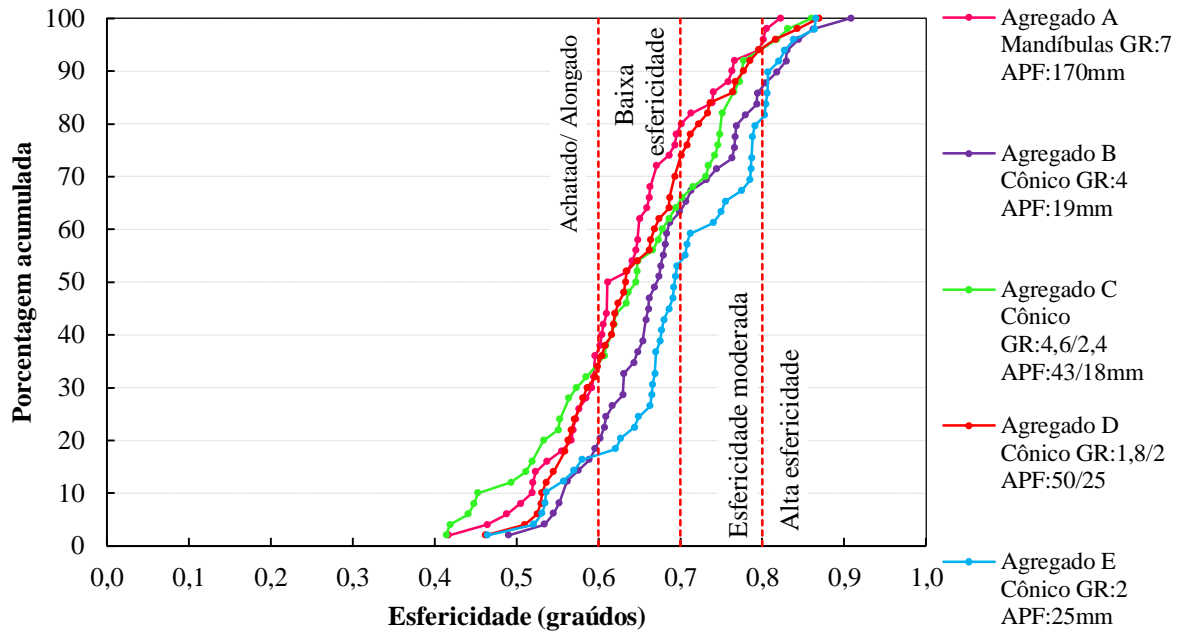
O agregado A (curva rosa), retirado da pilha de brita corrida com grande quantidade de finos, produto que sai diretamente do britador primário (de mandíbulas), apresenta um comportamento específico com relação à esfericidade. Para a fração de 19mm, sua curva mostra-se afastada para a esquerda com relação às curvas dos outros agregados, o que se traduz em partículas com menores valores de esfericidade, com 30% classificadas como lamelares ou alongadas, enquanto os outros agregados possuem no máximo 10% nessa faixa, e 6% com alta esfericidade, enquanto os outros apresentam de 20 a 34% com esta classificação. Na sua fração de 12,5mm, o agregado A ainda apresenta um valor médio de esfericidade menor que os valores encontrados para os outros agregados, entretanto, já bem mais próximo, com sua curva sobrepondo-se às outras em alguns pontos (Figura 33). Já para as frações menores, de 9,5 e 4,75mm (Figuras 34 e 35, respectivamente), a curva do agregado A mostrou-se afastada para a direita em relação às outras, apresentando partículas mais esféricas. Em geral, os valores de esfericidade do agregado A não se mostraram relacionados ao tamanho das partículas, fato que deve estar ligado à maneira como ocorre a fragmentação no britador de mandíbulas.

Figura 32 – Distribuição da esfericidade das frações de 19mm



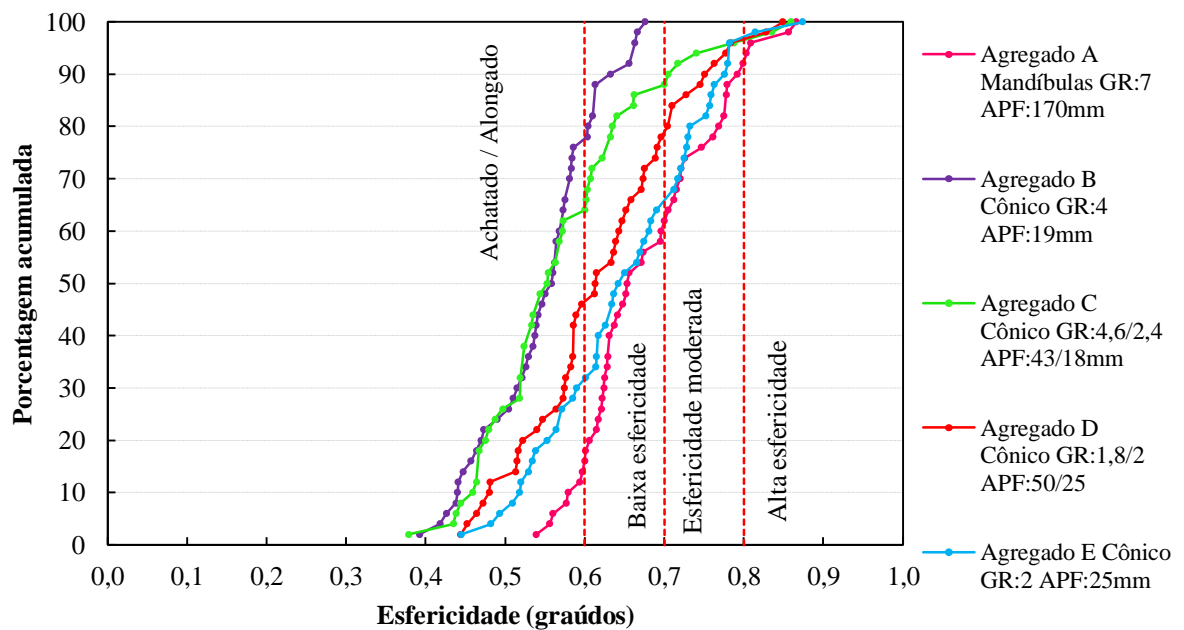
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 33 – Distribuição da esfericidade das frações de 12,5mm



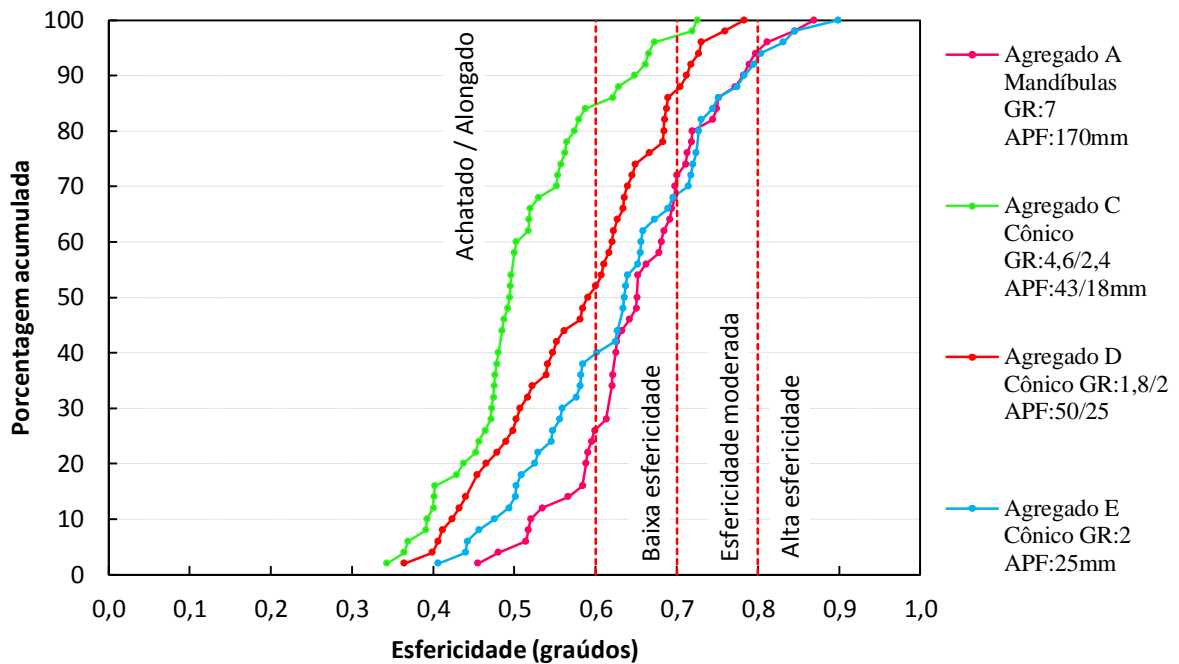
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 34 – Distribuição da esfericidade das frações de 9,5mm



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 35 – Distribuição da esfericidade das frações de 4,75mm



Fonte: Próprio autor (2015).

4.1.2.2 Razões de Lamelaridade

A Tabela 6 mostra a porcentagem de partículas com razão de lamelaridade (razão entre a maior e a menor dimensão da partícula) maior que 5:1 em cada agregado e em cada fração. O limite adotado pelo Superpave é de no máximo 10% de partículas com razão de lamelaridade de 5:1 ou maior. A *Federal Highway Administration*, em 1998, sugeriu a utilização da relação 3:1. Vários grupos de pesquisa americanos adotam um limite de 5% para a razão de 5:1, sendo mais rigorosos que o Superpave.

Observando a porcentagem de cada agregado (considerando todas as frações), percebe-se que todos obedecem ao critério do Superpave de apresentar no máximo 10% das partículas com razão de lamelaridade de 5:1 ou maior. Quando se observa cada fração, entretanto, vê-se que 10 e 18% das partículas de 9,5 e 4,75mm do agregado C, respectivamente, possuem razão de lamelaridade maior que 5:1, o que instiga a necessidade de se verificar se agregados de TMN menores gerados por processo similar àquele que gerou o agregado C, com GR de 4,5 e 2,5 e com APF do britador cônico de 43 e 18mm, estarão obedecendo o critério do Superpave. No Apêndice B, são apresentados os gráficos que mostram as razões entre as dimensões das partículas (achatamento, alongamento e lamelaridade) de cada agregado.

Tabela 6 – Porcentagens de partículas com razão de lamelaridade maior que 5:1

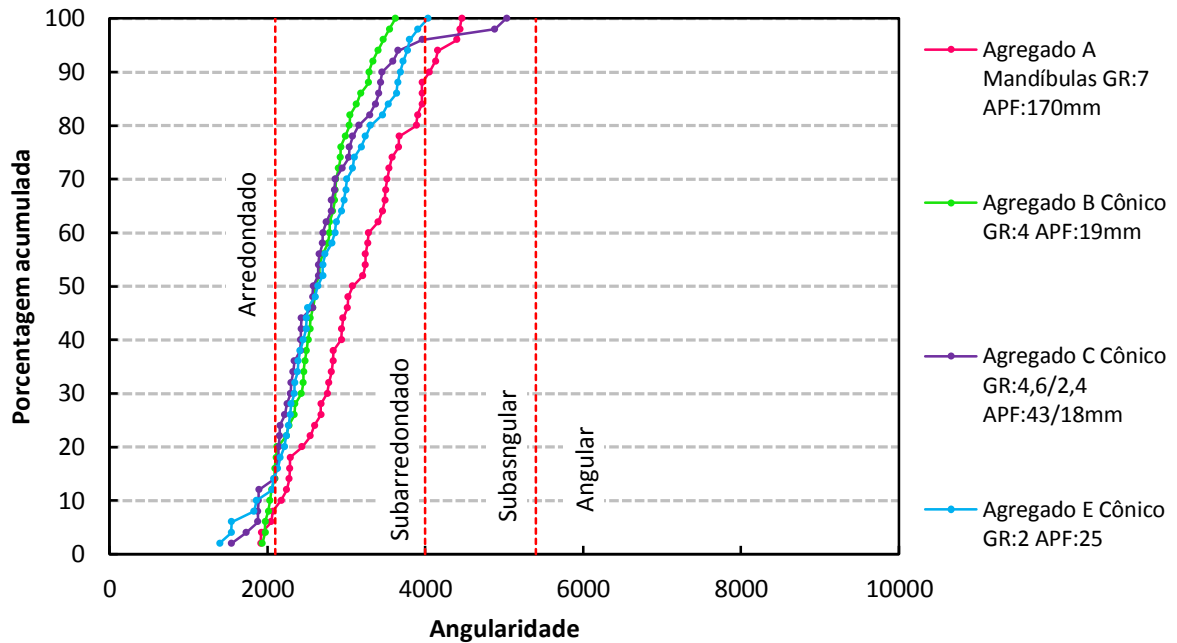
Fração (mm)	Agregado	A	B	C	D	E
		GR	7	4	4,6 / 2,4	1,8 / 2
	APF	170	19	43 / 18	50 / 25	25
	Britador	Mandíbulas	Cônico	Cônico	Cônico	Cônico
Todas as frações		3	2,7	8	4	1,5
19		6	2	0	-	0
12,5		2	0	4	0	0
9,5		0	6	10	6	2
4,75		4	-	18	6	4

Fonte: Próprio autor (2015).

