

## Utilização de sílica de cinza de casca de arroz em concretos em substituição parcial do cimento Portland

Utilization of rice husk silica in concrete as partial replacement of Portland cement

Utilización de sílice de cáscara de arroz en concretos como reemplazo parcial del cemento Portland

Recebido: 30/08/2023 | Revisado: 10/09/2023 | Aceitado: 11/09/2023 | Publicado: 13/09/2023

**Liliane Cruz Gomes de Souza Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8597-3703>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: [lilianecruzbh@gmail.com](mailto:lilianecruzbh@gmail.com)

**Aniel de Melo Dias**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2536-7362>

Centro Universitário Estácio de Belo Horizonte, Brasil

E-mail: [anieldias@gmail.com](mailto:anieldias@gmail.com)

**Luiz Gustavo Guimarães Medeiros**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7626-7524>

Centro Universitário Estácio de Belo Horizonte, Brasil

E-mail: [luizguimaraesmedeiros@gmail.com](mailto:luizguimaraesmedeiros@gmail.com)

### Resumo

A utilização de materiais pozzolânicos, como a sílica, na área da construção civil, especialmente ao substituir uma parte do cimento na produção de concreto, representa uma prática que contribui para a sustentabilidade ambiental. Isso desempenha um papel importante na diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. As sílicas permitem a diminuição da quantidade de cimento necessária na produção de concreto, o que resulta em uma preservação ambiental dupla. 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. A utilização das sílicas pode também melhorar as propriedades do concreto. Com isso, através de uma pesquisa exploratória experimental, o propósito deste estudo foi analisar o desempenho mecânico de concretos de cimento Portland, nos quais ocorreu a substituição parcial do cimento Portland por sílica proveniente da cinza da casca de arroz (rh-SiO<sub>2</sub>). Os resultados mostraram que a resistência à compressão do concreto obteve ganhos significativos principalmente com a substituição parcial do cimento pela (rh-SiO<sub>2</sub>) em teores de 15% e 20%.

**Palavras-chave:** Concreto; Sílica de cinza de casca de arroz; Sustentabilidade.

### Abstract

The use of pozzolanic materials, such as silica, in the construction industry, especially when replacing part of the cement in concrete production, represents a practice that contributes to environmental sustainability. This plays an important role in decreasing CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere. Silicas allow the reduction of the amount of cement required in the production of concrete, which results in double environmental preservation. This occurs not only due to the reduction in the extraction of clinker used in the manufacture of cement, but also due to the use of waste from other industries. The use of silica can also improve the properties of concrete. Therefore, through experimental exploratory research, the purpose of this study was to analyze the mechanical performance of Portland cement concrete, in which Portland cement was partially replaced by silica from rice husk ash (rh-SiO<sub>2</sub>). The results showed that the compressive strength of concrete achieved significant gains mainly with the partial replacement of cement with (rh-SiO<sub>2</sub>) at levels of 15% and 20%.

**Keywords:** Concrete; Rice husk ash silica; Sustainability.

### Resumen

El uso de materiales pozzolánicos, como la sílice, en la industria de la construcción, especialmente cuando se reemplaza parte del cemento en la producción de concreto, representa una práctica que contribuye a la sostenibilidad ambiental. Esto juega un papel importante en la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Las sílices permiten reducir la cantidad de cemento requerida en la producción de hormigón, lo que redundará en una doble preservación ambiental. Esto se produce no sólo por la reducción en la extracción de clínker utilizado en la fabricación de cemento, sino también por el aprovechamiento de residuos de otras industrias. El uso de sílice también puede mejorar las propiedades del hormigón. Por lo tanto, a través de una investigación experimental exploratoria, el propósito de este estudio fue analizar el desempeño mecánico del concreto de cimento Portland, en el cual el cemento Portland fue reemplazado parcialmente por sílice proveniente de ceniza de cáscara de arroz (rh-SiO<sub>2</sub>). Los resultados

mostraron que la resistencia a la compresión del concreto logró ganancias significativas principalmente con el reemplazo parcial del cemento por (rh-SiO<sub>2</sub>) en niveles del 15% y 20%.

**Palabras clave:** Concreto; Sílice de ceniza de cáscara de arroz; Sostenibilidad.

## 1. Introdução

O Cimento Portland é obtido através de um processo industrial a partir da lavra e beneficiamento do calcário e argila. É um material muito utilizado na construção civil, devido as suas características aglutinantes, podendo ser empregado em argamassas, rebocos e para a fabricação de concreto. No Brasil o concreto armado é a técnica mais utilizada para construção de estruturas, podendo ser utilizado em edificações, obras de saneamento, barragens pontes, viadutos, entre outras. Essa técnica consiste na combinação de barras de aço em conjunto com o concreto para resistir às tensões de compressão e tração. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SINC, 2022), foram produzidos em 2021 65,8 milhões de toneladas no Brasil e o consumo aparente foi de 64,5 milhões de toneladas. Durante o processo de fabricação do cimento há uma grande emissão de poluentes gasosos e particulados, gerando impactos ambientais. Devido a esses impactos, a utilização de resíduos em substituição parcial do Cimento Portland em concretos vem sendo estudada por pesquisadores de todo o planeta, (Rúa Suárez et al, 2022; Oliveira et al, 2023; Neves & De Sousa, 2023), com o intuito de diminuir o consumo de cimento e de melhorar suas propriedades mecânicas.

