Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.02, 2024
ISSN 2178-6925

UTILIZAÇÃO DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ EM ARGAMASSAS EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND

USE OF RICE HUSK SILICA IN MORTARS AS A PARTIAL REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT

André Barroso Mourão
Mestre em Engenharia Civil
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil
E-mail: andrebmourao@cefetmg.br

Liliane Cruz Gomes de Souza Santos
Doutora em Design, Materiais e Tecnologias
Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil
E-mail: lilianecruzbh@gmail.com

Aniel de Melo Dias
Mestre em Engenharia Civil
Centro Universitário Estácio de Belo Horizonte, Belo Horizonte/MG, Brasil
E-mail: anieldias@gmail.com

Lucas Thadeu da Silva Ramos
Mestre em Engenharia Civil
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil
E-mail: lucas.ramos@cefetmg.br

Ivan Batista Morais
Graduando em Engenharia Civil
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil
E-mail: ivan@cefetmg.br

Resumo

A utilização de materiais, como a sílica resultante da queima da casca de arroz, na construção civil, especialmente para substituir uma parte do cimento na produção de compósitos cimentícios, representa uma prática que contribui para a sustentabilidade ambiental, uma vez que a indústria do cimento é responsável por uma parcela substancial das emissões globais de gases de efeito estufa. Isso ocorre não apenas pela redução na extração do clínquer utilizado na fabricação do cimento, mas também pelo aproveitamento de resíduos

provenientes de outras indústrias. Uma outra vantagem é que a substituição parcial do cimento pela sílica pode contribuir para melhorias em algumas propriedades desses compósitos. Em virtude disso, o propósito deste estudo foi analisar o desempenho mecânico e físico de argamassas produzidas com 0% (referência), 5%, 10% e 15% de substituição, em volume, do cimento pela sílica proveniente da cinza da casca de arroz (SCA). Foram realizados ensaios de tração por compressão diametral aos 28 dias, compressão aos 7 e 28 dias e índice de absorção aos 28 dias de cura. Os resultados evidenciaram que as amostras com cinzas obtiveram resistência à tração similar à referência. De maneira geral, a introdução da SCA reduziu os valores de resistência à compressão e ampliou ligeiramente o índice de absorção das argamassas, resultados desfavoráveis para o desempenho mecânico e durabilidade, respectivamente, mas que podem ser mitigados por meio de uma moagem efetiva das cinzas anterior ao seu uso. Para pesquisas futuras, sugere-se o estudo do desempenho das argamassas com cinzas após longas idades de cura, pois as reações das SCA ocorrem lentamente.

Palavras-chave: Cimento Portland; Argamassas; Sílica cinza de casca de arroz; Sustentabilidade.

Abstract

The use of materials such as silica from burning rice husks in construction, especially to replace some of the cement in the production of cementitious composites, is a practice that contributes to environmental sustainability, since the cement industry is responsible for a substantial portion of global greenhouse gas emissions. This is due not only to the reduction in the extraction of the clinker used to make cement, but also to the use of waste from other industries. Another advantage is that the partial replacement of cement with silica can contribute to improvements in some of the properties of these composites. As a result, the purpose of this study was to analyze the mechanical and physical performance of mortars produced with 0% (reference), 5%, 10% and 15% replacement, by volume, of cement with silica from rice husk ash (SCA). Tensile tests were carried out for diametrical compression at 28 days, compression at 7 and 28 days and absorption index at 28 days of curing. The results showed that the samples with ash had similar tensile strength to the reference. In general, the introduction of SCA reduced the compressive strength values and slightly increased the absorption index of the mortars. These results are unfavorable for mechanical performance and durability, respectively, but can be mitigated by effectively grinding the ash before use. For future research, we suggest studying the performance of mortars with ash after long curing times, as the reactions of SCA occur slowly.

Keywords: Portland Cement; Mortars; Rice husk ash silica; Sustainability.

1. Introdução

A construção civil é um setor de extrema importância para o desenvolvimento econômico e social, no entanto enfrenta desafios significativos relacionados à sustentabilidade ambiental, com um consumo considerável de recursos naturais e a emissão de gases de efeito estufa durante a produção de materiais de construção, especialmente cimento Portland. Segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (IPCC, 2021), a construção civil é responsável por aproximadamente 38% das emissões globais de CO_2. Uma das principais fontes dessas emissões é a produção de cimento Portland, um componente essencial na fabricação de argamassas e concretos.

A produção de clínquer, principal componente do cimento Portland, é um processo intensivo em emissões de CO_2. Devido à alta demanda por concreto, a indústria do cimento é responsável por uma parcela substancial das

emissões globais de gases de efeito estufa, variando entre 5% e 8%. Cada tonelada de clínquer de cimento Portland, devido ao processo de descarbonatação, processamento e moagem, geram a liberação de 600 a 900 kg de CO_2 (Thiedeitz et al., 2022). Além disso, cada tonelada de cimento produzida gera o consumo de 1,7 toneladas de recursos naturais (Jagadesh et al., 2015).

Diante desses desafios ambientais, a busca por materiais alternativos que possam substituir o cimento tem se intensificado. Várias pesquisas têm explorado alternativas sustentáveis, como resíduos industriais e cinzas de biomassa, a fim de reduzir os impactos negativos associados ao cimento Portland (Scrivener et al., 2018). Esses materiais alternativos oferecem uma promissora oportunidade de mitigar os prejuízos ambientais sem comprometer a qualidade e a durabilidade das construções.

