

## **Análise da trabalhabilidade e da resistência à compressão de argamassas produzidas com substituições parciais da areia artificial por pó de pedra**

*Analysis of the workability and the compressive strength of mortars produced with partial replacement of the artificial sand stone powder*

Campos, H.C (1); Polucha, A. (2); Marques Filho, J. (3)

*(1) Heloisa Campos, Universidade Federal do Paraná*

*(2) José Marques Filho, Universidade Federal do Paraná*

*(3) Alan Polucha, Universidade Federal do Paraná*

### **Resumo**

A extração da areia natural é responsável pela retirada de cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente, o que dificulta também a obtenção de licenças ambientais para aproveitamento de novas jazidas. Nesse contexto a substituição da areia natural pela areia artificial aparece como alternativa atraente. A lavagem desse material gera pó de pedra, caracterizado pelo material passante na peneira #200 (0,075 mm), que é estocado ao ar livre. O assoreamento destes corpos d'água é um agravante antieconômico ao processo produtivo. Aproveitar o pó retirado das jazidas, além de trazer maior lucratividade às empresas, traz benefícios ao meio ambiente.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho é analisar, em termos de trabalhabilidade e de resistência à compressão, o efeito da substituição parcial da areia artificial pelo pó de pedra, em argamassas de cimento Portland. Os teores de substituição da areia artificial pelo pó de pedra foram definidos em 0%, 6%, 12% e 18% e os teores de superplastificante utilizados foram definidos em 0%, 0,3%, 0,6%, 0,9% e 1,20% do total de finos.

Os resultados obtidos demonstram a que a adição de pó de pedra tem influência na consistência e na resistência da argamassa. De maneira geral, houve redução no espalhamento das argamassas à medida que se aumentou o teor de pó de pedra, devido à elevada superfície específica do pó. Já na resistência à compressão, os resultados demonstraram que o aumento foi diretamente proporcional ao aumento do teor de pó de pedra. Os valores mais altos alcançados foram com os teores de 12% de substituição da areia artificial por pó de pedra.

*Palavra-Chave: areia artificial, pó de pedra, argamassas, sustentabilidade.*

### **Abstract**

The extraction of natural sand is responsible for the removal of vegetation cover, the degradation of water courses and considerable damage to the environment, which also makes it difficult to obtain environmental permits for exploitation of new deposits. In this context, the replacement of natural sand by artificial sand appears as an attractive alternative. The washing of this material generates dusty material, characterized by passing the material through a sieve # 200 (0.075 mm) which is stored outdoors. Siltation of these water bodies is an aggravating uneconomical to production. Getting the dust removed from the deposits, and bring greater profitability for companies, brings benefits to the environment. Thus, the objective of this study was to analyze in terms of workability and compressive strength, the effect of partial replacement of artificial sand for dusty material in Portland cement mortar. The substitution level of replacement of artificial sand for dusty material was set to 0%, 6%, 12% and 18% and the content of superplasticizer used was set at 0%, 0.3%, 0.6%, 0.9 % and 1.20% of fines. The results obtained demonstrated that adding dusty material in the mortar influenced consistency and resistance. In general, a reduction in spreading the mortar as it increased the stone powder content due to the high specific surface of the powder. In the compressive strength, the results showed that the increase was directly proportional to the increase in the stone powder content. The highest values were achieved with the levels of 12% substitution of artificial sand for rock dust.

*Keywords: artificial sand, dusty material, mortars, sustainability.*

## 1 Introdução

A deterioração da natureza em escala global implica em preocupações com questões ambientais e, paralelamente, com questões sociais e econômicas. Cabe a cada parcela do setor produtivo a redução dos danos ao meio ambiente. A construção civil é considerada uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, e tem grande impacto ambiental. Em 1999, Mehta já afirmava que a indústria do concreto tem papel fundamental na infraestrutura e, como representa a maior consumidora de reservas naturais, a mesma possui a obrigação de incorporar tecnologias adequadas, que procurem minimizar os agentes potenciais de problemas ambientais. Assim, atualmente, percebe-se que além de fornecer material de construção de menor custo, a indústria do cimento deve assumir o seu papel social na conservação das reservas naturais.

A durabilidade das obras de engenharia civil está diretamente ligada à qualidade do concreto, a qual está vinculada a propriedades dos agregados. Dentre os outros materiais, o agregado miúdo merece atenção especial, uma vez que sofre com a escassez de reservas localizadas próximas aos grandes centros consumidores.

