

# Extração de Sílica Residual Proveniente da Casca de Arroz e Aplicação na Produção de Argamassa

A. C. A. Alves<sup>1</sup>, M. G. V. Collares<sup>1</sup>, G. O. R. Silva<sup>1</sup>, M. C. Pereira<sup>1</sup>, A. N. C. L. Silva<sup>1</sup>, P. H. A. S. Neves<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas. Instituto Politécnico IPUC. Engenharia Química.

(Recebido em 29/09/2018; revisado em 25/10/2018; aceito em 29/11/2018)  
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

## Resumo:

O arroz é um dos alimentos mais consumidos no Brasil, e durante seu processo de beneficiamento, um dos resíduos gerados em larga escala é a casca do arroz, que possui um alto valor calorífico, e é queimada, gerando assim uma cinza que acaba sendo descartada de forma inadequada. Por meio de análises dessa cinza, percebeu-se que ela é rica em sílica e possivelmente pozzolânica. A partir disso, buscou-se incorporá-la em misturas de argamassa no lugar de frações mássicas de cimento Portland (5, 10, 15 e 20%) e comparar a resistência à compressão das misturas fracionadas com a argamassa padrão. Foram realizados ensaios buscando caracterizar a cinza como material pozzolânico e leve, como análise microestrutural, de infravermelho, colorimétrica, densidade e granulometria. Posteriormente, foram realizados ensaios de compressão, de expansibilidade e de pasta normal para determinar as mudanças obtidas ao incorporá-la ao cimento. Os ensaios mostraram uma menor expansibilidade com a adição de cinza e um aumento na resistência à compressão para composições em torno de 10% de massa.

**Palavras-chave:** Cinza da casca de arroz; Pozolanidade; Sílica residual; Sustentabilidade ambiental; Materiais.

## Abstract:

Rice is one of the most consumed foods in Brazil, and during its processing, one of the generated residues in large scale is the rice husk, which has a high calorific value, and it is burned, thus generating an ash that ends up being discarded inappropriately. Through analysis of this ash, it has been found that it is rich in silica and possibly pozzolanic. It was proposed to incorporate it in mortar mixtures instead of Portland cement mass fractions (5, 10, 15 and 20%) and to compare the compressive strength of the fractured mixtures with the standard mortar. Tests were carried out to characterize the ash as pozzolanic and light ash, such as microstructural analysis, infrared, colorimetric, density and granulometry. Subsequently, compression, expansion and normal consistency cement paste test were performed to determine the variations obtained when incorporating it into the cement. The tests showed a lower expandability with the addition of ash and an increase in the compressive strength for compositions around 10% mass.

**Keywords:** Rice husk ash; Pozolanicity; Residual silica; Environmental sustainability; Materials.

## 1. Introdução

A indústria orizícola do Brasil produz, em média, 12 milhões de toneladas de arroz anualmente e, com isso, aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de casca de arroz são obtidas por ano [1]. Devido a esse grande volume de casca produzido e à necessidade de se diversificar a matriz energética do país, usinas termelétricas utilizam essa casca como fonte de energia, uma vez que esse subproduto apresenta um elevado poder calorífico, de 3200 kcal/kg. Anualmente, se todo o volume nacional de casca de arroz gerado fosse queimado, seriam obtidos 500 mil toneladas de cinza [1].

As cinzas obtidas são normalmente inutilizadas e descartadas de forma imprópria a céu aberto [2]. Esse quadro se caracteriza como poluição, devido à possibilidade contaminação do solo e das águas pelo carbono residual

proveniente da combustão, além da taxa de CO<sub>2</sub> que retorna para o ciclo do carbono da biosfera terrestre [3]. Além disso, trata-se também de uma forma de desperdício, visto que as cinzas apresentam em sua composição alto teor de sílica (>92%), composto que possui diversas aplicações industriais, como na construção civil. Dessa forma, um destino a esse resíduo torna-se imperativo [4].

A crescente industrialização e o crescimento populacional conferem à indústria de construção civil um papel importante na economia e na qualidade de vida brasileira. Entretanto, devido ao crescimento da produção por parte desse setor industrial, ele tornou-se responsável pelo consumo de grande parte dos recursos naturais do país, que são esgotáveis. Além disso, é responsável pelo descarte de materiais não renováveis utilizados na confecção dos materiais de construção civil e por

\*E-mail: phneves97@gmail.com (P. H. A. S. Neves)

intensa emissão de gases estufa, prejudicando o meio ambiente [5].

Em vista desse cenário, é de suma importância ambiental e econômica, o estudo do uso de resíduos como agregados nos materiais de construção civil. Faz parte desse estudo, principalmente, verificar se o resíduo em questão origina materiais que atendam às exigências físicas e mecânicas de acordo com a normatização vigente, como resistência, durabilidade e trabalhabilidade. Assim serão obtidos produtos superiores ou similares aos já existentes no mercado [6].

Dessa forma, esse trabalho visa caracterizar a sílica residual proveniente da queima da casca do arroz. A análise de granulometria é de suma importância, pois pode prever o grau de empacotamento dos sistemas, ou seja, quanto maior esse grau de empacotamento menor será a porosidade, devido ao preenchimento dos macroporos e poros capilares [7]. A análise colorimétrica por sua vez, é importante pois as cores das cinzas resultam da impureza e das condições de queima, variando entre preto, marrom, marrom claro e branco [8], e podem indicar falha no processo de queima, ou obtenção de um método eficiente.

Em seguida, a CCA foi incorporada na argamassa de cimento. Onde foi avaliada a qualidade e a resistência da argamassa obtida, associando o resultado com a cinza obtida e a quantidade utilizada na substituição.

