

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ SILCCA NOBRE SCI PROVENIENTE DA COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO

MARANGON Ederli^{1,a}, OLIVEIRA Letícia L.^{1,b}, OLIVEIRA Marcelo^{1,c}, BARONI Magnos^{1,d}, BUDNY Jaelson^{1,e}

¹ Av. Tiarajú, 810, CEP:97546-550, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil

^aederlimarangon@gmail.com, ^bleticialarre.ec@gmail.com, ^cmarcelooliveira@gmail.com, ^dmagnos.baroni@gmail.com, ^ejaelsonbudny@gmail.com

Palavras-chave: Índice de atividade pozolânica, Adições minerais, Sílica da casca de arroz.

Resumo. A casca de arroz quando queimada em temperatura controlada deixa de ser um resíduo e passa a ser um material amorfo, denominado sílica da casca de arroz (SCA), com características pozolânicas. A técnica de combustão em leito fluidizado mostra-se eficaz, resultando em uma sílica da casca de arroz de alta qualidade e homogeneidade, o que possibilita sua utilização em dosagens de concretos e argamassas como adição ou na substituição parcial do cimento Portland. Este trabalho avalia por meio do índice de atividade pozolânica (IAP) a pozolanicidade da SCA, obtida pela técnica de fluidização, e compara com outras pozolanas, tais como, cinza volante (CV) e sílica ativa (SA). Para essa avaliação, os testes foram realizados de acordo com a norma brasileira NBR 5752, ensaiados com cimento Portland brasileiro CPII-Z e mantendo-se a relação água/aglomerantes (a/agl) para o índice de consistência padrão (225±5mm) estabelecido na mesma norma. A fim de manter a consistência padrão para uma mesma relação a/agl acrescentou-se aditivo químico superplastificante (SP). Os resultados dos ensaios indicaram que para SCA o IAP das amostras com alteração da relação a/agl aos 28 dias foi inferior ao mínimo previsto em norma (IAP<75%). Entretanto as amostras contendo cimento e SP, que tiveram relação a/agl mantidas constante, apresentaram aos 28 dias IAP superior ao mínimo (IAP>75%), caracterizando assim a SCA como uma adição mineral.

Introdução

A utilização de pozolanas como alternativa ao uso do cimento Portland vem sendo altamente introduzida há algumas décadas, seja visando redução de custos, maior desempenho, aumento da durabilidade e ainda questões ambientais, visto que a produção do cimento Portland consome enorme quantidade de energia e emite grande quantidade de CO₂ [1]. Pozolanas são materiais que em sua composição apresentam sílica e alumínio e que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas na presença de água reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio de modo a formar compostos que possuem propriedades cimentícias [2]. Assim, no cimento Portland o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos reage com a pozolana resultando em silicatos de cálcio hidratados adicionais, que são os produtos mais estáveis do cimento Portland, responsáveis pela resistência e durabilidade das argamassas [3]. A casca de arroz é subproduto do processo de obtenção dos grãos de arroz. A partir de um sistema de combustão em leito fluidizado é utilizada a casca de arroz para a geração de energia elétrica renovável e dessa combustão com temperatura controlada, uma sílica da casca de arroz amorfa e com elevada reatividade é obtida [4]. Quando realizados ensaios de índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento para as adições minerais, é visto que o aumento do consumo de água necessário para a obtenção da consistência padrão das argamassas influencia diretamente nos resultados de IAP [5][6]. Consequentemente com o aumento do consumo de água, há uma perda de resistência à compressão, não atingindo assim o IAP mínimo de 75%. Entretanto quando mantida a relação água/aglomerantes da argamassa de referência e obtida consistência padrão com aditivo

superplastificante, o IAP demonstra valores de aproximadamente 101% para a sílica da casca de arroz [7].

Dessa forma, esse estudo demonstra o IAP da sílica de casca de arroz, da cinza volante e da sílica ativa. Para manter a mesma trabalhabilidade determinada na norma NBR 5752 das argamassas produzidas com as pozolanas, essas foram produzidas com diferentes relações a/agl. Com o objetivo de compara-las foram produzidas outras argamassas mantendo-se a relação a/agl da argamassa de referência (produzida somente com cimento Portland), sendo estas corrigidas com superplastificante.