A extração da areia natural é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente, o que dificulta também a obtenção de licenças ambientais para aproveitamento de novas jazidas (BARBOSA, COURA e MENDES, 2008). Segundo Cabral Junior *et al* (2008), somente no estado de São Paulo, do total de substância minerais produzidas, a areia corresponde a 40,81%. A simples substituição da areia natural por areia britada (artificial) já se mostra como uma alternativa para minimização do impacto ambiental decorrente do uso de areia. Além disso, a maior variabilidade das características das areias naturais extraídas de rios, ao longo do tempo, implica em adoção de maiores consumos de cimento para que seja garantida a resistência característica especificada. O somatório destes fatores tem levado concreteiras a optarem pela substituição da areia natural por agregado miúdo de britagem (WEIDMANN, 2008).

A substituição da areia natural pela artificial leva à redução dos impactos ambientais e do custo da matéria prima. Sua produção é realizada no canteiro das pedreiras, próximas aos grandes centros consumidores, o que reduz o valor do frete. Durante a produção da areia artificial é gerado pó de pedra, um rejeito pulverulento passante na peneira #200 (0,075mm). Este rejeito é armazenado ao ar livre para secagem e não há um destino final adequado. Segundo Buest Neto (2006), o possível assoreamento de corpos d'água é um agravante antieconômico ao processo produtivo. Aproveitar o pó retirado das jazidas, além de trazer maior lucratividade para as empresas, traz benefícios ao meio ambiente.

Menose (2004) já afirmava que a utilização do pó de pedra como substituto parcial do agregado miúdo no concreto vinha sendo analisada, gerando grande interesse. Nessa abordagem, as pedreiras poderiam comercializar um produto oriundo de rejeito que não tinha valor significativo e que causava transtornos no que diz respeito à estocagem e ao

meio ambiente. Essa alternativa apresenta diversas vantagens, sendo as principais: aproveitamento integral das pedreiras, menor consumo de cimento na preparação do concreto e solução de problemas ambientais (ALMEIDA; SILVA, 2005).

Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho é avaliar a perda de consistência e a resistência à compressão de argamassas de cimento Portland com substituições parciais da areia artificial pelo pó de pedra.

## 2 Materiais e métodos

Para a realização do estudo experimental optou-se pela utilização de materiais obtidos na Região Metropolitana de Curitiba, com o intuito de aplicação prática dos resultados. Devido à crescente utilização de argamassas dosadas em central nesta região, foram empregados agregados utilizados usualmente em uma empresa que fornece esse tipo de serviço. A rocha matriz de todos os agregados foi o calcário, sendo que todas as frações granulométricas foram originárias da mesma pedreira.

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento: CP V-ARI. As especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações técnicas CP V - ARI (FABRICANTE (2014))

CARACTERÍSTICAS CIMENTO				
FÍSICAS			QUÍMICAS	
Expan. Quente (mm)		0,2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,25
Tempo de pega	Início (h:min)	2:38	SiO <sub>2</sub> (%)	18,82
	Fim (h:min)	3:15	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,57
Consis. Normal (%)		28	CaO (%)	60,55
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4085	MgO (%)	4,84
# 200 (%)		0,41	SO <sub>3</sub> (%)	2,88
# 325 (%)		3,23	Perda fogo (%)	2,87
Resistência à compressão (MPa)	1 (dia)	22,1	CaO livre (%)	0,82
	3 (dias)	38,1	Resid. Insolúvel (%)	0,72
	7 (dias)	43,8	Equiv. Alcal. (%)	0,61
	28 (dias)	51,9		

#### 2.1.2 Agregados

Optou-se pela utilização de areia 100% artificial, devido às restrições ambientes no uso da areia natural, como descrito anteriormente. A granulometria do agregado miúdo está apresentada na Tabela 2, as características na Tabela 3 e a curva granulométrica na Figura 1.