## 2 Metodologia

### 2.1 Obtenção, lavagem e secagem da casca de arroz

A casca de arroz empregada neste trabalho foi obtida *in natura* do município de Porto Ferreira, em São Paulo. Inicialmente foi realizada a lavagem da casca de arroz, baseando-se na metodologia de Yalçin (2001) [9], para a qual foram medidos 4 L de água destilada, vertidos em um recipiente previamente higienizado, juntamente com 300 g de casca de arroz. A mistura foi agitada a 2000 rpm no agitador mecânico da marca IKA RW 20 – Digital.

O parâmetro utilizado para análise do tempo ótimo de agitação foi a turbidez da água de lavagem. De forma que para motivos de padronização teve que ser igual ou maior que 1000 UNT, medida no turbidímetro modelo HI 93703 – Hanna Instruments.

Toda a casca obtida foi filtrada após as lavagens para retirar o excesso de água e, em seguida, colocada dentro de uma estufa modelo EL-80 – SOLDATEL. Esse material permaneceu no equipamento por 18 h, a 100 °C, e em camadas de aproximadamente 2 cm de altura. Esse procedimento almejou remover a água remanescente, sendo o tempo e temperatura baseados em literaturas disponíveis [2,9–11]. Posteriormente a casca de arroz lavada e seca foi armazenada em sacos plásticos vedados, contendo sílica gel, para prevenir o aumento da umidade.

### 2.2 Queima e moagem da casca de arroz

Após a secagem, a casca de arroz foi colocada em forno mufla modelo AN1222 – ANALOGICA a 700 °C por 2 h -

contadas a partir do momento em que foi atingida a temperatura desejada [4,12].

Para que a queima fosse mais efetiva em quantidade e em qualidade, foram confeccionados recipientes de aço inox 304, que possui alta resistência oxidativa a uma temperatura de até 850 °C [13]. Desse modo o material a ser queimado teria maior área de contato com o oxigênio favorecendo assim a combustão completa, que indica uma redução no teor de carbono o que leva à uma cinza mais branca. Baseando-se no mesmo princípio de oxigenação a porta do forno mufla foi deixada aberta para que o ambiente interno recebesse oxigênio suficiente.

A calcinação promove uma transformação físico-química na casca do arroz, pois essa realiza a eliminação da matéria orgânica e é obtido o óxido de silício [2]. O tempo de queima pode ser variável, porém temperaturas maiores que 800 °C são indesejáveis, pois podem cristalizar a sílica amorfa devido à presença de impurezas como sódio e potássio [14,15], o que prejudicaria sua posterior incorporação na argamassa.

Em seguida, a casca de arroz calcinada foi levada para o moinho de bolas MB 12x12 - CDC para redução de sua granulometria. O tempo de moagem depende da granulometria inicial, granulometria desejada, assim como o método de queima utilizado e o tipo da cinza [16]. Portanto, a moagem ocorreu inicialmente por 2 h, com a proporção de 5 kg de bolas de 10 mm a 20 mm de diâmetro para 1 kg de cinza [4]. Passado esse tempo, foi realizada uma análise granulométrica da cinza, que deveria apresentar porcentagem passante de 50% em peneira ABNT de malha nº 200, seguindo a NBR NM – ISSO 3310-1 [6,17].

Após o processo de moagem, a cinza da casca de arroz foi armazenada em recipientes plásticos vedados contendo sílica gel, evitando a presença de umidade, para que fossem caracterizadas em seguida.

### 2.3 Caracterização da cinza da casca de arroz

Para caracterizar a cinza da casca de arroz os parâmetros utilizados foram pH, cor, estrutura, densidade, composição química e física.

#### 2.3.1 Análise de pH

A análise do pH da cinza da casca do arroz foi baseada nas metodologias descritas na norma ASTM 4980-89 [18] e utilizadas por Ferret (2014) [19]. Desta forma, 10 g de cinza foram colocadas em 20 mL de água destilada, e após a solução ser agitada por 15 min e decantada, foram realizadas medições do pH em triplicata. O equipamento utilizado para essa medição foi o pHmetro HANNA EDGE HI2020.

Com os valores do pH obtidos, pode-se determinar o tipo de cinza obtido, sendo essas caracterizadas em cinzas leves e pesadas. As cinzas leves são mais alcalinas que as cinzas pesadas, fato que reflete a sua composição química [20].

### 2.3.2 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica da cinza da casca do arroz foi determinada pelo método do peneiramento a seco realizado conforme a NBR 7217 [21]. Neste método foi avaliado o tamanho das partículas e dos aglomerados para que fosse possível a incorporação dessa como matéria prima de materiais da construção civil, como cimento, concreto e argamassa. O valor esperado é inferior à 75 µm, indicando a característica pozolânica do material [22].

### 2.3.3 Determinação da densidade

Para a análise de densidade foi utilizado o aparelho de Le Chatelier, onde foi colocado inicialmente tolueno até a marcação da graduação do aparelho, e depois adicionados 25 g de cinza, observando a diferença de volume que o sólido gerou para que a densidade fosse determinada. O valor de densidade foi obtido a partir da razão entre massa de CCA adicionada (25 g) e o volume deslocado após a adição do material. A análise foi feita pela adaptação do método DNER-ME 93/94 [23]. Esperava-se um valor entre 2,17 e 2,18 g/mL, caracterizando a cinza como leve [24].

### 2.3.4 Espectrofotometria no infravermelho

A análise de espectroscopia no infravermelho foi realizada para determinar a presença de grupos funcionais na cinza da casca do arroz e o tipo de cinza, uma vez que cinza leves tem um pico máximo próximo de 1090 cm<sup>-1</sup> e a cinza pesada próximo de 1000 cm<sup>-1</sup> [25]. Esse procedimento foi realizado com um Espectrofotômetro de Infravermelho SHIMADZU UV-3600.

