

Influence of crusher type in the shape of fine crushed aggregate grains

Influência do tipo de britador na forma dos grãos de agregados miúdos de britagem

G. C. HICKEL^a
guilhermechickel@gmail.com

G. C. BOAVENTURA^a
giovane.carlosboaventura@hotmail.com

R. A. SOUZA^a
ras@ifsc.edu.br

L. M. CALÇADA^a
lucianamaltez@ifsc.edu.br

J. M. CASALI^a
juliana.casali@ifsc.edu.br

A. M. BETIOLI^a
andrea.betioli@ifsc.edu.br

A. L. OLIVEIRA^a
alexandre@ifsc.edu.br

Abstract

Quarries have invested in equipment to increase production and improve the quality of their products, such as vertical shaft impact crushers (VSI). This type of crusher works with autogenous comminution of the material to improve the shape of the coarse aggregates. However, there are few studies about the influence of crushers in the shape of fine aggregate grains. In this context, gneiss and granite fine crushed aggregates, produced in cone crushers and VSI were studied. Parameters such as coefficient of volumetric shape, aspect ratio, and circularity were used to compare these aggregates with the river sand. The results showed that there is a difference between the shape of the sand river and the fine crushed aggregates. Among the crushed aggregates, those from the VSI showed improvements in grain shape, compared to aggregates from cone crushers. However, this improvement decreases with the reduction of grain size. Mortars produced with the studied aggregates were also evaluated. It was verified their influence on the consistency, the air content and compressive strength at 28 days. For the study in the mortar, the crushed aggregates were separated in fractions by sieving and composed to obtain the same granulometric distribution for all the aggregates. The mortars made with the crushing aggregates from the VSI showed higher fluidity, lower air content and higher compressive strength when compared to the crushed aggregates produced in the cone crusher.

Keywords: crushed aggregates, grain shape, crushers.

Resumo

As pedreiras têm investido na aquisição de equipamentos para aumentar a produção e melhorar a qualidade dos seus produtos, como os britadores de eixo vertical – VSI (*Vertical Shaft Impact*). Esse tipo de britador realiza a cominuição autógena do material melhorando o formato dos grãos dos agregados miúdos. Contudo, existem poucos estudos sobre a influência dos britadores na forma dos grãos para os agregados miúdos. Nesse contexto, foram estudados agregados miúdos de britagem de gnaíse e de granito, produzidos em britadores cônicos e VSI. Foram avaliados parâmetros de forma como coeficiente de forma volumétrico, relação de aspecto e arredondamento em comparação com as mesmas propriedades obtidas para uma areia de rio. Os resultados mostraram que existe diferença entre a forma dos grãos da areia de rio e a dos agregados de britagem. Entre os agregados de britagem, os provenientes do VSI apresentaram melhorias na forma dos grãos, frente aos agregados provenientes dos britadores cônicos. Entretanto, essa melhora diminui com a redução do tamanho dos grãos. Avaliou-se, também, argamassas produzidas com os agregados estudados, verificando sua influência sobre a consistência, o teor de ar incorporado e a resistência à compressão aos 28 dias. Para o estudo em argamassa os agregados miúdos de britagem foram separados em frações por peneiramento para posterior composição da mesma curva granulométrica para todos os agregados. As argamassas confeccionadas com os agregados de britagem provenientes do VSI apresentaram uma maior fluidez, menor teor de ar incorporado e maior resistência à compressão, se comparado com os agregados de britagem produzidos no britador cônico.

Palavras-chave: agregado de britagem, forma dos grãos, britadores.

^a Federal Institute of Santa Catarina, Academic Department of Civil Construction, Florianópolis, SP, Brazil

1. Introdução

Os agregados graúdos e miúdos representam 60 a 80 % da composição volumétrica de um concreto de cimento Portland, sendo que cerca de 30 % é ocupado pelo agregado miúdo. Dentro desse universo, o emprego de agregados miúdos de britagem pelas centrais dosadoras de concreto vem crescendo. Segundo Weidmann[1], que focou seu estudo no estado de Santa Catarina, fatores como constância nas propriedades granulométricas, baixo teor de impurezas e o menor impacto ambiental, se comparado com os agregados miúdos provenientes de rios e cavas, vêm contribuindo para esse crescimento. Contudo, apesar das vantagens mencionadas, os agregados de britagem apresentam desvantagens relacionadas à forma dos grãos.

No intuito de melhorar esta deficiência e aumentar cada vez mais o mercado consumidor, as empresas produtoras de agregado de britagem (pedreiras) têm investido em tecnologia e novos equipamentos. O principal destaque tem sido o uso de britadores mais modernos e eficientes, buscando corrigir a forma dos grãos, a composição granulométrica e até mesmo a quantidade de finos. Como destaque disso, tem-se o crescente uso dos britadores de eixo vertical (VSI – vertical shaft impact) [1]. Esses britadores foram desenvolvidos no final da década de 1960 na Nova Zelândia, ganhando espaço na indústria do concreto [2]. O princípio de cominuição dos britadores tipo VSI baseia-se na aceleração das partículas através de um rotor central que gira em alta velocidade. Os grãos entram pela parte central do rotor e são arremessados pela força centrífuga para as laterais do equipamento, a velocidades que podem atingir até 90 m/s (aproximadamente 320 km/h), podendo se chocar no colchão formado pelos agregados acumulados na carcaça do britador, ou nos agregados que caem em forma de cascata lateral (Figura 1). A redução das partículas ocorre devido ao choque de rocha contra rocha [3], gerando uma quantidade maior de partículas finas e um agregado com forma mais cúbica se comparado aos agregados obtidos nos britadores cônicos [5]. Normalmente os britadores VSI são empregados nas pedreiras como britadores terciários, para a produção exclusiva de agregado miúdo de britagem ou para a redução de dimensão de algum material que eventualmente apresenta pouca valor comercial.

Um outro tipo de equipamento comumente encontrado nas pedreiras como britador secundário e terciário é o britador cônico. Esse possui um êmbolo central oscilante que, em movimentos circulares, hora se afasta, hora se aproxima da carcaça lateral do britador (Figura 2). A britagem propriamente dita ocorre por esmagamento da rocha entre os revestimentos do êmbolo (manto) e da carcaça, ou entre as próprias partículas pressionadas [6, 7, 8]. Contudo a fratura das partículas neste tipo de britador obedece, em muitos casos, planos preferenciais de fraturas das rochas, em funções de constituições mineralógicas, podendo gerar agregados com forma pouco favorável para a produção de concretos [9], conforme apresentado na Figura 3.

O meio técnico-científico já conhece os benefícios dos britadores VSI na melhoria da forma dos grãos dos agregados graúdos de britagem (Figura 3) [9,10]. Muitas centrais dosadoras de concreto do sul do país escolhem seus fornecedores de agregados graúdos considerando, além do preço e do tipo de rocha, o tipo de britador,

uma vez que o este pode trazer melhoria no formato do material e reduções significativas de custos das misturas e consumos de cimento [9].

Em se tratando de agregados miúdos, Bengtsson & Evertsson [11] avaliaram a influência de um britador cônico e um britador VSI,

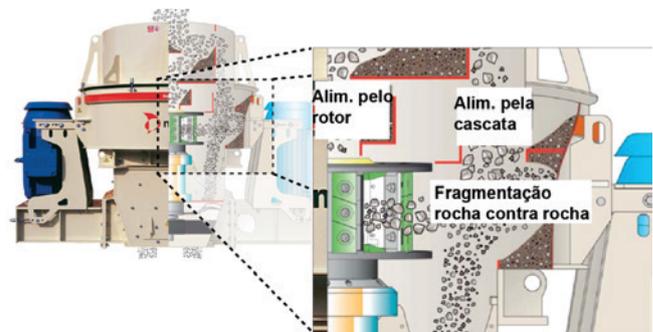


Figura 1
Detalhe de funcionamento do britador VSI (adaptado de Metsominerals [4])

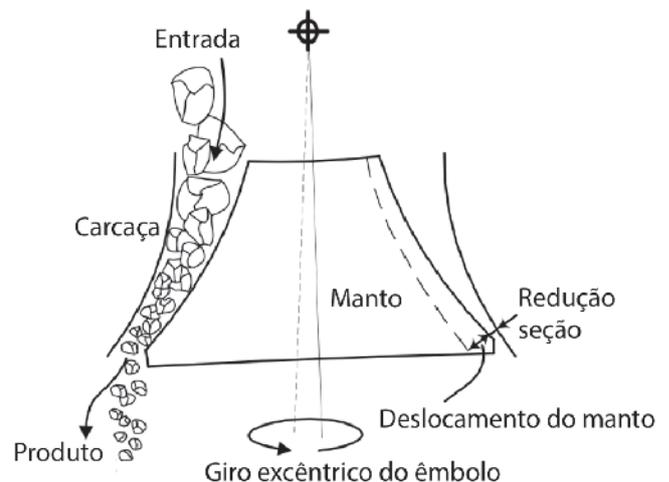


Figura 2
Detalhe de funcionamento do britador Cônico (adaptado de Itävuo *et al.* [8])