4.1.2.3 Angularidade

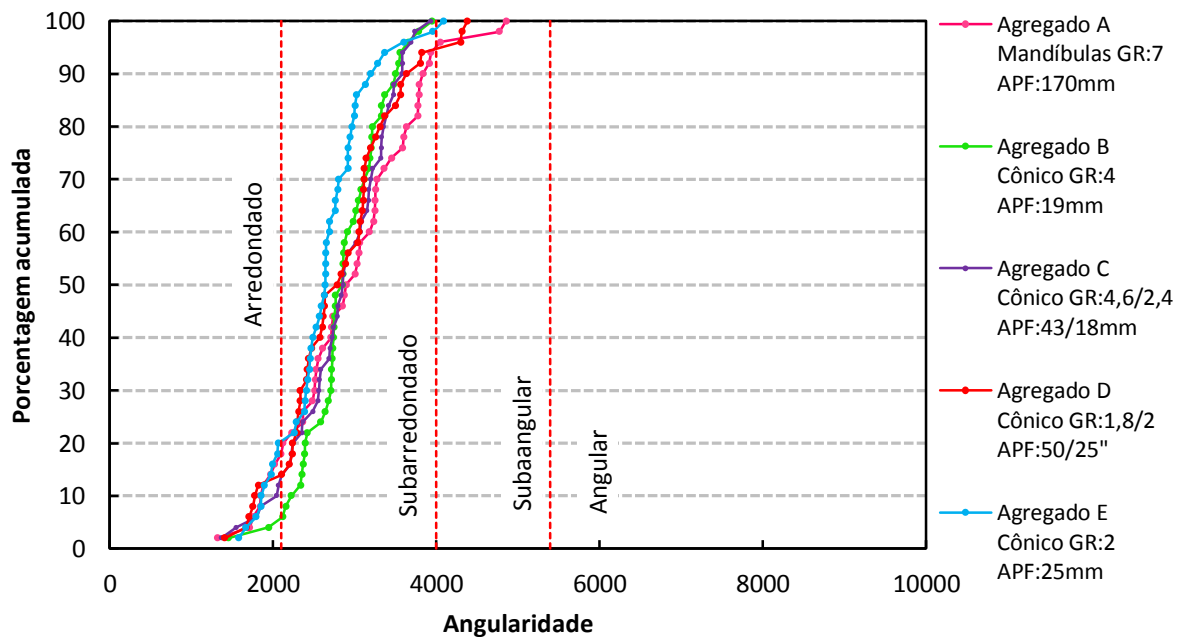
São apresentadas, nas Figuras de 36 a 39, as comparações do parâmetro de angularidade entre os diferentes agregados, por fração. Percebe-se que as curvas referentes aos materiais B, C e E mantêm-se muito próximas entre si, muitas vezes se sobrepondo, para os quatro tamanhos de partículas, não apresentando variações significativas que possam ser atribuídas à britagem. A fração de 19mm da brita corrida com alto percentual de finos (agregado A, Figura 36) mostra uma certa variação, com sua curva afastada para a direita, o que significa que esse agregado possui, na fração de 19mm, partículas com maior angularidade, mas ainda se mantém na mesma faixa de classificação dos demais, subarredondado. Os resultados obtidos para o agregado E, por sua vez, mostram que o menor valor médio de angularidade apresentado, em relação aos outros materiais, foi causado, principalmente, pelas frações de 12,5 e de 4,75mm.

Figura 36 – Distribuição da angularidade das frações de 19mm



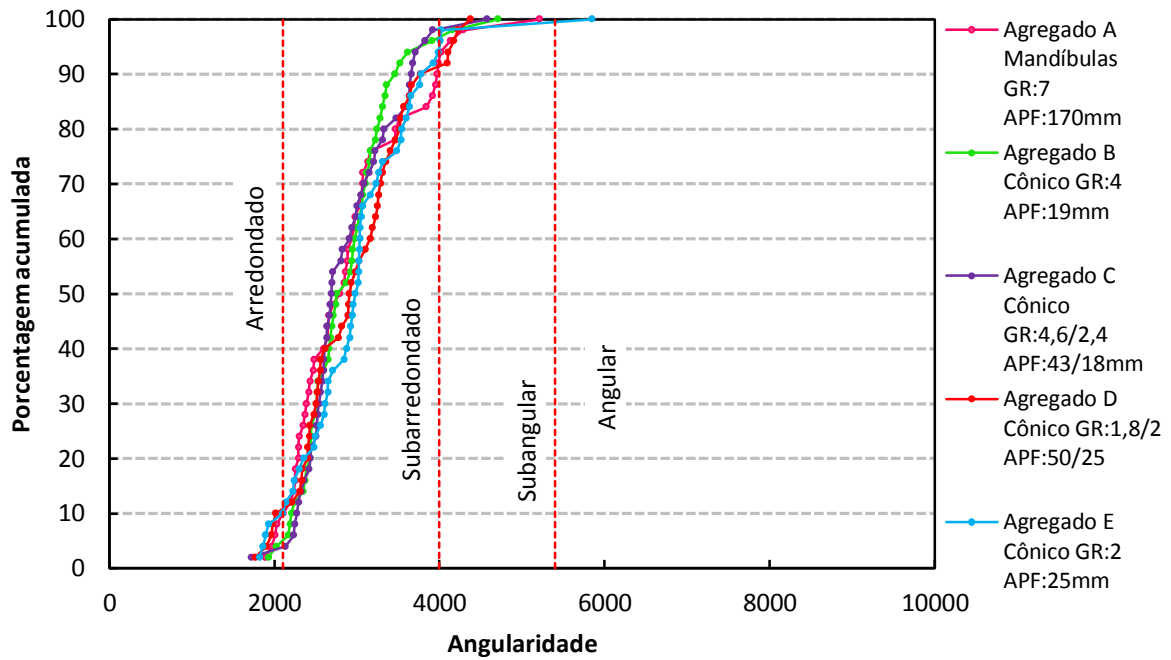
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 37 – Distribuição da angularidade das frações de 12,5mm



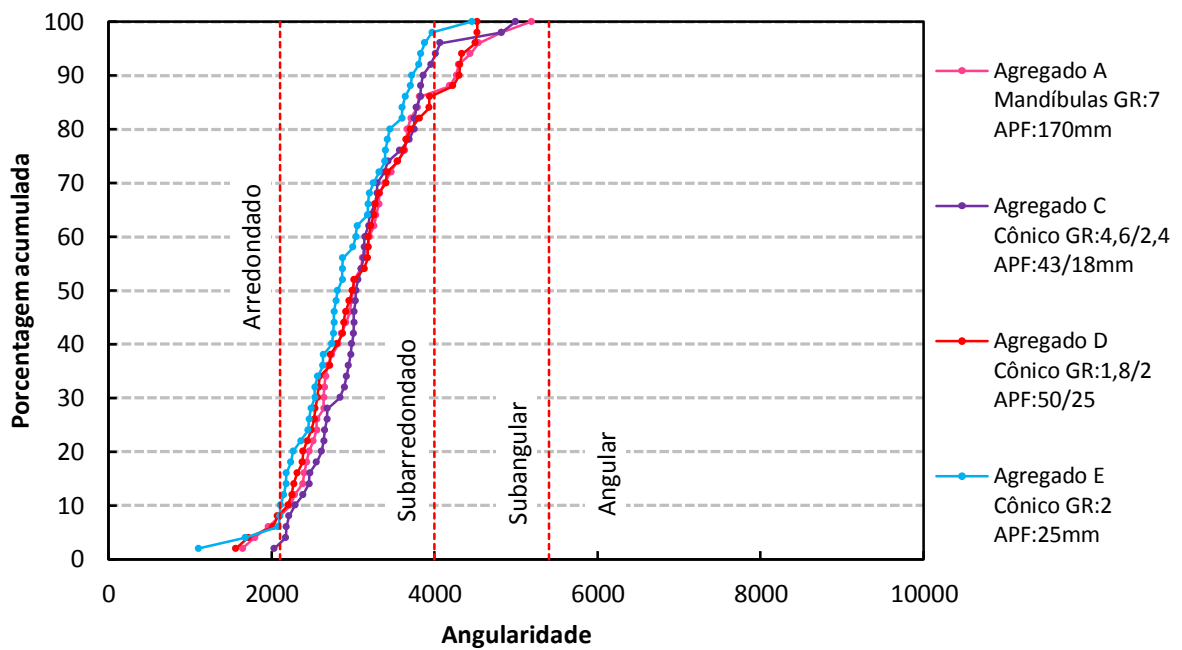
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 38 – Distribuição da angularidade das frações de 9,5mm



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 39 – Distribuição da angularidade das frações de 4,75mm



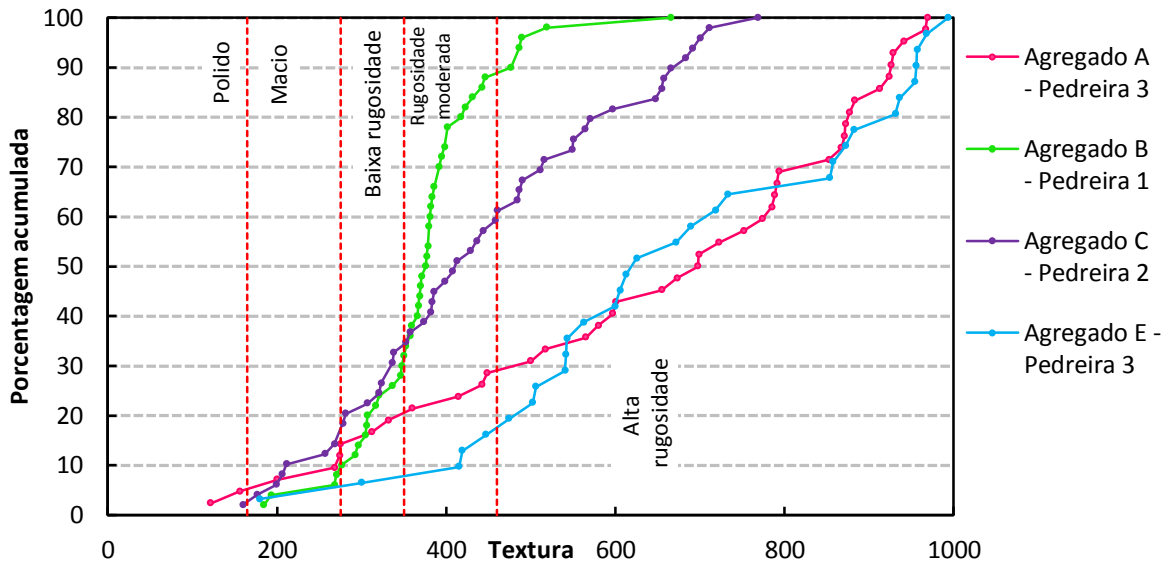
Fonte: Próprio autor (2015).

4.1.2.4 Textura

A análise da textura das partículas, fator mais relacionado à própria composição mineral do material do que ao processo de britagem em si (BESSA, 2012), apresentou

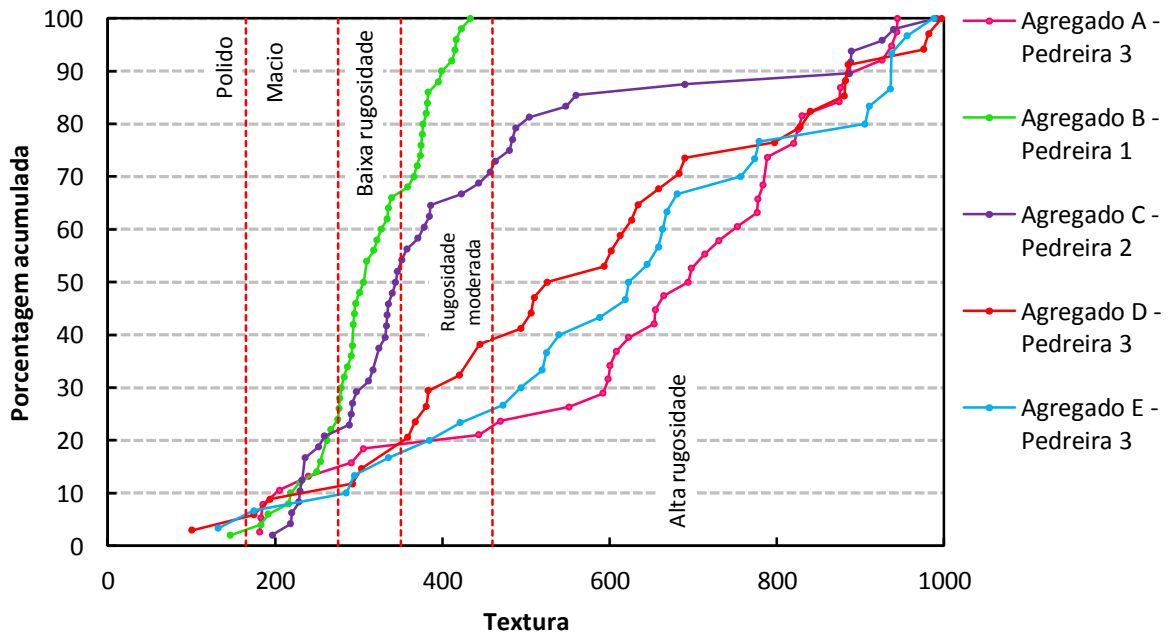
resultados que vão de acordo com essa afirmação. Nas Figuras de 40 a 43, podem-se observar as informações constatadas a seguir.