Em um estudo recente, Šupić et al. (2022)exploraram a incorporação de cinzas de biomassa e pó de resíduos cerâmicos como substitutos parciais do cimento em argamassas. Eles destacaram a necessidade crescente de alternativas sustentáveis aos ligantes convencionais à base de cimento, não apenas por preocupações ambientais, mas também para promover a melhora nas propriedades mecânicas de compostos cimentícios. Esse estudo confirmou a viabilidade técnica dessas substituições e apontou o potencial significativo desses resíduos como aditivos minerais.

Zheng et al. (2023) concentraram-se na melhoria da atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar resultante de diferentes protocolos de processamento, revelando a possibilidade de produzir uma cinza ideal com influência positiva na resistência mecânica e resistência ao cloreto da argamassa.

Geraldo et al. (2022) propuseram e avaliaram um método para obter um ligante ativado alcalinamente, utilizando resíduos da casca de arroz, indicando a eficiência desse processo na geração de um material em pó de silicato de sódio não cristalino, com alto potencial para aplicações na construção civil.

O atual cenário da indústria da construção civil apresenta desafios ambientais e econômicos que exigem uma reavaliação das práticas tradicionais. Portanto, a pesquisa sobre o uso de resíduos como componentes desses materiais surge como uma alternativa relevante.Uma solução é a utilização da sílica proveniente da queima da casca de arroz (SCA) como substituto parcial do cimento Portland em argamassas. A cinza de casca de arroz é um resíduo abundante na indústria do arroz. De acordo com Nguyen et al., (2017), a quantidade de cinzas geradas pela queima da casca de arroz corresponde a 20% do volume da própria casca. O destino inadequado desses resíduos pode impactar o meio ambiente e a saúde da sociedade, se não forem gerenciados adequadamente.

Além disso, a cinza da casca de arroz, juntamente com a sílica ativa e as cinzas volantes, são consideradas adições potenciais na composição de concretos e argamassas. Isso se deve ao fato de conferirem ganhos de resistência contra agentes agressivos, aumentando a durabilidade e promovendo maior resistência mecânica (Nguyen et al., 2017).

Diante do exposto, esta pesquisa se concentra em uma análise experimental da substituição de parte do cimento Portland pela sílica de casca

de arroz (SCA), explorando seu potencial para reduzir os impactos ambientais e contribuir para a sustentabilidade ambiental na construção civil.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi produzir argamassas que utilizem a sílica proveniente da casca de arroz (SCA) e que esse composto tenha a capacidade para atender aos requisitos de resistência mecânica exigidos pelas normas. Visa-se ainda, avaliar os efeitos de diferentes percentagens da SCA sobre as propriedades físico-mecânicas e de durabilidade das argamassas.

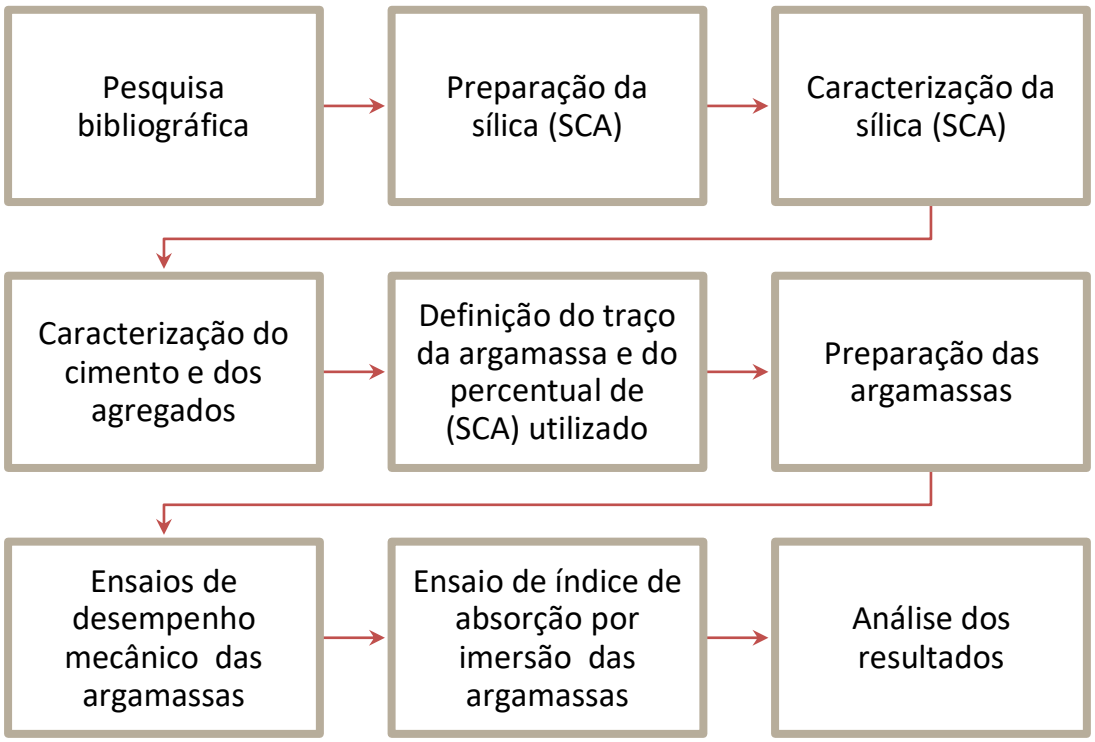
2. Metodologia

A pesquisa em questão pode ser classificada como exploratória, uma modalidade cujo propósito é adquirir uma compreensão mais aprofundada do problema em estudo, fomentando o desenvolvimento de ideias e a investigação de possíveis soluções. A fase inicial da pesquisa é identificada como pesquisa bibliográfica, a qual se baseia em materiais previamente elaborados, como artigos científicos, capítulos de livros e obras publicadas relacionadas ao campo de estudo (Sousa, et. al. 2021). Esta etapa desempenha um papel crucial na construção de um arcabouço teórico, sendo fundamental para a identificação de oportunidades e para o estabelecimento de parâmetros com base nos principais estudos conduzidos pela comunidade científica sobre o tópico em questão. A revisão da literatura proporcionou uma base sólida para compreender e contextualizar as questões em análise.