Materiais e Métodos

Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram: sílica da casca de arroz (SCA) comercializada pela empresa Pilecco Nobre juntamente com a Geradora de Energia Elétrica de Alegrete (GEEA), comercialmente chamada Silcca Nobre SCI; cinza volante (CV) proveniente da termoelétrica de Candiota localizada no estado do Rio Grande do Sul; sílica ativa (SA), comercializada pela empresa Silmix; Cimento Portland brasileiro CP II-Z; areia normal brasileira do Instituto de Pesquisas Tecnológicas nas frações granulométricas: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100); e aditivo superplastificante à base de policarboxilato ADVA CAST 527 comercializado pela empresa GRACE, com as características conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Características do aditivo superplastificante utilizado.

Aditivo Químico	pH	Sólidos (%)	Massa Específica (g/cm ³)
ADVA CAST 527 - GRACE	5,0	34,0	1,06

Para as adições minerais e o cimento Portland foram determinadas, as massas específicas por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier NBR NM 23:2001 [11], as áreas específicas, os diâmetros médios e as compacidades por demanda d'água conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Características físicas do cimento e adições minerais.

Materiais	Massa Específica [g/cm ³]	Área Específica [m ² /kg]	Diâmetro Médio [μm]	Compacidade
Cimento CP II-Z	2,93	347	16,6	0,543
Sílica da casca de arroz	2,03	21.142	14,1	0,495
Cinza volante	1,89	3.630	22,17	0,56
Sílica ativa	2,085	28.000	0,42	0,40

Na Figura 1 são mostradas as curvas granulométricas do cimento Portland e da sílica de casca de arroz.

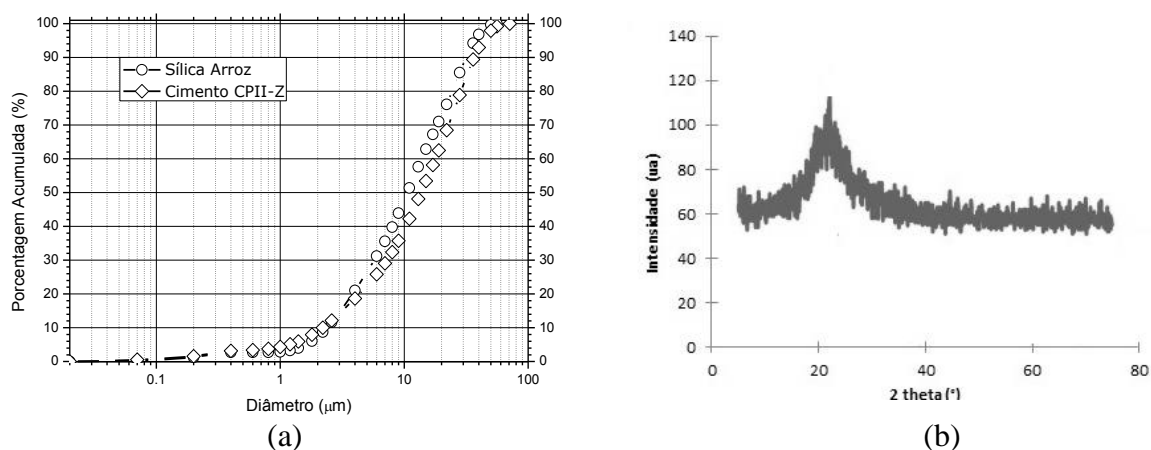


Figura 1: (a) Curvas granulométricas do cimento CP II-Z e da sílica da casca de arroz; (b) Análise de difração de raios-X da SCA.

De acordo com a Figura 1(a) é possível observar que as curvas são praticamente iguais. Na Figura 1(b) pode ser observado que a SCA apresenta uma estrutura tipicamente amorfa, uma vez que o difratograma mostra um alargamento dos seus picos e o aparecimento de bandas.

A NBR 12653/13 [8], que classifica os materiais pozolânicos, lista algumas exigências químicas e físicas com as quais estes materiais devem estar em conformidade. Segundo esta norma o limite máximo de perda ao fogo para as pozolanas é de 6%. A Tabela 3 apresenta as características químicas da sílica de casca de arroz. Conforme observado na Tabela 3 a SCA apresenta perda ao fogo menor que a máxima permitida por norma (3,5%). Outro fator químico exigido pela norma é que o somatório dos compostos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ deve ser no mínimo de 50%. Conforme observado na Tabela 3 a SCA apresenta um somatório dos compostos de 91,53% atendendo a esta exigência. Em relação às impurezas encontradas na SCA, como óxido de ferro (Fe_2O_3), magnésio (MgO) e cálcio (CaO), a soma destas é muito baixa, 0,73%.

Tabela 3: Características químicas da sílica da casca de arroz.

