

# Influence of fine aggregates particle shape in the concrete properties

## *Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto*

F. FABRO <sup>a</sup>  
fabi\_civil@hotmail.com

G. P. GAVA <sup>b</sup>  
gpgava@yahoo.com.br

H. B. GRIGOLI <sup>c</sup>  
henriquegrigoli@hotmail.com

L. C. MENEGETTI <sup>d</sup>  
lmenegetti@gmail.com

### Abstract

Natural and manufactured fine aggregates are the most usual aggregates used in mortar and concrete. The most important difference between these aggregates is the particle shape. This property was analyzed using different parameters and was verified its influence in mortar and concrete performance. The digital image processing was used to measure the aggregate dimension and the following shape parameters were obtained: aspect ratio, sphericity, flakiness ratio and shape factor. The flakiness ratio and shape factor, which analyses the particle shape property in third dimension showed the best results. It was observed that the crushing equipment influences the particle shape. Aggregates produced by vertical impact crushing are more rounded, with particle similar to the natural sand. In the experiments the particle shape has influenced the mortar and concrete consistence. However, it did not significantly influence the compressive strength.

**Keywords:** fine aggregate, concrete, mortar, particle shape.

### Resumo

Os agregados miúdos utilizados na produção de concretos são basicamente as areias naturais provenientes dos leitos dos rios e os agregados artificiais oriundos da britagem de rocha. A principal diferença entre estes dois agregados está no formato de seus grãos. O objetivo principal deste trabalho é avaliar o formato dos grãos de agregados miúdos por meio de diferentes parâmetros, analisando as diferenças entre as formas dos agregados, e suas consequências nas propriedades das argamassas e concretos confeccionadas com estes materiais. Para medição dos grãos dos agregados empregou-se a análise digital de imagens e foram calculados os seguintes parâmetros: relação de aspecto, esfericidade, indicador de lamelaridade e coeficiente de forma, sendo que os dois últimos foram os que melhor avaliaram a forma dos agregados. Observou-se que o formato dos grãos dos agregados artificiais depende do tipo de britador empregado pelas pedreiras no processo de britagem das rochas. Os agregados oriundos do britador do tipo vertical de impacto possuem grãos mais arredondados, semelhantes aos grãos da areia natural. Verificou-se que o formato dos grãos dos agregados tem influência direta sobre a consistência das argamassas e concretos, porém não apresentou influência nos resultados de resistência à compressão.

**Palavras-chave:** agregado miúdo, concreto, argamassa, forma de partículas.

<sup>a</sup> Engenheira Civil, fabi\_civil@hotmail.com, Rua Carlos Gomes, nº 2119, apto. 404, Parque São Paulo, CEP: 85803-000, Cascavel-PR, Brasil.

<sup>b</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Curso de Engenharia Civil, gpgava@yahoo.com.br, Rua Fortaleza, nº 1740, apto. 111, Centro, CEP 85810-051, Cascavel-PR, Brasil.

<sup>c</sup> PROENERG ENGENHARIA LTDA, henriquegrigoli@hotmail.com, Rua Maringá 1719 apto. 7B, Bairro Gramado, CEP 85816-280, Cascavel-PrR, Brasil.

<sup>d</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Curso de Engenharia Civil, lmenegetti@gmail.com, Rua Recife, nº 2101, apto. 204, Centro, CEP 85810-031, Cascavel-PR, Brasil.

## 1. Introdução

Devido ao esgotamento das jazidas de agregados naturais próximos aos centros consumidores, ao aumento dos custos de transporte deste insumo e às leis de proteção ambiental que têm proibido a extração de areia natural em determinados leitos de rios, intensificou-se o uso da areia de britagem como agregado miúdo na produção de concretos [1]. Contudo, algumas características demonstram-se diferentes entre os dois agregados miúdos: as areias naturais, que são formadas por atrito, processo pelo qual ocorre a perda de vértices, possuem grãos mais arredondados, enquanto que as areias de britagem geralmente possuem seus grãos mais angulosos [2]. Sabe-se que as características dos agregados têm significativa influência nas propriedades do estado fresco e endurecido do concreto. A porosidade, a massa específica, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos agregados determinam, principalmente, as propriedades no estado fresco dos concretos e conseqüentemente exercem influência no consumo de pasta dos concretos. Verifica-se que quanto mais alongadas, angulosas e ásperas forem as partículas maior será o consumo de cimento da mistura [1, 2, 3, 4]. Do ponto de vista de resistência do concreto, as partículas angulosas são preferíveis, pois implicam melhor entrosamento entre as partículas individuais, contribuindo assim para a resistência do concreto. Por outro lado, partículas angulosas têm maior área superficial e exigem uma maior quantidade de água para a mesma consistência dos concretos, o que pode ocasionar uma diminuição na resistência à compressão [3, 5].

Segundo De Larrard [6] a relação entre as partículas finas e o total de partículas (finas + grossas) presentes na mistura de um concreto determina o seu comportamento reológico. Num primeiro momento, o volume de vazios diminui à medida que aumenta a percentagem de finos na mistura. No entanto, atingido um certo nível, os finos começam a interferir na acomodação dos grãos mais grossos e o efeito de afastamento entre as partículas torna-se preponderante, elevando o índice de vazios. Quanto mais vazios na composição granulométrica, menor é o empacotamento dos grãos. O empacotamento granular aliado às interações das partículas sólidas e líquidas contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento do concreto.

Assim, tratando da composição granulométrica entre agregado graúdo e miúdo, o grau de empacotamento deve ser considerado, o qual depende do formato das partículas, da porcentagem de cada tamanho das partículas e da fração dominante de tamanho das partículas [7].

Sendo as propriedades do concreto no estado fresco dependentes do teor e composição da pasta de cimento, quando há diminuição da quantidade de pasta, ocorre também uma redução no grau de dispersão das partículas, incrementando a interferência entre os grãos e diminuindo a fluidez. Por outro lado, existe um ponto limite para a quantidade de pasta para evitar que o concreto exsude e segregue (excesso de água) ou fique muito coeso (excesso de material fino) [6, 8].

O formato dos grãos dos agregados britados, bem como a sua granulometria, teor de material pulverulento e textura superficial dependem da origem mineralógica da rocha matriz e do tipo de equipamento empregado para a trituração da rocha. Quando são utilizados britadores do tipo cone, martelo ou rolo para obtenção

dos agregados observa-se que os grãos dos agregados apresentam-se mais angulosos do que aqueles oriundos da britagem no britador do tipo giroférico de impacto vertical, também conhecido como VSI [9, 10].