### 2.3.5 Análise Microestrutural

Para a determinação da composição química qualitativa ou semiquantitativa das cinzas empregou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JSM-IT300 acoplado com um sistema de EDS (Energy Dispersive System). Com o MEV, pode-se observar e caracterizar a morfologia da casca de arroz calcinada, [26] além do tamanho médio de sua partícula.

### 2.3.6 Colorimetria

Segundo Tutsek e Bartha (1997), a sílica branca é muito difícil de ser obtida, uma vez que para sua obtenção é necessária uma lenta taxa de aquecimento da casca que promove o aquecimento gradativo da temperatura por meio de um fluxo lento e de sentido contrário dos gases volatilizados na mufla. Logo, espera-se obter majoritariamente cinza escura, que possui um maior teor de carbono, de 15% a 25%, e pouca cinza da cor branca que indicam um material oxidado [27]. Esse resultado foi observado em vários estudos [28–30].

## 2.4 Incorporação da cinza no cimento

Para a incorporação da cinza na argamassa de cimento e posterior comparação, foram realizadas 5 misturas contendo diferentes percentuais de CCA, sendo uma delas a mistura padrão comparativa, com 0% de cinza escolhidos com base em diferentes publicações [2,31,32]. Os percentuais foram calculados em massa total de cimento que foi substituída pela CCA e estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição das Argamassas

Argamassa	CCA (%)	Cimento (g)	CCA (g)	Areia Normal (g)	Água (g)
AG01	0	312,0	0	936,0	150,0
AG02	5	296,4	15,6	936,0	150,0
AG03	10	280,8	31,2	936,0	150,0
AG04	15	265,2	46,8	936,0	150,0
AG05	20	249,6	62,4	936,0	150,0

Fonte: Próprio autor.

Foram confeccionados 3 corpos de prova para cada mistura, utilizando Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) NBR 5733 [33] e areia normal, de acordo com a NBR 7215 [34]. O CPV-ARI não contém pozolana, e, portanto, seu uso é ideal, pois não haveria outro material em sua composição que afetaria os resultados da incorporação da CCA. Os valores calculados para a massa dos componentes de cada mistura são mostrados na Tabela 2, sendo a massa total de areia normal composta de frações mássicas iguais de areia grossa, média grossa, média fina e fina, de acordo com a NBR 7214 [35].

Tabela 2 – Composição das misturas de CCA e cimento

Mistura	CCA (%)	Cimento (g)	CCA (g)
M01	0	500,0	0
M02	5	475,0	25,0
M03	10	450,0	50,0
M04	15	425,0	75,0
M05	20	400,0	100,0

Fonte: Próprio autor.

A CCA também foi incorporada à pasta de cimento, nas mesmas porcentagens mássicas, para que fossem realizados diferentes ensaios comparativos. As composições mássicas de cimento e cinza são mostradas na Tabela 2. A quantidade de água utilizada em cada pasta foi definida realizando o teste da pasta de consistência normal, cujo procedimento está descrito no item 4.5.1, realizado de acordo com a NBR NM 43 [36].

## 2.5 Ensaios Comparativos

Todos os ensaios comparativos foram realizados utilizando Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) NBR 5733 [33], seguindo as normas da ABNT para

cada teste, sendo eles de determinação da pasta de consistência normal, tempo de pega e expansibilidade. Todos foram realizados utilizando as misturas relacionadas na Tabela 2, e o teste de resistência à compressão utilizando corpos de prova com a composição da Tabela 1.

### 2.5.1 Determinação da pasta de consistência normal

Para realização de testes posteriores, primeiramente foi realizada a determinação da pasta de consistência normal para cada mistura da Tabela 2 seguindo os procedimentos da NBR NM 43 [36]. Para isso foi utilizado um aparelho de Vicat Pavitest I3004 com sonda e uma base, onde foram adicionadas as misturas juntamente com diferentes quantidades de água por tentativa e erro, até que se atingissem os parâmetros estabelecidos na norma, em que a sonda deveria penetrar a  $(6 \pm 1)$  mm da placa base.

Os resultados da quantidade de água necessária para cada mistura são expressos em porcentagem, calculados pela razão entre a massa de água utilizada e a massa de cimento.

No teste, foram avaliadas 5 pastas contendo percentuais de massa de cinza de casca de arroz diferentes, de 0 a 20%, com um intervalo de 5% entre as misturas. Sabendo a massa de cimento e a de água utilizada, é possível determinar a porcentagem de água necessária para obtenção da consistência normal da pasta do cimento, utilizando a Equação 1.

$$A\% = \frac{M_a}{M_c + M_{cc}} \times 100 \quad (1)$$

Nessa fórmula, o percentual de água (A%) é a divisão da massa de água (Ma) pela somatória da massa de cimento (Mc) e da massa de cinza (Mcc), em gramas, multiplicado por 100.

### 2.5.2 Expansibilidade

Para a determinação da expansibilidade das diferentes misturas, foi utilizada a Agulha de Le Chatelier, de acordo com a NBR 11582 [37]. Foram confeccionados corpos de prova para cada mistura percentual, imersos em água potável durante 24 h para cura inicial.

Em seguida, foram realizados testes de expansibilidade a frio, onde os moldes ficaram durante 7 dias em água potável, e de expansibilidade a quente, onde os moldes ficaram durante 3 h imersos em água em temperatura de ebulição. Os resultados são expressos em milímetros, sendo eles a diferença da abertura da Agulha de Le Chatelier logo após a confecção dos corpos de prova e após a realização dos procedimentos descritos. De acordo com a norma supracitada o valor máximo de expansibilidade é de 5 mm.