O método empregado para desenvolver os corpos de prova foi o experimental, com o propósito de explorar novas combinações por meio de experimentos conduzidos em ambiente laboratorial, seguido da avaliação dos resultados obtidos (Miodownik, 2013; Bak-Andersen, 2021).

A fim de permitir a comparação do desempenho das argamassas com substituição parcial do Cimento Portland por sílica da casca de arroz (SCA), foram produzidas as chamadas amostras controle ($CP0_{(controle)}$) sem adição da sílica da casca de arroz. A Figura 1 apresenta o fluxograma com a metodologia empregada na pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma do processo de pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2023).

2.1. Materiais

Os materiais utilizados para a pesquisa foram: sílica de cinza de casca de arroz (SCA), cimento Portland, areia como agregado miúdo, e água.

2.1.1 Sílica de cinza de casca de arroz (SCA)

A sílica utilizada é de baixa pureza, derivada da cinza de casca de arroz (SCA). O material foi adquirido da Silcca Nobre (Embu das Artes – SP) e é proveniente da queima controlada da casca de arroz em sistema de combustão via leito fluidizado. Sua denominação técnica é Silcca Nobre SBI, composta por sílica amorfa, óxido de ferro, cálcio, magnésio sódio, potássio e carbono (Catálogo SILCCA NOBRE - 2024).

Para caracterizar a sílica, foram feitos, nesse trabalho: queima a 450°C, picnometria, granulometria a laser, difração de raios x (DRX), espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), a espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado é do tipo CP-V ARI. Foi adquirido ensacado em embalagem de 50kg no comércio local, fabricado com as especificações técnicas estabelecidas pelas normas da ABNT. A massa específica do cimento

foi obtida com base no ensaio de picnometria. As demais características necessárias foram adquiridas através das informações do fabricante.

2.1.3 Areia (agregado miúdo)

Foi utilizada, como agregado miúdo, a areia fina, com dimensões de 0,075 a 0,42mm, de acordo com a NBR 7225. Esse material também foi adquirido no comércio local e submetido a ensaios de granulometria e massa específica. A massa específica do agregado foi determinada conforme os procedimentos do método de Chapman.

2.1.4 Água

A água utilizada para produção das argamassas da pesquisa foi proveniente do abastecimento público da companhia de águas COPASA que fornece a água potável para a cidade de Belo Horizonte/MG.

2.4. Produção das argamassas

Após a caracterização dos materiais, a dosagem foi definida, como mostra a Tabela 1. Tomando-se como base a NBR 7215 (ABNT, 2019), a proporção de aglomerante / agregado miúdo foi 1:3, em massa, para a argamassa controle (REF). A relação de água / cimento para a dosagem REF foi de 0,55, em massa. As quantidades de água e agregado miúdo foram mantidas constantes para os demais traços.

Além da argamassa controle (REF), com 100% de cimento Portland, foram elaboradas mais três dosagens de argamassas: SCA 5%, SCA 10% e SCA 15%, com percentuais de substituição do cimento pela SCA, em volume, de 5%, 10% e 15%, respectivamente. Dessa forma, a relação água / aglomerante foi mantida constante, em volume, para todas as dosagens, conforme consta na Tabela 1:

Tabela 1 – Dosagem das argamassas

Dosagem	**Aglomerantes**		**Agregado miúdo**	**Água**	**Relação água / aglomerante (volume)**
	Cimento Portland	**Sílica (SCA)**			
REF	686,40g	0g	2059,20g	377,52g	1,66
SCA 5%	652,08g	27,09g	2059,20g	377,52g	1,66
SCA 10%	617,76g	54,20g	2059,20g	377,52g	1,66

SCA 15%	583,44g	81,29	2059,20g	377,52g	1,66

Fonte: Autoria própria (2023).

Seguindo-se os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019), foram produzidos corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão (idades de 7 e 28 dias), ensaios de tração por compressão diametral (idade de 28 dias) e determinação do índice de absorção por imersão aos 28 dias. Os ensaios de desempenho mecânico foram realizados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019) para a compressão e NBR 7222 (ABNT, 2011) para tração. O ensaio de absorção teve como base a NBR 9778 (ABNT, 2005). A Figura 2 exibe as amostras submetidas aos ensaios de compressão, tração e absorção:

Figura 2 - Ensaios de compressão (a), tração por compressão diametral (b) e absorção por imersão (c).



(a) (b) (c)

Fonte: Autoria própria (2023).

3. Resultados e Discussões

3.1. Caracterização da sílica

3.1.1 Queima a 450ºC por 3 horas

Uma parte importante da presente pesquisa envolveu a preparação da sílica partindo de uma sílica obtida a partir de cinzas de casca de arroz. A partir dessa sílica foram executados procedimentos que visam aumentar a pureza e diminuir o tamanho das partículas.

Azat et al. (2019), já haviam reportado que para se alcançar uma sílica com alta pureza e alta área superficial específica, é necessário realizar a lixiviação com solução ácida e também o tratamento térmico em temperatura de aproximadamente 450°- 600 °C. Com isso, tais autores alcançaram uma sílica relativamente pura, com pureza de 99,5% e área superficial específica de aproximadamente 260 m^2 g^{-1}.