A influência da forma de agregados miúdos natural e oriundos de diferentes processos de britagem nas propriedades de argamassas do concreto e de concretos confeccionados com estes materiais foi analisada neste trabalho. Utilizou-se a análise digital de imagens como ferramenta para a caracterização dos agregados, determinando-se sua relação de aspecto, esferecidade, indicador de lamelaridade e coeficiente de forma.

### 1.1 Avaliação da forma do agregado miúdo

Existem mundialmente diversas metodologias para avaliar a forma dos agregados graúdos, sendo que a maioria depende da medição manual das dimensões dos agregados. Mora et al. [11] apresentaram o primeiro trabalho utilizando a análise digital de imagens para a avaliação da distribuição granulométrica dos agregados graúdos, no entanto Kwan et al. [12] constatam que a distribuição granulométrica de um agregado não é suficiente para avaliar a forma dos grãos deste agregado.

D'Agostino [13] utilizou imagens digitalizadas para obter parâmetros que caracterizassem a forma dos grãos de agregados miúdos e calculou os parâmetros arredondamento e a relação de aspecto, obtidos a partir das equações 1 e 2, respectivamente.

$$\text{Arredondamento} = \frac{\text{Perímetro} \times \text{Perímetro}}{4 \times \pi \times \text{Área}} \quad (1)$$

Resultados com valores iguais a um para o parâmetro de arredondamento, representam um bom arredondamento, semelhante à forma de um círculo perfeito, valores maiores que um, representam grãos com baixo arredondamento, ou seja, com um mau arredondamento.

$$\text{Relação de aspecto} = \frac{\text{comprimento do maior eixo do grão}}{\text{comprimento do menor eixo do grão}} \quad (2)$$

Gonçalvez et al. [10], Cortes et al. [4] e Westerholm et al. [14] também utilizaram o parâmetro relação de aspecto definido pela Equação 2 e calcularam o parâmetro denominado esferecidade, que corresponde ao inverso do parâmetro de arredondamento (inverso da equação 1) para avaliar a forma dos grãos dos agregados miúdos. Observa-se que estes parâmetros são baseados apenas nas dimensões obtidas a partir da projeção das partículas do agregado, ou seja, numa análise bi-dimensional da forma da partícula.

Já em 1999, preocupados com esta limitação da análise bi-dimensional, Kwan et al. [12] propuseram um novo índice para avaliar a forma dos grãos dos agregados, denominado de indicador de lamelaridade. A definição deste indicador está baseada na consideração de que as partículas de agregados de uma mesma amostra têm mais ou menos a mesma característica de forma. A partir deste critério, Kwan et al. [12] definiram que a espessura da partícula

de agregado pode ser estimada a partir das informações obtidas na imagem bi-dimensional, conforme a equação 3:

$$espessura\ média\ da\ partícula = \lambda \times largura\ da\ partícula \quad (3)$$

Onde:

$\lambda$  = parâmetro dependente da lamelaridade da partícula, indicador de lamelaridade.

Obtendo-se a largura e a área da projeção bi-dimensional da partícula a partir da análise digital da imagem das partículas do agregado e conhecendo-se a massa e a densidade da amostra de agregado analisado é possível calcular o indicador de lamelaridade pela equação 4.

$$\lambda = \frac{M}{\rho \times \sum_{i=1}^n (largura \times área)} \quad (4)$$

Onde:

$\lambda$  = indicador de lamelaridade

M = massa da amostra de agregado que foi utilizada para a medição das dimensões por meio da análise de processamento de imagens

$\rho$  = massa específica da amostra de agregado

largura = corresponde a menor dimensão do retângulo que circunscreve a projeção da partícula do agregado na imagem digital  
 área = corresponde a área projetada da partícula do agregado na imagem digital.

Mora e Kwan [15] e Kwan e Mora [16] verificaram que há uma boa correlação entre os valores do indicador de lamelaridade e a densidade de empacotamento do agregado, enquanto que os parâmetros bi-dimensionais como alongamento e relação de aspecto não se correlacionam bem com a densidade de empacotamento. Devido à dificuldade para a avaliação da forma dos agregados miúdos, Weidmann [17] utilizou o processamento digital de imagens para medir a maior dimensão de cada grão do agregado e calcular o coeficiente de forma do mesmo. Com o resultado das análises das imagens, obtêm-se a maior dimensão do grão, com a qual, baseando-se na norma francesa AFNOR XP P18-540 (1997) apud (Weidmann, [17]), pode-se calcular o coeficiente de forma para cada fração segundo a equação 5.

$$Cf_{fração} = \frac{m_{fração}}{\pi/6 \times \sum L^3} \quad (5)$$

Onde:  $m_{fração}$  = massa de todos os grãos contidos na imagem;

$d_{fração}$  = massa específica da fração analisada;

L= maior dimensão de cada grão determinado com auxílio do programa de análise de imagens.

Tendo-se o coeficiente de cada fração é possível calcular o coeficiente de forma do agregado, definido pela equação 6.

$$Cf_{agregado} = \frac{\sum_{i=1}^n Cf\ de\ cada\ fração \times respectiva\ \% \ retida\ em\ cada\ peneira}{\sum \% \ retida\ em\ cada\ peneira} \quad (6)$$

Weidmann [17] utilizou o parâmetro coeficiente de forma para avaliar a forma de agregados miúdos naturais e oriundos da britagem de rochas e verificou que os agregados naturais apresentaram coeficientes de forma maiores (próximos a 0,2) do que os agregados britados.

Neste procedimento a norma francesa apresenta um coeficiente de forma volumétrico, ou seja, estabelece uma relação entre o volume dos grãos e o volume de uma esfera que circunscreve estes grãos. Observa-se que o indicador de lamelaridade ( $\lambda$ ) proposto por Kwan et al. [12] é também um parâmetro volumétrico, o qual relaciona o volume dos grãos com o volume de um paralelepípedo que circunscreve este grão. Apesar dos parâmetros indicador de lamelaridade e coeficiente de forma terem sido propostos há mais de 11 e 5 anos, respectivamente, não se encontrou na literatura qualquer referência que avaliasse comparativamente estes parâmetros com os demais para avaliar a forma dos grãos dos agregados miúdos.

## 2. Materiais e programa experimental

### 2.1 Materiais

O cimento empregado foi o Cimento Portland Composto com adição de Pozolana – CP II Z-32, que apresentava uma massa específica de 2,99 g/cm<sup>3</sup>, área superficial Blaine de 3568 cm<sup>2</sup>/g e resistência à compressão média aos 28 dias de 35,3 MPa.