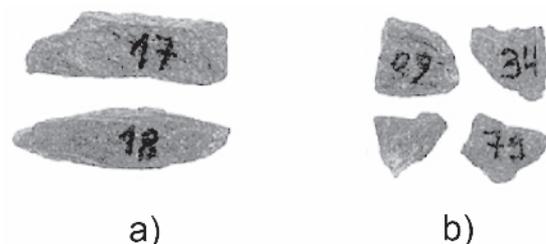


Figura 3
Forma de agregados graúdos de origem basáltica (a) proveniente de britadores tipo cônico (b) proveniente de VSI (adaptado de Wedmann [9])

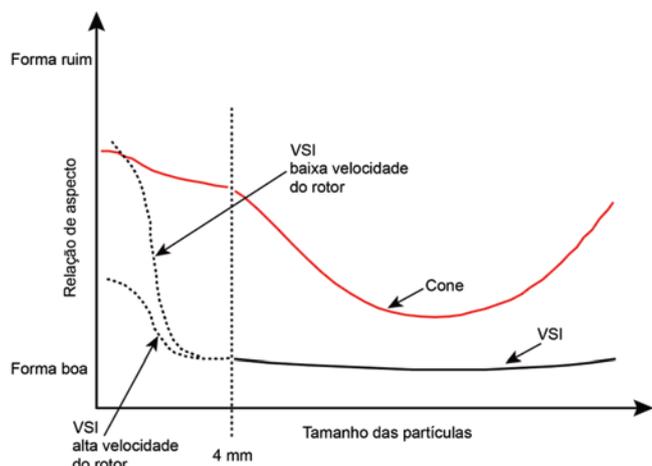


Figura 4
Relação de aspecto para agregados de britagem proveniente de VSI (alta e baixa velocidade do rotor) e Cônico (adaptado de Bengtsson *et al.* [14])

com diferentes velocidades do rotor, na forma de agregados miúdos de tonalito. Os referidos autores mostraram que a relação de aspecto (razão entre a menor e a maior dimensão de Feret) dos agregados miúdos proveniente do britador cônico são menores do que os obtidos com o britador do tipo VSI. Contudo, quando a velocidade do rotor do VSI é baixa, a relação de aspecto do material resultante se aproxima da relação de aspecto do agregado produzido com uso do britador cônico (Figura 4).

Weidmann [9] comparou a forma de agregados miúdos de britagem de origem basáltica provenientes de britadores do tipo VSI e girosféricos. O referido autor empregou o método proposto por Pudêncio *et al.* [12] que baseia-se na Norma francesa AFNOR NF EN 933-4 [13] para a determinação do coeficiente de forma volumétrico das frações, empregando-se imagens digitais para a obtenção das maiores dimensões dos grãos. Weidmann [9] mostrou que as frações mais grossas dos agregados miúdos de britagem (fração entre as peneiras 4,8 mm e 1,2 mm) sofrem melhorias significativas na forma dos grãos. No entanto, o material passante na peneira de abertura 0,6 mm não apresenta variações signifi-

Tabela 1
Coeficiente de forma volumétrico¹ de agregado miúdo de origem basáltica em função do tipo de britador (Weidmann [9])

Peneira (mm)	Coeficiente de forma volumétrico ¹	
	Britador VSI	Britador girosférico
4,8	0,66	0,116
2,4	0,177	0,124
1,2	0,173	0,127
0,6	0,186	0,32
0,3	0,153	0,42
0,15	0,63	0,153

¹ Coeficiente de forma volumétrico determinado segundo a AFNOR NF EN 933-4 [11] e os procedimentos prescritos por Prudêncio *et al.* [12]

vas na forma dos grãos em função do tipo de britador (Tabela 1). Fabro *et al.* [15] avaliaram a forma dos grãos de agregados miúdos de britagem de origem basáltica (frações entre as peneiras 4,8 mm a 0,3 mm), provenientes de diferentes britadores (cone, martelo e VSI) e compararam os resultados com a forma de um agregado natural proveniente de rio. Os resultados mostraram que a forma dos agregados de britagem depende do tipo de britador e que os agregados provenientes do VSI apresentaram coeficientes de forma mais próximos do agregado miúdo natural. Além disso, os referidos autores concluíram que o coeficiente de forma volumétrico [12] e o indicador de lamelaridade proposto por Kwan *et al.* [16] foram os parâmetros que permitiram melhor avaliação da forma dos grãos dos agregados.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do tipo de britador (VSI e cone) na forma de agregados miúdos de britagem de granito e de gnaiss e em comparação com um agregado miúdo natural de rio, além de avaliar a possível influência das diferenças de formato dos grãos nas propriedades de argamassas produzidas com os referidos materiais. Vale destacar que os poucos trabalhos encontrados no país, foram feitos com rochas de origem basálticas.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Materiais

Para a realização deste estudo, foram coletados agregados de britagem em duas pedreiras do estado de Santa Catarina. A primeira pedreira, situada na região da grande Florianópolis, produz agregados miúdos de britagem de origem granítica, e a segunda, situada na região do Vale do Itajaí, produz agregados miúdos de britagem de gnaiss. Conforme mencionado anteriormente, também foi utilizada uma areia natural de rio, proveniente da mesma região da segunda pedreira (Vale do Itajaí), mais precisamente,



Figura 5
Localização das pedreiras onde os materiais empregados no presente trabalho foram coletados

próximo a cidade de Blumenau (Figura 5). As duas pedreiras mencionadas possuíam em sua linha de produção os dois britadores, cônico e VSI como britadores secundários e terciários, respectivamente, o que possibilitou a coleta de agregados de mesma origem produzidos por meio dos dois britadores mencionados. Ambas as empresas trabalham com o britador VSI sem o efeito de cascata (somente material passando pelo rotor e se chocando com a cama de rocha da carcaça) para a produção de agregados miúdos de britagem. As areias de britagem foram coletadas na esteira de saída dos britadores, durante um dia de produção em regime normal. A esteira era parada por um determinado tempo e o material, contido em uma seção com aproximadamente 1,5 a 2,0 m de comprimento era removido e acondicionado em tambores plásticos. Esse procedimento foi realizado duas a três vezes, em intervalos de aproximadamente 1 hora, conseguindo-se quantidades de material suficiente para os estudos em laboratório (cerca de 100 a 150 kg de material). Os materiais foram encaminhados ao laboratório de tecnologia de materiais de construção civil do IFSC/Florianópolis, onde foram colocados em estufa para posterior peneiramento preliminar, empregando-se uma peneira de malha 4,8 mm, cujo intuito foi eliminar a parcela de agregado graúdo presente.

Após o peneiramento preliminar, o material passante na peneira de malha 4,8 mm de cada amostra de areia de britagem, bem como o agregado miúdo natural, foram caracterizados segundo as prescrições da ABNT NM-248 [17], ABNT NM-46 [18], ABNT NM-52 [19], para a determinação da composição granulométrica, teor de material pulverulento e massa específica aparente, respectivamente. Além disso, o material passante na peneira de abertura 0,075 mm foi caracterizado com relação a distribuição granulométrica empregando-se um analisador de imagem dinâmica de partículas com capacidade de análise de grãos com dimensões de 800 a 1 µm.

2.2 Determinação dos parâmetros de forma dos grãos

Uma amostra de aproximadamente 1,5 kg de cada material foi tratada previamente, para a determinação dos parâmetros de forma. Essas amostras foram lavadas em laboratório por repetidas vezes através da peneira 0,075mm, até que todo material pulverulento

fosse removido. Toda a água utilizada no processo de retirada do pulverulento foi armazenada em recipientes metálicos e submetida a secagem em estufa, com o intuito de coletar o material passante na peneira 0,075 mm para posterior análise. Vale destacar que o material acima da peneira 0,075 mm também foi encaminhado a estufa para secagem e posterior peneiramento.

Após o processo de lavagem e secagem, o material acima da peneira 0,075 mm foi peneirado, empregando-se a seguinte série de peneiras: 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, para a remoção de eventual fração de pulverulento que por ventura ainda estivesse presente. Este resíduo de material pulverulento foi misturado com o pulverulento removido por lavagem. O material removido com a água e passante na peneira 0,075 mm, após a secagem em estufa, foi passado por uma peneira de abertura 0,038 mm; sendo o material passante na referida peneira armazenado no fundo. Cada fração de material retida nas peneiras mencionadas acima, e o material do fundo foram acondicionados em sacos plásticos, lacrados e devidamente identificados para posterior determinação dos parâmetros de forma.