Figura 40 – Distribuição da textura das frações de 19mm



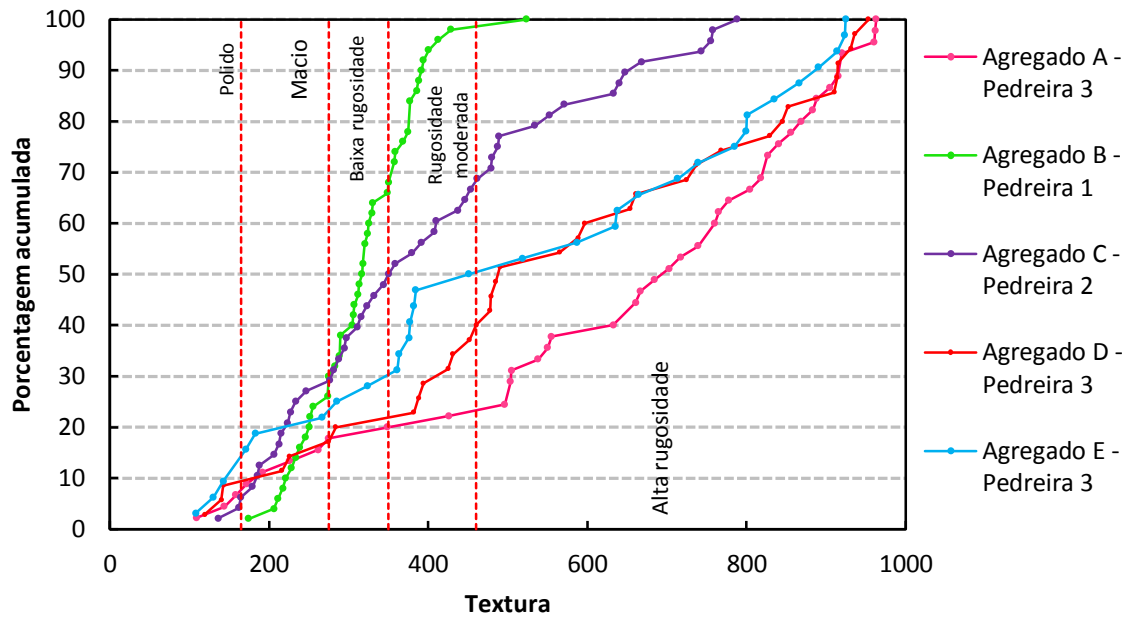
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 41 – Distribuição da textura das frações de 12,5mm



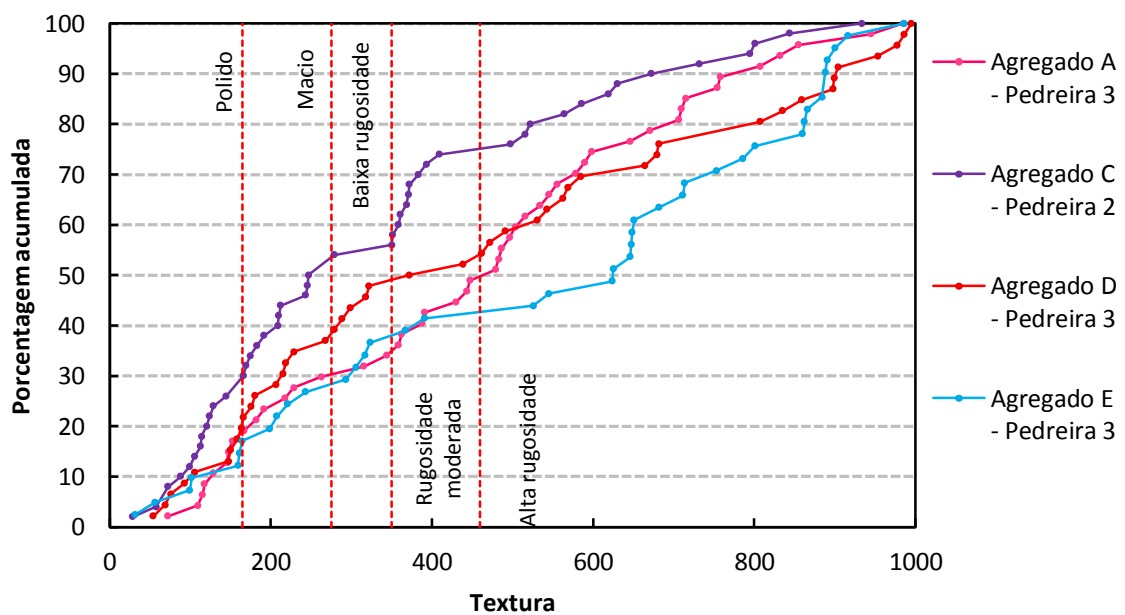
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 42 – Distribuição da textura das frações de 9,5mm



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 43 – Distribuição da textura das frações de 4,75mm



As curvas dos agregados A, D e E, provenientes da Pedreira 3, de origem granítica, apresentam altos CV para as partículas com relação à textura (32 a 65%), com a maior parte das partículas classificadas como de alta rugosidade. Já o agregado C, proveniente da Pedreira 2, de rocha gnáissica, tem suas curvas, para todas as frações, deslocadas para a esquerda em relação às curvas dos agregados provenientes da Pedreira 3, ou seja, com menor rugosidade superficial, também apresentando alto CV, que chega a 70% para a fração mais

fina. O agregado B, granítico, proveniente da Pedreira 1, apresenta os menores CV (21%), assim como os menores valores de rugosidade superficial. Suas curvas de distribuição, para todas as frações, estão deslocadas para a esquerda em relação a todos os outros agregados. Percebe-se que o fato de os materiais provenientes das Pedreiras 1 e 3 serem de origem granítica não faz com que estes possuam valores de textura superficial semelhantes, pois dentro da classificação de rocha granítica, podem existir diferentes tipos com variações na composição mineralógica e na proporção entre os minerais presentes, propiciando, assim, rugosidades superficiais distintas nos materiais.

4.2 Resultados de propriedades de forma de agregados miúdos

São expostos, na Tabela 7, os resultados médios das propriedades de cada material, considerando sua distribuição granulométrica, e os valores de CV considerando todas as partículas analisadas para cada agregado. Na Tabela 8, posteriormente, serão mostrados os resultados para cada fração separadamente.

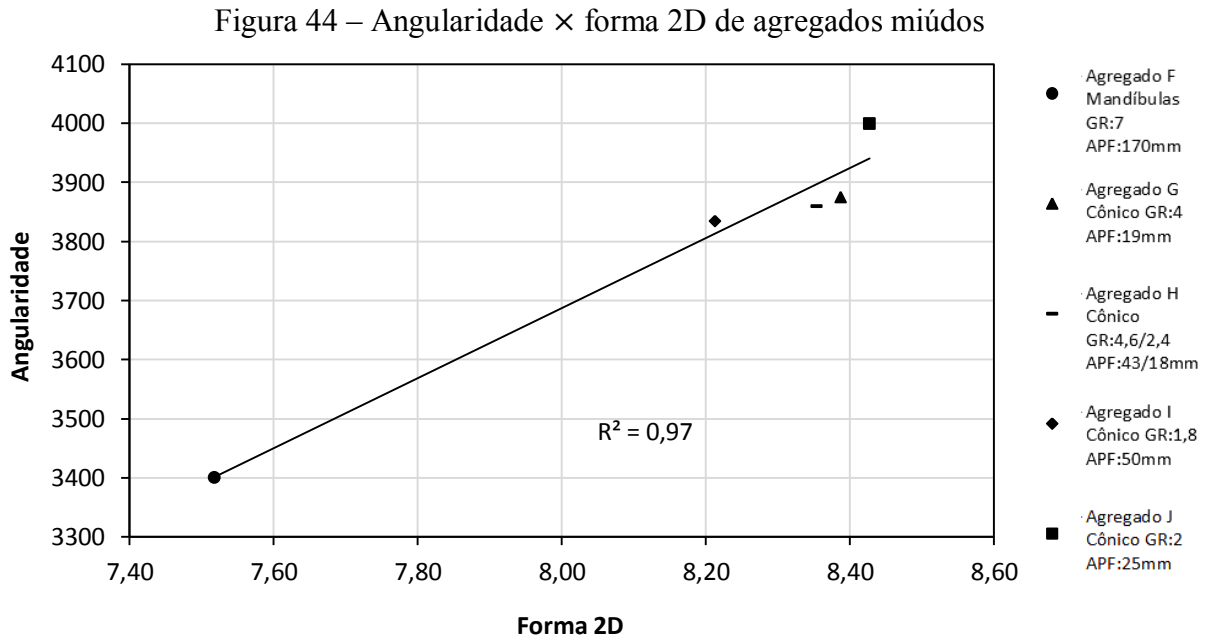
Tabela 7 – Resultados gerais das propriedades de forma de agregados miúdos

Agregado Pedreira	Último britador	Último(s) GR	Última(s) APF (mm)	Propriedade	Classificação	Média	Desvio Padrão	CV (%)
F 3	Mandíbulas	7	170	Forma 2D	Semicircular	7,5	1,9	25
				Angularidade	Subarredondado	3401	1210	36
G 1	Cônico	4	19	Forma 2D	Semialongado	8,4	2,2	26
				Angularidade	Subarredondado	3875	1213	31
H 2	Cônico	4,6 / 2,4	43 / 18	Forma 2D	Semialongado	8,4	2,1	25
				Angularidade	Subarredondado	3860	1250	32
I 3	Cônico	1,8	50	Forma 2D	Semialongado	8,2	2,2	27
				Angularidade	Subarredondado	3835	1282	33
J 3	Cônico	2	25	Forma 2D	Semialongado	8,43	2,1	25
				Angularidade	Subarredondado	4000	1328	33

Fonte: Próprio autor (2015).

A Tabela 7 mostra que o agregado F, parte miúda da brita corrida produzida por britador de mandíbulas, apresentou o menor valor médio de forma 2D (quanto menor for esse valor, mais próximo de um círculo é o formato da partícula), sendo classificado como semicircular, enquanto os outros foram classificados como semialongados. O maior valor de forma 2D foi apresentado pelo agregado J, produto de um britador cônico, com GR de 2 e APF de 25mm. O parâmetro de angularidade comportou-se da mesma maneira que a Forma

2D, sugerindo que partículas com formato mais circular tendem a ser menos angulares, contudo, todos os agregados foram classificados como subarredondados, ficando o agregado J no limite da classe subangular. Esse comportamento pode ser verificado na Figura 44, que mostra a relação entre a Forma 2D e a angularidade das partículas, com R^2 de 0,97.



Fonte: Próprio autor (2015).

Tabela 8 – Resultados das propriedades de forma de agregados miúdos por fração

Fração (mm)	Agregado		F		G		H		I		J	
	GR		7		4		4,6 / 2,4		1,8		2	
	APF		170		19		43 / 18		50		25	
	Britador		Mandíbulas		Cônico		Cônico		Cônico		Cônico	
	Parâmetro	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	
2,36	Forma 2D	7,2	26	8,8	23	8,7	24	7,8	22	8,1	24	
	Angularidade	3.481	26	4.162	24	4.048	25	3.779	27	4.095	25	
1,18	Forma 2D	7,7	24	8,7	26	8,3	22	8,5	24	8,9	25	
	Angularidade	3.921	25	4.207	24	4.192	25	4.421	25	4.350	22	
0,6	Forma 2D	8,1	23	8,0	28	8,3	27	8,2	26	8,4	25	
	Angularidade	4.201	29	4.014	23	4.157	25	4.370	28	4.447	25	
0,3	Forma 2D	7,9	23	7,9	27	8,0	27	8,5	24	8,4	25	
	Angularidade	3.933	29	3.922	26	4.123	26	4.068	27	4.454	28	
0,15	Forma 2D	7,4	27	7,6	27	7,5	26	7,8	30	8,0	29	
	Angularidade	2.958	34	3.253	37	2.876	34	3.201	36	3.218	34	
0,075	Forma 2D	8,2	21	8,8	24	8,4	25	8,3	23	8,6	22	
	Angularidade	2.321	39	2.363	40	2.321	42	2.414	41	2.539	50	

Fonte: Próprio autor (2015).