O agregado miúdo natural utilizado foi uma areia de rio proveniente de Guairá (PR).

Os agregados miúdos artificiais consistiam em rejeitos do processo de britagem de rocha basáltica para obtenção de agregados graúdos, os quais não eram submetidos a nenhum processo de beneficiamento e por isso apresentavam elevada quantidade de material fino, sendo denominados de pó-de-pedra neste trabalho. Os pós-de-pedra eram oriundos de três pedreiras distintas (denominadas Pedreiras A, B e C) as quais exploram a rocha basáltica e utilizam diferentes tipos de britadores para trituração da rocha. Destas três pedreiras foram obtidos cinco tipos de pós-de-pedra, diferenciando-os pelo tipo de britador, a saber: britador do tipo Cone, britador do tipo martelo e britador vertical de impacto (VSI). Além destes pós-de-pedra, foi estudado um sexto tipo de agregado miúdo artificial que consistiu em um rejeito de britagem de rocha basáltica oriundo do britador tipo VSI e que passou por processos de lavagem e peneiramento na própria pedreira, sendo denominado de areia artificial.

O agregado graúdo consistiu de brita proveniente da rocha basáltica, classificada como 9,5/25 pela ABNT NBR 7211 [18].

As características dos agregados miúdos e do agregado graúdo são apresentadas na Tabela 1.

Foi utilizado um aditivo polifuncional como base química lignosulfonatos, de cor castanho, com massa específica de 1,18 g/cm<sup>3</sup> com a finalidade de se produzir concretos com abatimentos superiores a 9 cm.

Tabela 1 – Características dos agregados miúdos e do agregado graúdo

Parâmetro	Agregados Miúdos							Agregado Graúdo
	Areia natural	Areia artificial	Pó-de-pedra Cone A	Pó-de-pedra VSI-A	Pó-de-pedra Martelo B	Pó-de-pedra Cone C	Pó-de-pedra VSI-C	Brita 1
Dimensão Máxima Característica (mm)	2,36	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	19,00
Dimensão Mínima Característica (mm)	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	6,30
Módulo de Finura	1,71	3,05	3,22	2,93	3,10	2,88	2,69	6,91
Material Pulverulento (%)	0,60	4,54	14,72	16,24	13,40	15,99	17,16	0,81
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,99	2,97	2,95	2,95	2,95	2,95	2,88
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,57	-	1,72	1,85	1,66	-	-	1,49
Absorção (%)	1,00	-	0,70	1,14	0,90	-	-	2,00

## 2.2 Avaliação da forma dos agregados miúdos

A forma dos grãos dos agregados miúdos foi avaliada por meio dos seguintes parâmetros: relação de aspecto, esfericidade, indicador de lamelaridade e coeficiente de forma.

Para o cálculo destes parâmetros fez-se necessária a obtenção das seguintes dimensões dos grãos: maior e menor dimensão, área da projeção e perímetro. Estas dimensões foram obtidas por

meio da análise digital de imagens, sendo as imagens obtidas por um scanner (HP PSC 1210) e as medições feitas por meio do programa de análise de imagens Image Tool, de acordo com o Método Gtec-UFSC apresentado por Weidmann [17].

A obtenção das imagens foi realizada para cada amostra de agregado miúdo analisado conforme os procedimentos relacionados a seguir:

1. Os agregados miúdos foram lavados na peneira 0,075 mm para a retirada do material fino passante;

Figura 1 – Exemplos de imagens obtidas para determinação dos parâmetros de forma dos agregados: (a) fração 1,18 mm pó-de-pedra CONE-C; (b) fração 4,75 mm pó-de-pedra CONE-A; (c) fração 4,75 mm pó-de-pedra VSI-A

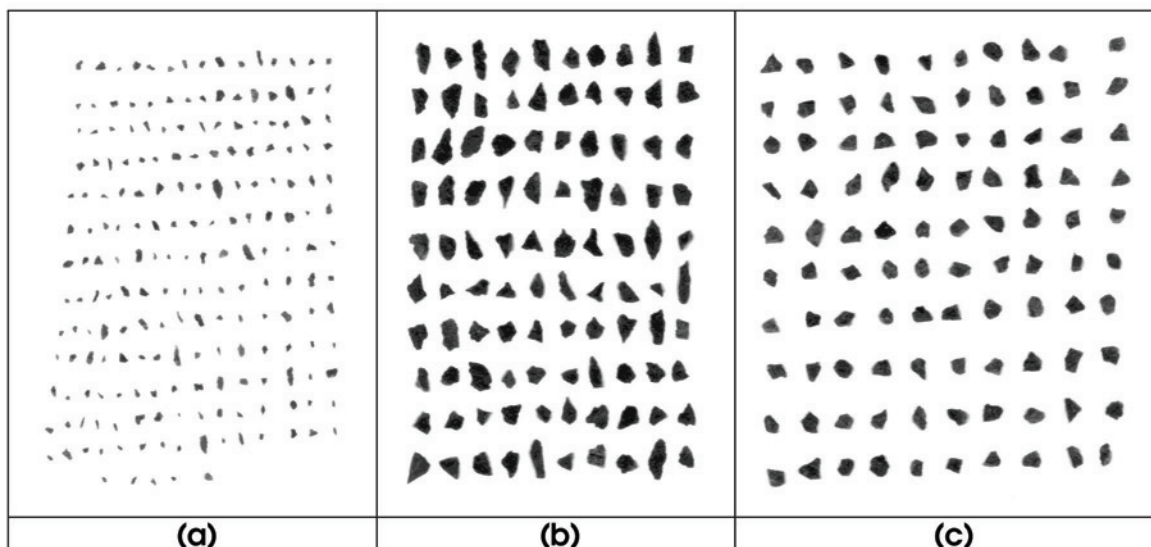
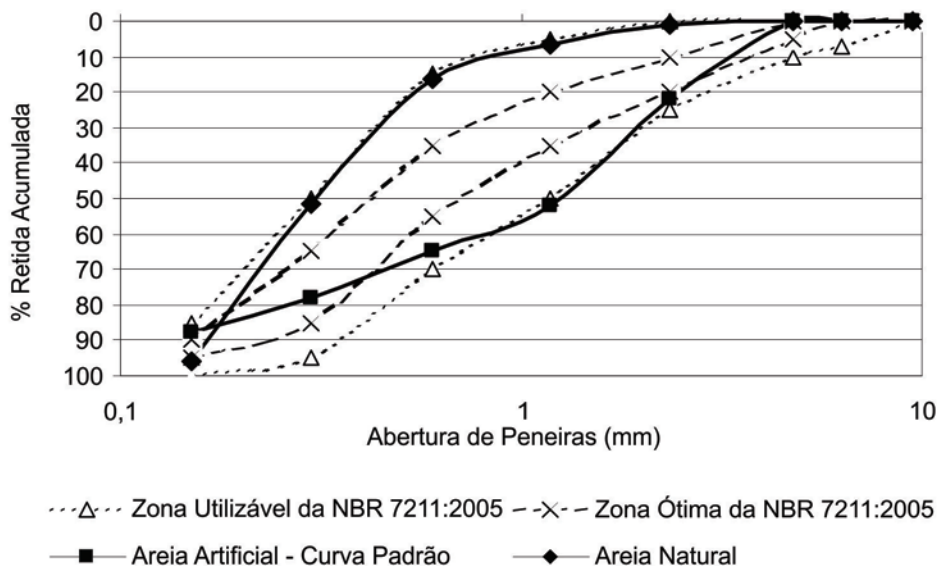