A sílica de arroz, proveniente da queima da casca de arroz, está sendo utilizada como um recurso na indústria da construção civil, oferecendo vantagens ambientais. A incorporação da sílica de cinza de casca de arroz (rh-SiO<sub>2</sub>) no concreto tem mostrado potencial para impactar positivamente a indústria da construção e o meio ambiente. Além dos benefícios mecânicos, a utilização dessa sílica como adição mineral no concreto de cimento Portland pode resultar em redução da reatividade álcali-sílica, contribuindo para a mitigação de problemas relacionados à expansão e fissuração do concreto (Ramezaniapour & Nematollahi, 2019).

Devido à sua baixa densidade, a sílica de arroz se mostra especialmente vantajosa na produção de concretos leves, sendo uma escolha ideal em aplicações que requerem controle estrito sobre o peso estrutural, como na construção de grandes edifícios e pontes. O uso da sílica de arroz se destaca por contribuir para a sustentabilidade ambiental na construção civil, uma vez que pode substituir parcialmente o Cimento Portland e aproveitar um resíduo agrícola que poderia ser fonte de poluição. (Melo et al., 2021; Azadi et al., 2011; Liu et al., 2012; Hubadillah et al., 2018).

Além de suas propriedades mecânicas, a sílica de arroz também demonstra notáveis características de isolamento térmico, tornando-a uma escolha vantajosa em aplicações onde o controle de temperatura desempenha um papel crucial, como em edifícios sustentáveis e energeticamente eficientes (Ripoli Filho, 2022). A casca de arroz, geralmente, apresenta custos mais baixos em comparação com outros resíduos utilizados na construção civil, tornando-se uma opção economicamente atrativa para melhorar o desempenho dos materiais de construção (Fernandez, 2015; Swamy, 2013).

A casca de arroz possui baixo valor nutricional e elevado conteúdo de sílica (Melo et al., 2021; Azadi et al., 2011). É constituída principalmente por celulose (25-35%), hemicelulose (18-21%), lignina (26-31%), sílica (15-17%), cinzas (2-5%) (Melo et al., 2021). Por ser um material de origem natural, sua composição varia de acordo com o clima, área de cultivo e espécie.

O arroz é um dos grãos de maior importância na produção agrícola mundial e o Brasil está entre os 10 maiores produtores (Melo et al., 2021). A casca é um dos principais resíduos gerados durante o processo de beneficiamento do arroz, tendo em vista que corresponde a 20-33% da massa do grão. Usualmente é descartada como lixo ou empregada como biomassa na geração de energia, podendo gerar um resíduo sólido que se não aproveitado da forma adequada, torna-se um poluente (Melo et al., 2021; Azadi et al., 2011; Liu et al., 2012; Hubadillah et al., 2018). O uso da sílica proveniente da cinza da casca do arroz, vem apresentando bons resultados como material pozolânico.

O uso de adições minerais no concreto tem demonstrado efeitos benéficos significativos, desempenhando um papel significativo na melhoria das características do material. Isso é de grande importância, uma vez que essas adições contribuem para a redução da porosidade nas pastas de concreto e promovem um refinamento dos grãos de hidróxido de cálcio (CH), como mencionado por Mehta e Monteiro (2008). Além disso, elas atuam como agentes tamponantes nos poros capilares, distribuindo de maneira mais uniforme os produtos resultantes da hidratação do cimento Portland, em comparação com o concreto convencional, e reduzindo a migração de fluidos para o interior do concreto.

A redução da porosidade das pastas de concreto implica em uma menor permeabilidade do material à passagem de fluidos, um efeito diretamente relacionado à alteração da microestrutura da pasta. Essa redução na permeabilidade é resultado de ações tanto físicas (como o preenchimento de vazios) quanto químicas (reações pozolânicas) que ocorrem durante o processo de hidratação dos aglomerantes. A pozolanidade e a finura das adições minerais são as principais propriedades que influenciam no desempenho do concreto (Mehta & Monteiro, 2006).

As adições minerais mais comuns incluem cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa e metacaulim. Elas são compostas por uma variedade de óxidos, incluindo silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), cálcio (Ca) e anidrido sulfúrico, entre outros. A sílica amorfa é um dos principais constituintes das pozolanas, e sua reação principal ocorre com o hidróxido de cálcio [Ca(OH)<sub>2</sub>] (CH) formado durante a hidratação dos silicatos de cálcio presentes no cimento Portland. O resultado dessas reações pozolânicas é a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), que possui uma relação cálcio-sílica (C/S) ligeiramente inferior à do cimento puro (Neville, 2012).

Por isso, as adições minerais auxiliam na otimização das propriedades do concreto, reduzindo a porosidade, melhorando a durabilidade e a resistência química, e contribuindo para a sua sustentabilidade. Isso torna essas adições um componente promissor na formulação de concretos de alta performance e de maior eficiência em uma ampla gama de aplicações na construção civil. (Garcia et al, 2021).