### 2.5.3 Teste de Resistência à Compressão

Para a realização do teste de resistência à compressão foi realizada uma adaptação dos procedimentos da NBR 7215 [34]. Utilizando as composições de argamassa da Tabela 2, foram confeccionados 3 corpos de prova para cada porcentagem de cinza, primeiramente realizando a mistura dos componentes em uma argamassadeira e em seguida colocando

a massa em moldes de diâmetro interno igual a 50 mm e altura de 100 mm. Depois, os corpos de prova ainda nos moldes passaram pelo processo de cura inicial em câmara úmida por 24 h, e após desenformados, foram colocados em uma câmara com controle de umidade e temperatura até o momento do ensaio, que ocorreu após 7 dias.

Para a determinação da resistência à compressão, os corpos de prova foram retificados no equipamento Pavitest I3064 para que não houvessem irregularidades na superfície, e rompidos individualmente na Máquina de Ensaio de Compressão AMSLER. O resultado da resistência individual (em MPa) é expresso pela razão entre carga máxima de ruptura (em kgf) e a área da seção do corpo de prova (em cm<sup>2</sup>). Em seguida, foram calculadas as resistências médias para cada composição de argamassa e o desvio relativo dos corpos de prova individuais, que foram descartados caso este fosse superior a 8%, seguindo a NBR 7215 [34].

### 2.5.4 Análise Microestrutural da Argamassa

A análise microestrutural da argamassa foi feita utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV). O objetivo foi de comparar a superfície porosa de cada mistura de argamassa para que se pudesse relacionar a quantidade de cinza substituída e a quantidade de poros, com a resistência final à compressão.

## 3 Resultados e Discussão

### 3.1 Caracterização da Cinza da Casca de Arroz (CCA)

Para a caracterização da cinza, diferenciou-se essa em cinza leve ou pesada, apresentou-se suas características físicas, composição química e estrutural para que seja avaliado o potencial de incorporação na argamassa. A proporção de cinza gerada a partir da queima foi calculada pela razão da massa de CCA obtida após a queima pela massa de CA queimada, obtendo-se um valor de 16%. Esse valor foi menor que o valor esperado de 20% [1]. Tal fato, provavelmente foi devido à queima mais completa da cinza da casca do arroz ou por uma menor quantidade de carbono, o que reduziu sua massa.

#### 3.1.1 Análise do pH

O pH foi medido em triplicata, sendo encontrados os valores de 9,16, 9,12 e 9,18, obtendo-se um valor médio de 9,15 calculado por meio de uma média simples. O valor foi comparado com valores obtidos por Sabedor e colaboradores (2011) [24], no qual foram analisadas cinzas residuais obtidas de três diferentes termelétricas que utilizam carvão mineral como combustível, sendo elas Braskem S/A, CMPC Celulose Riograndense e Tractebel Energia S/A, com duas amostras de cada origem. Os valores encontrados pelos autores para cada amostra estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação pH Cinza Leve e Cinza Pesada

Origem da cinza	Cinza Leve	Cinza Pesada
<b>Braskem 01</b>	12,6	8,5
<b>Braskem 02</b>	12,6	8,7
<b>CMPC 01</b>	12,2	8,9
<b>CMPC 02</b>	12,6	12,1
<b>Tractebel 01</b>	9,6	9,3
<b>Tractebel 02</b>	11,9	9,1

Fonte: [24].

Comparando os valores médios de pH para cinza leve (pH 11,9) e para cinza pesada (pH 9,4) contidos na Tabela 3 com o valor médio obtido em laboratório (pH 9,2), à priori a cinza obtida seria classificada como cinza pesada, pois apresenta pH menos alcalino. Porém foram feitos outros testes determinantes para essa classificação, como análise granulométrica e de densidade.

### 3.1.2 Granulometria

Os dados obtidos para o ensaio de granulometria resultaram na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise granulométrica da CCA

Peneiras (mesh)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)
<b>70</b>	0,210	0,2	0,4
<b>100</b>	0,150	0,0	0,0
<b>200</b>	0,075	0,4	0,8
<b>325</b>	0,045	0,6	1,2
<b>Coletor</b>	0,0	48,8	97,6
<b>Total</b>	-	50,0	100

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os dados obtidos é possível observar que o diâmetro da partícula é inferior à abertura da última peneira. Com isso, não foi possível determinar o diâmetro exato de cada partícula, no entanto, algumas considerações importantes podem ser feitas. Segundo estudos apresentados por Menezes e colaboradores (2009) [22], pela NBR 12653 [38] e ASTM 618C [39], que determinam os requisitos de um material com pozolanicidade, para um material ser considerado, ele deve apresentar no máximo 34% de retenção na peneira ABNT n° 325 (0,044 mm) Dessa forma, como na análise feita o valor encontrado foi muito inferior, é possível concluir que a CCA é um material pozolânico. Além disso, como sabe-se que a partícula possui um diâmetro inferior ao de uma partícula de cimento do tipo Portland CPV, a substituição de parte desse composto pela CCA pode ser viável.

### 3.1.3 Densidade

A análise de densidade foi realizada utilizando o aparelho de Le Chatelier com tolueno. Ao se adicionar 25,00 g de

CCA, foi observado um aumento de 11,5 mL no volume do aparelho. Portanto, a densidade encontrada foi de 2,17 g/mL. O valor foi comparado novamente com valores obtidos por [24], presentes na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação Densidade Cinza Leve e Cinza Pesada

Origem da cinza	Cinza Leve (g/mL)	Cinza Pesada (g/mL)
<b>Braskem 01</b>	2,18	2,36
<b>Braskem 02</b>	2,17	2,31
<b>CMPC 01</b>	2,17	2,27
<b>CMPC 02</b>	2,18	2,26
<b>Tractebel 01</b>	2,18	2,20
<b>Tractebel 02</b>	2,17	2,31

Fonte: [24].

Comparando os valores médios de densidade para cinza leve (2,175 g/mL) e para cinza pesada (2,285 g/mL) obtidos na Tabela 4 com o valor obtido em laboratório (2,17 g/mL), pode-se caracterizar a cinza obtida como cinza leve, pois apresentou valor próximo à média de densidade da cinza leve, como observado por outros autores [24].