Figura 3 - (a) Sílica como recebida (b) Após tratamento térmico a 450 °C.



(a) (b)

Fonte: Autoria própria (2023).

No presente estudo não foi realizada a lixiviação das sílicas (SCA), apenas o tratamento térmico a 450 °C por 3 h. Observou-se uma diferença na coloração das partículas de (SCA) após esse tratamento, conforme mostrado na Figura 3 (a) na qual consta a sílica antes do tratamento térmico e (b) após o tratamento térmico.

3.1.2 Massa específica (picnometria)

Conforme os resultados registrados nos ensaios de picnometria da SCA, a amostra sem o tratamento térmico apresentou massa específica de 2,142 g/cm³, ao tempo que a amostra submetida à queima obteve massa específica de 2,393 g/cm³. Ou seja, a requeima a 450ºC durante três horas resultou em um aumento de 11,72% da massa específica da SCA.

Valores similares foram obtidos por (FERNANDES et al., 2017) que encontraram em seus estudos valores entre 2.13 g/cm³ e 2.24 g/cm³ para um tratamento térmico com temperaturas variando entre 500ºC - 800ºC .

3.1.3 Granulometria a laser

A distribuição granulométrica da cinza foi realizada por via úmida, fazendo-se uso de água. Obteve-se como resultado para D10, D50 e D90 valores de 2,99 μm, 14,94 μm e 47,86 μm, respectivamente. O diâmetro médio foi 20,80 μm.

Os valores D10, D50 e D90 significam o diâmetro médio após o ensaio de 10%, 50% e 90% da amostra acumulada, respectivamente.

3.1.4 Difração de raios X (DRX)

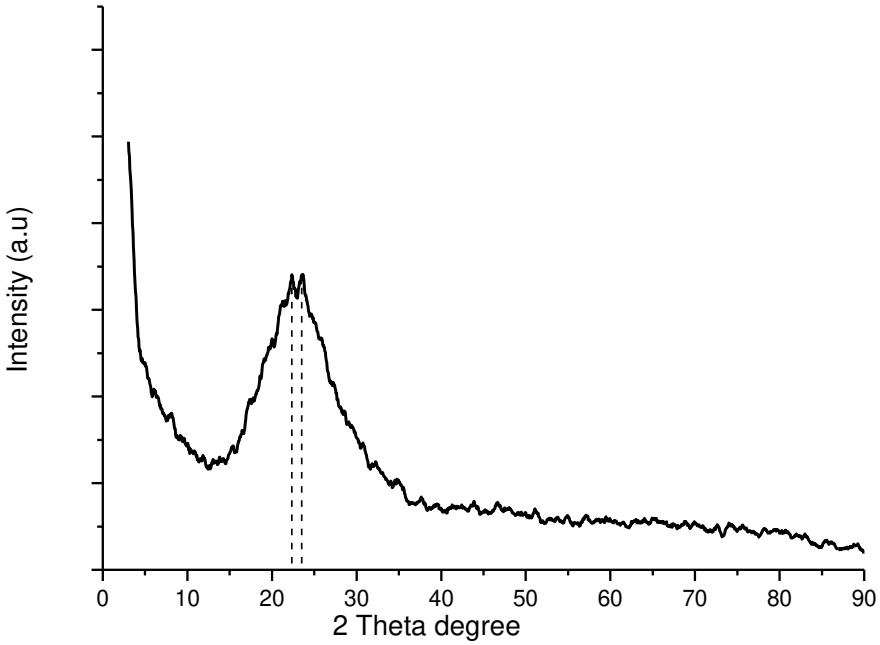
O difratograma (Figura 4) das partículas de sílica rh-SiO2 foram obtidos com auxílio de um difratômetro de raios X (PANalyticalX'Pert, Empyrean, Holanda) equipado com um alvo do tubo de cobre (CuKα, λ=1.54 Å) operando em 40 kV e 30 mA. As amostras foram escaneadas em uma taxa de 0,06o min-1 entre 2θ=3 e 90o. O tamanho médio de cristalito das partículas de sílica rh-SiO_2 foi

calculado usando (1), chamada de equação de difração de Debye-Scherrer (MOOSA & SADDAM, 2017):

$$D(2\theta) = \frac{K\,\lambda}{ß\cos\theta} \qquad (1)$$

na qual:
D é o tamanho médio do cristalito (nm), ß é a largura na metade do máximo do pico em radianos, θ é o ângulo de Bragg (em radianos), K é um fator adimensional relacionado à forma do cristalito, geralmente considerado como 0,9 e λ é o comprimento de onda de Raios-X (0,1541 nm) para Cu-Kα.
. O perfil, com um pico duplo largo em ângulos 2θ de 22º e 23º, confirmou a natureza amorfa da sílica (MOOSA *et al.*,2017; JYOTI *et al.*, 2021).