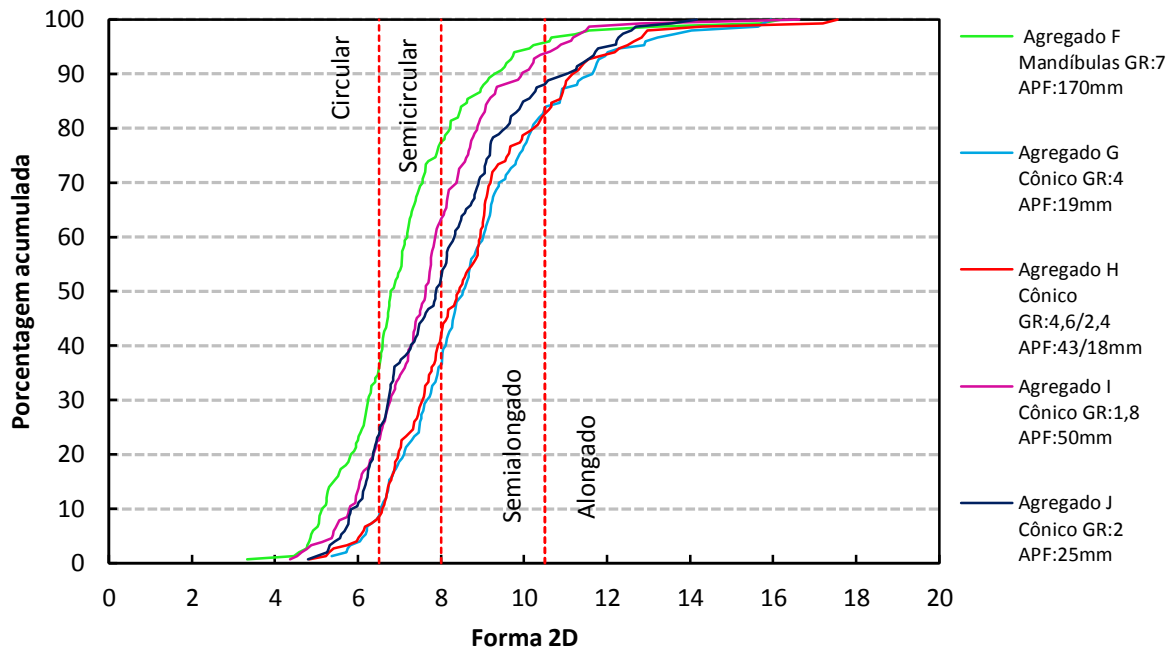
A partir dos valores médios do parâmetro de forma 2D obtidos para as frações de agregados miúdos, expostos na Tabela 8, percebe-se que os agregados G e H apresentam uma queda nos valores com a redução do tamanho das partículas, exceto para a menor fração (0,075mm), que sofre um aumento súbito no valor. Esse aumento no valor de forma 2D na última fração ocorre também para os agregados F, I e J. Entretanto, estes três materiais apresentam valores mais baixos para a fração de 2,36mm se comparada às frações intermediárias, semelhança que pode estar relacionada às características do material, já que os agregados F, I e J são provenientes da mesma pedreira.

Com relação à angularidade, todos os agregados apresentam valores mais elevados para as partículas maiores que 0,3mm em relação às menores, com a maior parte das frações classificadas como subangulares, já próximas do limite que as classificariam como subarredondadas. Para as frações menores que 0,3mm, os cinco agregados apresentam uma considerável queda, de aproximadamente 34% (considerando a média das quatro maiores frações e a média das duas menores frações), encaixando-se na classe subarredondado, com valores da menor fração próximos do limite da classe de partículas arredondadas.

4.2.1 Forma 2D

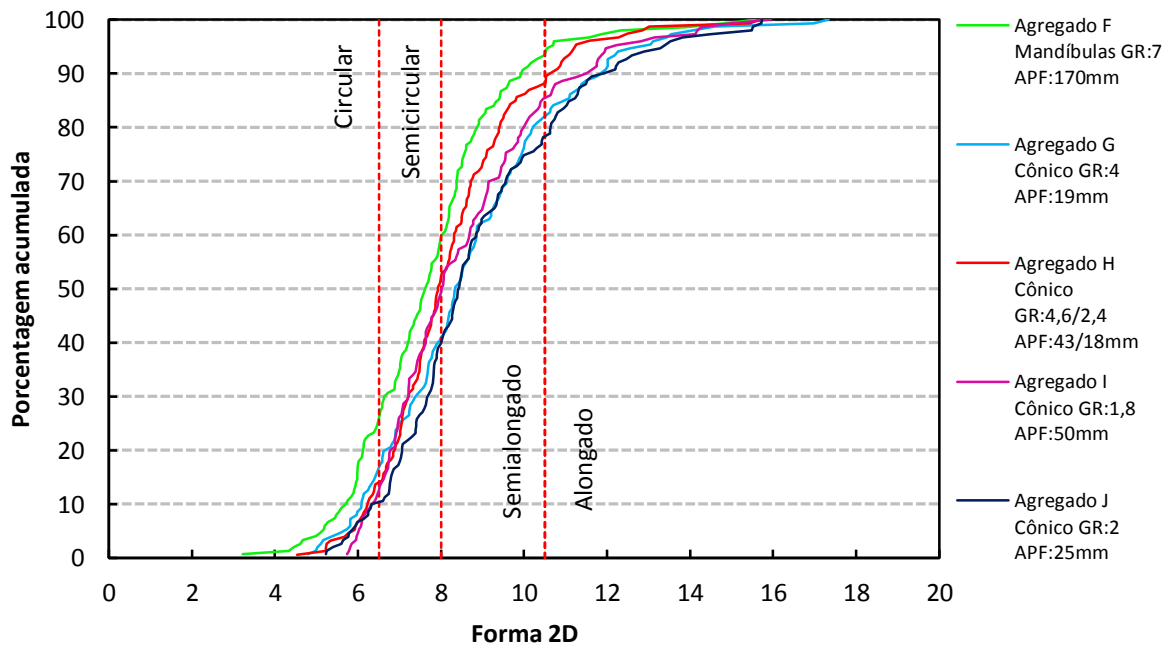
Ao analisar o parâmetro de forma 2D para as frações de agregados miúdos, pelas distribuições apresentadas nas Figuras de 45 a 50, observa-se que, para a fração de 2,36mm, o agregado F, proveniente da brita corrida com grande quantidade de finos provenientes da Pedreira 3, seguido dos agregados I e J, retirados respectivamente do pó de pedra e da areia de britagem, também proveniente da Pedreira 3, destacam-se com curvas deslocadas para a esquerda em relação aos agregados G e H, provenientes de pós de pedra das Pedreiras 1 e 2, respectivamente. As curvas mais à esquerda representam partículas com menores parâmetros de forma 2D, ou seja, formas 2D mais próximas de um círculo.

Figura 45 – Distribuição de forma 2D das frações de 2,36mm



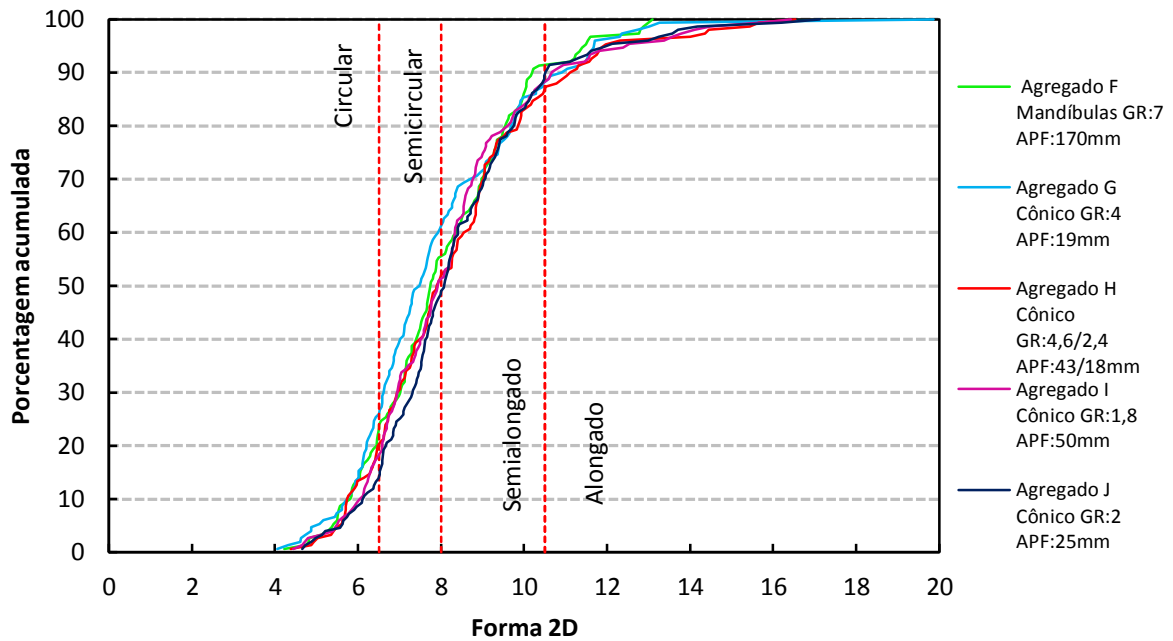
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 46 – Distribuição de forma 2D das frações de 1,18mm



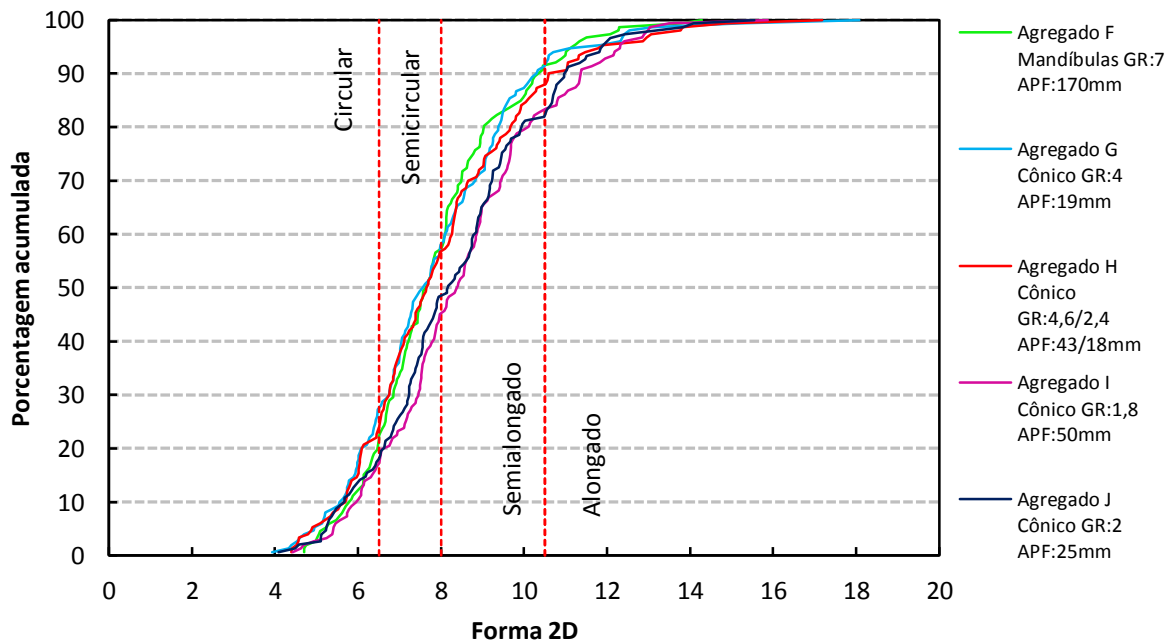
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 47 – Distribuição de forma 2D das frações de 0,6mm