Nesse contexto, esse trabalho objetivou avaliar o comportamento mecânico de concretos cimento Portland produzidos substituindo parcialmente o Cimento Portland por Sílica da Casca de arroz. Foram feitas análises dessa adição utilizada e produzidos e ensaiados corpos de prova com substituição de 5%, 10%, 15% e 20% do cimento Portland pela (rh-SiO<sub>2</sub>), além da referência sem substituição (apenas com cimento Portland como aglomerante).

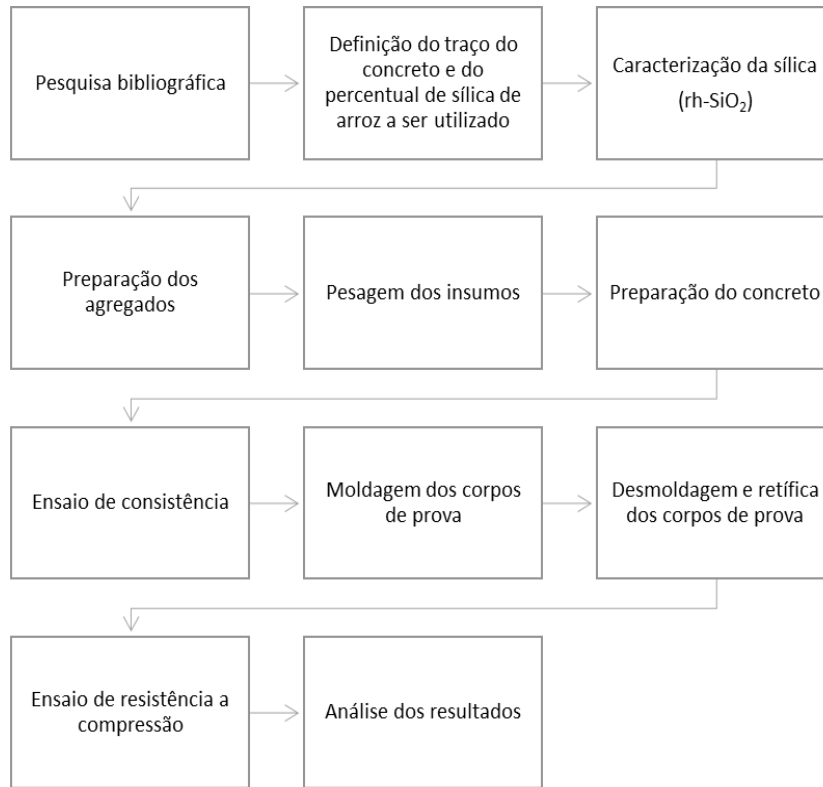
## 2. Metodologia

A pesquisa em questão pode ser classificada como exploratória experimental, 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 (Pereira et al. 2018). 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 dos concretos com substituição parcial do Cimento Portland pela sílica da casca de arroz (rh-SiO<sub>2</sub>), foram produzidas as chamadas amostras controle (CP0) 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

**Sílica da casca de arroz (rh-SiO<sub>2</sub>):** A sílica de baixa pureza, derivada da cinza de casca de arroz (rh-SiO<sub>2</sub>), foi adquirida 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 - 2023).

**Cimento:** Cimento Portland CP-V ARI – adquirido em saco de 50Kg no comércio local e com especificações técnicas de acordo com as normas, apresentadas na Tabela 1.

**Aditivo:** Aditivo Hiperplastificante - Aditivo Redutor de Água – Tipo 2 / RA2

**Britas 1,2:** Brita 1 com dimensões de 12,5 a 25mm de acordo com a NBR 7225 (ABNT, 1993), adquirida no comércio local.

**Areias de rio (quartz):** areia fina com dimensões de 0,075 a 0,42mm, de acordo com a NBR 7225 (ABNT, 1993), adquirida no comércio local.

**Água:** A água utilizada para pesquisa é proveniente do abastecimento público da COPASA.

**Tabela 1** - Características do cimento CPV ARI e exigências da NBR 05733/1991.

Idades	Resistência À Compressão (Mpa)				Blaine (cm <sup>2</sup> /G)
	24 Horas	3 Dias	7 Dias	28 Dias	
NBR 5733/1991	≥14	≥24	≥34	-	≥3000
CPV ARI	27	37	42	48	5330

Fonte: Fabricante do cimento Portland e NBR 05733/1991, adaptado (2023).

## 2.2 Definição dos traços do concreto

O traço de referência do concreto utilizado para a confecção dos corpos de prova foi determinado baseado nas referências de (Santana, et al, 2018) e nos traços usuais e delimitando o abatimento em 80±10mm. Foram preparados corpos de prova com a substituição de 5% (CP5), 10% (CP10), 15% (CP15) e 20% (CP20) da massa inicial do Cimento Portland, pela sílica da casca de arroz(rh-SiO<sub>2</sub>) e corpos de prova controle (CP0), sem a adição da sílica, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2** - Traços utilizados no programa experimental.

Dosagem	Aglomerantes		Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água/Aglomerante
	Cimento Portland	Sílica (rh-SiO <sub>2</sub> )			
CP0	1	0	2,12	2,88	0,625
CP5	0,95	0,05	2,12	2,88	0,625
CP10	0,90	0,10	2,12	2,88	0,625
CP15	0,85	0,15	2,12	2,88	0,625
CP20	0,80	0,20	2,12	2,88	0,625

Fonte: Autoria própria (2023).