Neste trabalho foram determinados:

O coeficiente de forma volumétrico, conforme as recomendações de Prudêncio *et al.* [12] e empregando-se a Equação (1). Esse coeficiente foi determinado para as frações compreendidas entre as peneiras 2,4 mm e 0,3 mm;

A relação de aspecto, com base na Equação (2), para o material compreendido entre a peneira 2,4 mm e o fundo;

O arredondamento [20], dado pela Equação (3), também, para o material compreendido entre a peneira 2,4 mm e o fundo.

$$Cf_{\text{fração}} = \frac{m_{\text{fração}}/d_{\text{fração}}}{\pi/6 \cdot \sum L^3} \quad (1)$$

Onde: $Cf_{\text{fração}}$ é o coeficiente de forma volumétrico, com base na AFNOR NF EN 933-4 [13] e nas recomendações de Prudêncio *et al.* [12].

$m_{\text{fração}}$ = massa dos grãos analisados nas imagens digitais.

$d_{\text{fração}}$ = massa específica aparente da fração analisada.

L = Maior dimensão de cada grão determinada mediante a análise das imagens digitais.

$$Ra = \frac{L_{\text{Ferret}}}{C_{\text{Ferret}}} \quad (2)$$

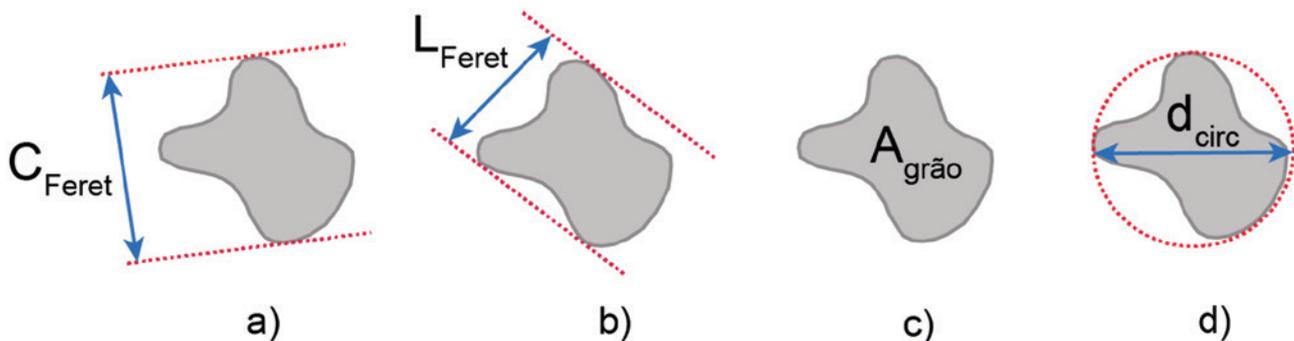


Figura 6

Detalhe das medidas para a determinação da relação de aspecto (Ra) e do arredondamento (Ar): a) Comprimento de Ferret; b) Largura de Ferret; c) Área do grão em projeção plana; d) Diâmetro do círculo que circunscreve o grão

Onde:

Ra = Relação de aspecto.

C_{Feret} = Comprimento de Feret, que consiste na maior dimensão possível entre duas retas paralelas que tangenciam o grão na imagem (Figura 6a).

L_{Feret} = Largura de Feret, que consiste na menor dimensão possível entre duas retas paralelas que tangenciam o grão na imagem (Figura 6b).

$$Ar = \frac{4 \cdot A_{gr\grave{a}o}}{\pi \cdot d_{circ}^2} \quad (3)$$

Onde:

Ar = Arredondamento do grão.

$A_{gr\grave{a}o}$ = Área do grão em projeção plana (Figura 6c).

d_{circ} = Diâmetro da circunferência que circunscreve o grão (Figura 6d).

Para a obtenção das imagens digitais foi empregada uma lupa estereoscópica ZEISS, modelo Stemi 2000-C com captação direta de imagem mediante uma câmera AxioCam Erc-5s. O sistema de iluminação e a definição do brilho eram ajustados para obtenção do maior contraste dos grãos para posterior análise das imagens com o software livre FIJI (Schindelin *et al.* [21]). Vale destacar que o equipamento (lupa estereoscópica) possibilitava a inclusão de uma escala gráfica de referência, em função do grau de aumento empregado (zoom) para facilitar a calibração da imagen no software FIJI e obtenção das medidas desejadas com maior precisão. Para as frações abaixo da peneira 0,075 mm se fez necessária a utilização de mesa digitalizadora *Bamboo™ Pad* para a definição manual do contorno dos grãos. Isso se deu em função da pequena

dimensão dos mesmos, formação de grumos e/ou superposição de partículas, aliado ao fato de uma grande quantidade de grãos translúcidos, incapazes de serem analisados automaticamente e com precisão, apenas pelo ajuste do histograma de frequências (threshold) (Figura 7). Vale ressaltar que essa fase de definição manual dos contornos dos grãos era feita ampliando-se as imagens e pegando-se os grãos com os contornos bem definidos e sem a presença de acumulos e/ou sobreposição de grãos (Figura 7).

As frações a serem analisadas eram, primeiramente, homogeneizadas e quarteadas sucessivamente até a redução do tamanho da amostra de tal maneira que o número de grãos fosse de no mínimo 240. Esse número foi obtido em estudos pilotos, com base no desvio padrão obtido e adotando-se um grau de confiabilidade de 95% e um erro de 10%. Apesar de Presson [22], Araújo [23] e Tristão [24] recomendarem que se trabalhe com cerca de 400 grãos, optou-se por reduzir o número de grãos por fração, para diminuição de tempo de aquisição e análise de imagens. Essa redução foi feita com base nas análises de Goldoni *et al.* [20] que avaliou, dentre outras coisas, a influência do número de grãos no coeficiente de forma de partículas de agregados miúdos, mostrando que uma amostra, previamente peneirada e composta com cerca de 90 grãos tende a resultar em valores de coeficientes de forma próximos da média populacional.

As aquisições das imagens das frações retidas nas peneiras de abertura 2,40mm a 0,30mm foram obtidas soltando-se uma amostra de grãos sobre uma lâmina de vidro de forma aleatória, fazendo-se posteriormente pequenos ajustes de posição em alguns grãos para que não houvesse superposição dos mesmos. Após a aquisição das imagens, os grãos da fração que estava sendo analisada eram devidamente pesados em uma balança com resolução de milésimo de grama, para a determinação do volume real de grãos analisados, sendo calculado, posteriormente, o coeficiente de forma volumétrico da fração ($C_{f_{frac\~{a}o}}$). Em função da baixa resolução da balança, não foi possível a determinação dos coeficientes de forma volumétricos das frações inferiores a peneira 0,30 mm.

Já para as frações retidas nas peneiras de abertura 0,15 mm a 0,038mm e no fundo (passante na peneira 0,038 mm), a aquisição das imagens foi realizada com auxílio de uma fita adesiva. Primeiramente, as amostras dos grãos eram depositadas sobre as lâminas de vidro, de forma aleatória. Em função da dificuldade de movimentação das lâminas sem deslocamento dos grãos, que eram muito pequenos e leves, era colocada uma fita adesiva sobre as lâminas, para que os grãos ficassem aderidos nas mesmas. Essa fita era removida com os grãos aderidos em sua superfície colante e posicionada diretamente na lupa (com a parte da fita sem cola para baixo). Após esse procedimento, as imagens eram captadas de nove regiões da fita, três na porção ocidental, três na parte central e outras três na oriental, garantindo-se o número mínimo de grãos mencionado anteriormente e buscando regiões em que não houvessem superposições dos grãos. O tratamento posterior dessas frações no software FIJI era todo feito com o auxílio da mesa digitalizadora *Bamboo™ Pad*, pois a definição automática do contorno dos grãos era prejudicada pela constante superposição dos mesmos e pela quantidade elevada de grãos translúcidos nessas frações. Para essas frações (0,15 mm até o fundo) não foi possível a determinação do peso dos grãos em função da falta de precisão da balança e, conseqüente necessidade de muitos grãos, além

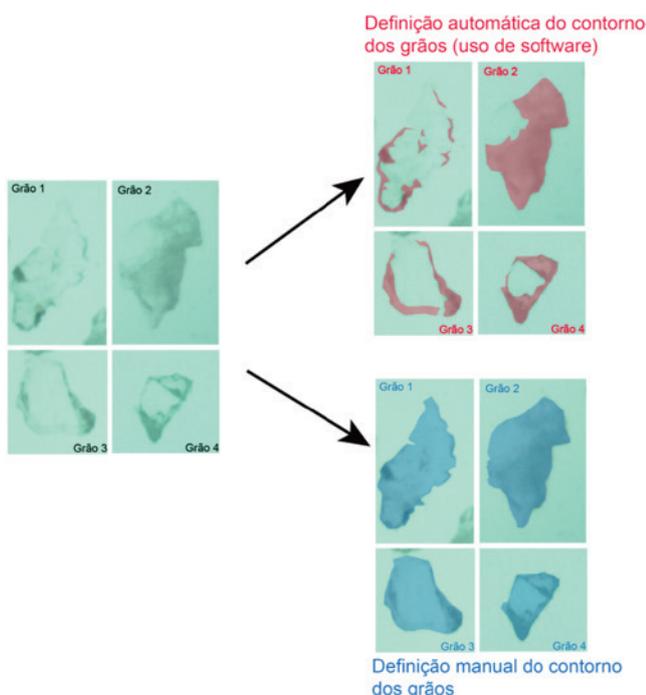


Figura 7
 Detalhe da obtenção do contorno dos grãos (material passante na peneira 0,075 mm) automática e manual

dos problemas de medida de grãos superpostos e dificuldade de ajustes dos mesmos; inviabilizando a determinação do coeficiente de forma volumétrico para o referido material.