Tabela 2: Caracterização granulométrica do agregado miúdo (FABRICANTE (2014))

GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO - NBR 7211/2009		
PENEIRA	% MÉDIA RETIDA	% MÉDIA ACUMULADA
2,4	4	4
1,2	40	44
0,6	24	68
0,3	14	82
0,15	10	92
0,075	5	97
Fundo	3	100

Tabela 3: Características agregado miúdo (FABRICANTE (2014))

CARACTERIZAÇÃO AGREGADO MIÚDO		
MASSA ESPECÍFICA - NBR NM 52:2009 (Kg/dm³)	MASSA UNITÁRIA - NBR NM 45:2006 (Kg/dm³)	MATERIAL PULVERULENTO - NBR NM 46:2003(%)
2,79	1,37	2,1

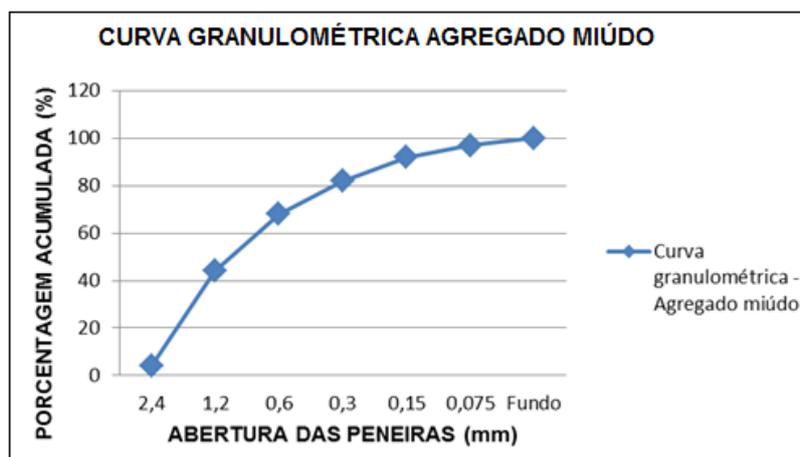


Figura 1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (AUTORES (2014))

O pó de pedra foi obtido pelo processo de britagem da areia artificial proveniente do calcário, foi coletado (Figura 2), posteriormente seco em estufa no laboratório com temperatura de 60°C durante 24h e destorrado manualmente por cerca de 5 horas.



Figura 2 – Pó coletado em pedreira (AUTORES (2014))

A caracterização do pó está apresentada na Tabela 4 e graficamente na Figura 3.

Tabela 4: Caracterização pó de pedra (AUTORES (2014))

PÓ DE PEDRA SEM PENEIRAR						
MASSA INICIAL (g)	80				DATA	10/10/2014
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADA ABAIXO	
5	4	1,94	2,43	2,43	97,58	
9	2	1,03	1,29	3,71	96,29	
16	1	0,68	0,85	4,56	95,44	
32	0,5	0,71	0,89	5,45	94,55	
60	0,25	1,73	2,16	7,61	92,39	
Laser	0,18	0,46	0,57	8,19	91,81	
Laser	0,09	11,87	14,84	23,02	76,98	
Laser	0,063	7,38	9,22	32,24	67,76	
Laser	0,043	4,72	5,89	38,14	61,86	
Laser	0,036	2,44	3,05	41,19	58,81	
Laser	0,028	4,41	5,51	46,69	53,31	
Laser	0,02	6,59	8,24	54,93	45,07	
Laser	0,01	11,8	14,75	69,68	30,32	
Laser	0,006	6,33	7,91	77,59	22,41	
Laser	0,003	6,58	8,22	85,81	14,19	
Laser	0,001	7,23	9,04	94,84	5,16	
Laser	0	4,12	5,16	100	0	
<b>MASSA FINAL (g)</b>	<b>80</b>				<b>FINOS ABAIXO #60 - MICRÔMETROS</b>	
					Diâmetro 10%	1,81
					Diâmetro 50%	20,98
					Diâmetro 90%	110,31
					Diâmetro médio	40,43