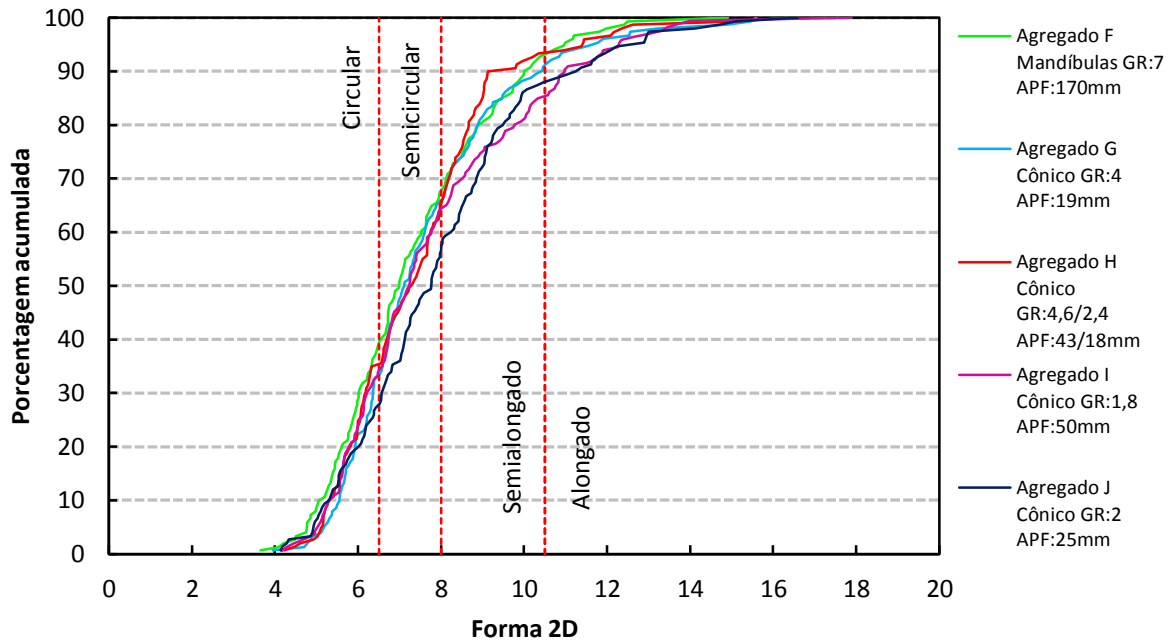
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 48 – Distribuição de forma 2D das frações de 0,3mm



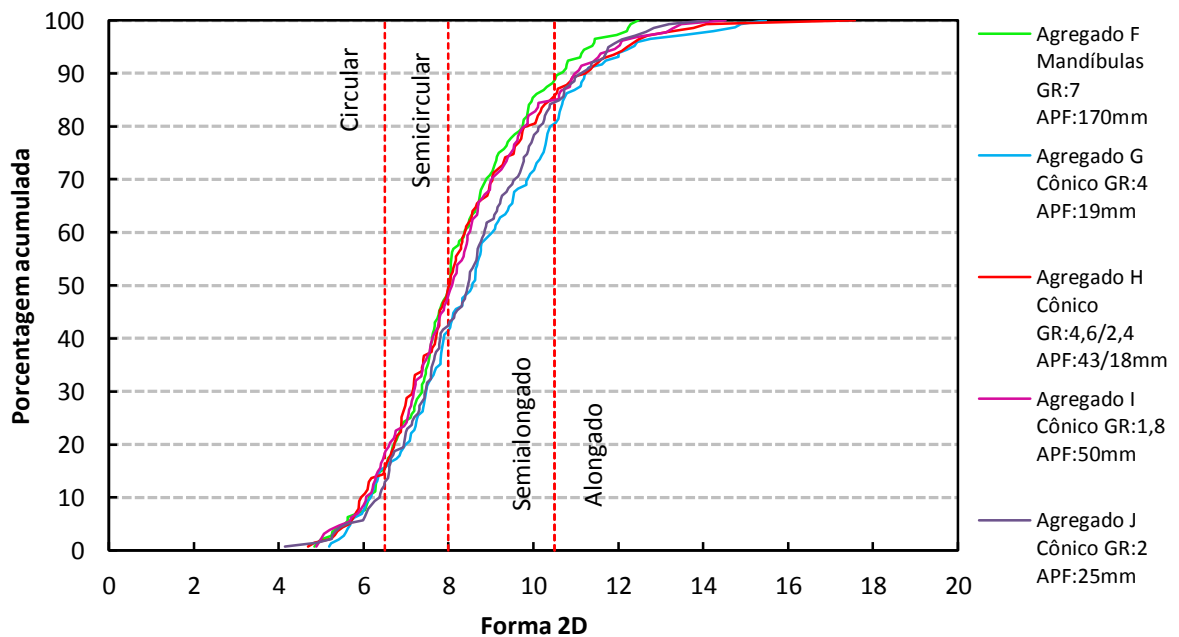
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 49 – Distribuição de forma 2D das frações de 0,15mm



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 50 – Distribuição de forma 2D das frações de 0,075mm



Fonte: Próprio autor (2015).

Analisando os gráficos referentes às frações de menores tamanhos, nota-se que a curva do agregado F tende a se manter um pouco mais à esquerda para as frações de 2,36mm e 1,18mm. As demais curvas, entretanto, ficaram bastante próximas, não apresentando uma variação ou uma tendência significativa. Percebe-se que, para agregados miúdos, a forma das

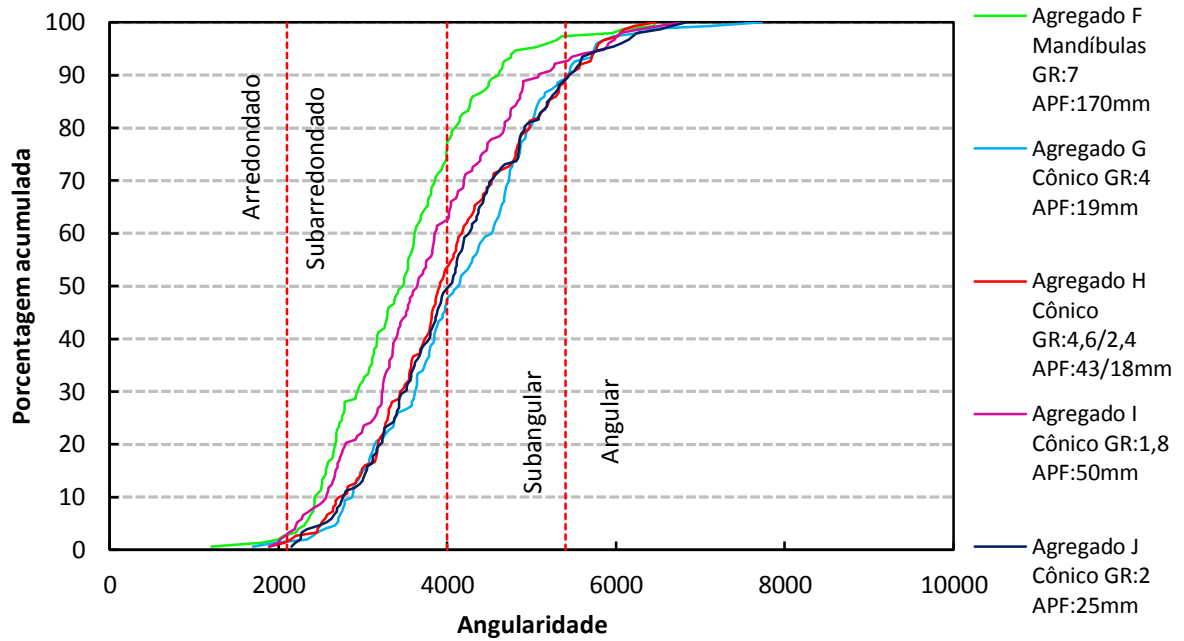
partículas produzidas não parece seguir o mesmo comportamento observado para os agregados graúdos, para os quais partículas mais esféricas foram obtidas ao se diminuir o GR em cada estágio de britagem, ao se aproximar a APF do britador do tamanho das partículas produzidas, e ao se controlar a alimentação do britador para garantir que a câmara de britagem trabalhe sempre cheia, de forma a proporcionar fragmentação de rocha contra rocha, e não rocha entre as paredes do britador. Essa diferença no comportamento dos agregados miúdos em relação aos graúdos pode ser interpretada considerando-se o fato de que os primeiros podem ser resultantes, na sua maior parte, das quinas arrancadas das partículas maiores e dos pontos em que estas recebem cargas de compressão (ponto de contato, sejam entre duas partículas, sejam entre partícula e face do britador). Ou seja, mesmo com a câmara de britagem cheia de agregados graúdos, ocorrendo fragmentação predominantemente interparticular, os fragmentos menores podem não receber carregamento multiponto, não sendo quebrados ou gerados da mesma forma que os graúdos. Já em uma câmara de britagem contendo grande quantidade de partículas de agregado miúdo (sem anterior retirada de finos), esperar-se-ia que o fenômeno ocorresse analogamente ao que ocorre com os agregados graúdos nas câmaras de britagem dos processos analisados.

4.2.2 Angularidade

As Figuras de 51 a 56, a seguir, apresentam a distribuição do parâmetro de angularidade para agregados miúdos. Nota-se que a curva do agregado F tende a mostrar-se deslocada para a esquerda em relação às outras, principalmente para as duas maiores frações, indicando a presença de partículas menos angulares (mesmas frações que se destacaram no parâmetro de forma 2D com forma mais circular).

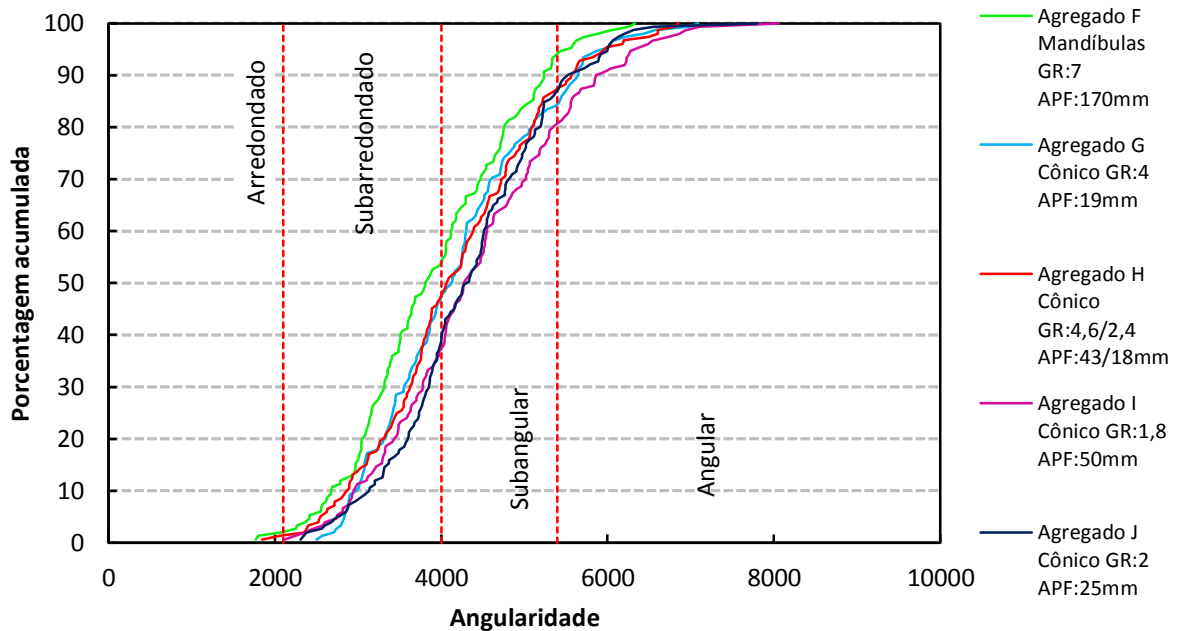
A diferença apresentada pelo agregado F, tanto com relação à forma como com relação à angularidade, pode estar ligada, além do fato de que o material passou por somente um estágio de britagem em um britador de mandíbulas, diferentemente das outras amostras, à sua composição, que pode apresentar ainda certa quantidade de partículas finas que foram geradas no momento do desmonte do maciço rochoso, na lavra, e não desceram no escalpe realizado antes da britagem primária pelas grelhas com abertura de 70mm. Em geral, as curvas dos outros agregados parecem estar sempre muito próximas, muitas vezes sobrepondo-se, embora a curva do agregado J (areia de britagem da pedreira 3) apareça algumas vezes, para as frações abaixo de 0,6mm, mais à direita, deslocada no sentido das partículas mais angulares.