Além da lupa estereoscópica, foi empregado neste trabalho um analisador de imagem dinâmica de partículas, para análise do material retido nas peneiras de abertura 0,075 mm, 0,038 mm e fundo. O equipamento empregado no presente estudo foi o Micro-meritics® - Particle Insight dynamic image analyzer, equipamento esse que trabalha com via úmida e capta as imagens das partículas, em tempo real, com o auxílio de uma câmera CCD (Figura 8) e realiza o processamento das mesmas diretamente no software de tratamento de imagem. Ulusoy & Yekler [25] usaram o mesmo aparelho para avaliar a influência de diferentes moinhos e propuseram usar os modelos para avaliação de forma, baseados nos círculos (Figura 6a), elipses e retângulos que circunscrevem as partículas, e nas dimensões de Feret para partículas muito irregulares (comprimento e largura—Figura 6a e 6b, respectivamente), determinados diretamente pelo software do equipamento. Contudo, conforme mencionado anteriormente, foram avaliados o fator de aspecto e o arredondamento, empregando-se as Equações (2) e (3), respectivamente, sendo os referidos parâmetros de forma determinados diretamente pelo software do analisador de imagens dinâmicas. Vale destacar que foram avaliadas 15.000 partículas para cada uma das situações.

2.3 Avaliação das propriedades de argamassas confeccionadas com os agregados miúdos de britagem provenientes dos britadores VSI e cônico

Com o intuito de averiguar se as diferenças encontradas nos parâmetros de forma dos agregados exercem influência em misturas de argamassas e concretos, foi realizado um estudo em argamassa. Padronizou-se uma curva granulométrica para todos os agregados de britagem, realizando-se o peneiramento prévio e separação das diversas frações para posterior composição e adequação à curva padronizada. Vale destacar que, em função da grande diferença existente entre a curva granulométrica do agregado miúdo natural e as curvas dos agregados de britagem proveniente dos dois britadores e da pouca quantidade de agregado natural disponível, não se empregou o agregado miúdo natural nessa fase do trabalho.

Foi empregado um traço em massa de 1:3 (cimento : agregado miúdo de britagem) fixando-se a relação água/cimento em 0,71. As argamassas foram produzidas em um misturador mecânico (argamassadeira), obedecendo-se ao seguinte procedimento de mistura:

- 1 min na velocidade 1 (velocidade lenta), misturando-se todos os materiais a seco;
- 30 s na velocidade 1 (velocidade lenta), adicionando-se a água; e
- 1 min na velocidade 1 (velocidade lenta), para a completa mistura dos materiais.

Ao término do processo de mistura, foram avaliadas a consistência das argamassas empregando-se a mesa de consistência (*Flow-table*), bem como a densidade de massa no estado fresco a fim de se detectar, indiretamente, a incorporação de ar das misturas, segundo as prescrições da ABNT NBR 13278[26].

No ensaio da mesa de consistência foram determinados os diâmetros de espalhamento (D), após a aplicação de 5, 10, 15, 20 e 30 golpes. Esta variação de golpes no ensaio de Flow-Table, prescrito pela ABNT NBR 7215 [27], foi proposta por MARTINS [28], para avaliação da consistência de argamassas com relações a/c próxima da empregada no presente trabalho.

Foram moldados três corpos de prova cilíndricos 5x10 cm, empregando-se as prescrições da ABNT NBR 7215 [27], para avaliação da resistência à compressão aos 28 dias de idade para cada mistura produzida.

Os corpos de prova foram desmoldados com 24 horas e colocados em um tanque de água saturada de cal, com temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ \text{C}$, até a data de ensaio. Antes de se proceder à ruptura, os corpos de prova foram capeados (topo e base) com enxofre, para se evitar concentrações de tensões no momento do ensaio.

3. Resultados e discussões

Primeiramente vale destacar que não houve nenhum controle dos parâmetros de equipamento e do processo de produção dos



Figura 8
Detalhe de funcionamento do analisador de imagens dinâmicas de partículas (adaptado de Ulusoy&Yekler [25])

Tabela 2

Propriedades dos agregados miúdos de britagem e natural empregados no presente trabalho

Propriedades	Porcentagem retida acumulada				Agregado miúdo natural
	Granito		Gnaisse		
	Cônico	VSI	Cônico	VSI	
# 4,8 mm	1	0	0	1	0
# 2,4 mm	25	17	10	22	0
# 1,2 mm	46	36	38	46	1
# 0,6 mm	64	56	55	61	11
# 0,3 mm	77	71	68	70	40
# 0,15 mm	87	83	78	80	82
Fundo	100	100	100	100	100
Módulo de finura	3,1	2,63	2,49	2,80	1,34
Material pulverulento	6,14%	9,90%	15,26%	14,94%	1,40 %
Massa específica	2,68 kg/dm ³		2,0 kg/dm ³		2,65 kg/dm ³

agregados utilizados nesta, tais como: velocidade do rotor, vazão de entrada do material, tamanho das partículas de entrada (abastecimento dos britadores), entre outros. Cada pedreira trabalhou com as suas regulagens e particularidades dos seus processos produtivos, sendo que muitas das análises e conclusões feitas no presente trabalho, podem ser restritas a essas pedreiras com seus respectivos materiais. A preocupação no momento da coleta foi de se obter todo o material resultante de ambos os equipamentos, sem a ocorrência de qualquer mistura ou contaminação com outros materiais. Em função disso, não serão feitas análises e conclusões da influência da origem mineralógica (granito e gnaisse), nos parâmetros de forma. Uma vez que os diferentes processos de produção de cada pedreira podem ter exercido influência na forma do material e essa variável não pôde ser controlada.

3.1 Características físicas dos agregados miúdos de britagem e natural

Na Tabela 2, são apresentadas as propriedades físicas dos

agregados miúdos de britagem e natural empregados no presente trabalho. Na Figura 9 são apresentadas as distribuições granulométricas do material passante na peneira de abertura 0,075 mm (material pulverulento) avaliado pelo analisador de imagens dinâmicas de partículas.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 2 não se pode afirmar que o tipo de britador (cônico ou VSI) tende a gerar agregado miúdo de britagem mais fino ou mais grosso. No processo de britagem com rocha granítica, o britador cônico, gerou um material mais grosso, enquanto que no processo de britagem com o gnaisse, o material passante pelo britador VSI resultou em um agregado de britagem mais grosso; isto pode ser constatado pelos valores de módulo de finura encontrados (Tabela 2).

Com base nos materiais analisados no presente trabalho, o processo de produção do gnaisse, apresentou um maior teor de material pulverulento, se comparado com o material proveniente do processo de produção do granito, independente do tipo de britador.