### 3.1.4 Espectrofotometria no infravermelho

O espectrofotômetro de infravermelho está ilustrado na Figura 1.

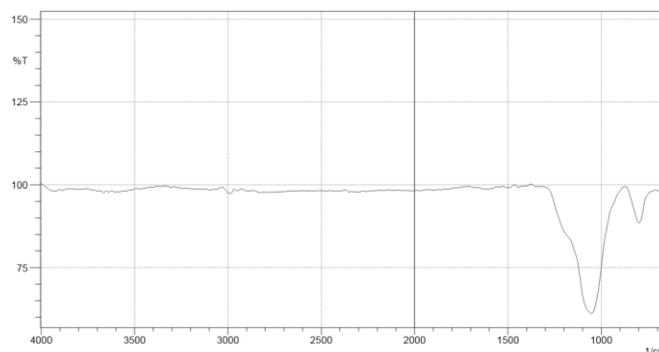


Figura 1 – Espectro da CCA na região do infravermelho

Fonte: Próprio autor.

Verifica-se na Figura 1 um pico máximo de absorção na região de 1090  $\text{cm}^{-1}$ , característico de cinza leve [25]. O espectro apresenta uma banda em  $\sim 1057 \text{ cm}^{-1}$  referente ao estiramento assimétrico Si-O-Si<sub>(vSi-O-Si)</sub> e uma banda de menor intensidade em  $\sim 795 \text{ cm}^{-1}$  provavelmente devido ao estiramento Si-C [40], confirmando a presença de sílica e também de algum carbono restante da queima.

Pode-se observar que foi obtida uma cinza sem umidade, pela ausência de banda característica de O-H em  $\sim 3600$ , com presença de sílica e provavelmente algum resquício de carbono não retirado na queima. Por meio do pico máximo tem-se mais uma evidência de que a cinza pode ser caracterizada sendo cinza leve.

### 3.1.5 Análise Microestrutural

Na análise microestrutural realizada no MEV foram obtidas imagens morfológicas da CCA (Fig. 2). De maneira geral, foi possível observar que a CCA apresentou baixa granulometria, com partículas de 0,017 mm de diâmetro. As partículas maiores podem ser atribuídas apenas à uma aglomeração das menores, devido ao fato da análise granulométrica ter apresentado 97,6% passante na peneira com abertura de 0,045 mm e da CCA ser um material higroscópico, sendo observada a aglomeração de partículas, visualmente, na tentativa de realização de peneiramento à seco deste mesmo trabalho. Portanto, a análise microestrutural reafirmou o teste de granulometria.

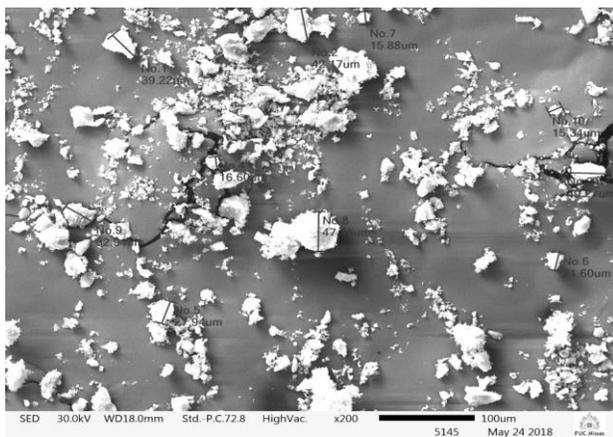


Figura 2 – Superfície da CCA obtida no MEV com aumento de 200X  
Fonte: Próprio autor.

A Figura 3 ilustra análise semiquantitativa elementar da cinza da casca de arroz, na qual pode-se observar que a cinza contém grande quantidade de silício e oxigênio, indicando alta porcentagem de sílica e que a calcinação foi efetiva, pois há menor teor de carbono. Ainda assim observam-se pequenos picos referentes à carbono, que pode ser devido à combustão incompleta ou à própria fita de carbono utilizada na análise. Além disso foram encontrados traços de elementos como cobre, potássio, cálcio, zinco, manganês e ferro, que não interferem significativamente em nenhum parâmetro de incorporação.

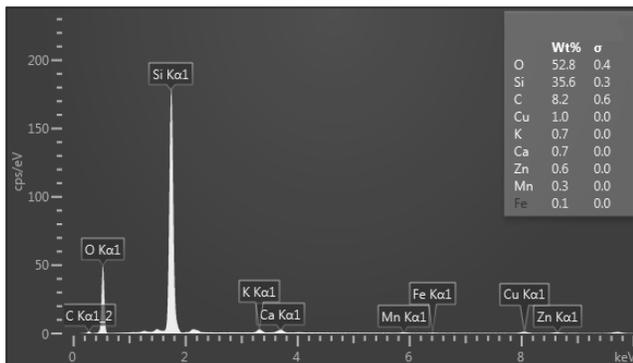


Figura 3 – Análise Semiquantitativa da CCA  
Fonte: Próprio autor.

### 3.1.6 Colorimetria

Inicialmente a CA (Figura 4a) foi queimada em forno mufla em recipientes de porcelana e com o forno fechado, e obteve-se cinza preta (Figura 4b). Ao deixar a porta do forno mufla com uma pequena abertura obteve-se CCA de aspecto cinzento, o que indica menor teor de carbono, porém no fundo dos recipientes a cinza ainda era preta. Desse modo observou-se que a presença de oxigênio no interior do forno em contato com a CA favoreceria a formação de cinza branca.

A maior oxigenação leva a uma queima mais eficiente, a porta do forno entreaberta e foi utilizado os recipientes confeccionados de aço inox 304 com as dimensões do forno (Figura 5). Logo, com uso dessas técnicas, foi possível uma obtenção de uma cinza mais clara. (Figura 4c).