Figura 2 - Curva granulométrica da areia natural e da areia artificial (curva padrão)



- O agregado lavado foi peneirado, separando o material retido sobre cada peneira, conseqüentemente, separando-o em frações por diâmetro: 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm e 0,3 mm;
- De cada fração separava-se uma amostra contendo 100 ou 200 grãos, dependendo do tamanho dos grãos, e determinava-se a sua massa. Estes grãos eram dispostos sobre a lente do scanner de forma ordenada para digitalização;
- Durante a digitalização o scanner foi envolvido por uma caixa escura contendo lâmpadas no seu interior para que a incidência de luz sobre a lente do scanner acontecesse de forma homogênea e não ocorressem sombras na imagem digitalizada. Além disso, juntamente com os grãos de agregado era scanneado uma escala métrica, para que no processo de análise de imagens fosse possível determinar a dimensão de cada pixel na imagem e conseqüentemente as dimensões dos grãos. Exemplos de imagens obtidas são mostrados na Figura 1.
- De cada agregado miúdo obtinham-se 5 imagens, correspondentes ao material retido em cada uma das peneiras: 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm e 0,3 mm;
- As imagens eram, então, analisadas no programa de análise de imagens Image Tool, sendo obtidas automaticamente as dimensões de cada grão de cada fração do agregado miúdo. Com este procedimento, foi possível obter os parâmetros de forma para cada fração de agregado;
- Os parâmetros de forma do agregado foram calculados por meio da média ponderada, em que o peso atribuído para cada fração corresponde à porcentagem de material retido na respectiva fração, semelhante ao procedimento recomendado por Weidmann [17] para o cálculo do coeficiente de forma do agregado (equação 6);
- Uma segunda amostra da fração do agregado miúdo limpo foi utilizada para a determinação da massa específica aparente

seca, pois esta propriedade é necessária para o cálculo do coeficiente de forma e do indicador de lamelaridade do agregado.

### 2.3 Produção das argamassas

Uma vez que existe relação entre os resultados de argamassa e de concreto, parte do trabalho foi desenvolvida em argamassa com composição semelhante a argamassa do concreto. Esta etapa objetivou a análise da influência da forma dos agregados nas propriedades da argamassa do concreto.

Para que o parâmetro forma fosse a única variável analisada, definiu-se uma curva granulométrica padrão para todos os pós-de-pedra, eliminando-se assim a influência da granulometria e do teor de material pulverulento nas propriedades das argamassas, conforme também sugerido por Weidmann [17]. Definiu-se como curva granulométrica padrão a curva granulométrica da areia artificial.

Para a composição da nova curva granulométrica padrão lavou-se, peneirou-se e separou-se todos os pós-de-pedra em frações segundo a ABNT NBR 248 [19], para posteriores pesagens de iguais massas de cada fração dos diferentes agregados, para a composição de curvas granulométricas iguais a curva granulométrica da areia artificial. Durante a lavagem dos pós-de-pedra foi coletado o material passante na peneira 0,075mm (material pulverulento) para que este material fosse utilizado na composição da curva granulométrica padrão, mantendo-se em todas as amostras de pó-de-pedra a mesma quantidade de material pulverulento apresentada pela areia artificial. Assim, as novas amostras de cada pó-de-pedra apresentavam a mesma curva granulométrica e o mesmo teor de material pulverulento apresentado pela areia artificial.

A areia natural foi utilizada na sua composição granulométrica original, uma vez que não foi possível compor, a partir da sua curva granulométrica original, uma mistura com as características da curva granulométrica da areia artificial, pois era necessário o

**Tabela 2 – Consumos de materiais por metro cúbico de concreto dos concretos confeccionados**

Concretos	Cimento (kg)	Areia (kg)	Pó-de-pedra (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Aditivo (l)
100% areia natural	324	842,40	--	994,68	184,68	2,50
30% Cone-A e 70% areia natural	345	627,90	300,15	1059,15	196,65	2,66
70% Cone-A e 30% areia natural	346	269,88	702,38	1062,22	197,22	4,15
30% VSI-A e 70% areia natural	348	633,36	302,76	1068,36	198,36	2,68
70% VSI-A e 30% areia natural	347	270,66	704,41	1065,29	197,79	2,67

emprego de uma areia natural de granulometria mais grossa. Da mesma maneira que não foi possível utilizar a curva granulométrica da areia natural como curva padrão, devido à dificuldade de composição com os agregados oriundos de britagem disponíveis uma mistura dentro da curva granulométrica da areia natural.

As curvas granulométricas da areia natural e da areia artificial (curva padrão) são apresentadas na Figura 2.

Devido à utilização da curva granulométrica padrão para todos os agregados oriundos de britagem, o cálculo do coeficiente de forma destes agregados foi feito com base na porcentagem retida acumulada em cada fração da curva granulométrica padrão e não da curva granulométrica original de cada pó-de-pedra.

Para a composição das argamassas foi empregado o traço 1:2,6:0,57 (cimento:agregado miúdo:água) sendo que a quantidade de agregado miúdo foi variável, pois manteve-se constante na mistura o volume de agregado e as massas específicas destes são distintas. O traço da argamassa foi definido a partir do traço do concreto.

Foram avaliadas as seguintes propriedades das argamassas: consistência pelo ensaio da mesa de queda livre (ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 13276 [20]) e resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

## 2.4 Produção dos concretos

Para análise da influência da forma dos agregados nas propriedades do concreto foram escolhidos dois pós-de-pedra oriundos da mesma pedreira, porém de distintos britadores o que gera a produção de pós-de-pedra com grãos de diferentes formatos, sendo utilizado o pó-de-pedra Cone-A e o VSI-A. Estes pós-de-pedra foram os que apresentaram o menor e o maior coeficiente de forma entre os estudados. Nesta etapa os pós-de-pedra foram empregados sem qualquer tratamento prévio, ou seja, apresentando a curva granulométrica original.