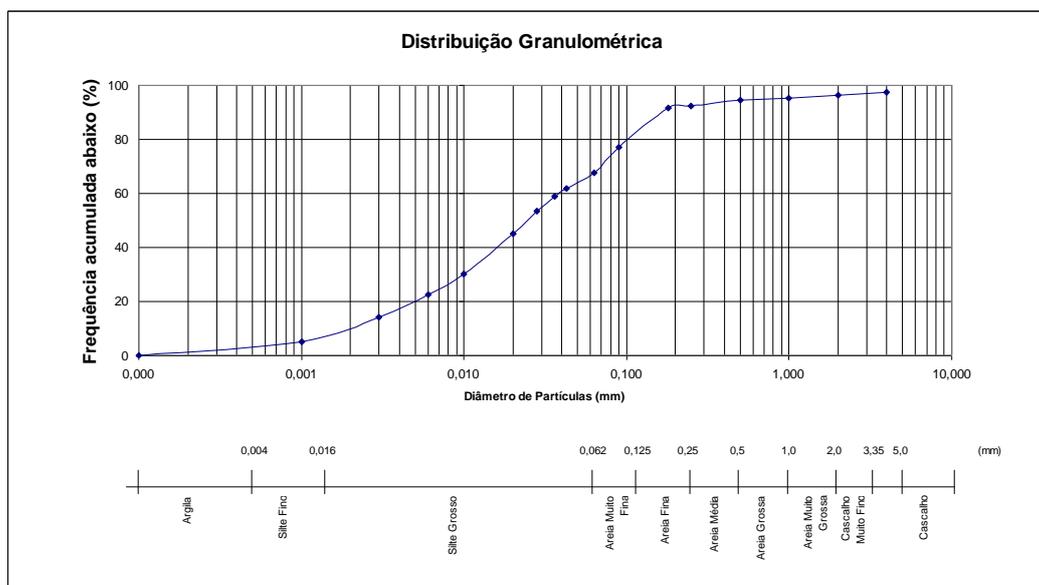


Figura 3 – Distribuição granulométrica pó de pedra (AUTORES (2014))

### 2.1.3 Adição mineral

Como adição mineral optou-se pela sílica ativa devido às suas características físico-químicas, que proporcionam alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland. A Tabela 5 resume as principais características desse material.

Tabela 5: Especificações técnicas - sílica ativa (FABRICANTE (2014))

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA UTILIZADA	
Massa específica	2200 kg/m <sup>3</sup>
Superfície específica	20000 m <sup>2</sup> /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio	0,2 µm
Teor de SiO <sub>2</sub>	Mínimo 85%
Umidade	Máximo 3%

### 2.1.4 Aditivo

O aditivo superplastificante utilizado consiste em um produto de terceira geração, baseado em polímeros de éteres carboxílicos modificados. Atende aos requisitos da NBR 11768:2011 e é compatível com todos os tipos de cimento Portland. A Tabela 6 apresenta as especificações técnicas do mesmo.

Tabela 6: Especificações técnicas – superplastificante (FABRICANTE (2014))

Recomendações técnicas para aplicação	PH (ABNT 10908:2008)	Massa específica (ABNT 10908:2008)	Teor de sólidos	
			Mín.	Máx.
Aditivo desenvolvido para a obtenção de concretos de alto desempenho.	5,5 ± 1,0	1, 100 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>	44,35%	49,01%

## 2.2 Métodos

O programa experimental iniciou-se pela análise da perda de consistência da argamassa de cimento Portland produzida com um traço padrão, sem a presença de pó e com adição de pó de pedra retido na #200.

Observando argamassas utilizadas em centrais de concreto, juntamente com tentativas prévias em laboratório, definiu-se empiricamente o traço padrão ou base. Deve ser ressaltado que, nos diversos ensaios, foram feitas substituições de parte da areia artificial lavada por pó nos teores definidos. A quantidade de aglomerante foi mantida, indicando aumento significativo da superfície específica da mistura. Os traços usados nas argamassas estão apresentados na TABELA 07, onde se variou o teor de pó de pedra em substituição à areia artificial e os teores de superplastificante, calculados em cima do total de finos (cimento, pó de pedra e sílica ativa).

Tabela 7: Traço base – argamassa

TRAÇOS ARGAMASSA							
% PÓ	% SP	PÓ (Kg)	SP (Kg)	AREIA (Kg)	CIMENTO (Kg)	ÁGUA (Kg)	SÍLICA ATIVA (Kg)
0	0	0	0,00	1408,00	490	300	35
	0,3	0	1,58	1408,00	490	300	35
	0,6	0	3,15	1408,00	490	300	35
	0,9	0	4,73	1408,00	490	300	35
	1,2	0	6,30	1408,00	490	300	35
6	0	84,48	0,00	1323,52	490	300	35
	0,3	84,48	1,83	1323,52	490	300	35
	0,6	84,48	3,66	1323,52	490	300	35
	0,9	84,48	5,49	1323,52	490	300	35
	1,2	84,48	7,31	1323,52	490	300	35
12	0	168,96	0,00	1239,04	490	300	35
	0,3	168,96	2,08	1239,04	490	300	35
	0,6	168,96	4,16	1239,04	490	300	35
	0,9	168,96	6,25	1239,04	490	300	35
	1,2	168,96	8,33	1239,04	490	300	35
18	0	253,44	0,00	1154,56	490	300	35
	0,3	253,44	2,34	1154,56	490	300	35
	0,6	253,44	4,67	1154,56	490	300	35
	0,9	253,44	7,01	1154,56	490	300	35
	1,2	253,44	9,34	1154,56	490	300	35