Figura 4 - Difratograma da SCA



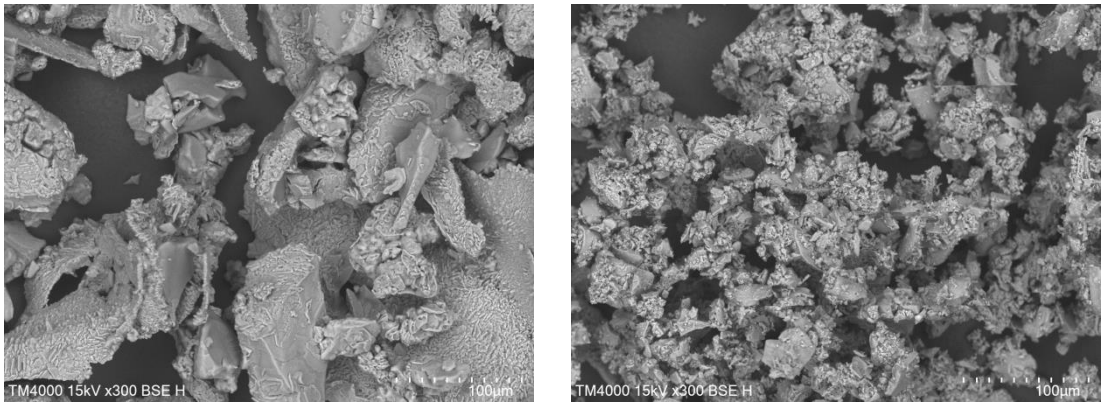
Fonte: Autoria própria (2023).

3.1.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de MEV foram obtidas por um microscópio eletrônico de varredura (HITACHI TM 3000) com feixe de elétrons operando a 5 kV e usando detector de elétrons secundários (SED).

A Figura 6 (a) mostra a micrografia da sílica de arroz (SCA) sem o tratamento térmico e a Figura 6 (b) após o tratamento térmico. Nota-se que as partículas possuem formas angulares com a presença de poros, o que corrobora as observações feitas por Moraes et al. (2014). Na Figura 6 (a), observam-se aglomerados de partículas com dimensões entre aproximadamente 50μm e 150μm. Já na figura (b) que apresenta a sílica após o tratamento térmico, observam-se o aumento do número de poros e diminuição das partículas com dimensões entre aproximadamente 25μm e 60μm.

Figura 6 - Imagem de MEV: (a) Sílica de arroz (SCA), antes do tratamento térmico (b) após o tratamento térmico.



(a) (b)

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2. Cimento Portland

3.2.1 Granulometria do cimento Portland

O ensaio de granulometria a laser do cimento Portland CPV ARI foi realizado por via úmida úmida, fazendo-se uso do álcool isopropílico. Obteve-se como resultado para D10, D50 e D90 valores de 1,75 μm, 11,46 μm e 31,23 μm, respectivamente. Obteve-se um diâmetro médio foi 14,31 μm.

Comparando-se os resultados da granulometria do cimento com a cinza da casca de arroz, nota-se que a cinza apresentou um diâmetro médio 45,35% superior ao valor registrado para o cimento.

3.2.2 Caracterização

Foi obtido um valor de 3,132 g/cm3 para a massa específica do cimento, por meio do ensaio de picnometria. Logo, nota-se que o cimento apresenta uma massa específica 30,88% superior à massa específica da SCA submetida à requeima (2,393 g/cm³), que por sua vez foi utilizada na produção das argamassas.

3.3. Agregado miúdo (areia)

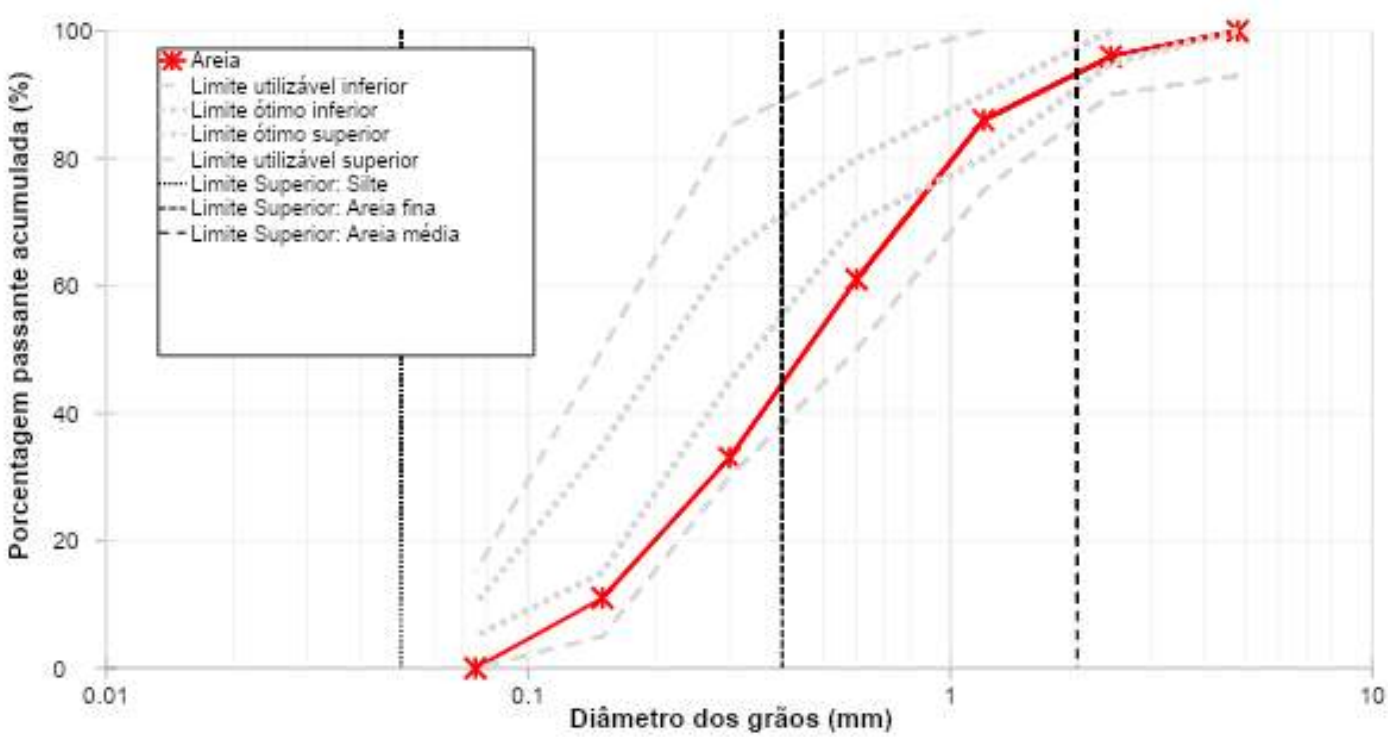
As características da areia natural utilizada, quanto à granulometria e massa específica aparente são apresentadas na Tabela 2 e sua curva granulométrica está posta na Figura 7.