## 2.3 Caracterização da sílica (rh-SiO<sub>2</sub>)

### 2.3.1 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).

### 2.3.2 Difração de raios X (DRX)

Os difratogramas das partículas de sílica rh-SiO<sub>2</sub> foram obtidos com auxílio de um difratômetro de raios X (PANalyticalX'Pert, Empyrean, Holanda) equipado com um alvo do tubo de cobre (CuK $\alpha$ ,  $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ ) operando em 40 kV e 30 mA. As amostras foram escaneadas em uma taxa de 0,06o min<sup>-1</sup> entre 2 $\theta=3$  e 90o.

### 2.3.3 Ensaio de sorção gasosa

A área superficial específica das sílicas lixiviadas com ácido oxálico, água e HCl após o tratamento térmico a 650 °C, e do produto final de sílica de arroz (rh-SiO<sub>2</sub>) foi determinada utilizando a sorção gasosa (BET multiponto) a partir dos dados de isotermas de adsorção de nitrogênio, a 77,35 K, na faixa de pressões relativas (P/Po) de 0,01 a 0,99.

## 2.4 Preparação do concreto, ensaio de consistência e moldagem dos corpos de prova

### 2.4.1 Preparação dos agregados

As areias médias e finas foram submetidas ao processo de secagem es estufa com a temperatura entre 105°C e 110°C de acordo com a NBR-7215 (ABNT, 1978), durante um período de 15 horas, para que a umidade contida nelas não interferisse nos resultados.

As britas passaram por processo de secagem em temperatura ambiente, sendo espalhadas em lonas plásticas em local coberto.

### 2.4.2 Pesagem dos insumos

A pesagem dos insumos foi feita de acordo os traços estabelecidos para essa pesquisa. A tabela 3 apresenta a pesagem dos materiais dos corpos de prova de referência (sem adições) e dos corpos de prova dos concretos com adições (5%, 10%, 15% e 20%).

**Tabela 3** – Quantidade de material utilizado na produção dos cps.

Dosagem	Aglomerantes		Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Aditivo
	Cimento Portland	Sílica				
CP0	4,0kg	0	8,48kg	11,52kg	2,5kg	0
CP5	3,8kg	0,2kg	8,48kg	11,52kg	2,5kg	10ml
CP10	3,6kg	0,4kg	8,48kg	11,52kg	2,5kg	12ml
CP15	3,4kg	0,6kg	8,48kg	11,52kg	2,5kg	21,2ml
CP20	3,2kg	0,8kg	8,48kg	11,52kg	2,5kg	33,2ml

Fonte: Autoria própria (2023).

### 2.4.3 Preparação do concreto, ensaio de consistência e preparação dos corpos de prova

Após a fase de pesagem e segregação dos materiais, procedeu-se à mistura dos diferentes traços de concreto, os quais foram desenvolvidos durante a pesquisa. A mistura foi feita com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, cuja capacidade nominal é de 120 litros.

Uma vez concluída a mistura integral, além de avaliar visualmente a homogeneidade e coesão de cada traço, foram conduzidos os ensaios de consistência por meio do teste de abatimento de tronco de cone (conforme a norma NBR-NM-67),

Para cada ciclo de mistura, foram produzidos 6 corpos de prova cilíndricos para cada formulação em conformidade com as diretrizes estabelecidas na norma NBR-5738. Estes corpos de prova foram moldados em formas metálicas e possuíam dimensões nominais de 100 mm x 200 mm. A finalidade destes corpos de prova é avaliar a resistência à compressão axial em intervalos de 3, 7 e 28 dias.

Após as 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e inseridos em solução saturada de hidróxido de cálcio em um tanque de cura com temperatura entre  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  até a data de suas respectivas rupturas, como ilustrada na Figura 2.



**Figura 2** - Corpos de prova desmoldados, identificados e imersos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Quando os corpos de prova completaram as idades especificadas na pesquisa para a realização do ensaio de resistência à compressão, passaram pelo processo de retificação e foram ensaiados no equipamento EMIC, 200tf, do Laboratório de Comportamento Mecânico do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG. O carregamento da máquina foi contínuo até a ruptura do concreto. O resultado é expresso em MPa e corresponde à relação entre a carga de ruptura e a seção transversal do corpo de prova.

### 3. Resultados e Discussão

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi realizada para se conhecer a morfologia característica da sílica da casca de arroz ( $\text{rh-SiO}_2$ ), utilizando a mostra apresentada na Figura 3.