O teor de substituição de pó de pedra foi definido em 0%, 6%, 12% e 18%, por ser a faixa mais utilizada na bibliografia existente. Segundo BONAVETTI e IRASSAR (1994), valores acima de 20% de substituição aumentam significativamente a demanda de água. O teor de superplastificante foi definido em 0%, 0,3%, 0,6%, 0,9% e 1,20%. Ensaios pilotos realizados com valores acima de 1,2% levaram à segregação da argamassa. Assim, trata-se de um projeto tipo fatorial de dois fatores cruzados 4x5, totalizando 20 amostras.

O índice de consistência da argamassa foi medido de acordo com a norma:

- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência – NBR- 13276:2005 e pelo abatimento do minicone (cone de Kantro).

O primeiro consiste em medir o espalhamento horizontal da argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do cone (Figura 4). O espalhamento foi medido em três diâmetros diferentes, com régua com a precisão de uma casa decimal.



Figura 4 – Ensaio realizado: Mesa de consistência (AUTORES (2014))

Já o ensaio de abatimento através do minitrinco de cone foi desenvolvido por Kantro em 1980 e consiste na determinação do abatimento da pasta de cimento por meio do minicone. Apesar dos ensaios de abatimento do minicone de Kantro serem, em geral, utilizados para estudos reológicos de pastas, este trabalho procura avaliar sua utilização em argamassas. A argamassa é lançada no equipamento que é levantado verticalmente. Dessa forma, a mesma sofre um espalhamento que é medido (CASTRO, 2007). A partir do espalhamento do material, o ensaio avalia a fluidez do mesmo. O espalhamento foi medido em três diâmetros diferentes, com paquímetro, e com a precisão de duas casas decimais, conforme Figura 5.



Figura 5 – Ensaio realizado: Minicone de Kantro (AUTORES (2014))

A fim de analisar o comportamento da resistência da argamassa com a adição de diferentes teores de pó de pedra, com as mesmas argamassas definidas nas matrizes

experimentais, foram moldados corpos de prova de 5 x 10 cm, conforme Figura 6. O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova foi executado segundo a norma:

- Resistência à compressão – NBR-5739:2007.

Foram moldados dois corpos de prova para cada traço, conforme determina a norma. As formas foram lubrificadas com desmoldante. Foram compactados manualmente e a cura foi em temperatura ambiente, no laboratório. Para a execução das rupturas dos CPs foi utilizada prensa, marca EMIC, com capacidade máxima 100kN, conforme demonstrado na Figura 7. O prato inferior da prensa é fixo e o superior tem cabeça esférica, para acertar diferenças de paralelismo entre as faces dos CPs. Antes do início de cada ensaio foi verificada a centralização do CP no prato inferior.



Figura 6 – Corpos de prova - argamassa (AUTORES (2014))



Figura 7 – Rompimento corpo de prova – argamassa (AUTORES (2014))

### 3 Análise dos resultados

#### 3.1 Fluidez

Os gráficos com o resultado da média das três medições, no Flow Table e no Cone de Kantro, estão apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Com base nesses

dados, realizou-se a análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 95%, conforme Tabela 8 e Tabela 9.

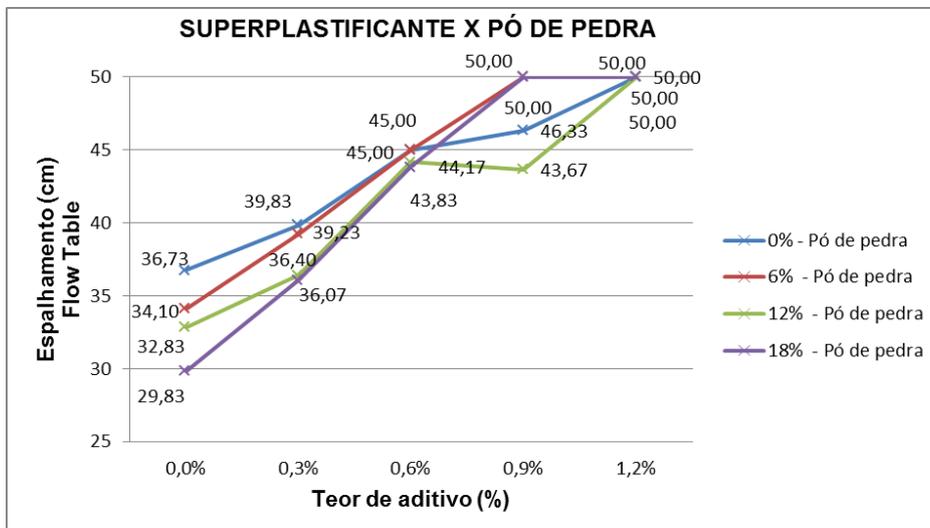


Figura 8 – % Superplastificante x pó de pedra: Mesa de consistência (AUTORES (2014))