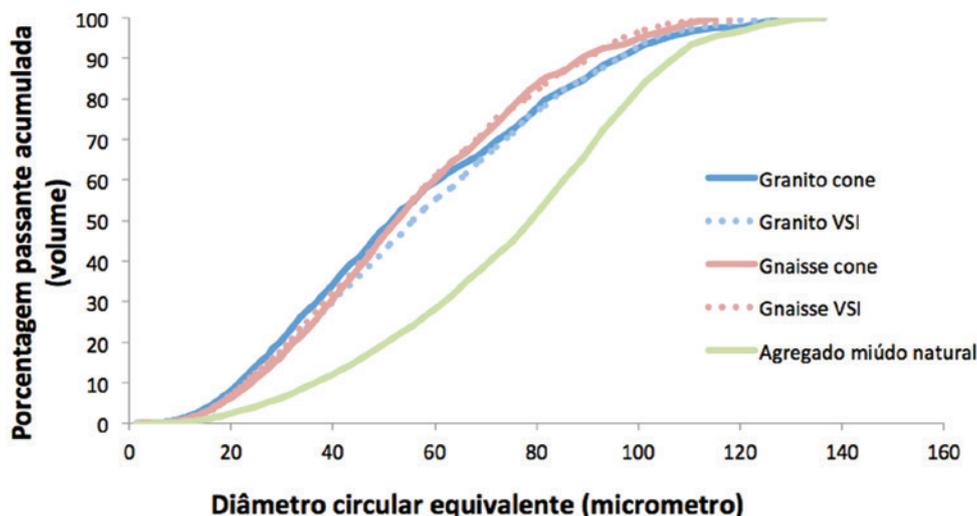


Figura 9
Distribuição granulométrica das partículas passantes na peneira de abertura 0,15 mm

Tabela 3

Coeficientes de forma volumétricos dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural

Peneira (mm)	Granito						Gnaisse						Agregado miúdo natural		
	Cônico			VSI			Cônico			VSI			Média	cv ¹ (%)	n
	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n			
2,4	0,137	24,8	300	0,254	19,8	306	0,149	21,1	587	0,217	20,8	271	-	-	-
1,2	0,149	27,7	284	0,215	23,3	308	0,097	27,7	375	0,203	25,5	602	0,297	20,7	156
0,6	0,114	25,1	310	0,175	22,2	313	0,106	28,5	247	0,174	24,4	263	0,279	20,6	177
0,3	0,094	26,6	311	0,210	24,2	314	0,112	27,4	501	0,156	27,7	315	0,309	34,8	278
0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,038	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fundo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ Coeficiente de variação = desvio padrão dividido pela média, expresso em porcentagem; n = número de partículas da amostra.

O agregado miúdo natural utilizado, é um agregado proveniente de rio, mais fino que os agregados de britagem e que vem sendo empregado por uma empresa do Vale do Itajaí para a produção de argamassas estabilizadas, em função da sua distribuição granulométrica contínua e formato dos grãos, que contribuem para a melhoria da trabalhabilidade da argamassa. Em função disso, esse material foi escolhido como referência, para os parâmetros de forma dos grãos que serão apresentados no item 3.2.

Com relação à distribuição do tamanho dos grãos para o material passante na peneira 0,075 mm, pode-se verificar, pela Figura 9, que o tipo de britador e o processo de produção com as suas respectivas rochas, parece não exercer influência na distribuição do tamanho dos grãos, uma vez que as variações são pequenas. Já o agregado miúdo natural, possui uma baixa quantidade de material passante na peneira 0,075 mm, sendo que este material pulverulento é mais grosso que os materiais pulverulentos provenientes dos agregados de britagem (Figura 9).

3.2 Parâmetros de forma dos agregados

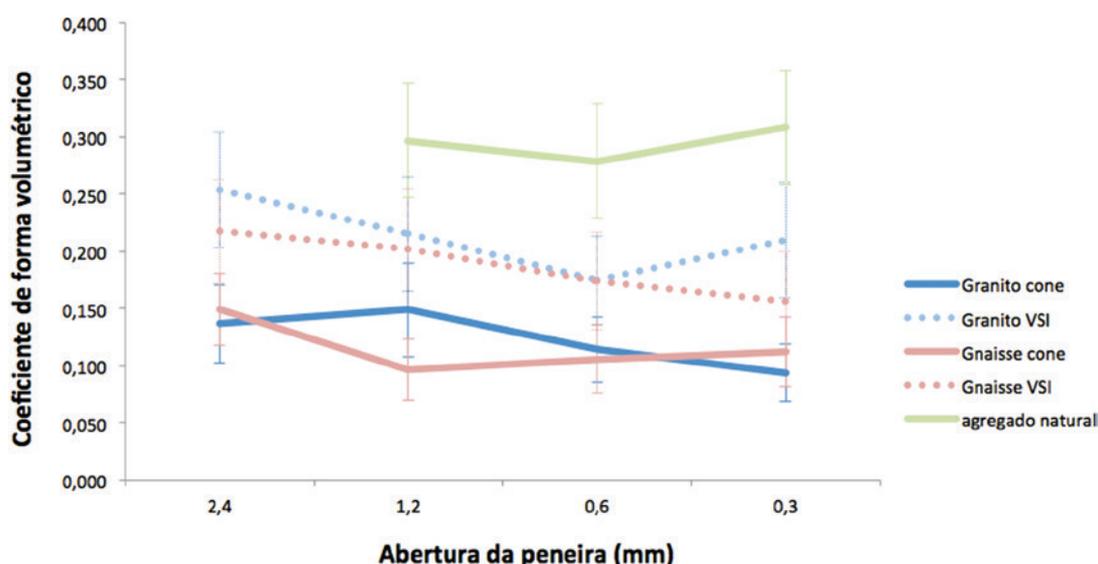
3.2.1 Análises feitas com a lupa estereoscópica

3.2.1.1 COEFICIENTE DE FORMA VOLUMÉTRICO

Na Tabela 3 e Figura 10 são apresentados os coeficientes de forma volumétricos para os agregados miúdos de britagem de granito, gnaisse e para o agregado miúdo natural, com os respectivos coeficientes de variação e número de grãos que compuseram cada amostra.

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para um experimento fatorial de 3 fatores (processo de britagem com seu respectivo tipo de rocha, tipo de britador e as diferentes frações). Um resumo dessa análise de variância encontra-se apresentado na Tabela 4.

Os resultados obtidos na análise estatística mostraram que

**Figura 10**

Coeficiente de forma volumétrico obtido com o auxílio da lupa estereoscópica para os agregados miúdos de britagem e natural

todos os fatores (processo de britagem com seus respectivos tipos de rocha, tipo de britador e as frações) influenciam significativamente nos resultados de coeficiente de forma volumétrico, com um grau de confiabilidade de 95% ($F > F_{\text{tabelado}}$). A interação entre esses fatores também exercem influência significativa; com exceção da interação entre processo de britagem e o tipo de britador; mostrando não haver diferença significativa nesse caso.

Os resultados mostram que o coeficiente de forma volumétrico do agregado miúdo natural é superior ao dos agregados miúdos de britagem.

Analisando-se a influência do britador na forma dos grãos, pode-se perceber, considerando o coeficiente de forma volumétrico, que o britador VSI melhora o formato dos grãos para ambos os

processos de britagem e suas respectivas origens mineralógicas. Percebe-se também que as frações influenciam significativamente nos resultados de coeficiente de forma volumétrico indicando uma tendência de redução no referido coeficiente de forma, com a diminuição do tamanho dos grãos.

O processo de britagem dos agregados e suas respectivas origens mineralógicas exercem influência significativa no coeficiente de forma volumétrico. Porém, quando se avalia o processo de britagem junto com os tipos de britadores, os resultados obtidos na análise estatística mostraram não haver influência. Em outras palavras, os britadores cônicos e os britadores do tipo VSI, apresentaram valores de coeficiente de forma muito semelhantes, independente do processo de britagem. Isso pode ser verificado nos gráficos da Figura 10.

Tabela 4

Resumo de ANOVA – Coeficiente de forma volumétrico dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural

Fonte	SQ ¹	Graus de liberdade	MQ ²	F	F _{tabelado}
Processo	0,36	1	0,36	228,55	3,84
Britador	8,81	1	8,81	5557,93	3,84
Fração	1,77	3	0,59	372,40	2,60
Processo+britador	0,00	1	0,00	0,84	3,84
Processo+fração	0,23	3	0,08	48,22	2,60
Britador+fração	0,38	3	0,13	79,90	2,60
Processo+britador+fração	1,24	3	0,41	260,65	2,60
Resíduo	8,86	5591	0,0016	-	-
Total	2,65	5606	-	-	-

¹ Soma quadrática dos desvios; ² Média quadrática dos desvios.

Tabela 5

Relação de aspecto dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural

Peneira (mm)	Granito						Gnaisse						Agregado miúdo natural		
	Cônico			VSI			Cônico			VSI			Média	cv ¹ (%)	n
	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n			
2,4	0,659	19,5	299	0,734	13,	306	0,681	17,2	587	0,713	15,0	271	-	-	-
1,2	0,661	21,5	299	0,720	14,1	308	0,672	18,4	978	0,702	15,7	603	0,726	14,0	156
0,6	0,660	19,3	309	0,694	16,0	303	0,647	20,4	787	0,711	15,9	263	0,723	15,4	177
0,3	0,623	21,0	310	0,686	16,0	315	0,664	19,6	501	0,684	16,7	315	0,724	14,7	238
0,15	0,599	21,7	186	0,629	22,8	262	0,639	23,1	467	0,658	20,2	561	0,719	14,9	235
0,075	0,626	22,8	361	0,595	25,8	372	0,642	21,4	464	0,654	19,4	296	0,704	15,6	248
0,038	0,633	23,0	267	0,626	22,2	355	0,618	22,5	580	0,639	21,9	417	0,671	17,2	250
Fundo	0,662	17,8	267	0,622	19,6	322	0,628	19,2	341	0,634	19,8	274	0,653	17,6	407

¹ Coeficiente de variação = desvio padrão dividido pela média, expresso em porcentagem; n = número de partículas da amostra.