A dosagem do concreto foi feita empregando-se o método de dosagem do IPT/EPUSP. A partir de um concreto de traço 1:5,67 fez-se o ajuste do teor de argamassa ideal para obter um concreto de consistência e coesão adequados à aplicação. Este ajuste do teor de argamassa do concreto foi realizado no concreto contendo 100% de areia natural, sendo encontrado o valor ideal de 54% de teor de argamassa, obtendo-se o traço final de 1:2,6:3,07:0,57 (cimento:areia natural:brita 1) com 0,077% de aditivo plastificante. Nos demais concretos foi mantido o teor de argamassa de 54%,

**Tabela 3 – Parâmetros de forma dos agregados miúdos**

Agregado	Relação de aspecto	Esfericidade	Coeficiente de forma	Indicador de lamelaridade
Pó-de-pedra Cone-A	1,58	0,48	0,1103	0,2053
Pó-de-pedra VSI-A	1,56	0,50	0,2070	0,3610
Pó-de-pedra Martelo-B	1,59	0,58	0,1393	0,2674
Pó-de-pedra Cone-C	1,66	0,60	0,1432	0,2861
Pó-de-pedra VSI-C	1,55	0,52	0,1470	0,2624
Areia artificial	1,50	0,62	0,2551	0,3964
Areia natural	2,00	0,61	0,1869	0,4058

sendo a substituição da areia natural pelo pó-de-pedra calculada mantendo-se o volume de agregado miúdo constante em todos os concretos confeccionados.

Foram confeccionadas cinco misturas de concreto nas quais variava-se o tipo de agregado miúdo empregado: 100% de areia natural; 30% de pó-de-pedra Cone-A e 70% de areia natural; 30% de pó-de-pedra VSI-A e 70% de areia natural; 70% de pó-de-pedra Cone-A e 30% de areia natural e 70% de pó-de-pedra VSI-A e 30% de areia natural. Os consumos de materiais por metro cúbico de concreto para cada concreto confeccionado são apresentados na Tabela 3.

Nos concretos, foram realizados os seguintes ensaios: consistência (*slump test*) de acordo com a ABNT NBR NM 67 [21] e resistência à compressão aos 7 e 28 dias. A resistência à compressão foi avaliada em corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, sendo moldados de acordo com a ABNT NBR 5738 [22] e ensaiados de acordo com a ABNT NBR 5739 [23]. A consistência foi avaliada 10 minutos após a adição do aditivo no concreto, pois nos primeiros minutos observava-se uma perda considerável da fluidez.

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1 Avaliação da forma dos agregados miúdos

As características de forma dos agregados miúdos analisados são apresentadas na Tabela 3. No caso dos pós-de-pedra os parâmetros de forma foram calculados considerando a porcentagem retida acumulada da curva granulométrica padrão.

Analisando os dados apresentados na Tabela 3, verifica-se algu-

mas divergências entre os resultados dos parâmetros de forma analisados. Para o pó-de-pedra VSI –A encontrou-se valores altos de coeficiente de forma (0,2070) e índice de lamelaridade (0,3610) o que dá o indicativo que este agregado possui grãos de formato arredondado, no entanto, o parâmetro esfericidade foi baixo (0,50) o que contraria a análise anterior. Observa-se que os valores de relação de aspecto encontrados para os agregados pó-de-pedra VSI-A e pó-de-pedra VSI-C são muito próximos e se fosse usado este parâmetro para classificar a forma destes agregados poder-se-ia concluir que são agregados com formato de grãos semelhantes. No entanto, os valores de coeficientes de forma e de indicador de lamelaridade são bem distintos, demonstrando que o pó-de-pedra VSI-A tem grãos mais arredondados que o pó-de-pedra VSI-C. No caso dos pós-de-pedra VSI-C e Cone-C nota-se que os valores de coeficientes de forma e indicador de lamelaridade são semelhantes, porém os valores de esfericidade e relação de aspecto são distintos. Estas divergências confirmam que os parâmetros relação de aspecto e esfericidade, por utilizarem informações da apenas duas dimensões dos grãos dos agregados, podem, em alguns casos, avaliar erroneamente a forma de um agregado. Por outro lado, os parâmetros coeficiente de forma e indicador de lamelaridade por ambos considerarem a massa da amostra analisada e sua respectiva massa específica, ou seja, por fazerem uma estimativa da terceira dimensão do agregado tendem a melhor avaliar a forma dos seus grãos. Diante disso, na continuidade deste trabalho será utilizado apenas estes dois últimos parâmetros para avaliar a forma dos agregados.

Na análise dos valores de coeficiente de forma e indicador de lamelaridade dos agregados miúdos é possível perceber que além da areia natural, os agregados oriundos de processos de britagem

Figura 3 – Consistência das argamassas e coeficientes de forma dos respectivos agregados utilizados nas misturas