Sílica da Casca de Arroz										
Perda do Fogo (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	CaO (%)	K_2O (%)	MnO (%)	P_2O_5 (%)
3,50	91,48	0,00	0,05	0,32	0,15	0,04	0,36	1,40	0,32	0,45

A Tabela 4 apresenta as características físico-químicas do cimento.

Tabela 4: Características físico-químicas do cimento.

Cimento Portland CP II-Z										
Perda ao Fogo (%)	CO_2 (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino (%)	Expansão Quente (mm)	Início de Pega (h)	Fim de Pega (h)	Consistência Normal (%)	# 200 (%)
5,34	4,37	5,87	4,37	12,80	0,74	0,55	04:10	05:50	26,80	3,10%

Métodos

O ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) estabelecido pela NBR 5752 [9] é basicamente uma comparação entre as resistências médias à compressão, da argamassa referência moldada sem adição mineral e das argamassas contendo os materiais pozolânicos (substituição de 35% do cimento em massa). As resistências à compressão foram obtidas por meio de testes realizados em uma máquina de ensaios universais da marca EMIC mostrada na Figura 3. A característica comum a todas as argamassas é consistência padrão ($225 \pm 5\text{mm}$) obtida por meio de abatimento na mesa *flow table* conforme mostrada na Figura 2. A determinação do índice de consistência normal e das resistências à compressão das argamassas foram executados com base na NBR 7215 [10].

Dessa forma, foram moldadas as seguintes misturas, conforme identificadas na Tabela 5: uma argamassa de referência usando somente cimento Portland; três argamassas contendo SCA, CV e SA respectivamente, sendo inicialmente alterada a relação a/agl para obtenção da consistência padrão; duas argamassas contendo SCA e SA respectivamente, sendo que para estas foi mantida a relação a/agl da argamassa referência e adicionado SP para obtenção da consistência padrão.



(a)



(b)

Figura 2: Determinação de consistência na mesa *flow table*. (a) adensamento da argamassa no molde; (b) medida do espalhamento.



(a)



(b)

Figura 3: (a) Máquina para ensaios universais; (b) Detalhamento ensaio de compressão.

Tabela 5: Nomenclatura das argamassas estudadas.

A1	Argamassa Referência
B1	Argamassa com SCA
C1	Argamassa com SCA; mantida a relação a/agl de A1 com SP
D1	Argamassa com CV
E1	Argamassa com AS
F1	Argamassa com SA; mantida a relação a/agl de A1 com SP

Apresentação e Análise dos Resultados

Para cada uma das argamassas foram moldados três corpos de prova cilíndricos de dimensões 50x100 mm. A relação a/aglomerantes, consistência padrão, teor de superplastificante e as quantidades de cimento e pozolanas são apresentadas na Tabela 6. Cabe salientar que as quantidades

de areia foram constantes para todas as argamassas (234 gramas de cada fração). É possível observar nas dosagens em que não se manteve a relação a/agl da argamassa referência (B1,D1 e E1) que as relações a/agl foram bastante elevadas devido ao aumento da área específica das pozolanas em relação a área do cimento. No que diz respeito a sílica ativa, cabe ressaltar que o diâmetro médio é muito inferior ao do cimento, exigindo assim uma maior quantidade de água (38%) para envolver todas as partículas e alcançar a mesma consistência padrão. Para a argamassa contendo sílica de casca de arroz foi necessário um acréscimo de 24% de água a mistura. Para manter a consistência padrão e a mesma relação a/agl da argamassa de referência foram usados 0,08% e 0,5% de aditivo superplastificante, respectivamente, para as argamassas C1 e F1. Nota-se, que o uso de aditivo foi maior para a argamassa contendo SA, reforçando o maior uso de água na mistura E1.

Tabela 6: Especificação e quantitativo dos materiais utilizados para a dosagem das argamassas.

	A1	B1	C1	D1	E1	F1
Relação a/agl	0,55	0,68	0,55	0,58	0,85	0,55
Consistência (mm)	225,00	230	226,00	222,00	222,00	225,00
Cimento (g)	321,00	202,8	202,8	202,80	202,80	202,80
Pozolana (g)	0,00	75,66	75,66	70,44	77,71	77,71
Água (g)	172,24	190,0	152,63	157,40	239,00	151,01
SP (%)	0,00	0,00	0,08%	0,00	0,00	0,5%

Índice de Atividade Pozolânica

O índice de atividade pozolânica da sílica da casca de arroz, cinza volante e sílica ativa, representadas pela comparação das resistências mecânicas à compressão são mostradas na Figura 4 através das curvas típicas de tensão x deformação das argamassas ensaiadas. É possível observar os ângulos diferentes das curvas, que influenciam diretamente no módulo de elasticidade das argamassas.