Figura 51 – Distribuição de angularidade das frações de 2,36mm



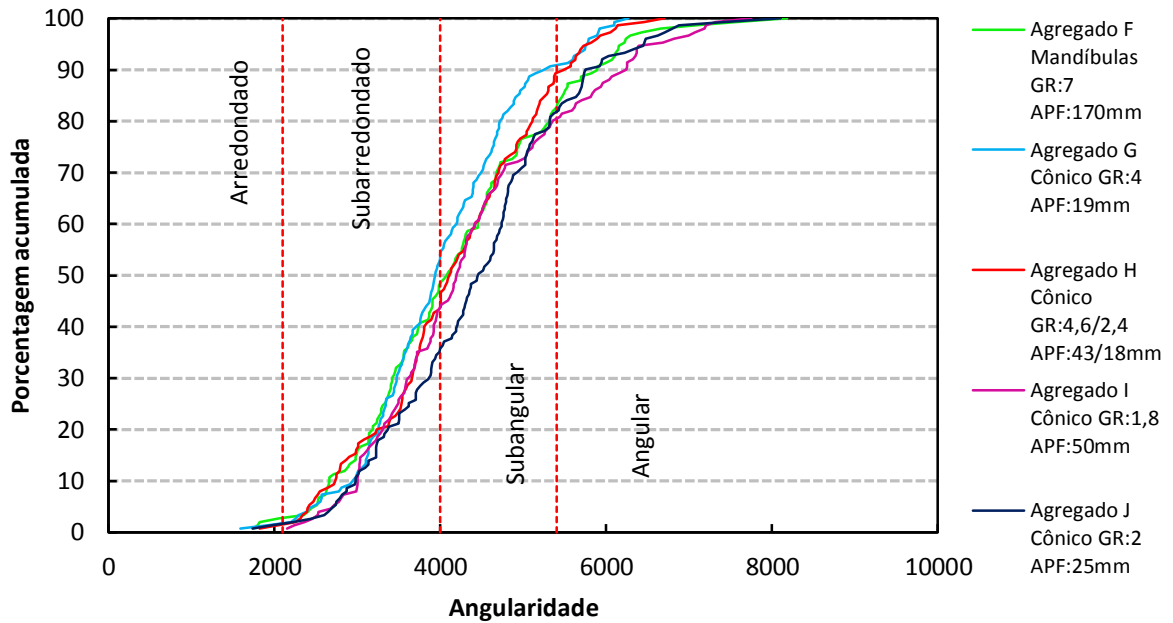
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 52 – Distribuição de angularidade das frações de 1,18mm



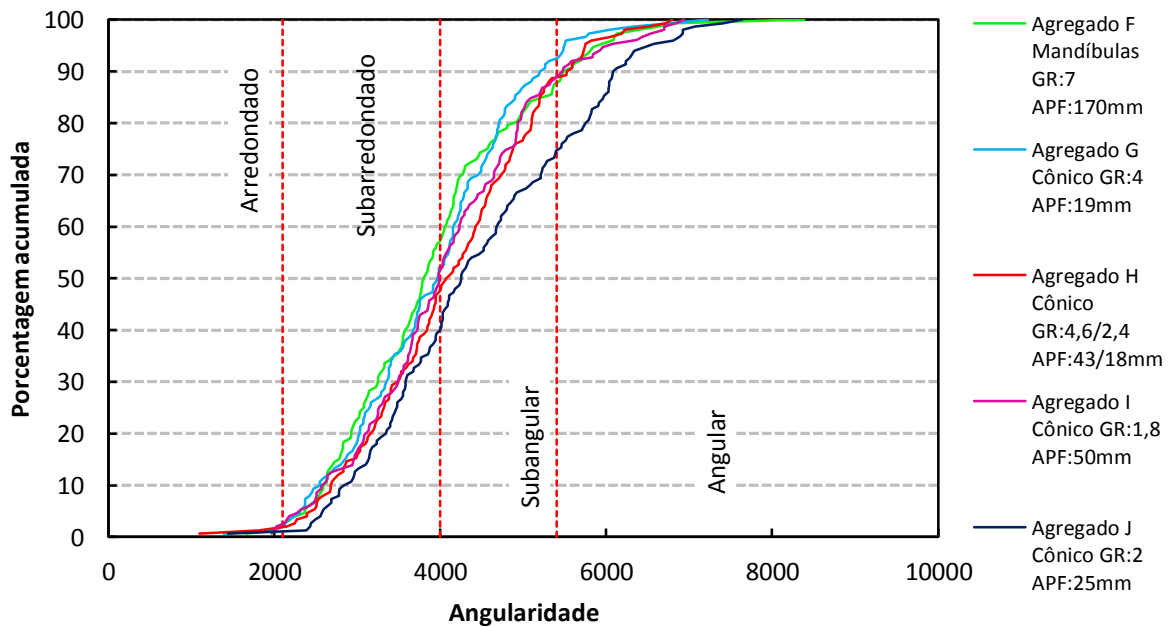
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 53 – Distribuição de angularidade das frações de 0,6mm



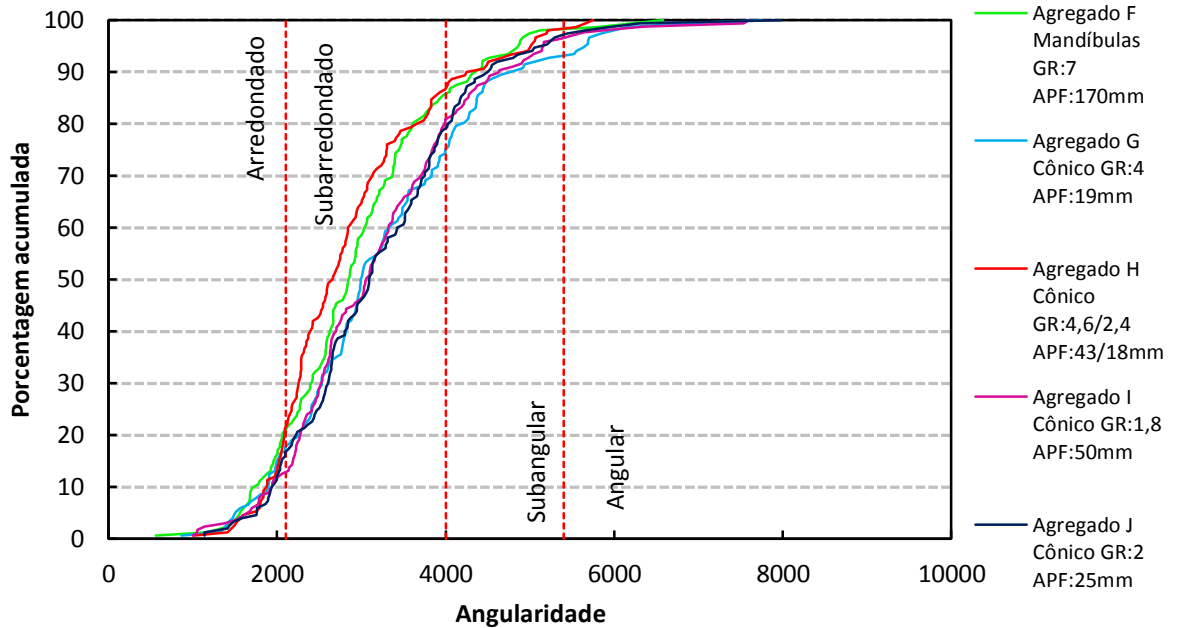
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 54 – Distribuição de angularidade das frações de 0,3mm



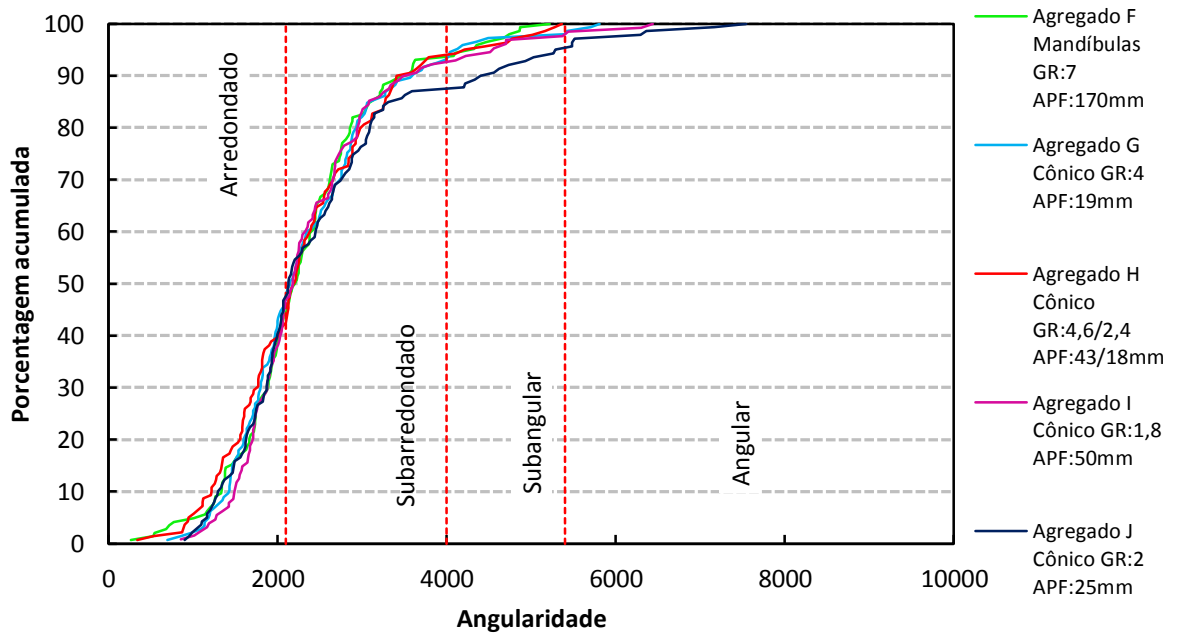
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 55 – Distribuição de angularidade das frações de 0,15mm



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 56 – Distribuição de angularidade das frações de 0,075mm



Fonte: Próprio autor (2015).

4.3 Resumo geral dos resultados

Devido à grande quantidade de informações geradas pela análise realizada com a utilização do AIMS, será apresentada, nas Tabelas 9 e 10, a ordem estabelecida entre os agregados graúdos e miúdos, para cada propriedade, considerando os resultados médios. O número 1 representa o material que obteve o maior valor de cada propriedade, exceto para a forma 2D, cujo número 1 representa o material que obteve menor forma 2D, isto é, aquele que apresentou partículas com forma mais próxima de um círculo (menos alongadas). Ou seja, as melhores posições do *ranking* são para agregados graúdos com partículas mais esféricas, angulares e rugosas, e para agregados miúdos com partículas mais angulares e circulares.

Tabela 9 – *Ranking* estabelecido entre os agregados graúdos para cada propriedade analisada com o uso do AIMS

Parâmetros do processo de britagem				Ordem dos agregados			
Agregado	Último britador	Último(s) GR	Última(s) APF(mm)	Esfericidade	Angularidade	Textura	
Graúdos	A	Mandíbulas	7	170	3	1	2
	B	Cônico	4	19	2	3	5
	C	Cônico	4,6 / 2,4	43 / 18	5	4	4
	D	Cônico	1,8 / 2	50 / 25	4	2	3
	E	Cônico	2	25	1	5	1

Fonte: Próprio autor (2015).

Tabela 10 – *Ranking* estabelecido entre os agregados miúdos para cada propriedade analisada com o uso do AIMS

Parâmetros do processo de britagem				Ordem dos agregados		
Agregado	Último britador	Último(s) GR	Última(s) APF(mm)	Angularidade	Forma 2D	
Miúdos	F	Mandíbulas	7	170	5	1
	G	Cônico	4	19	2	3
	H	Cônico	4,6 / 2,4	43 / 18	3	3
	I	Cônico	1,8	50	4	2
	J	Cônico	2	25	1	4

Fonte: Próprio autor (2015).

Ressalta-se que o agregado B não apresentou, em sua composição, a fração de 4,75mm em quantidade suficiente para ser avaliada com o uso do AIMS, assim como o agregado D não apresentou a fração de 19mm. Como foi notado que a esfericidade das

partículas tende a diminuir com a redução do tamanho destas, acredita-se que, caso esses materiais tivessem apresentado todas as frações graúdas, o agregado B teria um menor valor de esfericidade e o agregado D teria um maior valor para essa propriedade. Por fim, é importante destacar que as posições dos agregados no *ranking* exposto não necessariamente revelam uma grande diferença entre os valores de propriedades dos materiais, como também não são resultantes, necessariamente, do processo de britagem, pois, como foi visto anteriormente, alguns agregados apresentaram valores de propriedades muito próximos entre si, e a propriedade de textura não mostrou estar relacionada à britagem.

De maneira geral, pelo *ranking* exposto, sugere-se que o agregado graúdo A, retirado do produto do primeiro estágio de britagem, realizado por britador de mandíbulas, pode ser o material mais indicado para utilização em misturas asfálticas, devido à apresentação de uma combinação adequada de parâmetros de forma e de angularidade em relação aos outros materiais. Além desses dois parâmetros, a textura superficial desse agregado, propriedade ligada à sua mineralogia, também apresenta rugosidade adequada, se comparada aos outros materiais. Já para os agregados miúdos, os materiais G e J mostraram melhores posições no *ranking*, considerando a combinação da angularidade com a forma 2D.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo realizado sobre os processos de britagem de três pedreiras localizadas na RMF, pôde-se perceber que, apesar de serem utilizados, em geral, os mesmos tipos de equipamentos para fragmentar as partículas e gerar agregados, esses processos apresentam uma série de diferenças que podem influenciar as propriedades de forma dos produtos. A seguir, serão listados itens importantes que puderam ser concluídos com a análise das propriedades de forma dos materiais coletados, tanto por meio do ensaio tradicional normatizado pelo DNIT, como com o uso do AIMS, o qual utiliza o PDI para avaliar as partículas.