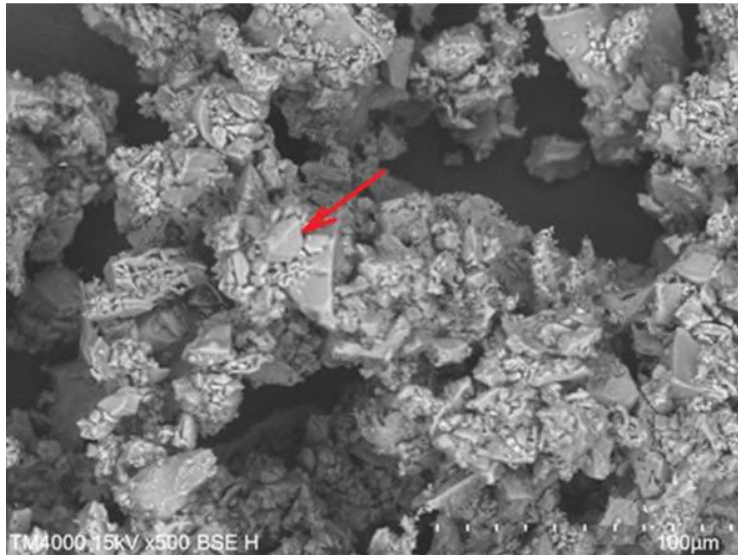
**Figura 3** - Amostra da sílica de cinza de casca de arroz para realização do MEV.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4 mostra a micrografia da sílica da casca de arroz ( $rh\text{-SiO}_2$ ). Nota-se que as partículas possuem formas angulares com a presença de poros, o que corrobora as observações feitas por Moraes et al. (2014). Nessa micrografia, observam-se aglomerados de partículas com dimensões entre aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , indicados pela seta vermelha.

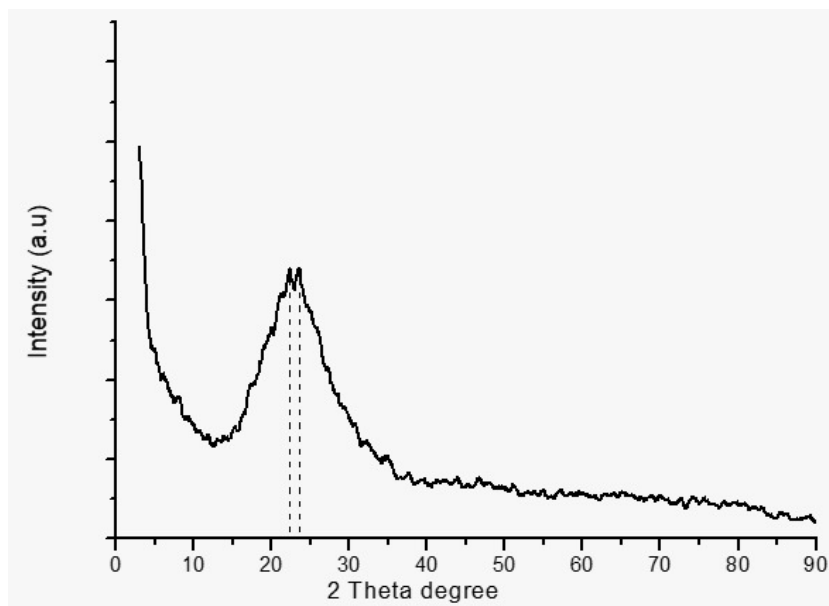
**Figura 4** – Micrografia da sílica de cinza de casca de arroz.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 5 apresenta o difratograma de raios X (DRX) das partículas de sílica  $rh\text{-SiO}_2$ . O perfil, com um pico duplo largo em ângulos  $2\theta$  de 22° e 23°, confirmou a natureza amorfa da sílica (Moosa et al., 2017; Jyoti et al., 2021).

**Figura 5** - Difratograma de raios X (DRX) da sílica obtida.



Fonte: Autoria própria (2023).



### Ensaio de sorção gasosa

O tamanho médio de cristalito das partículas de sílica rh-SiO<sub>2</sub> foi calculado usando (1), chamada de equação de difração de Debye-Scherrer (Moosa e Saddam, 2017):

$$D(2\theta) = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

na qual:

D é o tamanho médio do cristalito (nm),  $\beta$  é a largura na metade do máximo do pico em radianos,  $\theta$  é o ângulo de Bragg (em radianos), K é um fator adimensional relacionado à forma do cristalito, geralmente considerado como 0,9 e  $\lambda$  é o comprimento de onda de Raios-X (0,1541 nm) para Cu-K $\alpha$ .

Verificou-se então que o tamanho de cristalito na sílica rh-SiO<sub>2</sub> é de cerca de 1,0 nm. O tamanho do cristalito determina se a amostra é cristalina ou amorfa. O tamanho do cristalito tão pequeno quanto 1,0 nm significa que as regiões amorfas são predominantes na sílica (Moosa e Saddam, 2017). Esse resultado corrobora com os resultados divulgados na literatura. Além disso, o tamanho de cristalito muito pequeno é indicativo de nanomateriais (Jyoti et al., 2021). Portanto, sugere-se que rh-SiO<sub>2</sub> seja uma nanosílica, conforme foi indicado pelo resultado da análise de BET.

A área superficial específica medida pelo método BET após a combustão da sílica foi de 1,263 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. Azat et al. (2019), relataram que existe uma faixa muito ampla de área superficial reportada na literatura para esse tipo de material. Segundo eles, isso é devido à grande variedade de casca de arroz existente.

### Ensaio de compressão do concreto

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão dos corpos de prova do concreto de referência e do concreto com substituição parcial do cimento pela sílica de cinza de casca de arroz.