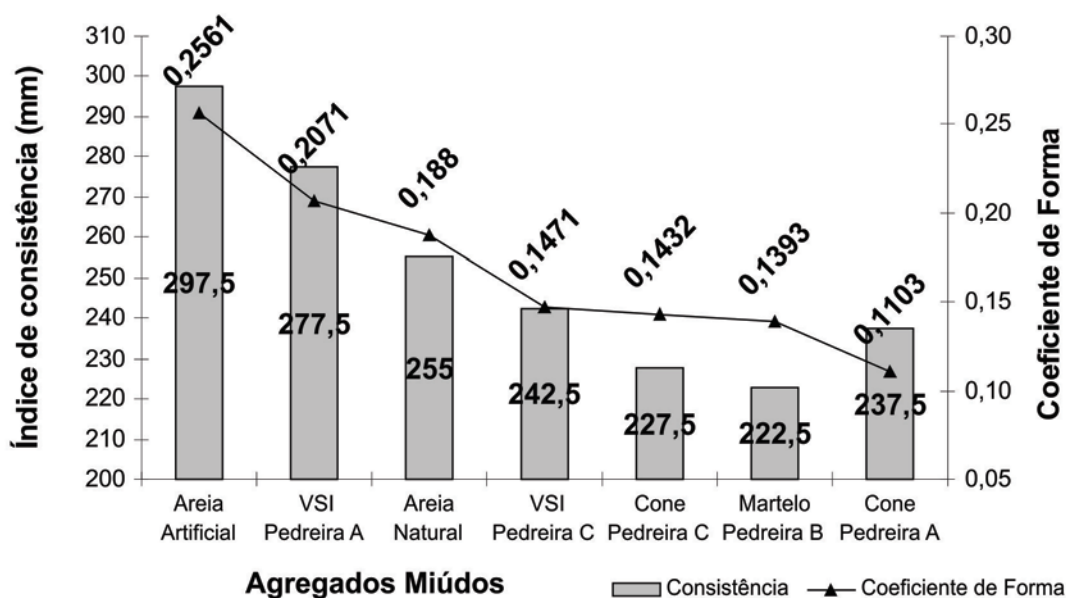
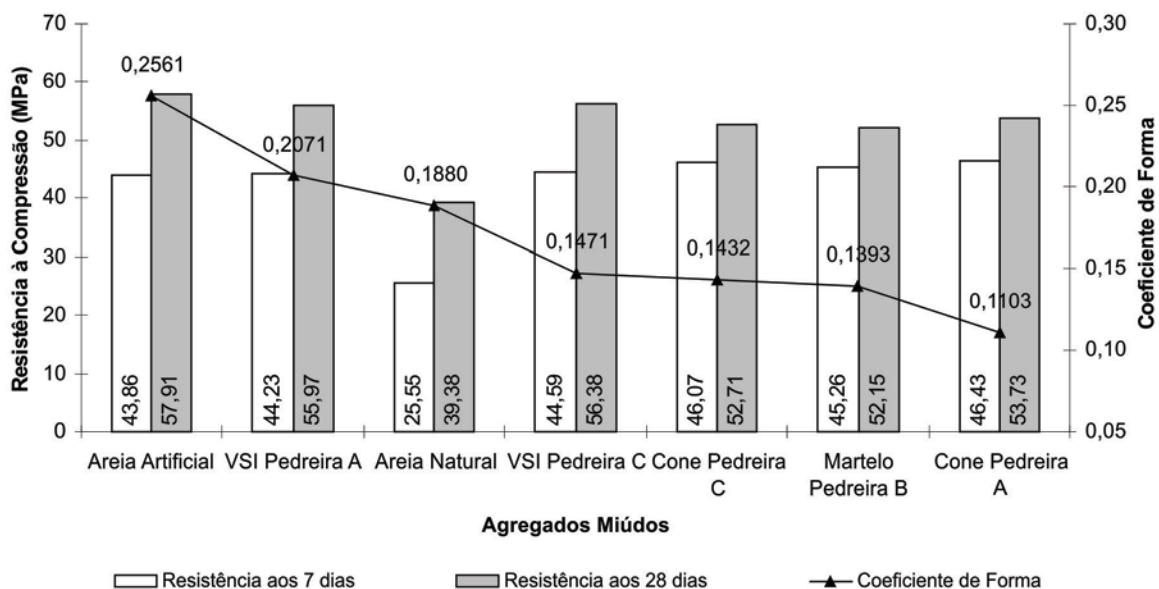


Figura 4 – Resistência à compressão das argamassas compostas pela curva granulométrica padrão e coeficientes de forma dos agregados



que utilizam o britador do tipo VSI apresentaram maiores coeficientes de forma, sendo estes a areia artificial e o pó-de-pedra VSI-A. Diante destes resultados, pode-se considerar que estes agregados apresentam os grãos mais arredondados. Contrariando o que era esperado, o coeficiente de forma de 0,1470 encontrado para o agregado pó-de-pedra VSI-C, não foi semelhante ao dos outros agregados que também são processados por britadores do tipo VSI. Este resultado contraditório deve-se possivelmente ao fato de que a coleta deste agregado foi realizada logo em seguida do acionamento do britador e foram coletados os primeiros grãos triturados pelo mesmo. Deve-se lembrar que o formato mais arredondado dos grãos dos agregados obtidos pela passagem do britador do tipo VSI é garantido pelo impacto dos fragmentos de rocha que entram no britador com os fragmentos da mesma rocha que estão formando um “colchão” nas laterais internas do britador. Portanto, no início do processo de britagem o “colchão” de fragmentos pode não estar formado e a britagem ocorrer por impacto dos fragmentos de rocha que entram em contato com a lateral metálica do britador, o que provoca a formação de grãos com características mais lamelares.

Os resultados demonstram que os agregados processados por britadores do tipo Cone ou Martelo são realmente mais lamelares do que os agregados britados por britadores do tipo VSI, pois apresentaram os menores coeficientes de forma e indicadores de lamelaridade.

Apesar de se esperar valores elevados para o coeficiente de forma e o indicador de lamelaridade da areia natural, pois o formato da mesma é definido pelo atrito entre os grãos que desgastam a superfície uns dos outros, tornando-se mais arredondados; a mesma apresentou um coeficiente de forma igual a 0,1869 inferior ao

de alguns agregados britados como aqueles oriundos do britador do tipo VSI, como o pó-de-pedra VSI-A e a areia artificial. Este resultado demonstra que o processo de desgaste das rochas provocado pelo britador do tipo VSI é realmente eficiente, deixando os grãos que passam por ele com uma forma mais arredondada. Dentre os agregados analisados, o agregado que apresentou maior coeficiente de forma e indicador de lamelaridade, portanto o agregado mais arredondado, foi a areia artificial e o agregado mais lamelar, com menor coeficiente de forma e indicador de lamelaridade foi o pó-de-pedra Cone-A.

### 3.2 Resultados em argamassa

Os resultados de consistência das argamassas confeccionadas com os agregados miúdos compostos na curva granulométrica padrão e os respectivos coeficientes de forma dos agregados, apresentados na Figura 3, demonstram que o índice de consistência das argamassas é maior quanto maior o coeficiente de forma do agregado.

Weidmann [17] havia verificado comportamento semelhante com argamassas confeccionadas com agregados miúdos britados de origem granítica. Com estes resultados é possível constatar que os agregados que possuem grãos com formatos mais arredondados (maiores coeficientes de forma) proporcionam argamassas com maior fluidez. Estes agregados são em ordem decrescente de maior coeficiente de forma e maior índice de consistência: a areia artificial, seguida pelo pó-de-pedra VSI-A e a areia natural. Observa-se também que as demais argamassas compostas com agregados oriundos de processos de britagem que não utilizam o britador do tipo VSI apresentaram consistências mais secas, uma vez que são compostas por grãos com formato lamelares, apre-



sentando um valor médio de índice de consistência de 233 mm, enquanto que a argamassa com o pó-de-pedra VSI-A apresentou índice de consistência superior a 277 mm.