- Os resultados do ensaio de IF mostraram que existe uma diferença entre os produtos gerados pelos processos de britagem analisados. O agregado E, que passou, no último estágio de britagem, por GR de 2 e APF de 25mm (próximo ao TMN do agregado, 19mm) e cuja vazão de alimentação do último britador é controlada rigorosamente, de maneira a manter a câmara de britagem sempre cheia, apresentou IF em torno de 20% maior que os outros três agregados produzidos por britadores cônicos com maiores GR ou maiores APF (B, C e D). O agregado A, produzido por britador de mandíbulas, apresentou IF 12,5% menor que o citado agregado E, e 5% maior que os agregados B, C e D, mostrando que, com relação à forma, pode ser um material adequado ao uso em misturas asfálticas.

- A comparação entre os resultados do ensaio tradicional e a análise por meio do AIMS mostrou que os valores de IF e de esfericidade apresentaram boa correlação, com R^2 de 0,85. O ensaio tradicional, entretanto, baseia-se apenas nos valores médios, que não representam bem todas as partículas, pois estas apresentaram elevados coeficientes de variação de esfericidade (chegando a 22%), com partículas classificadas em três faixas distintas para um mesmo agregado. Além disso, constatou-se que o ensaio tradicional de IF não considera o alongamento das partículas, mas apenas seu achatamento.

- As partículas de 19mm dos agregados graúdos gerados por britadores cônicos não apresentaram diferença significativa de esfericidade entre produtos de diferentes processos. Entretanto, à medida que se diminuiu o tamanho das partículas observadas, notou-se que produtos gerados por processos com menor número de estágios e, conseqüentemente, reduções maiores em cada estágio, apresentam partículas mais achatadas e alongadas, enquanto os processos em que a fragmentação é realizada de maneira mais distribuída, com maior número de estágios de britagem, geraram produtos mais cúbicos. Percebeu-se também que, para um mesmo agregado, quanto menor for o tamanho das partículas (mais distantes do

valor da APF do britador), menos cúbicas estas tendem a ser. O produto que passou apenas por um britador de mandíbulas, entretanto, mostrou um comportamento diferente do descrito para os outros agregados, não apresentando uma variação da esfericidade em relação ao tamanho das partículas.

- O parâmetro de angularidade de agregados graúdos mostrou ter sido influenciado pelo processo de britagem. O agregado que passou por 4 estágios de britagem (E) apresentou-se 6,4% menos angular que os outros três produtos oriundos de britadores cônicos (B, C e D) que passaram por menores quantidade de estágios, os quais mostraram-se bastante próximos entre si. Já o agregado produzido por um estágio em britador de mandíbulas (A) mostrou uma angularidade 7,5% maior que a média dos três intermediários (B, C e D). Esses resultados podem ser atribuídos ao fato de que, ao longo do processo de britagem, as partículas perdem suas quinas durante a fragmentação. Logo, partículas que passam por mais estágios tendem a apresentar cantos menos angulares. A textura dos agregados mostrou-se estar mais relacionada à composição mineralógica do material e ao tamanho das partículas do que ao processo de britagem.

- Os agregados miúdos não apresentaram a mesma tendência de comportamento com relação à forma 2D que os agregados graúdos com relação à esfericidade, para os diferentes processos de britagem, sugerindo que, nesses processos, essas partículas não são fragmentadas analogamente à fragmentação dos agregados graúdos. Os agregados miúdos devem ser compostos, na maior parte, pelos pequenos fragmentos que são arrancados dos agregados graúdos quando estes são comprimidos, podendo essa compressão ocorrer tanto entre duas partículas como entre partícula e parede do britador. Os resultados sugerem que havendo material miúdo na câmara de britagem, essas partículas podem sofrer fragmentação interparticular, gerando produtos mais circulares. Foi determinada uma forte correlação entre os resultados de Forma 2D e de angularidade para os agregados miúdos analisados, com R^2 de 0,97.

- De maneira geral, pode-se concluir que algumas ações que propiciam a produção de partículas graúdas mais cúbicas, isto é, mais adequadas para uso em serviços de pavimentação com relação à forma, são: aumentar a quantidade de estágios de britagem, de maneira que em cada estágio as partículas passem por um GR menor; ajustar a APF dos britadores finais do processo para que estes fiquem com tamanhos próximos ao tamanho das maiores partículas geradas; controlar a velocidade de alimentação dos britadores para que se consiga manter a câmara de britagem sempre cheia, realizando uma britagem de rocha contra rocha. Deve-se atentar, contudo, à possibilidade desse processo acabar tornando as partículas

muito arredondadas, sem a angularidade necessária para garantir o intertravamento do esqueleto mineral das misturas asfálticas. Ressalta-se, ainda, que a brita corrida com finos, retirada diretamente do material produzido pelo britador de mandíbulas do estágio primário da Pedreira 3 (agregado A), apresentou características de forma e de angularidade adequadas, em relação aos materiais retirados dos produtos finais, oriundos de britadores cônicos, o que indica que esse agregado pode proporcionar bom comportamento a misturas asfálticas, com relação às propriedades analisadas.

São muitos os parâmetros de um processo de britagem que podem influenciar as propriedades de forma dos agregados e, como foi observado, pode acontecer de uma alteração em um parâmetro, realizada com o intuito de melhorar determinada propriedade, acabar diminuindo a qualidade do agregado em relação a outras características. Serão propostas, a seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros que podem dar prosseguimento ao presente estudo e seguir ampliando o conhecimento sobre esse tema.

- Investigar a variabilidade existente entre propriedades de forma de amostras retiradas de um mesmo produto de determinada pedreira.
- Utilizar um britador de laboratório para produzir agregados variando parâmetros, de maneira a avaliar mais minuciosamente o impacto dessas variações nas propriedades de forma das partículas geradas.
- Analisar as propriedades de forma de agregados produzidos por outros tipos de equipamentos, como, por exemplo, um Britador de Impacto de Eixo Vertical.
- Avaliar parâmetros volumétricos e mecânicos de misturas asfálticas compostas por agregados com diferentes propriedades de forma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ROUSAN, T. M. *Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Texas A&M University, College Station, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/szfK0B>>. Acesso em: 3 mai. 2015.

ALVES, V. A. H. S. **Avaliação da Resistência a Degradação Mecânica de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/83w1Yo>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252-06**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA, 2006.

_____. **ASTM D4791**: Standard Test Methods for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA, 2010.

_____. **ASTM D5821**: Standard Test Methods for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA, 2013.

ARAÚJO, V. M. de C. *et al.* Utilização do Processamento Digital de Imagens para Caracterização de Material Fresado. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 27, 2013, Belém. **Anais...** Belém: ANPET, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/mNfQVm>>. Acesso em: 10 set. 2015.

ARAÚJO, V. M. de C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 28, 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANPET, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/jt83Bj>>. Acesso em: 3 jul. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregado Graúdo – Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro – Método de ensaio. Rio de

Janeiro, 2006.

_____. **NBR 7809**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ARAGÃO, F. T. S. *Effects of aggregates on properties and performance of mastics and superpave hot mix asphalt mixtures*. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Engenharia Civil, University of Nebraska, Nebraska, 2007.

BENGTSSON, M.; EVERTSSON, C. M. *An empirical model for predicting flakiness in cone crushing*. *International Journal of Mineral Processing*, v. 79, n. 1, p. 49-60, 2006.

BERN, R. (1997) Agregados Cúbicos – Produção de Agregados de Alta Qualidade com Impactores e Britadores Cônicos. *Areia e Brita*, v. 1, p. 13 – 20. ANEPAC, 1997.

BERNUCCI, L. B. *et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2010.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Avaliação da Resistência ao Polimento e a Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los Angeles e o Processamento Digital de Imagens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 7, 2011, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: ABCR, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/ZTNJ7E>>. Acesso em: 5 set. 2015.

BESSA, I.S. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. TF; SOARES, J. B. Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations. *Construction and Building Materials*, v. 37, p. 370-378, 2012.

BRIGGS, C.; EVERTSSON, C. M. Shape potential of rock. *Minerals engineering*, v. 11, n. 2, p. 125-132, 1998.

CARVALHO, M. X. S. de. Equipamentos de Fragmentação: **Uma Revisão Avaliando Circuitos:** Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CASTELO BRANCO, V. T. F. *et al.* Caracterização de forma, angularidade e textura de agregado de brita granítica e escórias de aciaria usando o Aggregate Imaging System (AIMS). In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes–ANPET. CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 10, 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: ANPET. 2006.

CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, R. E. R. **A Indústria de Agregados para Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza.** Fortaleza: DNPM, 2012.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Britagem, Peneiramento e Moagem.** 5ª ed. – São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHEN, J-S.; LIN, K. Y; CHANG, M. K. *Influence of Coarse Aggregate Shape on the Strength of Asphalt Concrete Mixtures.* *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, p. 1062-1075, 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2015: Relatório Gerencial.** Brasília: CNT; SEST; SENAT, 2015.

COSTA, H. N. *et al.* Estudo da forma dos grãos de areias de britagem provenientes de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56, 2014, Natal. **Anais...** Natal: IBRACON. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 2ª Edição. Rio de Janeiro: IPR, 2006. Disponível em: <<http://goo.gl/M8zS8H>>. Acesso em: 3 mai. 2015.

_____. **DNER-ME 083: Agregados – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER-ME 086: Agregado – Determinação do Índice de Forma.** Rio de Janeiro, 1994.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M. de; LUZ, A. B. da. **Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios.** Centro de Tecnologia Mineral, 2004. p. 113-194. Disponível em: <<http://goo.gl/rBCgCz>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

GOUVEIA, L. T. de. **Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Transportes) – Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo, 2006.

GUIMARÃES, M. S. *et al.* **Aggregate Production: Fines Generation During Rock Crushing.** *International Journal of Mineral Processing*, v. 81, n. 4, p. 237-247, 2007.

HAGEMANN, S. E. **Apostila de Materiais de Construção Básicos.** Universidade Aberta do Brasil do Instituto Federal Sul-rio-grandense, RS, 2011.

MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. (2001) *Correlation of Imaging Shape Indices of Fine Aggregate with Asphalt Mixture Performance.* **Transportation Research Board, 80th Annual Meeting.** Washington, DC, 2001.

MASAD, E. A. **Aggregate Imaging Measurement System (AIMS): Basics and Applications.** *Texas Transportation Institute.* The Texas A&M University System. *Project performed in cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration.* Report n° FHWA/TX-05/5-1707-01-1, 2005a.

MASAD, E. A. *et al.* **Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture and Angularity.** Report NCHRP – 555, *National Cooperative Highway Research Program.* National Research Council, Washington, DC, 2005b.

MASAD, E. *et al.* *Analysis of aggregate shape characteristics and its relationship to hot mix asphalt performance.* **Road Materials and Pavement**, v. 8, n. 2, p. 317-350, 2011.

METSO. *Aggregates - Crushers*. Disponível em: <<http://goo.gl/K5zDQA>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Produzidas com Ligantes Asfálticos Modificados por Ácido Polifosfórico e Aditivos Poliméricos, Enfatizando a Resistência à Deformação Permanente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

PAZOS, A. G. **Efeitos de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

RAO, C.; TUTUMLUER, E.; KIM, I. T. *Quantification of Coarse Aggregate Angularity Based on Image Analysis*. ***Journal of the Transportation Research Board*** n° 1787 p. 117-124, 2002.

SINGH, D.; ZAMAN, M.; COMMURI, S. *Inclusion of Aggregate Angularity, Texture, and Form in Estimating Dynamic Modulus of Asphalt Mixes*. ***Road Materials and Pavement Design***, v. 13, n. 2, p. 327-344, 2012.

TAVARES, L. M.; NEVES, P. B. das. *Microstructure of Quarry Rocks and Relationships to Particle Breakage and Crushing*. ***International Journal of Mineral Processing***, n° 87, p. 28-41, 2008.

UNLAND, G.; SZCELINA, P. *Coarse Crushing of Brittle Rocks by Compression*. ***International Journal of Mineral Processing***, v. 74S – p. 209-217, 2004.