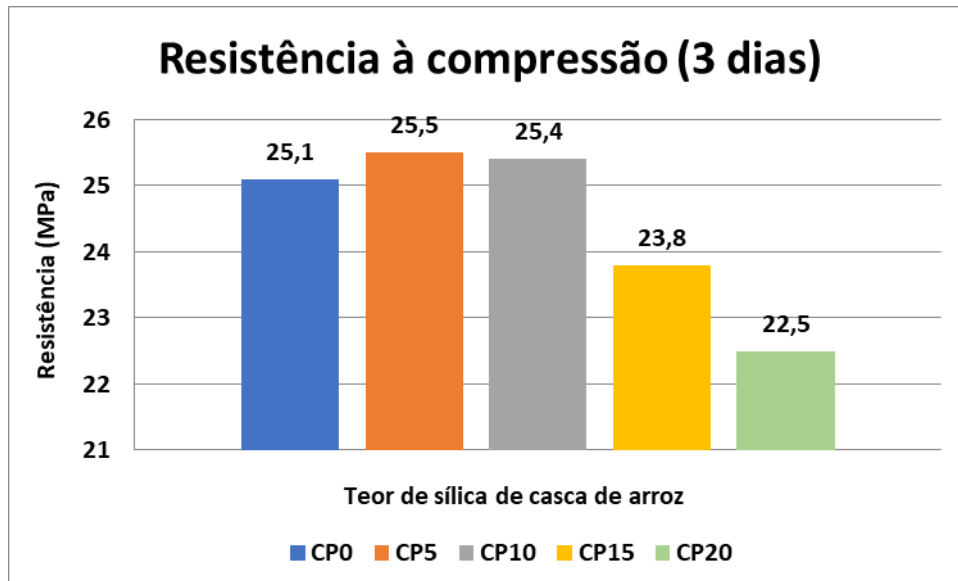
**Tabela 4** – Resultados numéricos dos ensaios de compressão em MPa.

Idades	Formulações				
	CP0	CP5	CP10	CP15	CP20
3 dias	25,1	25,5	25,4	23,8	22,5
7 dias	33,2	33,1	32,7	31,5	28,8
28 dias	39,8	39,5	41,1	42,8	43,9

Fonte: Autoria própria (2023).

O gráfico apresentado na Figura 6 demonstra o comportamento das resistências à compressão axial das formulações submetidas aos ensaios em função da quantidade de rh-SiO<sub>2</sub> com 3 dias. Nota-se que, ao considerar o período de 3 dias e incorporar proporções de 5% (CP5) e 10% (CP10) da sílica de cinza de casca de arroz, as disparidades entre essas proporções demonstram ser pouco significativas. Contudo, ao elevar os teores para 15% e 20%, emerge um aumento notável na discrepância, com valores de 5,2% e 10% respectivamente.

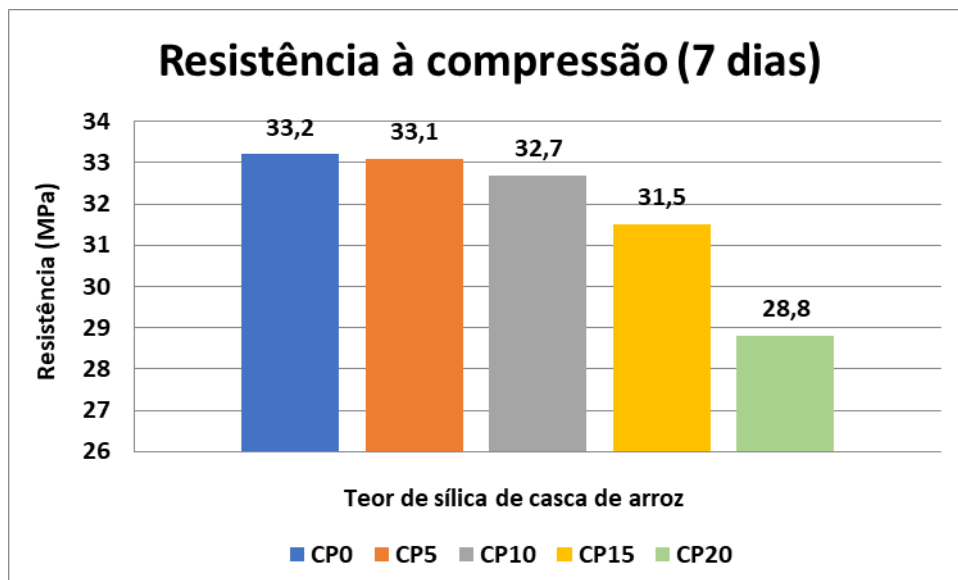
**Figura 6** – Resistência à compressão x teor de sílica de cinza de casca de arroz (3 dias).



Fonte: Autoria própria (2023).

O gráfico apresentado na Figura 7 demonstra o comportamento das resistências à compressão axial das formulações submetidas aos ensaios em função da quantidade de  $(rh-SiO_2)$  com 7 dias. Os resultados mostram que o comportamento foi similar aos 3 dias. Porém, a discrepância nas resistências atingiu valores de 5,1% e 15,3% respectivamente, ao atingir o marco de 7 dias.