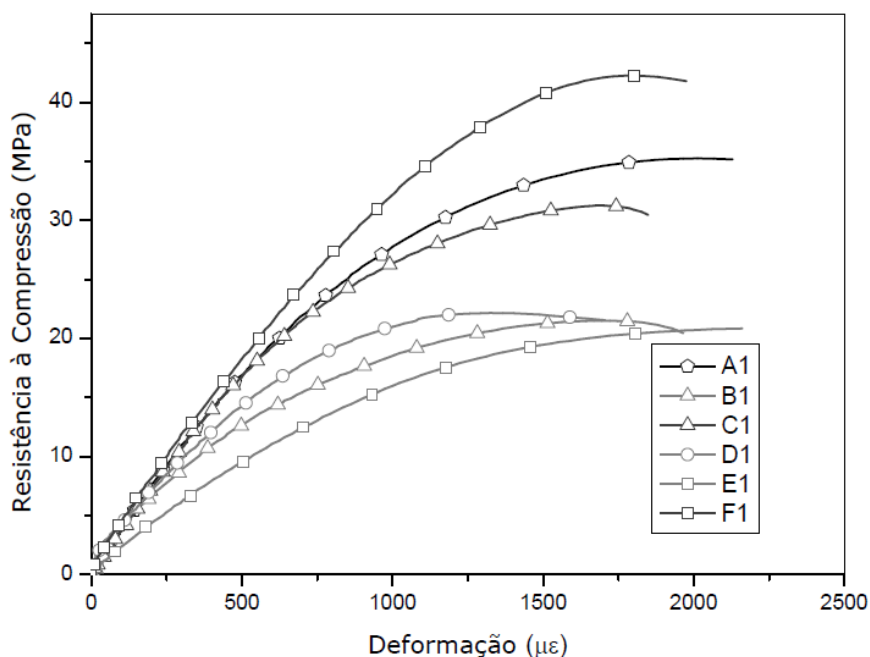


Figura 4 - Curvas típicas de tensão x deformação das argamassas.

A Tabela 7 apresenta os resultados médios de resistência à compressão e os módulos de elasticidade das argamassas, com desvio padrão e coeficiente de variação. Além desses, é apresentado o IAP das argamassas contendo cimento e das argamassas contendo cimento e SP.

Segundo a NBR 12653 [8] as adições podem ser caracterizadas como materiais pozolânicos quando a razão entre a resistência média à compressão da argamassa contendo pozolana e a resistência média à compressão da argamassa referência resultar um IAP igual ou superior a 75%. É possível

observar na Tabela 7 que os coeficientes de variação são relativamente baixos, o que demonstra a qualidade dos ensaios realizados.

Tabela 7: Resistência à compressão, módulo de elasticidade e IAP das argamassas.

	A1	B1	C1	D1	E1	F1
Resistência à Compressão (MPa)	35,03	21,51	31,21	21,24	20,15	40,23
Desvio Padrão	0,20	1,08	0,39	0,82	0,70	2,44
C.V. (%)	0,56	5,13	1,25	3,85	3,48	6,05
Módulo de Elasticidade (GPa)	34,70	26,01	31,91	20,85	16,79	31,86
Desvio Padrão	0,69	1,57	1,43	0,62	1,64	0,78
C.V. (%)	1,98	6,05	4,48	2,96	9,75	2,45
IAP com Cimento (%)	-	60,12	-	60,64	57,54	-
IAP com Cimento e SP (%)	-	-	88,51	-	-	114,84

No que se refere ao IAP das argamassas contendo cimento Portland e corrigindo a relação água/aglomerantes (B1, D1 e E1), é possível observar que os índices foram abaixo do valor mínimo exigido por norma (75%). Isso já era esperado, uma vez que a relação a/agl para essas misturas foi maior que a da argamassa referência, conseqüentemente perdas de resistência são previstas. Cabe salientar que para a mistura D1 o acréscimo na quantidade de água foi pequeno, e mesmo assim o índice foi baixo. Isso pode ter ocorrido, uma vez que o diâmetro médio da cinza volante é de 22,17 μm , e a reação com o hidróxido de cálcio não foi suficiente para elevar a resistência mecânica dessa argamassa. Além disso, a forma geométrica da cinza volante é esférica, o que contribui para a consistência, sem elevar o consumo de água.