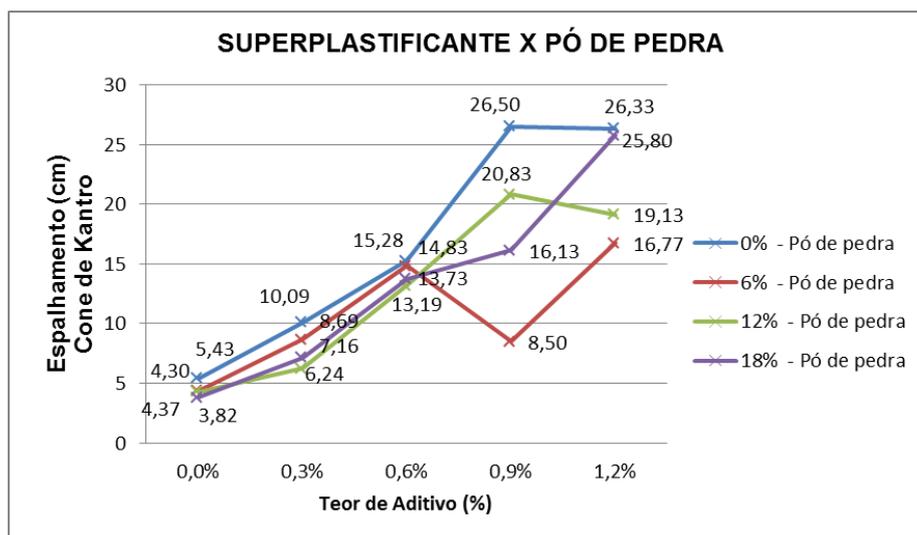


Figura 9 – % Superplastificante x pó de pedra: Cone de Kantro (AUTORES (2014))

Tabela 8: ANOVA para compatibilidade de aditivo e finos – Flow table

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	58,84	3	19,61	87,49	2,84	Efeito correspondente é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	2276,57	4	569,14	2538,93	2,61	Efeito correspondente é significativo
AB	137,29	12	11,44	51,04	2,00	Efeito correspondente é significativo
Erro	8,97	40	0,22			
<b>Total</b>	<b>2481,67</b>	<b>59</b>				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

Tabela 9: ANOVA para compatibilidade de aditivo e finos – Cone de Kantro

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	287,54	3	95,85	36,37	2,84	Efeito correspondente é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	2450,02	4	612,50	232,40	2,61	Efeito correspondente é significativo
AB	479,59	12	39,97	15,16	2,00	Efeito correspondente é significativo
Erro	105,42	40	2,64			
<b>Total</b>	<b>3322,56</b>	<b>59</b>				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

Os gráficos confirmam a influência da adição de pó de pedra na consistência da argamassa. Conforme pode ser observado nas Figuras 8 e 9, de maneira geral houve redução no espalhamento das argamassas à medida que se aumentou o teor de pó de pedra. Provavelmente, esse fenômeno está associado à superfície específica do pó de pedra. À medida que a porcentagem de pó aumenta, aumenta a superfície específica das partículas. Assim, é necessária mais água para molhar as superfícies, o que diminui a fluidez.

O espalhamento medido no Cone de Kantro com 6% de pó de pedra e 0,9% de aditivo foi exceção à regra, provavelmente devido a erro de medição, visto que o mesmo teor no Flow Table resultou em um espalhamento coerente com os demais.

Na Figura 8, observa-se que o teor de 1,2% de superplastificante resultou em espalhamentos que atingiram o diâmetro total da mesa, 50 cm, para todos os teores de substituição pelo pó de pedra. Esses resultados possivelmente ocorreram pelo alto teor do superplastificante combinado à eficiência do mesmo. Dessa maneira, para o teor de superplastificante de 1,2%, foi mais confiável o ensaio de Cone de Kantro.