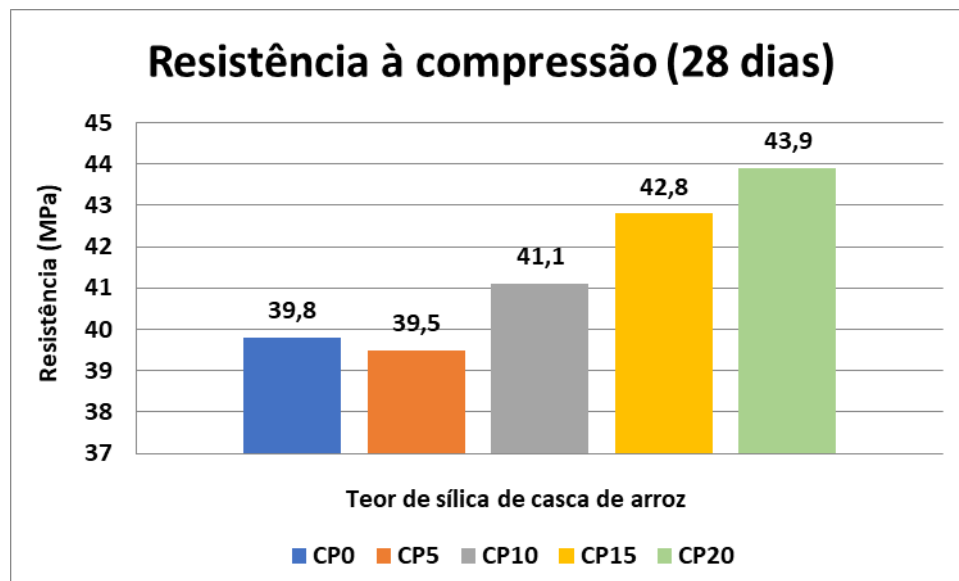
**Figura 7** – Resistência à compressão x teor de sílica de cinza de casca de arroz (7 dias).



Fonte: Autoria própria (2023).

O gráfico apresentado na Figura 8 demonstra o comportamento das resistências à compressão axial das formulações submetidas aos ensaios em função da quantidade de  $(rh-SiO_2)$  com 28 dias. Diferentemente dos resultados de 3 e 7 dias, ao alcançar o período de 28 dias, é evidente que no caso do concreto com teores de 5%, a discrepância é insignificante. Entretanto, para as subsequentes adições de 10%, 15% e 20% de  $(rh-SiO_2)$ , verifica-se um aumento na disparidade em relação às fases anteriores, com acréscimos de 3,0%, 7,5% e 10,3% respectivamente.

**Figura 8** – Resistência à compressão x teor de sílica de cinza de casca de arroz (28 dias).



Fonte: Autoria própria (2023).

É perceptível que com 20% de substituição do cimento à sílica de cinza de casca de arroz o concreto obtém um ganho significativo, como também mostrado em pesquisas recentes com esse tipo de substituição como a pesquisa de Schimanowski et. al. (2021) e a de Padoin et. al. (2022). Essas pesquisas também constataram um aumento de resistência à compressão em concretos leves e concretos autoadensáveis, respectivamente.

#### 4. Considerações Finais

A presente pesquisa utilizou a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para caracterizar a sílica obtida da casca de arroz ( $\text{rh-SiO}_2$ ). Essa técnica permitiu uma análise detalhada da morfologia das partículas de sílica, incluindo a avaliação da rugosidade, porosidade e outros aspectos de sua estrutura. Essas características são de extrema relevância, uma vez que têm o potencial de afetar suas propriedades de adsorção, catalíticas e outras. Durante a análise da sílica, observou-se que suas partículas apresentam formas angulares e porosidades, além de terem sido identificados aglomerados de partículas com dimensões variando entre aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ . A natureza amorfa da sílica ( $\text{rh-SiO}_2$ ) foi confirmada por meio do Difractograma de Raios X (DRX) e do Ensaio de Sorção Gasosa (BET).

Em relação aos ensaios de resistência à compressão o trabalho obteve resultados próximos aos encontrados nas pesquisas (Ripoli Filho, 2022, Rúa Suárez et al, 2022; Oliveira et al, 2023; Neves & De Sousa, 2023, Schimanowski, 2021). que tratam de substituição do cimento à sílica de cinza de casca de arroz. Nota-se que até 20% os ganhos são significativos. Esse trabalho não pode analisar o comportamento dessa resistência com teores maiores, pois não produziu nem ensaiou concretos com mais de 20% de substituição. Sugere-se que em pesquisas futuras, esses teores sejam objetivos de estudo para analisar de ainda existe ganho de resistência a compressão, aumentando a participação da ( $\text{rh-SiO}_2$ ) na composição do concreto.

Também é interessante, para trabalhos futuros, uma análise de outras propriedades do concreto utilizando essas substituições. Apesar de pouco ou nenhum ganho significativo de resistência à compressão utilizando teores de mais baixos (5% e 10%), outras propriedades importantes podem obter resultados positivos, viabilizando a utilização desses concretos em obras que tenham como requisito o melhoramento dessas propriedades como durabilidade, isolamento térmico e permeabilidade.