Os resultados de resistência à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias e os respectivos coeficientes de forma, apresentados na Figura 4, demonstram que não foi possível verificar a existência de uma influência direta do formato dos grãos sobre os resultados de resistência à compressão das argamassas.

Todas as argamassas confeccionadas com agregados oriundos de britagem apresentaram altos valores de resistência à compressão, valores estes que foram similares, não variando em função do coeficiente de forma dos diferentes agregados. A argamassa que apresentou as menores resistências foi a argamassa composta com a areia natural.

### 3.3 Resultados em concreto

Para a produção dos concretos os agregados miúdos foram empregados em sua curva granulométrica original, não sendo empregado uma curva granulométrica padrão, em virtude disso foi necessário o cálculo dos coeficientes de forma destes agregados nas suas curvas granulométricas originais. Os valores dos coeficientes de forma são apresentados na Figura 5 juntamente com os valores de abatimento dos concretos confeccionados.

Na Figura 5 observa-se que os concretos contendo o pó-de-pedra VSI-A substituindo parte da areia natural apresentaram abatimento superior ao concreto com 100% da areia natural. Isso pode ser justificado pela forma dos grãos dos agregados, pois o pó-de-pedra VSI-A apresenta coeficiente de forma superior ao coeficiente de forma da areia natural, indicando que os grãos do pó-de-pedra são mais arredondados que os grãos da areia natural e conseqüentemente contribuindo para o aumento de fluidez do concreto.

No concreto contendo o pó-de-pedra Cone-A substituindo 30% do volume de areia natural, o abatimento foi superior ao concreto com 100% da areia natural. No entanto, quando o volume de substituição da areia natural pelo pó-de-pedra Cone-A foi de 70%, o concreto com este material apresentou consistência nula, mesmo tendo sido aumentado o teor de aditivo superplastificante. Estes resultados são justificados também pela forma dos grãos dos agregados miúdos uma vez que o pó-de-pedra Cone-A é aquele que apresenta o menor coeficiente de forma, indicando que seus grãos possuem formatos lamelares. Desta forma, quando se aumenta a quantidade de pó-de-pedra no concreto aumenta-se a quantidade de material com a forma dos seus grãos mais lamelares o que influencia negativamente na consistência dos concretos. Salienta-se que o teor de material pulverulento dos pós-de-pedra VSI –A e Cone-A eram muito semelhantes (16% e 15%, respectivamente) e superiores ao da areia natural (0,60%), com isso, pode-se concluir que o teor de material pulverulento não é o responsável pela alteração no abatimento do concreto, sendo o abatimento mais influenciado pela forma dos grãos dos agregados.

Os concretos confeccionados com o pó-de-pedra VSI-A apresentaram coesão e textura semelhantes ao concreto confeccionado com 100% de areia natural, enquanto que o concreto com pó-de-pedra Cone-A apresentavam falta de coesão, textura áspera o que dificultou a trabalhabilidade dos concretos. Assim, observa-se que a forma dos grãos dos agregados influencia não somente a consistência dos concretos, mas também a coesão e a textura, agregados mais arredondados (com maiores coeficientes de forma) proporcionam concretos com maior fluidez, melhores coesão e textura superficial.

Figura 5 - Abatimento dos concretos confeccionados e os coeficientes de forma dos agregados miúdos

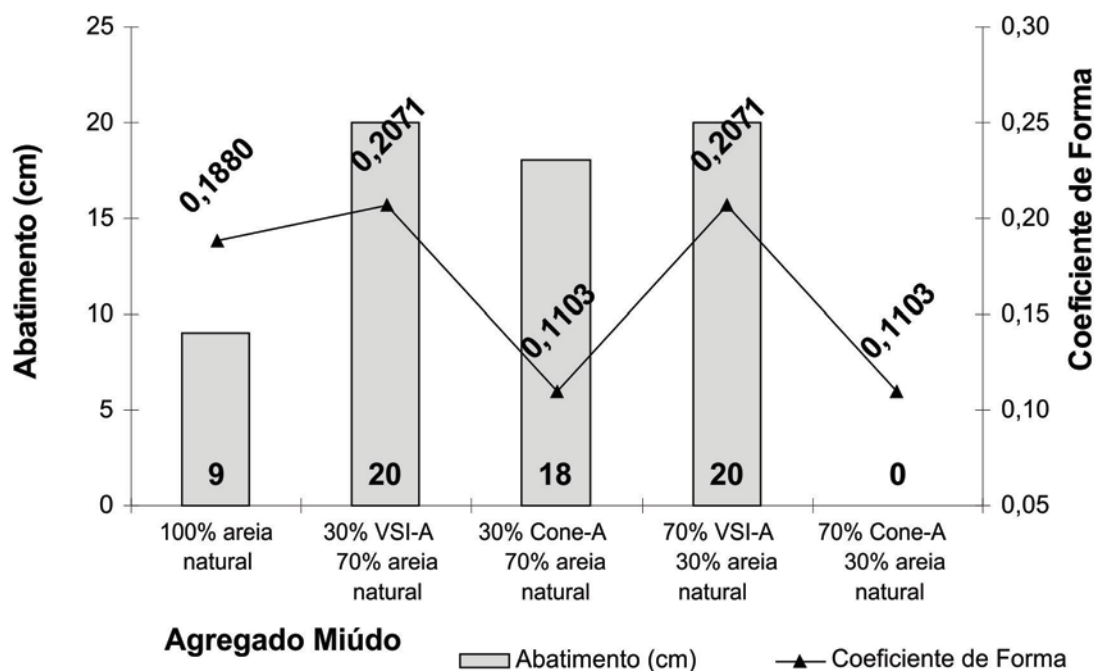
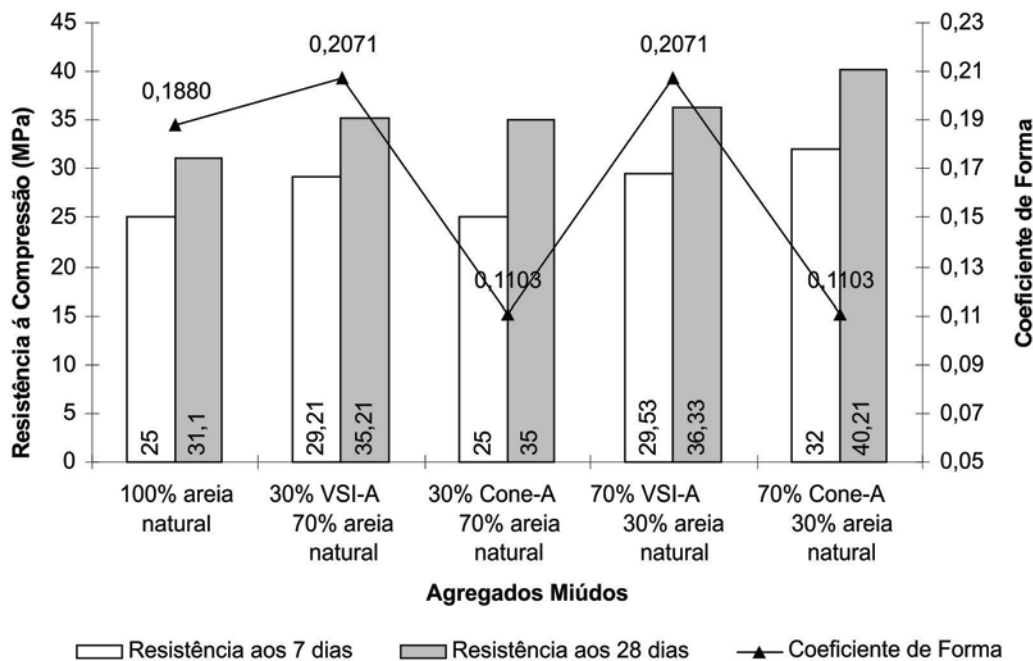