Tabela 6

Resumo de ANOVA – Relação de aspecto dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural

Fonte	SQ ¹	Graus de liberdade	MQ ²	F	F _{tabelado}
Processo	0,22	1	0,22	13,28	3,84
Britador	1,17	1	1,17	71,17	3,84
Fração	7,62	7	1,09	66,32	2,01
Processo+britador	0,17	1	0,17	10,17	3,84
Processo+fração	0,85	7	0,12	7,3	2,01
Britador+fração	2,32	7	0,33	20,23	2,01
Processo+britador+fração	4,02	7	0,57	34,96	2,01
Resíduo	205,42	12514	0,02	-	-
Total	221,79	12545	-	-	-

¹ Soma quadrática dos desvios; ² Média quadrática dos desvios.

3.2.1.2 RELAÇÃO DE ASPECTO

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de relação de aspecto para os agregados miúdos de britagem de granito e de gnaiss e para o agregado miúdo natural, com seus respectivos coeficientes de variação e número de partículas empregadas.

Com base nos dados apresentados na Tabela 5, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) para um experimento fatorial de 3 fatores (processo de britagem com seus respectivos tipos de rochas, tipo de britador e as diferentes frações). Um resumo dessa análise de variância encontra-se apresentado na Tabela 6.

Os resultados obtidos na análise estatística mostraram que todos os fatores (processo de britagem com seus respectivos tipos de rochas, tipo de britador e as frações) influenciam significativamente nos resultados de relação de aspecto, com um grau de confiabilidade de 95% ($F > F_{\text{tabelado}}$). A interação entre esses fatores também exercem influência significativa.

Em se tratando da relação de aspecto, o agregado miúdo natural apresentou resultados significativamente superiores, frente aos agregados miúdos de britagem, sendo que a diferença entre os resultados da areia natural e as areias de britagem provenientes de VSI diminuíram para as frações mais grossas (material com dimensão superior a 1,2 mm) e também para as frações mais finas (retido na peneira 0,038 mm e no fundo).

Com relação aos britadores, o VSI apresentou valores mais elevados de relação de aspecto se comparado com o britador cônico, para ambos os processo de britagem. Contudo essa diferença na relação de aspecto parece diminuir para as frações abaixo da peneira 0,15 mm chegando, em alguns casos, a ocorrer uma inversão (relação de aspecto do britador cônico foi melhor do que o do britador VSI).

Infelizmente, não se conseguiu obter as informações de regulagens dos referidos equipamentos, e como constatado por Bengtsson *et al.* [14] e apresentado na Figura 4, os agregados produzidos no VSI podem ter sido obtidos com o rotor em velocidades mais baixas, reduzindo assim a qualidade do material no que diz respeito à forma.

Com relação ao processo de britagem e suas respectivas origens mineralógicas, os valores obtidos para a relação de aspecto com o britador VSI indicam uma melhora na forma dos grãos do agregado miúdo no processo com o agregado granítico, para as frações retidas nas peneiras 2,4 e 1,2 mm. Entre as peneiras 0,6 e 0,3 mm a relação de aspecto ficou praticamente igual. Havendo uma inversão na melhoria da forma dos grãos para o material passante na peneira 0,3 mm. Já para o britador cônico e nas frações entre as peneiras 2,4 e 0,6 mm e abaixo da peneira 0,15 mm, o processo de britagem com o agregado de gnaiss apresentou melhor relação de aspecto. Sendo que houve uma inversão nesses resultados no material retido nas peneiras 0,3 e 0,15 mm.

3.2.1.3 ARREDONDAMENTO

Na Tabela 7 são apresentados os resultados de arredondamento para os agregados miúdos de britagem de granito, gnaiss e para o agregado miúdo natural. Com base nos dados apresentados na referida tabela, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) para um experimento fatorial de 3 fatores (processo de britagem com seu respectivo tipo de rocha, tipo de britador e as diferentes frações). Um resumo dessa análise de variância encontra-se apresentado na Tabela 8.

Tabela 7

Arredondamento dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural

Peneira (mm)	Granito						Gnaiss						Agregado miúdo natural		
	Cônico			VSI			Cônico			VSI			Média	cv ¹ (%)	n
	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n			
2,4	0,584	20,1	299	0,658	13,5	306	0,542	30,9	587	0,627	18,6	271	-	-	-
1,2	0,579	18,6	284	0,643	15,2	308	0,574	20,3	375	0,596	25,5	603	0,64	14,8	142
0,6	0,574	20,4	309	0,614	16,8	313	0,543	21,6	274	0,605	25,4	263	0,41	20,7	177
0,3	0,546	21,4	310	0,605	16,7	314	0,568	20,0	303	0,594	21,4	315	0,59	15,8	238
0,15	0,529	22,0	186	0,539	27,4	262	0,553	24,1	467	0,573	23,0	561	0,36	20,0	235
0,075	0,552	23,1	361	0,529	26,2	372	0,565	21,8	464	0,579	20,6	296	0,638	16,4	248
0,38	0,540	24,2	267	0,532	23,0	355	0,545	24,3	580	0,571	23,0	417	0,601	18,6	250
Fundo	0,500	23,1	267	0,542	21,0	322	0,564	19,5	341	0,561	20,5	274	0,582	18,3	407

¹ Coeficiente de variação = desvio padrão dividido pela média, expresso em porcentagem; n = número de partículas da amostra.

Tabela 8

Resumo de ANOVA – Arredondamento dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural

Fonte	SQ ¹	Graus de liberdade	MQ ²	F	F _{tabelado}
Processo	0,02	1	0,2	1,12	3,84
Britador	2,53	1	2,3	158,24	3,84
Fração	4,36	7	0,62	38,98	2,01
Processo+britador	0,04	1	0,04	2,39	3,84
Processo+fração	2,56	7	0,37	22,90	2,01
Britador+fração	2,15	7	0,31	19,21	2,01
Processo+britador+fração	5,01	7	0,72	44,81	2,60
Resíduo	178,70	11194	0,02	-	-
Total	195,35	11225	-	-	-

¹ Soma quadrática dos desvios; ² Média quadrática dos desvios.

Os resultados obtidos na análise estatística para o arredondamento dos agregados mostraram que, com exceção do processo de britagem, todos os demais fatores e suas interações influenciam significativamente nos resultados de arredondamento, com um grau de confiabilidade de 95% ($F > F_{\text{tabelado}}$). O agregado miúdo natural apresentou um arredondamento significativamente superior aos agregados miúdos de britagem.

Novamente, o material proveniente do britador VSI apresentou parâmetros de forma (arredondamento) superior ao material proveniente do britador cônico. Contudo, abaixo da peneira de abertura 0,15 mm essa melhora no arredondamento não foi muito pronunciada, sendo que no caso do processo de produção com material de origem granítica e para as frações retidas

nas peneiras 0,075 e 0,038 mm, houve uma inversão nos resultados (material proveniente do britador cônico apresentou melhor arredondamento do que o material do britador VSI). Os resultados de arredondamento obtido com o VSI e para o processo de britagem com agregado de gnaiss foram sempre superiores ao agregado produzido com o britador cônico, menos para o material retido no fundo, onde o arredondamento foi igual para ambos os britadores. Já para o processo de produção com agregado granítico, produzido no VSI, os resultados de arredondamento foram um pouco mais elevados para as frações superiores a 0,15 mm, sendo que nas frações inferiores à referida abertura de peneira, parece não haver influência no arredondamento dos grãos em função do tipo de britador.