Tabela 2 – Características da areia natural fina utilizada

Parâmetro			Areia Natural
Granulometria - NBR NM 248:2003 % Retida Acumulada	Abertura das peneiras (mm)	2,36	4%
		1,18	14%
		0,60	39%
		0,30	67%
		0,15	89%
		Fundo	100%
Dim. Máx. Caract. (mm) - NBR 7211:2005			2,36
Módulo de Finura - NBR 7211:2005			2,13
Massa Específica (g/cm³) - NBR NM 52:2003			2,66

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Nota-se aqui que o agregado utilizado neste experimento ainda encontra-

se como caracterizado dentro de uma zona utilizável, como percebido pela quase que manutenção total de sua linha média no gráfico da Figura 7, como dentro do limite utilizável superior, corroborado pelo módulo de finura entre 1,55 e 2,20. Além disso, cerca de 45% da curva granulométrica do material analisado encontra-se enquadrado como areia fina, cerca de 48% do material encontra-se enquadrado como areia média e apenas. Sendo assim, observa-se que a areia natural utilizada é média-fina (MF=2,13), apresentando uma distribuição percentual com crescimento quase linear de cerca de 10 pontos da abertura de 2,36mm até 0,30 mm e com inflexão e decrescimento linear entre 0,30mm e o fundo.

Com base em duas amostragens da areia fina, a média final obtida para a massa específica foi de 2,66 g/cm3. O teor de pulverulência do material, conforme NBR NM 46:2003, não foi considerado para essa caracterização, uma vez que o foco de interesse da pesquisa era a sílica e não o agregado utilizado.

A respeito da forma desse agregado, conforme Fabro et al. (2011) apresentam, há influência da forma de agregados miúdos nas propriedades de argamassas. Para caracterizar esta propriedade muitas ferramentas podem ser aplicadas, tais como a análise digital de imagens que pode determinar sua relação de aspecto, esfericidade, indicador de lamelaridade e coeficiente de forma.

3.4. Compressão das argamassas

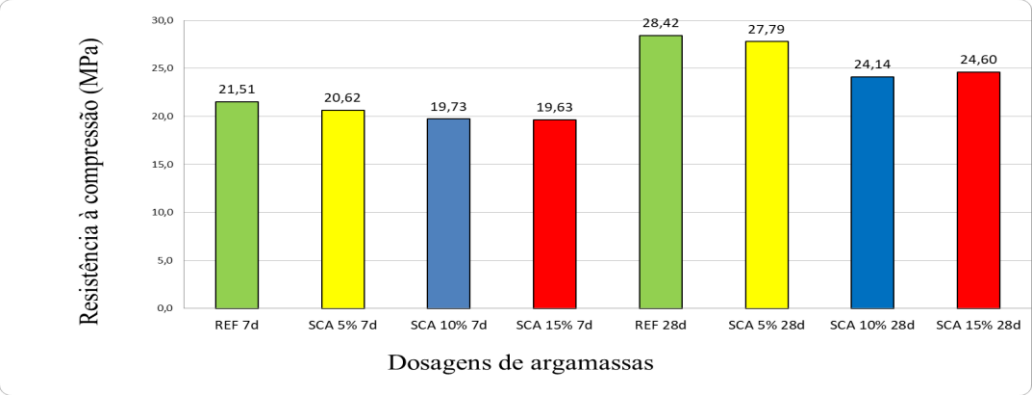
A Tabela 3 e a Figura 08 exibem os resultados alcançados pelas argamassas no ensaio de compressão axial, após 7 e 28 dias de idade.

Tabela 3 – Resultados de resistência à compressão.

Dosagem	**Idade (dias)**	**Resistência à compressão**	
		Média (MPa)	**Percentual em relação a REF**
REF	7	21,51	100%
	28	28,42	100%
SCA 5%	7	20,62	95,86%
	28	27,79	97,78%
SCA 10%	7	19,73	93,02%
	28	24,14	84,94%
SCA 15%	7	19,63	91,25%
	28	24,60	86,55%

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 8 - Resultados dos ensaios de compressão aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2023).

Com base na Tabela 3 e Figura 8, nota-se que, de maneira geral, a introdução das cinzas gerou decréscimo na resistência à compressão das argamassas.

A dosagem com 5% SCA obteve resistência 4,14% e 2,22% inferior à referência aos 7 e 28 dias, respectivamente. Já as amostras SCA 10% e SCA 15% registraram quedas no desempenho mecânico mais significativas, sendo que os valores de SCA 10% foram 6,98% (7 dias) e 15,06% (28 dias) menores em relação à referência e a resistência de SCA 15% foi 8,75% (7 dias) e 13,45% (28 dias) inferiores à referência. Gomes *et al.* (2023) também verificaram que concretos produzidos com substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz exibiram desempenho mecânico inferior à dosagem de referência para idades de 7 e 28 dias, mas após 91 dias de cura, as dosagens com 10%, 15% e 20% de cinzas apresentaram resultados similares ou superiores à dosagem com 100% de cimento. Estes resultados evidenciam que a introdução das cinzas retarda o tempo de ganho de resistência mecânica dos materiais cimentícios.