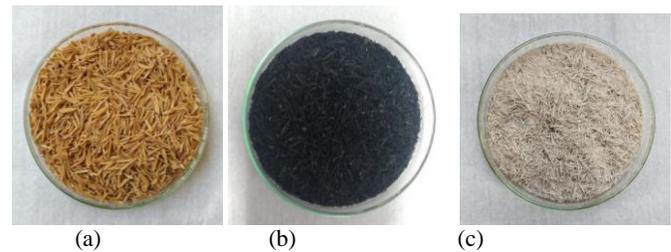


Figura 4 – Análise Colorimétrica: casca do arroz antes da queima (a), cinza preta obtida (b) e cinza branca obtida (c).  
Fonte: Próprio autor.



Figura 5 – Recipiente confeccionado de Aço INOX 304  
Fonte: Próprio autor.

## 3.2 Argamassa

### 3.2.1 Pasta de consistência normal

Os resultados do teste da pasta de consistência normal estão apresentados na Tabela 6 e Figura 6 para as 5 misturas com diferentes percentuais de CCA.

Pela análise do gráfico da Figura 6, pode-se perceber que a massa de água aumentou significativamente com a adição de cinza de casca de arroz, variando de 36,8% quando não havia cinza, até 46,2%, quando a concentração de cinza de casca de arroz atingiu um percentual de 20% da massa total. Logo, com uma maior concentração de material pozolânico no cimento, se faz necessário a utilização de mais água para obtenção da consistência normal. Isso acontece pois as reações pozolânicas de longo prazo reduzem os poros e consequentemente reduzem a permeabilidade e expansibilidade do cimento [41].

Tal fato também foi observado no estudo realizado por Castro e outros em 2017, que incorporam materiais pozolânicos diferentes no cimento Portland CPV-ARI e obteve como resultado um aumento na quantidade de água à medida que o teor de pozolânicos era aumentado.

Tabela 6 – Teor de água encontrado

Mistura	Massa de CCA (g)	Massa de cimento (g)	Massa total (g)	Massa de água (g)	Percentual de água
M01	0	500	500	184	36,8%
M02	25	475	500	189	37,8%
M03	50	450	500	203	40,6%
M04	75	425	500	216	43,2%
M05	100	400	500	231	46,2%

Fonte: Próprio autor.

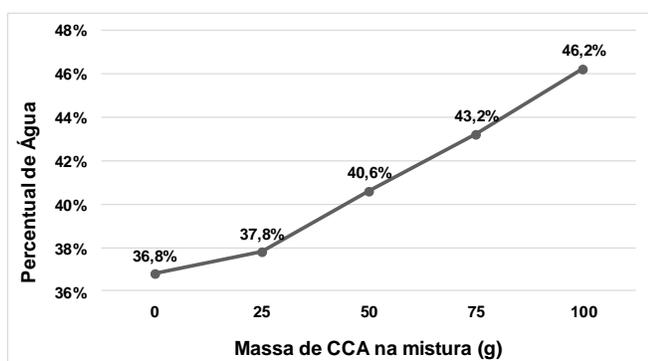


Figura 6 – Gráfico Massa de CCA (g) x Percentual de Água  
Fonte: Próprio autor.

### 3.2.2 Expansibilidade Metodologia

Na Tabela 7 estão contidos os resultados da expansibilidade das pastas contendo cinza da casca de arroz.

Tabela 7 – Teste de expansibilidade

Mistura	Expansibilidade à frio (mm)	Expansibilidade à quente (mm)	Limite da NBR 5733 (mm)
M01	0	0,5	5
M02	0	0	5
M03	0	0	5
M04	0	0	5
M05	0	0	5

Fonte: Próprio autor

Pela análise da Tabela 7, pode-se perceber que no teste à frio, a adição de cinzas não alterou o resultado da expansão das agulhas de Le Chatelier. Entretanto, no teste de expansibilidade à quente, a adição de cinzas reduziu a expansibilidade. Tal fato também foi observado no estudo

realizado por Castro e outros (2017) [42], que incorporam materiais pozolânicos diferentes no cimento Portland CPV-ARI e observaram redução da expansibilidade à medida que os pozolânicos foram adicionados.

Isso acontece uma vez que as reações pozolânicas de longo prazo reduzem os poros e conseqüentemente reduzem a permeabilidade do cimento [41]. A adição de pozolana em pastas de cimento Portland reduz a taxa de exsudação, pois essa adição faz com que as misturas adquiram características de microporos, logo, as partículas de pozolana ocupam os canais, o que dificulta a passagem de água, afetando as propriedades mecânicas da mistura. Essa dificuldade da passagem da água promovida pela adição de cinza de casca de arroz desfavorece a interação entre álcalis presentes no cimento com os compostos silicosos dos materiais agregados. Como essa interação entre os álcalis e os compostos silicosos é responsável pela expansão e fissuração do concreto, ao desfavorecê-la, desfavorece a expansão do cimento [41] – fato que, também, comprova os resultados encontrados.

### 3.2.3 Resistência à Compressão

Após a confecção dos corpos de prova (Figura 7) e seu período de cura em câmara úmida, foi realizado o teste de compressão.



Figura 7 – Corpos de Prova após confecção  
Fonte: Próprio autor.

Os valores de cada resistência e da média de cada argamassa são encontrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resistência das Argamassas no Teste de Compressão (em MPa)

	AG01	AG02	AG03	AG04	AG05
CP01	24,40	27,50	29,00	25,41	22,61
CP02	25,16	26,31	28,42	24,04	21,44
CP03	26,92	28,19	29,13	23,33	20,58
MÉDIA	25,50	27,34	28,85	24,26	21,54

Fonte: Próprio autor.