Tabela 9

Relação de aspecto dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural empregando-se o analisador de imagens dinâmicas de partículas

Peneira (mm)	Granito						Gnaiss						Agregado miúdo natural		
	Cônico			VSI			Cônico			VSI			Média	cv ¹ (%)	n
	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n			
0,075	0,641	36,0	15097	0,620	38,3	15036	0,649	39,9	15025	0,690	36	15084	0,690	29,3	15002
0,038	0,635	37,0	15180	0,608	40,1	15068	0,616	36,4	15257	0,622	36	15144	0,712	28,5	15037
Fundo	0,641	32,0	15135	0,628	34,0	15080	0,651	30,9	15143	0,641	31,1	15071	0,688	28,8	15040

Tabela 10

Arredondamento dos agregados miúdos de britagem e agregado miúdo natural empregando-se o analisador de imagens dinâmicas de partículas

Peneira (mm)	Granito						Gnaiss						Agregado miúdo natural		
	Cônico			VSI			Cônico			VSI			Média	cv ¹ (%)	n
	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n	Média	cv ¹ (%)	n			
0,075	0,558	30,5	6544	0,499	31,5	5873	0,541	32,9	4002	0,521	31,3	2163	0,615	24,9	10862
0,038	0,516	30,8	8344	0,496	32,9	8646	0,526	31,6	8720	0,533	31,7	8440	0,563	25,9	9497
Fundo	0,581	28,2	10868	0,570	28,8	10941	0,595	27,4	10867	0,587	27,4	10898	0,590	24,7	11176

Tabela 11

Resumo de ANOVA – Relação de aspecto e arredondamento dos grãos – comparação entre analisador de imagem dinâmica e lupa estereoscópica

Ensaio	Fonte	SQ ¹	Graus de liberdade	MQ ²	F	F _{tabelado}
Relação de aspecto	Processo	11,39	1	11,39	222,50	3,84
	Britador	0,5	1	0,75	14,58	3,84
	Fração	0,8	1	0,18	3,60	3,84
	Ensaio	27,44	2	13,72	268,13	3,00
	Resíduo	9498,94	185614	0,05	-	-
Arredondamento	Processo	8,88	1	8,88	335,34	3,84
	Britador	4,73	1	4,73	178,75	3,84
	Fração	0,0018	1	0,0018	0,07	3,84
	Ensaio	86,20	2	43,10	1627,51	3,00
	Resíduo	2664,16	100600	0,03	-	-

¹ Soma quadrática dos desvios; ² Média quadrática dos desvios.

3.2.2 Avaliação da forma com o analisador dinâmico de partículas para material abaixo da peneira 0,15 mm

Na Tabela 9 e 10 são apresentados, respectivamente, os resultados de relação de aspecto e arredondamento, juntamente com os tamanhos das amostras e coeficientes de variação para os materiais passantes na peneira 0,15 mm, analisados empregando-se o analisador de imagem dinâmica de partículas.

Fazendo-se uma análise de variância (ANOVA) de 4 fatores (processo de britagem, britador, fração e tipo de ensaio), empregando-se os resultados obtidos com o analisador de imagem dinâmica e com a lupa estereoscópica (tipo de ensaio) para a determinação da relação de aspecto e do arredondamento, pode-se perceber que todos os fatores exercem influência significativa nos parâmetros de forma com uma confiabilidade de 95%, com exceção da fração onde $F < F_{\text{tabelado}}$ (Tabela 11).

Semelhante aos resultados apresentados anteriormente, o agregado natural apresentou melhor relação de aspecto e arredondamento se comparado com os agregados de britagem. Contudo, quando analisado o tipo de britador, os resultados do britador cônico foram superiores aos resultados do VSI em algumas situações. Os resultados de arredondamento mostram que, para o material retido no fundo, existe uma tendência de convergência de resultados, inclusive para agregado natural. Acredita-se que isso tenha acontecido em função do tamanho das partículas retidas no fundo e da precisão da análise; onde muitas vezes o tamanho do grão avaliado com o analisador de imagem dinâmica se resume a poucos pixels.

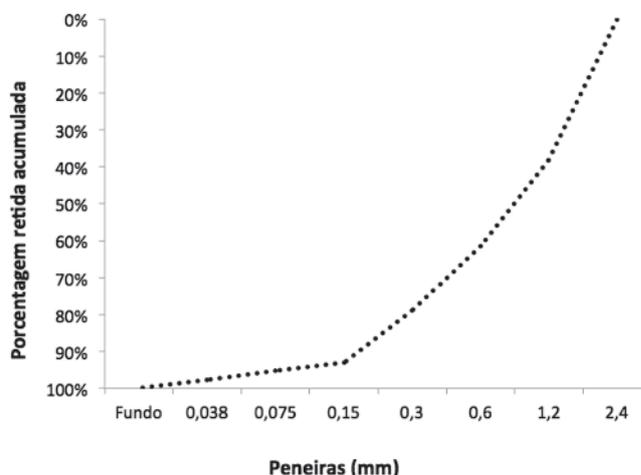


Figura 11 Curva granulométrica para produção das argamassas com os diferentes agregados de britagem

Vale ressaltar que as variabilidades (coeficiente de variação) são bem maiores quando empregado o analisador de imagem dinâmica, uma vez que um grão pode passar várias vezes pela frente do sensor de leitura em diferentes posições, causando uma variação maior nas dimensões e parâmetros obtidos com o referido aparelho.

Tabela 12

Resultados obtidos nos testes em argamassas com os agregados miúdos de britagem (granito e gnaïsse) provenientes dos britadores cônico e VSI

Propriedades		Granito		Gnaïsse	
		Cônico	VSI	Cônico	VSI
Relação de aspecto		0,643	0,685	0,657	0,691
Arredondamento		0,561	0,604	0,562	0,593
Índice de consistência (cm)	5 golpes	18,5	24,0	18,3	26,0
	10 golpes	22,5	29,8	23,8	29,8
	15 golpes	25,5	31,8	27,3	32,5
	20 golpes	28,3	33,2	29,8	34,4
	30 golpes	31,3	35,0	32,8	36,5
Teor de ar incorporado (%)		1,81	0,25	2,22	0,38

Tabela 13

Resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade

Propriedades		Granito		Gnaïsse	
		Cônico	VSI	Cônico	VSI
F_c (MPa)	CP1	18,63	19,82	18,58	23,01
	CP2	17,64	21,23	17,29	18,06
	CP3	20,27	21,38	18,47	20,55
Resistência média (MPa)		18,85	20,81	18,11	20,54
Desvio padrão (MPa)		1,328	0,860	0,715	2,475
Coeficiente de variação (%)		7,05	4,13	3,95	12,05

F_c = resistência à compressão

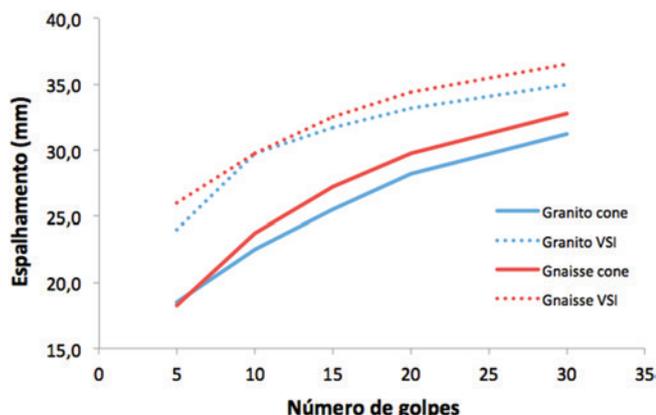


Figura 12 Resultados de espalhamento pelo número de golpes aplicados para os agregados miúdos de britagem empregados no presente trabalho

3.3 Avaliação da influência dos diferentes agregados de britagem nas propriedades de argamassas

Conforme mencionado anteriormente, após os devidos peneiramentos dos agregados, ajustou-se as quantidades para que as composições granulométricas ficassem conforme a curva apresentada na Figura 11.

Tomando-se os resultados de relação de aspecto e arredondamento, determinados com o auxílio da lupa estereoscópica (Tabelas 5 e 7) e as porcentagens retidas da curva granulométrica padronizada, determinou-se a relação de aspecto média ponderada e um arredondamento médio ponderado, multiplicando-se o referido parâmetro de forma pela porcentagem retida da respectiva peneira. Somando-se esses produtos obteve-se os parâmetros de forma médios ponderados de cada material, que são apresentados na Tabela 12. Na mesma tabela são apresentados os resultados de índice de consistência (Flow-table) para 5, 10, 15, 20 e 30 golpes e os teores de ar incorporado. Vale destacar que, para a determinação do índice de consistência e do teor de ar incorporado, foram feitas duas repetições. Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade são apresentados na Tabela 13. Analisando-se os resultados de relação de aspecto e arredondamento, obtidos para os agregados miúdos de britagem com a curva granulométrica padronizada, pode-se perceber que os valores obtidos para o material proveniente do VSI são significativamente

superiores aos valores dos materiais provenientes do britador cônico, tanto para o agregado granítico como para o agregado de gnaisse (Tabela 12).

Com relação ao processo de britagem, tanto as relações de aspecto como os arredondamentos obtidos para os agregados de britagem com a curva granulométrica padronizada não sofreram influências significativas.

Com base nos dados apresentados na Tabela 12 e os resultados de índice de consistência, construiu-se o gráfico da Figura 12, onde foram tomados os números de golpes aplicados e o respectivo valor de índice de consistência para os agregados de britagem empregados no presente trabalho. Analisando-se o referido gráfico, pode-se verificar que os valores de índice de consistência para os agregados provenientes do VSI são superiores aos resultados obtidos para o material proveniente do britador cônico.