Figura 6 – Resistência à compressão dos concretos e coeficientes de forma dos agregados



Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos concretos confeccionados demonstraram que todos os concretos nos quais houve substituição da areia natural pelo pó-de-pedra apresentaram resistência à compressão superior ao concreto com 100% de areia natural (Figura 6).

Comparando-se os concretos confeccionados com os pós-de-pedra oriundos de diferentes britadores observa-se que não há diferenças significativas nas resistências à compressão para ambos os teores de substituição. Observa-se que a forma dos grãos dos agregados não influencia na resistência à compressão dos concretos, uma vez que não houve relação entre os coeficientes de forma e a resistência à compressão. A maior resistência à compressão dos concretos com pó-de-pedra pode ser atribuída ao maior fechamento dos poros do concreto pela maior quantidade de material pulverulento presente nos pós-de-pedra.

#### 4. Conclusões

Com base nos resultados deste trabalho foi possível concluir que:

- os parâmetros indicador de lameridade e coeficiente de forma avaliam com mais acurácia a forma dos agregados uma vez que fazem uma análise tri-dimensional, enquanto que os parâmetros relação de aspecto e esfericidade não avaliam corretamente a forma dos grãos dos agregados;
- a forma dos grãos dos agregados depende da forma de extração e do tipo de britador empregado para trituração, os agregados artificiais oriundos do britador vertical de impacto apresentam grãos mais arredondados do que a areia natural e estes, por sua vez, apresentam grãos mais arredondados que os agregados oriundos dos britadores martelo e cone;

- a forma dos grãos dos agregados influencia fortemente a fluidez das argamassas, sendo que quanto maior o coeficiente de forma do agregado maior a fluidez da argamassa. Areias constituídas de partículas esféricas e arredondadas têm ângulo de atrito sensivelmente menor do que areias constituídas de partículas lamelares, e por isso, favorecem a fluidez;
- a forma dos grãos dos agregados influenciou o abatimento do concreto, quanto maior o coeficiente de forma maior o abatimento do concreto. O tratamento dos grãos proporcionado pelo britador VSI, ou seja, grãos mais arredondados proporcionam concretos de maior fluidez;
- a influência da forma dos grãos dos agregados sobre o abatimento do concreto foi mais significativa do que a influência do teor de material pulverulento dos agregados, uma vez que concretos com agregados miúdos de maior teor de material pulverulento e com maiores coeficientes de forma apresentaram abatimentos superiores aos concretos com areia natural que apresentava baixíssimo teor de material pulverulento;
- há pouca influência da forma dos agregados na resistência das argamassas e concretos, no entanto todas as argamassas e todos os concretos confeccionados com agregado artificial apresentaram resistências ligeiramente superiores ao da argamassa e do concreto com areia natural. A superioridade das resistências dos concretos com pó-de-pedra pode ser atribuída ao maior fechamento dos poros proporcionado pelo material pulverulento presente no pó-de-pedra.

#### 5. Referências bibliográficas

- [01] SBRIGHI NETO, C. Agregados para concreto. In: ISAIA, G.C. (Ed.). Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v.1. p. 323-343.
- [02] METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. p. 674.
- [03] DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F. High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 11, p.1755-1761, nov. 2002.
- [04] CORTES, D. D. ; KIM, H.-K.; PALOMINO, A. M.; SANTAMARINA, J.C.. Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. Cement and Concrete Research. v. 38, n. 10, p. 1142-1147, out. 2008.
- [05] De FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G.C. (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p.481-523.
- [06] De LARRARD, F. Concrete mixture proportioning – a scientific approach. E & FN Spon. New York, 1999. 421p.
- [07] RODOLPHO, P. M. Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- [08] POPOVICS, S. Fundamentals of Portland Cement Concrete: a Quantitative Approach. John Wiley and Sons. New York, 1982. 477p.
- [09] BISPO, L. H. O.; ALMEIDA, S. L. M. Obtenção de areia artificial a partir de finos de pedreiras - Análise de ensaios. In: IX Seminário de Iniciação Científica da UFOP/MG, 2003, Ouro Preto – MG. Anais... Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - MG, 2003. p. 24-26.
- [10] GONÇALVES, J. P. et al. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 6, p.924-932, jun. 2007.
- [11] MORA, C. F.; KWAN, A. K. H.; CHAN, H. C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. Cement and Concrete Research, v. 28, n. 6, p. 921-932, jun. 1998.
- [12] 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.
- [13] D'AGOSTINO, L. Z. Uso de finos de pedreira no preparo de argamassas de assentamento. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [14] WESTERHOLM, M. et al. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. Cement & Concrete Composites, v. 30, n. 4, p. 274-282, abr. 2008.
- [15] MORA, C. F.; KWAN, A. K. H. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 3 p. 351-358, mar. 2000.
- [16] KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregates particles. Magazine of Concrete Research, v. 53, n. 2, p. 91-100, abr. 2001
- [17] WEIDMANN, D. F. Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem ns propriedades do concreto de cimento Portland. 2008. 273 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado para concreto – Especificação. - NBR 7211, Rio de Janeiro, 2008.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248, Rio de Janeiro, 2003.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. NBR 13276, Rio de Janeiro, 2005.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67, Rio de Janeiro, 1998.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2003.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. NBR 5739, Rio de Janeiro, 2007.