Logo, para pesquisas futuras, é válido estudar a resistência à compressão de argamassas com substituição parcial do cimento pela SCA após 91 dias de idade.

A moagem das cinzas pode contribuir para a melhoria da resistência à compressão das argamassas, uma vez que que este procedimento permitirá a redução de sua granulometria da SCA e aumento de sua área superficial, facilitando assim a ocorrência das reações pozolânicas e um melhor empacotamento das partículas (efeito filer). Deste modo, a moagem prévia da SCA constitui mais uma sugestão para estudos futuros.

3.5. Tração por compressão diametral das argamassas

A Tabela 4 e a Figura 9 apresentam os resultados registrados pelas argamassas para os ensaios de tração por compressão diametral, após 28 dias de idade.

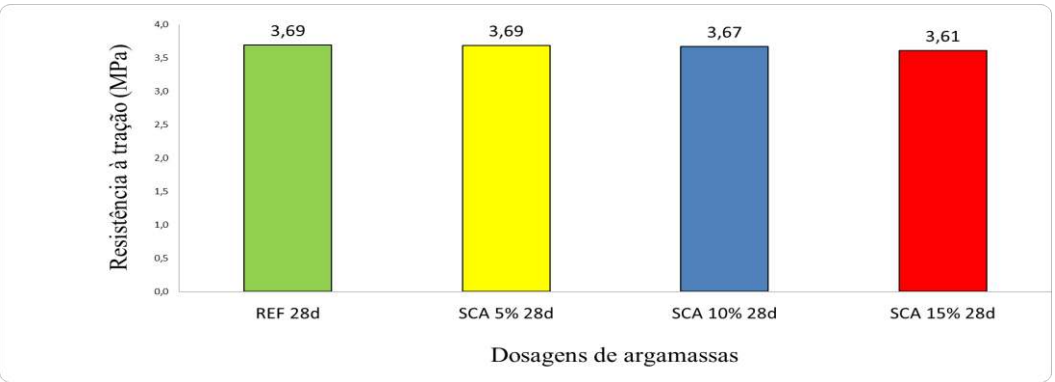
Tabela 4 – Resultados de resistência à tração.

Dosagem	Idade	Resistência à tração

	(dias)	Média (MPa)	Percentual em relação a REF
REF	28	3,69	100%
SCA 5%	28	3,69	100%
SCA 10%	28	3,67	99,45%
SCA 15%	28	3,61	97,83%

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 9 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral aos 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2023).

Diante dos dados da Tabela 4 e da Figura 9, observa-se que a substituição parcial do cimento pelas cinzas não alterou significativamente a resistência à tração das argamassas, uma vez que a amostra com 5% de SCA apresentou o mesmo desempenho da referência e as amostras com 10% e 15% de cinzas registraram, respectivamente, decréscimos de apenas 0,55% e 2,17% em relação à argamassa com 100% de cimento.

A comparação dos resultados evidenciam que a introdução das cinzas não prejudicou a resistência à tração das amostras, e, segundo Mourão e Paula (2022), este é um indício positivo para o não aparecimento de fissuras em argamassas de revestimento.

3.6. Absorção por imersão

A Tabela 5 expõe os resultados registrados para os ensaios de índice de absorção por imersão das argamassas:

Tabela 5 – Resultados do Índice de Absorção por Imersão.

Dosagem	Idade (dias)	Índice de Absorção (A)	
		Média	Percentual em relação a REF
REF	28	9,41%	100%
SCA 5%	28	10,04%	106,69%
SCA 10%	28	10,17%	108,07%
SCA 15%	28	10,05%	106,80%

Fonte: Autoria própria (2023).

Diante dos resultados, observa-se que, de maneira geral, a introdução das cinzas elevou o índice de absorção das amostras, uma vez que SCA 5%, SCA 10% e SCA 15% registraram valores de absorção 6,69%, 8,07% e 6,08% superiores à argamassa referência.

O índice de absorção mais elevado registrado pelas argamassas com cinzas está relacionado a distribuição granulométrica da SCA, uma vez que, conforme foi verificado nos ensaios de granulometria a laser, as partículas das cinzas registraram um diâmetro médio 45,35% superior ao diâmetro médio do cimento.

Pesquisas anteriores demonstraram que a introdução de cinzas com partículas de maior diâmetro em relação ao cimento contribuiu para o aumento da porosidade aberta das argamassas (Paula *et al* ,2009; Mourão e Paula, 2022), o que é desfavorável diante do ponto de vista da durabilidade e resistência dos materiais cimentícios.

Bezerra *et al.* (2017) verificaram que as argamassas produzidas com substituição parcial do cimento por cinzas com menor diâmetro médio obtiveram maior massa específica e índices de absorção similares ou inferiores em relação à referência. As cinzas utilizadas por Bezerra *et al.* (2017) apresentaram diâmetro médio 13,03 % inferior quando comparadas ao cimento. Portanto, nota-se que a redução do diâmetro médio da SCA é fundamental para a melhoria do índice de absorção das argamassas produzidas com cinzas, o que indica que a moagem da SCA é uma etapa relevante e que contribui para a melhoria do desempenho das amostras.

4. Conclusões

A incorporação das cinzas da sílica de casca de arroz não prejudicou a resistência à tração por compressão diametral das argamassas, sendo que o desempenho de todas as amostras foram semelhantes no estudo desta propriedade mecânica. Este resultado comparativo indica que a SCA pode ser usada em argamassas de revestimento.