O superplastificante, como esperado, agiu sobre o pó. Quanto maior a quantidade, maior a fluidez da argamassa, para maior parte dos casos. Os gráficos demonstram que, até o teor de 0,9% de superplastificante, o espalhamento das argamassas cresce e a partir do mesmo os valores se estabilizam. Assim, provavelmente o teor de 0,9% está próximo do ponto de saturação do aditivo para a argamassa. Nota-se que as curvas são coerentes em comportamento para teores de superplastificante de até 0,6%, sofrendo alterações bruscas acima desse valor, indicando necessidade de avaliação do comportamento reológico dessas misturas. Numa avaliação preliminar, apenas observando as Figuras 8 e 9, o cone de Kantro apresenta coerência para argamassas. Não é objetivo deste trabalho analisar essa possibilidade, mas abre-se caminho para futuras pesquisas desse assunto.

Conforme o esperado, a ANOVA apresentou efeito significativo para ambas as fontes de variação, tanto para o Flow Table, como para o cone de Kantro.

Segundo Ribeiro e Caten (2003), se há efeitos significativos, procede-se a uma comparação múltipla de médias. A comparação é feita a partir dos desvios padrões das médias e do limite de decisão (três vezes o desvio padrão das médias). Os resultados são comparados dois a dois. No caso da diferença entre eles ser maior que o limite de decisão a diferença é significativa.

A comparação múltipla de médias para fluidez da argamassa com adição de pó de pedra no ensaio Flow Table apresentou diferença significativa para todas as comparações sem superplastificante. Ao adicionar os teores de 0,3% e de 0,6%, apenas as comparações entre 18% e 12% e 6% e 0% de pó apresentaram diferenças não significativas. No teor de 0,9% apenas a comparação entre 18% e 6% apresentou diferença não significativa. Como o teor de 1,2% de superplastificante resultou em espalhamentos que atingiram o diâmetro total da mesa, como destacado anteriormente, não foi possível analisar a diferença estatística dos resultados com essa concentração.

A mesma análise foi feita com base nos resultados de fluidez obtidos no ensaio minicone de Kantro. A comparação múltipla de médias, para todos os teores de pó sem superplastificante e com 0,6% de superplastificante, diferente do encontrado com a mesa de consistência, não apresentaram diferenças significativas. Para o teor de 0,3% de superplastificante, 18% e 0% e 12% e 0% de pó apresentaram diferenças significativas. Já para o teor de 0,9% de superplastificante, todas as comparações apresentaram diferenças significativas. Para o teor de 1,2% de superplastificante, foram significativas as comparações entre 18% e 0% e entre 12% e 6%.

### 3.2 Resistência à compressão

As resistências médias alcançadas nos ensaios estão apresentadas na Figura 10 e a ANOVA para resistência à compressão da argamassa, com nível de significância de 95% está apresentada na Tabela 10.

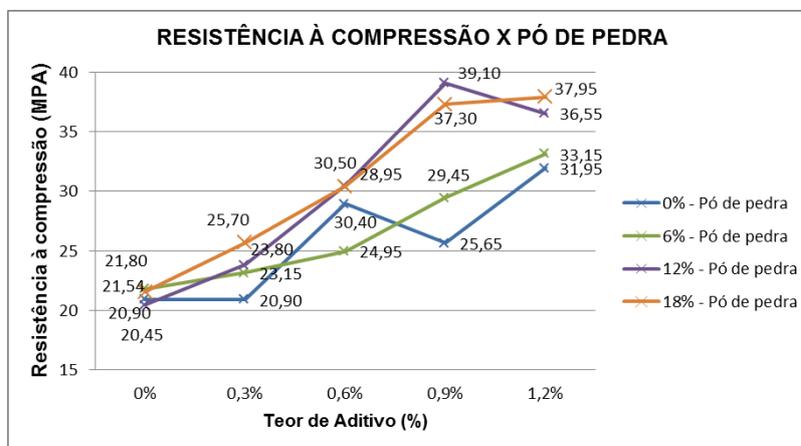


Figura 10 – Resultados da resistência à compressão argamassas (AUTORES (2014))

Tabela 10: ANOVA para resistência à compressão da argamassa

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	199,32	3	66,44	7,24	3,01	Efeito correspondente é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	1076,17	3	358,71	39,09	3,01	Efeito correspondente é significativo
AB	164,43	9	18,27	1,99	2,30	Efeito correspondente não é significativo
Erro	220,22	24	9,18			
Total	1660,13	39				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

Os resultados apresentados na Figura 10 demonstram, de maneira geral, que o aumento da resistência à compressão dos corpos de prova foi diretamente proporcional ao aumento do teor de pó de pedra, ou seja, a adição de pó de pedra em argamassas de cimento Portland aparentemente aumenta a resistência à compressão, até atingir certo limite.