## Referências

- (\*) Dados preliminares sujeitos à revisão (\*\*) Inclui estimativa do cimento produzido no país por misturadores e fábricas integradas não associadas REGIÕES E ESTADOS. (s.d.). Org.br. <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1691430860.pdf>
- 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.
- Bak-Andersen, M. (2021). Reintroducing Materials for Sustainable Design: Design Process and Educational Practice (Vol. 185).
- Fernandes, I. J. et al. (2015). Caracterização do resíduo industrial casca de arroz com vistas a sua utilização como biomassa. *Fórum internacional de resíduos sólidos*, 6.
- García-Contreras, J., Gaona-Tiburcio, C., López-Cazares, I., Sánchez-Díaz, G., Ibarra Castillo, J. C., Jáquez-Muñoz, J., Nieves-Mendoza, D., Maldonado-Bandala, E., Olguín-Coca, J., López-León, L. D., & Almeraya-Calderón, F. (2021). Effect of cathodic protection on reinforced concrete with fly ash using electrochemical noise. *Materials*, 14(9), 2438.
- Hubadillah, S. K., Othman, M. H. D., Ismail, A. F., Rahman, M. A., Jaafar, J., Iwamoto, Y., Honda, S., Dzahir, M. I. H. M., & Yusop, M. Z. M. (2018). Fabrication of low cost, green silica based ceramic hollow fibre membrane prepared from waste rice husk for water filtration application. *Ceramics International*, 44(9), 10498–10509.
- Jyoti, A., Singh, R. K., Kumar, N., Aman, A. K., & Kar, M. (2021). ‘Synthesis and properties of amorphous nanosilica from rice husk and its composites. *Materials Science & Engineering. B, Solid-State Materials for Advanced Technology*, 263(114871), 114871.
- Liu, Y., Guo, Y., Gao, W., Wang, Z., Ma, Y., & Wang, Z. (2012). Simultaneous preparation of silica and activated carbon from rice husk ash. *Journal of Cleaner Production*, 32, 204–209.
- Mehta, P. K.; & Monteiro, P. J. M. (2006) Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. (3rd ed.), *McGraw-Hill*.
- Melo, R. P., et al. (2021). Thermal, morphological and mechanical properties of composites based on polyamide 6 with cellulose, silica and their hybrids from rice husk. *Journal of Composite Materials*, 55(13), 1811-1821.
- Miodownik, M. (2013) *Stuff Matters: Exploring the Marvelous Materials That Shape Our Man-Made World*. Penguin.
- Moosa, A., Moosa, A. A., & Saddam, F. (2017). Silica Nanoparticles, Rice Husk, AFM, Epoxy, Nanocomposite. *American Journal of Materials Science*, 2017(6), 223-231.
- Moraes, C., Fernandes, I. J., Calheiro, D., Kieling, A. G., Brehm, A., Rigon, M. R., Berwanger Filho, J. A., Schneider, I. A., & Osorio, E. (2014). 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*, 32(11), 1034-1048.
- Neves, Vanessa da S.; & De Sousa, G. M. (2023) uso de cinza de esterco bovino como substituto parcial de cimento no concreto. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, 6(1).
- Neville, A. M. (2012). Propriedades do concreto. (5a ed.), *PINI*.
- Oliveira, João Pedro et al. (2023). Substituição parcial do cimento por cinzas de bagaço de cana de açúcar em concreto.
- Padoin, D. G., Zydeck, R. C., Kostascki, L. E., & Marangon, E. (2022). Sílica proveniente da queima da casca de arroz utilizada como substituto parcial do cimento no concreto autoadensável. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, 11(3), 195-214.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica*. UFSM.
- Ramezaniyanpour, A. A., & Nematollahi, B. (2019). Effects of rice husk ash on the alkali-silica reaction in concrete. *Materials and Structures*, 52(4), 79.
- Ripoli Filho, F.; Ripoli, S. A. L.; & Baesso, M. H. (2022). Aplicação de casca e cinza da casca de arroz para emprego em argamassa, na fabricação de blocos ecossustentáveis para alvenaria. A Construção Civil: em uma perspectiva econômica, ambiental e social - *Editores Científicos Digital* - Vol. 2.
- Rúa Suárez, A. F. et al. (2022). Produção de hormigón verde usando cinza de casca de arroz e resíduos de vidro como substitutos do cimento. *Revista Ion*, 35(2), 101-109.
- Santana, A. C. et al. (2018). Estudo comparativo de concreto com sílica de cinza da casca de arroz e sílica ativa. *Congresso Brasileiro do Concreto*, 1(1), 1-24.
- Schimanowski, E. R. Z., Oliveirad, G. T. D., & Lopes, D. C. (2021). Estudo de concreto leve com adição da sílica da cinza da casca de arroz. IX ENSUS – *Encontro de Sustentabilidade em Projeto* – UFSC – Florianópolis.
- Sousa, A. S., Oliveira, G. S. & Alves, L. H. (2021) A Pesquisa Bibliográfica: Princípios E Fundamentos, *Cadernos da Fucamp*, 20(43), 64-83.
- Swamy, R. N., & Abdul Awal, A. S. M. (2013). Rice Husk Ash in Concrete: Properties, Advantages and Uses in Construction. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 2(8).