De maneira geral, a introdução da SCA reduziu resistência à compressão das argamassas para curtas idades (7 e 28 dias). Para estudos futuros, sugere-se o estudo do desempenho mecânico a partir de 90 dias, tendo em vista que as reações das cinzas são lentas e sua introdução em materiais cimentícios produzirá resultados mais satisfatórios a longo prazo.

A ausência de moagem das cinzas contribuiu para a queda da resistência à compressão das amostras com SCA, pois as cinzas apresentaram diâmetro

médio 45,35% superior ao diâmetro do cimento. Logo,para trabalhos futuros, recomenda-se a realização da moagem prévia da SCA, a fim de reduzir o tamanho médio de suas partículas e aumentar sua área superficial, o que irá contribuir para um melhor empacotamento das partículas constituintes da argamassa e favorecerá a ocorrência de mais reações pozolânicas.

As argamassas com cinzas apresentaram maior porosidade aberta à água quando comparadas à amostra com 100% de cimento, entretanto, com base em estudos anteriores, este aumento da porosidade pode ser minimizado com uma moagem efetiva das cinzas. A introdução de cinzas moídas e, logo, de menor diâmetro, favorece a redução do índice de absorção e o aumento da massa específica dos materiais cimentícios.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para concreto – requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13280. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

AZADI, M., Bahrololoom, M. E., & Heidari, F. (2011). Enhancing the mechanical properties of an epoxy coating with rice husk ash, a green product. Journal of Coatings Technology and Research, 8(1), 117–123. https://doi.org/10.1007/s11998-010-9284-z

BAK-ANDERSEN, M. Reintroducing Materials for Sustainable Design: Design Process and Educational Practice. Routledge; New York: [s.n.]. v. 185

BEZERRA, A. C. DA S. et al. Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. Revista Matéria, v. 22, n. 1, 2017.

FABRO, Fabiana et al. Influence of fine aggregates particle shape in the concrete properties. Revista Ibracon de estruturas e materiais, v. 4, p. 191-212, 2011.

FERNANDES, I. J., Calheiro, D., Sánchez, F. A. L., Camacho, A. L. D., Rocha, T. L. A. de C., Moraes, C. A. M., & Sousa, V. C. de. (2017). Characterization of silica produced from rice husk ash: Comparison of purification and processing methods. Materials research, 20(suppl 2), 512–518. https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-1043

GERALDO, R. H., Gonçalves, J. P., & Camarini, G. (2022). Production process of an Eco-friendly one-part alkali-activated binder. Materials research, 25. https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0433

GOMES, Camila Lacerda et al. Mechanical and durability properties of concrete produced with construction and demolition waste and rice husk ash. Construction and Building Materials, v. 406, p. 133471, 2023.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press , 2021.

JAGADESH P, RAMACHANDRAMURTHY A, MURUGESAN R, SARAYU K Micro-analytical studies on sugar cane bagasse ash. Sadhana - AcadProc Eng Sci 40:1629–1638. https://doi.org/10.1007/s12046-015-0390-6, 2015.

LIU, YAN *et al.* Simultaneous preparation of silica and activated carbon from rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 32, p. 204–209, 2012. Disponívelem: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.021

MIODOWNIK, M. Stuff Matters: Exploring the Marvelous Materials That Shape Our Man-Made World. 1. London: Penguin, 2013.

MORAES, CARLOS; FERNANDES, IARA J; CALHEIRO, Daiane; KIELING, Amanda G; A BREHM, Feliciane; RIGON, Magali R; A BERWANGER FILHO, Jorge; SCHNEIDER, Ivo Ah; OSORIO, Eduardo. Review of the rice production cycle: by-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. **Waste Management & Research**: The Journal for a Sustainable Circular Economy, [S.L.], v. 32, n. 11, p. 1034-1048, 31 out. 2014. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/0734242x14557379.

MOURÃO, André Barroso; PAULA, Júnia Nunes De. Utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça como substituição parcial ao cimento nas propriedades das argamassas cimentícias. 4o congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis. ISBN: 978-65-00-55912-5, pag 606-619. Salvador - Bahia. 2022

NGUYEN, H. D., BUI, X. T., & TRAN, H. D. Effect of rice husk ash on the mechanical properties and durability of high-strength concrete. Construction and Building Materials, 153, 693-703, 2017.

PAULA, M. O. et al. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.3, p.353–357, 2009.

([SD]). Com.br. Recuperado em 29 de janeiro de 2024, de https://silcca.com.br/arquivos/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20Silcca_completa.pdf

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., & GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. CementandConcrete Research, 114, 2-26, 2018.

SOUSA, A.S., Oliveira, G.S.& Alves, L.H. (2021) A Pesquisa Bibliográfica: Princípios E Fundamentos, Cadernos da Fucamp, v.20, n.43, p.64-83

ŠUPIĆ, S. et al. Characterization of harvest residues ashes and ceramic waste powders originating from Vojvodina as potential supplementary cementitious materials. Gradjevinskimaterijali i konstrukcije, v. 65, n. 4, p. 155–166, 2022.

THIEDEITZ, M., Ostermaier, B., &Kränkel, T. (2022). Rice husk ash as an additive in mortar –

Contribution to microstructural, strength and durability performance. Resources, Conservation, and Recycling, 184(106389), 106389. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106389

ZHENG, C.; JINGLI, W.; CHAOFAN Y.; VIVEK B.; SHUYANG L.; TENGYU L. Strength and chloride resistance of mortars blended with SCBA: the effect of calcination and particle sizing on its pozzolanic activity. Journal of Materials Research and Technology, v. 22, p. 1423 - 1435, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.179