Com relação ao processo de britagem, o agregado de gnaisse apresentou índices de consistência levemente superiores ao agregado granítico, para ambos os britadores. Porém, essa diferença não foi significativa.

No que tange ao teor de ar incorporado das misturas, o material proveniente do britador cônico apresentou valores significativamente superiores do que o material proveniente do VSI. Esse fato pode ter sido causado pela diferença nos parâmetros de forma e, conseqüentemente, diferença nos índices de consistência, fazendo com que as argamassas confeccionadas com material de VSI (melhor forma) apresentassem maior facilidade para a eliminação do ar incorporado. Essa diferença nos teores de ar incorporados pode ter sido o fator responsável pelas diferenças obtidas nos resultados de resistência à compressão. As argamassas confeccionadas com o material proveniente do VSI apresentaram valores de resistência à compressão significativamente superiores aos obtidos para as argamassas confeccionadas com o material do britador cônico (Tabela 14). Tomando-se como base os dados obtidos e apresentados na Tabela 12, parece que o processo de britagem (granito e gnaisse), não exerce influência sobre o teor de ar incorporado nas misturas nem sobre a resistência à compressão das argamassas.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos e apresentados no presente trabalho, pode-se concluir:

- 1 – De um modo geral os parâmetros de forma estudados (coeficiente de forma volumétrico, relação de aspecto e arredondamento) apresentaram uma tendência similar de caracterização de comportamento dos agregados.

Tabela 14

Resumo de ANOVA – Resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas aos 28 dias de idade

Fonte	SQ ¹	Graus de liberdade	MQ ²	F	F _{tabelado}
Processo	0,76	1	0,76	0,33	5,32
Britador	14,45	1	14,45	6,32	5,32
Processo+britador	15,37	1	15,37	6,72	5,32
Resíduo	18,28	8	2,29	-	-
Total	48,86	11	-	-	-

¹ Soma quadrática dos desvios; ² Média quadrática dos desvios.

- 2 – Com exceção do coeficiente de forma volumétrico, os demais parâmetros de forma avaliados indicam uma tendência de convergência da forma dos grãos quando da redução do tamanho das partículas, independente do processo de britagem com os seus respectivos tipos de rochas ou da natureza do agregado (britagem ou de rio).
 - 3 – O tipo de britador exerce influência no coeficiente de forma volumétrico, na relação de aspecto e no arredondamento das partículas, sendo que o britador VSI apresentou os melhores resultados nos referidos parâmetros se comparados com os resultados obtidos para o britador cônico. Entretanto, essa melhora parece diminuir com a redução do tamanho das partículas.
 - 4 – Essa tendência a convergências dos parâmetros de forma para as partículas mais finas provenientes do VSI e do britador cônico pode ter ocorrido pelo fato da velocidade do rotor dos britadores VSI estarem baixas, conforme demonstrado por Bengtsson&Evertsson [11]. Infelizmente esses dados não foram disponibilizados pelos produtores (pedreiras), pois os mesmos encaram essas informações como segredos, particularidades de regulagens das plantas produtoras que não podem ser disponibilizados para concorrentes.
 - 5 – Pelo fato do coeficiente volumétrico determinado segundo as prescrições de Prudêncio *et al.* [12] levar em consideração os aspectos tridimensionais dos grãos, o referido parâmetro parece ser o mais indicado para a caracterização da forma das partículas, obtendo-se inclusive maiores diferenças entre os materiais de origens distintas. Contudo, existem limitações nas determinações dos coeficientes de forma volumétricos para as frações inferiores a 0,3 mm.
 - 6 – Tomando-se como base os parâmetros de forma médios ponderados, determinados para a curva granulométrica padronizada, verifica-se que os materiais provenientes de VSI apresentaram melhores relações de aspecto e arredondamento médio ponderado, se comparados com os materiais provenientes do britador cônico, independente do tipo de rocha.
 - 7 – As misturas compostas com os materiais provenientes dos britadores VSI (com melhores relação de aspecto e arredondamento médio ponderado), apresentaram maiores valores de índice de consistência e menores teores de ar incorporado.
 - 8 – Acredita-se que a melhora nos resultados de resistência à compressão obtida para as misturas compostas com os materiais provenientes do britador VSI, tenha ocorrido por conta do menor teor de ar incorporado das mesmas. Vale destacar que os processos de obtenção dos agregados de britagem com suas respectivas rochas de diferentes origens mineralógicas, parecem exercer influência sobre os resultados de resistência à compressão das argamassas.
- [3] WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Oxford: Butterworth-heinemann, 8ed, 2016. 512 p.
 - [4] METSO MINERALS. Brochure No. 1123-05-04-CSR/Portuguese. Matamata (New Zealand), 2004.
 - [5] BENGTTSSON, M.; EVERTSSON, C. M. Modelling of output and power consumption in vertical shaft impact crushers. *International Journal of Mineral Processing*, Volume 88, Issues 1–2, 1 August 2008, Pages 18-23.
 - [6] CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Britagem, peneiramento e moagem*, Vol. 3. Signus Editora. São Paulo, 2006. 674p.
 - [7] ITÄVUO, P.; VILKKO, M.; JAATINEN, A. Indirect Particle Size Distribution Control in Cone Crushers, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 46, Issue 16, 2013, Pages 224-229.
 - [8] HUANG, D.; FAN, X.; WU, D.; YAO, F. Multi-objective planning of cone crusher chamber, output and size reduction, *Minerals Engineering*, Volume 20, Issue 2, February 2007, Pages 163-172.
 - [9] WEIDMANN, D. F. Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland. Florianópolis, 2008, Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 271 fls.
 - [10] Kojovic, T., 1995. *Crushers: A Quarry Australia Special Feature*. Quarry (June), 26–34.
 - [11] BENGTTSSON, M.; EVERTSSON, C. M. Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers, *Minerals Engineering*, Volume 19, Issue 15, December 2006, Pages 1479-1486
 - [12] PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. ; DAMO, G.; WEIDMANN, D. F. ; OLIVEIRA, A. L. Particle shape analysis of fine aggregate using a simplified digital image processing method. *Magazine of Concrete Research*, v. 65, p. 27-36, 2013.
 - [13] AFNOR NF EN 933-4: Test for geometrical properties of aggregates – Part 4: Determination of particle shape – Shape index. AFNOR, La Plaine Saint-Denis Cedex, France, 2000.
 - [14] BENGTTSSON, M.; HULTHÉN, E.; EVERTSSON, C. M. Size and shape simulation in a tertiary crushing stage, a multi objective perspective, *Minerals Engineering*, Volume 77, June 2015, Pages 72-77.
 - [15] FABRO, F.; GAVA, G. P.; GROGOLI, H. B.; MENEGHETTI, L.C. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. *RIEM – Revista Ibracon Estruturas e Materiais*, Volume 4, Number 2, p. 191-212, Jun. 2011.
 - [16] KWAN, A. K. H.; MORA, C. F.; CHAN, H. C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 9, p. 1403-1410, set. 1999.
 - [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. - NM 248, Rio de Janeiro, 2003.
 - [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem*. - NM 46, Rio de Janeiro, 2001.

5. Referências bibliográficas

- [1] WEIDMANN, D. F. Contribuição para determinação de metodologia de avaliação da forma de agregados e análise da influência desta propriedade em argamassas. Florianópolis, 2006, Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 90 fls.
- [2] Rodriguez, D.E. (1990). *The Tidco Barmac Autogenous Crushing Mill - A circuit design primer*. *Minerals Eng.*, 3(1/2), 53.

- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. - NM 52, Rio de Janeiro, 2009.
- [20] GOLDONI, A. G.; PANDOLFO, L. M.; GOMES, A. P.; FOLLE, D.; MARTINS, M. S.; PANDOLFO, A. Avaliação de um método baseado em análise de imagens para obtenção de parâmetros de forma em grãos de areia de britagem. RIEM – Revista Ibracon Estruturas e Materiais, Volume 8, Number 5, p. 577-590, Oct. 2015.
- [21] SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I.; FRISE, E. *et al.* Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*. 9(7): 676-682. PMID 22743772, 2012.
- [22] PERSSON, Anna-Lena. Image analysis of shape and size of ne aggregates. *Engineering Geology*, Elsevier Science Ltd, v.50, 1998.
- [23] ARAÚJO, G. S. Estudo dos parâmetros texturais das areias para argamassas de revestimento através da análise de imagens. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.
- [24] TRISTÃO, F. A. Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [25] ULUSOY, U.; YEKELER, M. Dynamic image analysis of calcite particles created by different mills, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 133, 10, Pages 83-90. Dec. 2014.
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR-13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- [27] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR-7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- [28] MARTINS, V. C. Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos. Florianópolis, 2005. Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 186 fls.