O valor normativo para argamassa de cimento CPV-ARI após 7 dias é de 34MPa [33]. Os valores encontrados foram menores que os valores esperados, possivelmente devido à umidade dos corpos de prova no momento do rompimento. Após serem retiradas da câmara para o teste, estavam visivelmente úmidas. Essa câmara funciona através de um sensor que controla a sua umidade e, ao detectar diminuição da umidade relativa, automaticamente inicia-se uma aspersão de água até aumentar a umidade relativa no seu interior. Possivelmente os corpos de prova estavam localizados abaixo do guincho que promove essa aspersão e ao ser acionado o sistema, as amostras foram molhadas, o que provavelmente diminuiu a resistência à compressão dos corpos de prova, mascarando os resultados. Este comportamento também foi descrito por Logsdon em 2002 [43], que observou diminuição da resistência à compressão quando os corpos de prova apresentavam maior teor de umidade. Ainda assim, é possível comparar os valores de resistência, visto que foram afetados da mesma forma pela umidade.

A Tabela 9 e a Figura 8 mostram a média da resistência correspondente à cada porcentagem de cinza substituída na argamassa.

Tabela 9 – Resistência das Argamassas

Argamassa	Porcentagem de Cinza	Resistência (MPa)
AG01	0%	25,50
AG02	5%	27,34
AG03	10%	28,85
AG04	15%	24,26
AG05	20%	21,54

Fonte: Próprio autor.

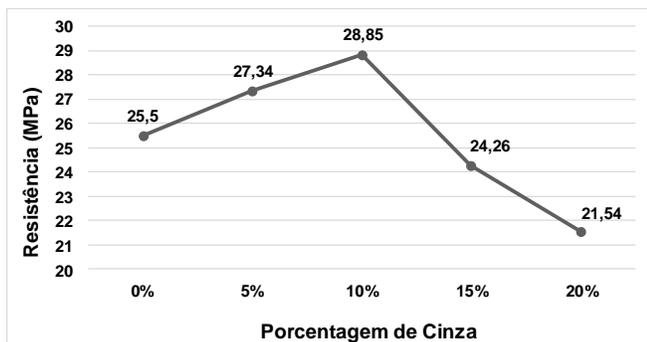


Figura 8 – Gráfico Porcentagem de Cinza x Resistência (MPa)  
Fonte: Próprio autor.

Pela análise do gráfico da Figura 8, pode-se perceber que a argamassa com 5 e 10% de cinza substituída apresentou valor de resistência à compressão maior que a argamassa padrão, porém ao aumentar a porcentagem para 15 e 20% houve um decréscimo na resistência.

É possível perceber que nas condições estudadas, a substituição de cinza é benéfica quando realizada em percentual adequado. O melhor resultado obtido foi de 10% de substituição, porém o valor máximo pode estar contido no intervalo entre 5 e 15%, e para ser determinado seria necessário a realização de mais ensaios.

Os valores obtidos foram comparados com valores obtidos por Bezerra e colaboradores em 2011 [6], que analisaram a resistência da argamassa em 28, 63 e 91 dias, substituída por teores de cinza de 0, 6, 9, 15 e 20%. O maior resultado de resistência ocorreu para valores de 9% para todas as variações de tempo. O mesmo foi encontrado em trabalhos anteriores [44] corroborando o percentual máximo encontrado neste trabalho.

Este resultado pode ser justificado pelo fato da incorporação de resíduos aumentar o empacotamento das partículas, diminuindo os espaços vazios e aumentando a resistência à compressão [45]. O potencial de resistência também foi aumentado devido à obtenção de uma cinza branca rica em sílica, levando à diminuição de cristais decorrentes do cálculo, aumentando a adesividade do cimento com o agregado [46].

Com valores de substituição de 15 e 20%, observou-se uma diminuição da resistência, provavelmente devido à quantidade de cimento ter atingido seu limite de substituição em relação à quantidade de agregados da mistura, diminuindo a possibilidade de se formar produtos através de reações de hidratação, levando à valores menores de resistência [6].

### 3.2.4 Análise microestrutural

A observação da superfície de fratura dos corpos de prova foi realizada após os testes de compressão. Essa análise foi feita utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

O primeiro corpo de prova analisado foi o relativo à mistura AG01 (imagem superior à esquerda da Figura 9), cuja argamassa não foi incorporada com cinza da casca de arroz e serviu como base comparativa para as análises posteriores. A Figura 9 também apresenta a análise dos corpos de prova relativos às misturas AG02, AG03, AG04 e AG05 (imagem inferior à direita da Figura 9), cada um incorporado com uma porcentagem de CCA. Analisando essa figura, é possível concluir que a superfície de fratura teve a porosidade visivelmente reduzida em relação à superfície do primeiro corpo de prova (AG01) à medida que se aumentou o percentual de cinza incorporada. Dessa forma, quanto maior o teor de CCA no corpo de prova, menor foi a sua porosidade.

De acordo com Mehta [41], reações pozolânicas de longo prazo diminuem a porosidade do cimento, reduzindo sua permeabilidade e, conseqüentemente, sua expansibilidade. Portanto, a análise microestrutural, ao confirmar a redução da

porosidade dos corpos de prova incorporados com CCA, justificou os resultados obtidos no teste de expansibilidade e reafirmou o caráter pozolânico da CCA.