No que se refere ao IAP das argamassas produzidas com cimento e adições, mantidas a relação a/agl da argamassa de referência e corrigidas a consistência padrão com o uso de aditivo superplastificante (C1, F1) é possível observar que os índices obtidos são maiores que o valor mínimo de 75 % para serem consideradas como pozolanas. A mistura C1 (argamassa com SCA) apresentou IAP 18 % superior ao mínimo exigido. Já a argamassa F1 (argamassa com SA) apresentou IAP 53 % maior que o mínimo exigido por norma.

Dessa forma, pode ser observado que a alteração da relação a/agl influencia diretamente nos resultados do índice de atividade pozolânica, sendo necessário manter a relação a/agl das argamassas com pozolana iguais a da argamassa de referência e corrigir a consistência padrão com o uso de aditivo químico.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, pode ser observado na Tabela 7 que os valores diminuíram consideravelmente quando alterado a relação a/agl das argamassas. No entanto, quando mantida a relação, essa variação foi pequena, menor que 11%.

Conclusões

As principais conclusões referentes ao presente trabalho são listadas a seguir.

- Para manter a consistência padrão das argamassas contendo como adição sílica da casca de arroz foi necessário o uso de aproximadamente 24% a mais de água com relação à argamassa de referência. Na argamassa contendo sílica ativa foi necessário aproximadamente 38% a mais de água. Esses aumentos significativos de água se fazem necessários, visto que a área superficial da sílica da casca de arroz é 60 vezes maior que a do cimento e a da sílica ativa é 81 vezes maior que a do cimento.
- Para manter a consistência padrão foi necessário o uso de 0,08% de superplastificante para a argamassa contendo sílica da casca de arroz e 0,5% na argamassa contendo sílica ativa.
- O aumento do consumo de água proporcionou perda na resistência à compressão das argamassas e assim não foi alcançado o índice de atividade pozolânica mínimo de 75%.
- Quando utilizado aditivo superplastificante e mantida a relação água/aglomerante das argamassas referência, o índice de atividade pozolânica foi superior aos 75%, necessários de acordo a norma, para as argamassas contendo sílica da casca de arroz e sílica ativa.

- O módulo de elasticidade apresentou diminuição em seus valores quando corrigida a quantidade de água das misturas. Por outro lado, quando mantida a relação água/aglomerantes com superplastificante, a diminuição do módulo foi menor que 11 % em relação à argamassa de referência.
- A sílica de casca de arroz mostrou atividade pozolânica satisfatória de acordo com a norma vigente. Dessa forma, esse subproduto agroindustrial pode ser usado como material pozolânico em construções de cimento Portland.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Pilecco Nobre Alimentos Ltda e GEEA-Geradora de Energia de Alegrete pelo apoio financeiro para a realização destes estudos, bem como pelo auxílio das bolsas concedidas aos alunos da UNIPAMPA, que fazem parte de um projeto de pesquisa que envolve estudos da durabilidade de concretos produzidos com substituição parcial do cimento por sílica de casca de arroz, Silcca Nobre.

Referências

- [1] D. G. Nair, A. Fraaij, A.K. Klaassen, A. P. M. Kentgens: *A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes*. Cement and Concrete Research. Vol. 38 (2008), p. 861-869.
- [2] V. M. Malhotra, P. K. Mehta: *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Vol 1, Gordon & Breach Publishers, Amsterdam (1996).
- [3] M. P. Oliveira, A. F. Nobrega, M. S. Campo, N. P. Barbosa: Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitação e Infra-estrutura de Interesse Social. Pirassununga (2004).
- [4] G. C. Cordeiro, R. D. T. Filho, L. M. Tavares, E. M. R. Fairbairn, S. Hempel: *Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash*. Cement and Concrete Research. Vol. 33 (2011), p. 529-534.
- [5] J. H. S. Rêgo: Avaliação do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento para adições minerais de alta reatividade. 41º Congresso Brasileiro do Concreto, São Paulo (2007).
- [6] J. H. S. Rêgo, L. H. P. Costa, N. P. Hasparyk: Avaliação da Atividade Pozolânica da Cinza da Casca de Arroz Residual (CCA) Pelo Ensaio de Índice de Atividade (IAP) com Cimento Modificado. 53º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis (2011).
- [7] E. Marangon, L. F. M. Marton, E. L. Soares, G.G. Mendes, R.P Martins, D. M. G. Silva: Atividade Pozolânica da Sílica da Casca de Arroz Produzida por Combustão em Leito Fluidizado. 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado (2013).
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais pozolânicos – Requisitos. ABNT NBR 12653, Rio de Janeiro, 2012.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – Método de ensaio. ABNT NBR 5752, Rio de Janeiro, 2012.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. ABNT NBR 7215, Rio de Janeiro, 1996.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. ABNT NBR NM 23, 2001.