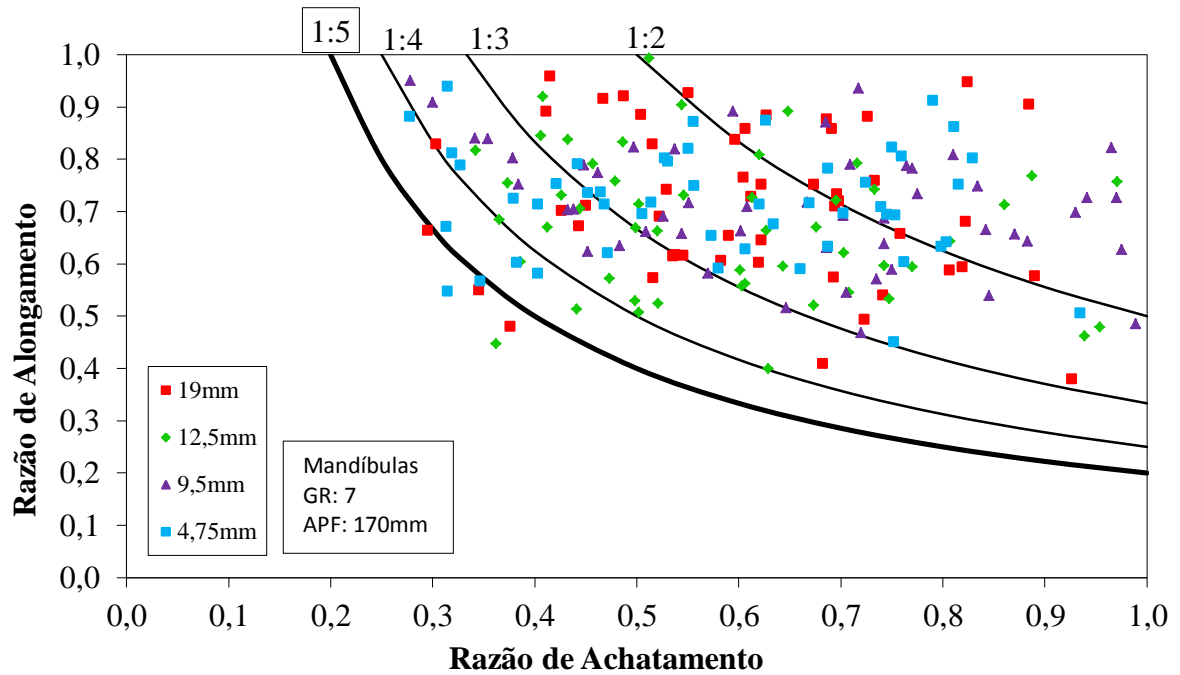
WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. ***Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery***. 7ª ed. – Elsevier, 2006. p. 123-146.

**APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE
BRITAGEM**

Localização da pedreira (endereço)
Produção mensal
Mercado atingido (para onde a produção é vendida)
Tipos de agregados vendidos (por tamanho máximo nominal)
Forma de controle de qualidade do material
Forma de armazenagem do material
Mineralogia do material (tipo de rocha explorada)
Sequência de britagem e peneiramento (quantidade de estágios de britagem), tipo de britador utilizado em cada etapa, com suas principais características
Outras Informações (ex.: operação a úmido; eliminação de finos; utilização de pulmão etc.)

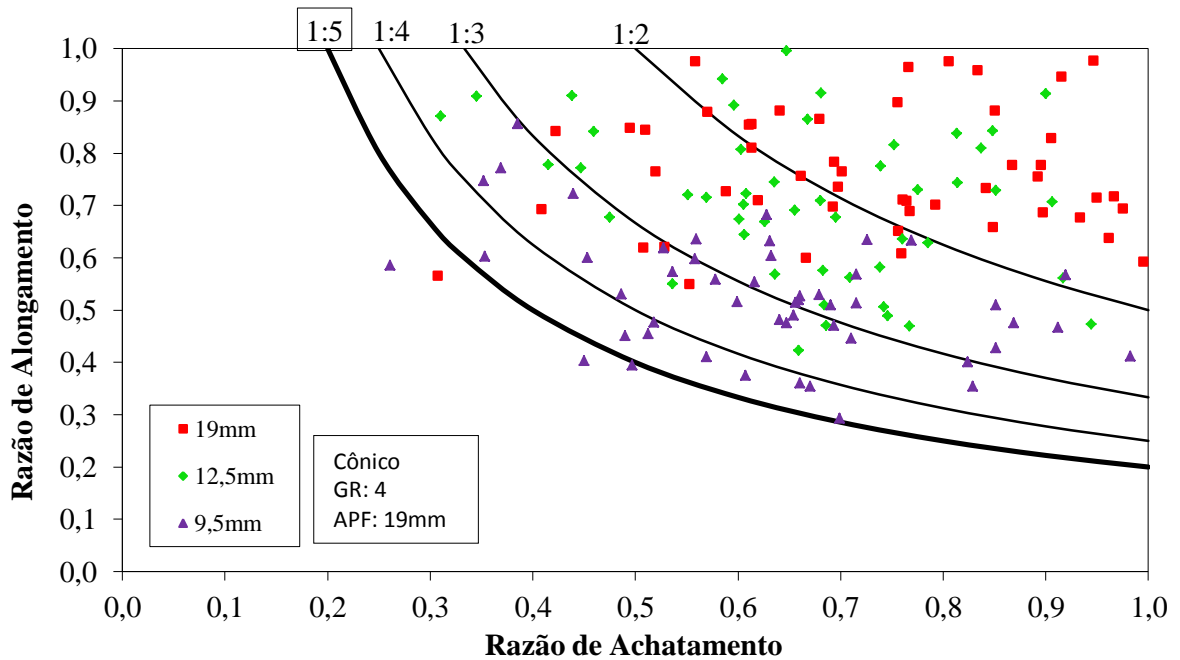
APÊNDICE B – RAZÕES ENTRE AS DIMENSÕES DOS AGREGADOS

Figura 1 – Razões entre as dimensões dos agregados – Agregado A



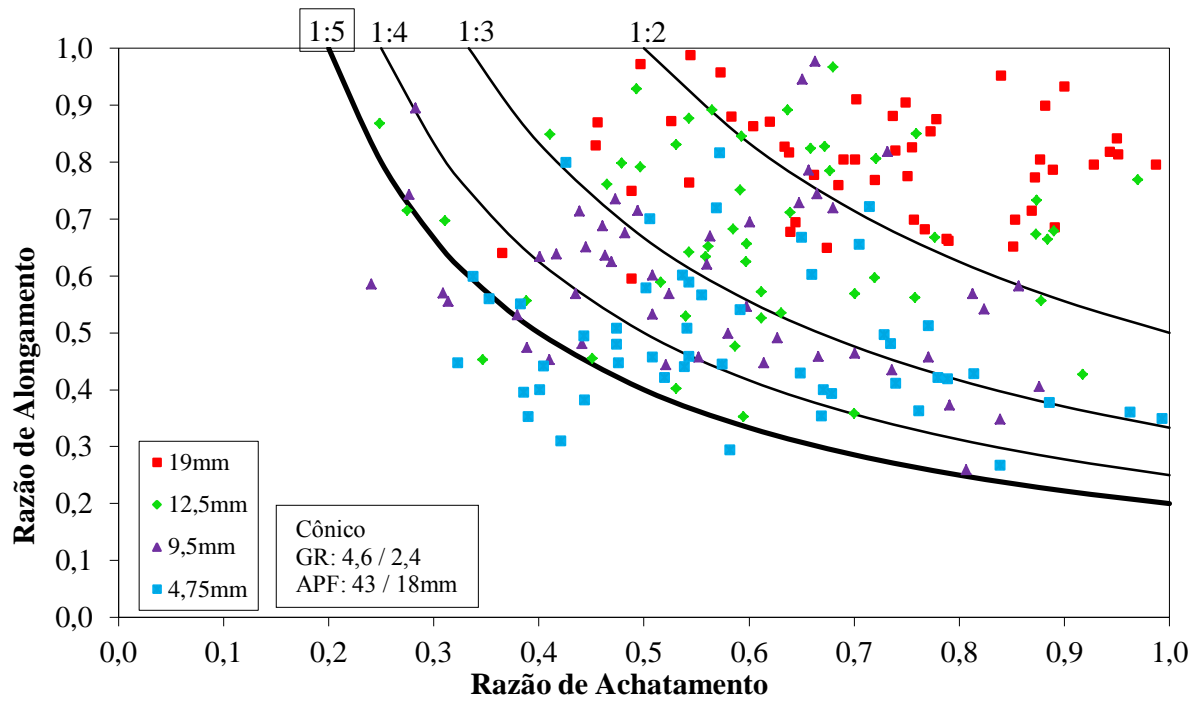
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 2 – Razões entre as dimensões dos agregados – Agregado B



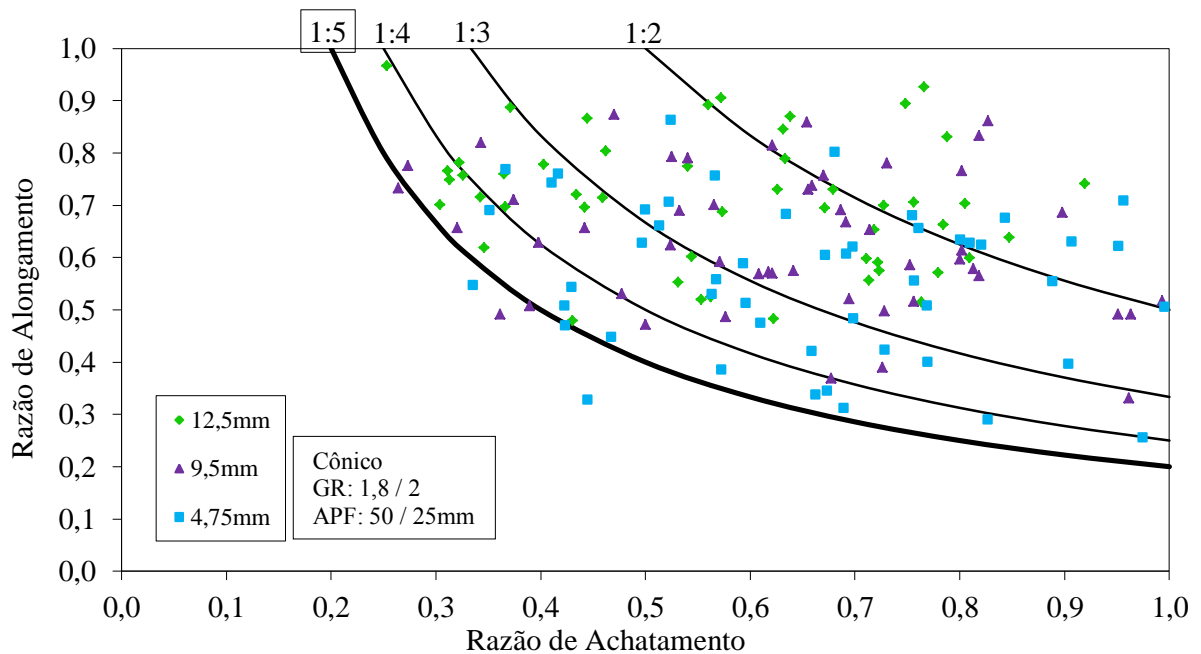
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 3 – Razões entre as dimensões dos agregados – Agregado C



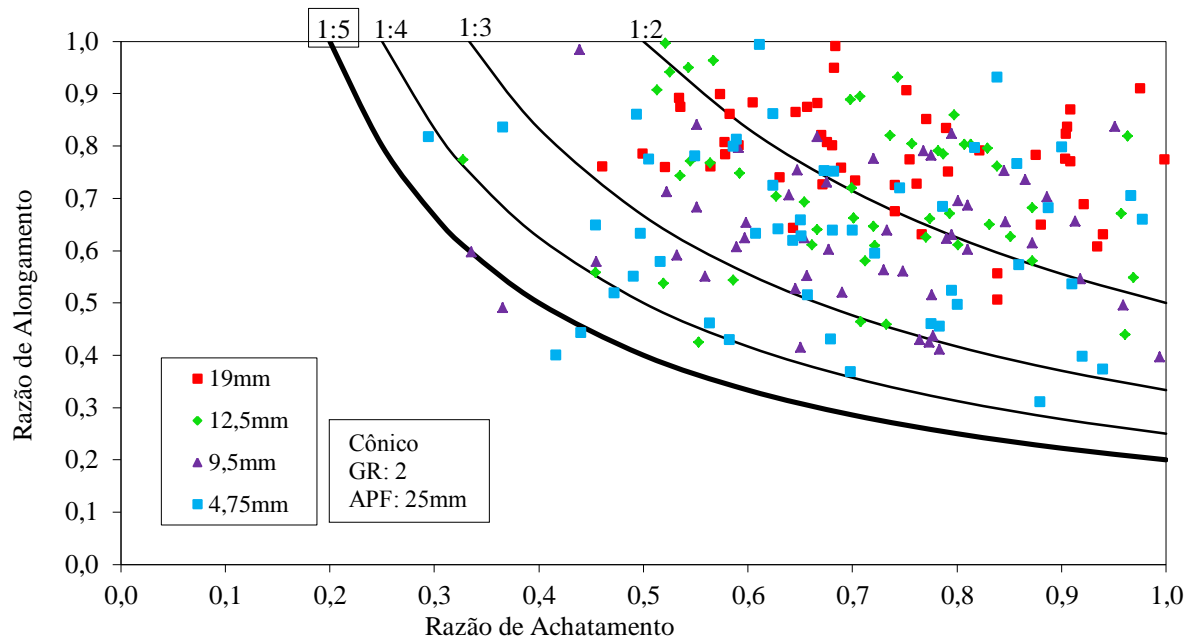
Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 4 – Razões entre as dimensões dos agregados – Agregado D



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 5 – Razões entre as dimensões dos agregados – Agregado E



Fonte: Próprio autor (2015).