Provavelmente, o aumento da resistência ocorre devido ao efeito microfíler do pó que, pelas suas minúsculas partículas, resulta em maior empacotamento dos sólidos. As partículas menores do pó se encaixam nos vazios das partículas maiores, preenchendo os poros da argamassa e tornando-os descontínuos. Nelson e Guillot (2006), explicam que a otimização da compactação do material é realizada, em geral, utilizando-se um material de maior granulometria e outro de menor granulometria em relação ao cimento, como discutido anteriormente.

Ao analisar a caracterização do agregado miúdo (Tabela 3), observa-se que o índice de vazios do mesmo é de 51%. O traço sem pó de pedra apresenta o teor de pasta de 48%, com o índice de vazios da argamassa de 3%. Já com 6% de pó de pedra em substituição a areia artificial, o teor de pasta passa a ser de 51%, reduzindo o índice de vazios. Com 12% de substituição, o teor de pasta chega a 54% e observa-se aumento significativo na resistência à compressão das argamassas. Com 18% de pó de pedra, o teor de pasta chega a 57%. Assim, o índice de vazios da areia não importa mais, e o efeito de afastamento começa a ocorrer. As partículas com diâmetros menores começam a agir sobre as partículas com diâmetros maiores. Ultrapassa o teor quando as elevadas quantidades de partículas finas adicionadas não se ajustam perfeitamente entre as aberturas das partículas maiores, prejudicando a densificação, havendo aumento do volume de poros e diminuição da densidade de empacotamento.

Observando os resultados, os valores mais altos alcançados foram com os teores de 12% de substituição da areia artificial por pó de pedra, com valores muito próximos a 18%. A partir desse teor, o efeito de afastamento começa a acontecer.

A ANOVA confirmou o efeito significativo do pó de pedra e do superplastificante na resistência da argamassa. A interação, como esperado, não foi significativa, demonstrando que o efeito da interação das variáveis não age na resistência. Isso ocorre pela fonte de variação influenciar os resultados no mesmo sentido. Tanto o superplastificante, quanto o pó de pedra, levam ao aumento da resistência da argamassa.

A comparação múltipla de médias para a resistência à compressão das argamassas apresentou diferença significativa apenas no teor de 0,9% de superplastificante, entre os teores de pó de pedra de 18% e 0%, 12% e 6% e entre 12% e 0%.

#### **4 Considerações finais**

Os resultados confirmam que a adição de pó de pedra influencia a consistência da argamassa de cimento Portland. De maneira geral, há redução no espalhamento à medida que se aumenta o teor de pó de pedra, e provavelmente, esse fenômeno está

associado à superfície específica do pó de pedra. Além disso, produzir argamassas com agregado miúdo de britagem apresenta tendência de aumentar a resistência à compressão, provavelmente, devido ao efeito microfíler do pó. Os valores mais altos alcançados são com os teores de 12% de substituição da areia artificial por pó de pedra, com valores muito próximos a 18%. A partir desse teor, o efeito de afastamento começa a acontecer. As diferenças só são significativas no teor de 0,9% de superplastificante para as comparações entre os teores de pó de pedra de 18% e 0%, 12% e 6% e entre 12% e 0%.

## 5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.

BARBOSA, M. T. G.; COURA, C. V. G.; MENDES, L. D. O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente construído**, v. 8, n. 4, p. 51-60, 2008.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2006.

CABRAL JUNIOR, M.; SUSLICK, S. B.; OBATA, O. R.; SINTONI, A. A mineração no estado de São Paulo: Situação atual, perspectivas e desafios para o aproveitamento dos recursos minerais. **Geociências**, UNESP, v. 27, p. 171-192, 2008.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Paulo, 2007.

MEHTA, P.K. **Concrete technology for sustainable development**. Concrete International, November, 1999.

MENOSE, R. T. **Utilização de Pó de Pedra Basáltica em substituição a Areia Natural do Concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

NELSON, E. & GUILLOT, D. (Ed.), Well Cementing, 2nd Ed., Schlumberger, 2006.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projeto de experimentos**, FEENG/ UFRGS, Porto Alegre, 2003.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma da composição granulométrica de agregado miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.