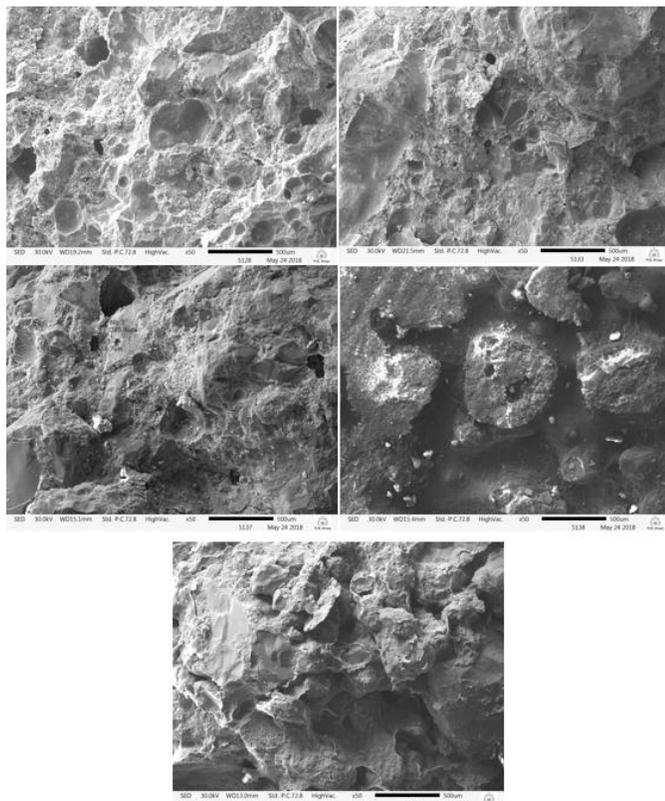


Figura 9 – Superfície de fratura do corpo de prova relativo às misturas AG01, AG02, AG03, AG04 e AG05, com aumento de 50 vezes em cada imagem  
Fonte: Próprio autor.

## Conclusão

Ao final de todos os ensaios realizados nas condições descritas, foi possível comprovar experimentalmente a viabilidade da reutilização da cinza proveniente da queima da casca de arroz como alternativa sustentável ao uso de cimento. Essa conclusão é sustentada pelo aumento da resistência à compressão da argamassa obtida a partir da incorporação de porcentagens em torno de 10% de cinza quando comparada a argamassa padrão. No entanto, seria necessário realizar mais ensaios para determinar a porcentagem exata que fornece a maior resistência à compressão.

## Referências

- [1] F.Z. Sobrosa, Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz, Unipampa, 2014.
- [2] M.S. Rodrigues, Caracterização de cinza residual da queima de casca de arroz para a produção de argamassa, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [3] E.L. Foletto, R. Hoffmann, R.S. Hoffmann, U.L. Portugal Jr, S.L. Jahn, Applicability of Rice Husk Ash, *Quim. Nova.* 28 (2005) 1055–1060. doi:10.1590/S0100-40422005000600021.
- [4] M.T.F. Pouey, Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- [5] S.C. Ângulo, S.E. Zordan, V.M. John, Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil, Universidade de São Paulo, 2000.
- [6] I.M.T. Bezerra, J. Souza, J.B.Q. de Carvalho, G.A. Neves, Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento, *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 15 (2011) 639–645. doi:10.1590/S1415-43662011000600015.
- [7] A.K. Duarte, Encapsulamento cerâmico de resíduos de materiais refratários, UFMG, 2005.
- [8] J. James, M. Subbarao, Characterization of silica in rice husk ash, *Am. Ceram. Soc.* (1986).
- [9] N. Yalçın, V. Sevinç, Studies on silica obtained from rice husk, *Ceram. Int.* 27 (2001) 219–224.
- [10] L. Fernandes, M.G. Sabino, H.L. Rossetto, Método de extração de sílica da casca do arroz, *Cerâmica.* 60 (2014) 160–163.
- [11] I.J. Fernandes, D. Calheiros, E.C. Santos, C.A. Moraes, T. Rocha, A. Kieling, F. Brehm, Tratamento de cinza de casca de arroz por lixiviação ácida, *Congr. Anu. Da ABM.* (2015) 2209–2216.
- [12] V.P. Della, Processamento e caracterização de sílica ativa obtida a partir da cinza de casca de arroz, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [13] Gerdau, Aço Inoxidável Gerdau-304, (2018).
- [14] R. V. Krishnarao, J. Subrahmanyam, T.J. Kumar, Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash, *J. Eur. Ceram. Soc.* 21 (2001) 99–104.
- [15] Y. Nakata, M. Suzuki, T. Okutani, M. Kikuchi, T. Akiyama, Preparation and Properties of SiO<sub>2</sub> from Rice Hulls, *J. Ceram. Soc. Japan.* 97 (1989) 842–49.
- [16] S. Santos, Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. doi:10.1590/S1517-70762008000400005.
- [17] M.S. Rodrigues, A.L. Beraldo, Caracterização Física e Mecânica de Argamassas à Base de Cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz Residual, *Eng. Agrícola, Jaboticaba.* 30 (2009) 193–204.
- [18] ASTM International, ASTM D4980 - 89 Standard Test Methods for Screening of pH in Waste, 1989.
- [19] L.S. Ferret, Zeólitas de cinzas de carvão : síntese e uso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

- [20] R.A.A. Boca Santa, C.S. Gonçalves, J.C. Moreira, J. V. Matsinhe, G.L. Miraglia, P.B. Prates, C. Soares, H.G. Riella, Avaliação das propriedades das cinzas leves e pesadas para produção de geopolímeros: estudo comparativo, (2017).
- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica, (1982).
- [22] R.R. Menezes, G.A. Neves, J. Souza, W.A. Melo, H.S. Ferreira, H.C. Ferreira, Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria, *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 13 (2009) 795–801.
- [23] Departamento Nacional De Estradas De Rodagem, Solos – determinação da densidade real, (1993).
- [24] S. Sabedot, M.G. Sundstron, S.C. de Böer, C.H. Sampaio, R.G.O. Dias, C.G. Ramos, Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas, III Congr. Bras. Carvão Miner. (2011).
- [25] A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco, Alkali-activated fly ashes: A cement for the future, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1323–1329. doi:10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- [26] M.S. Di Campos, Aproveitamento das cinzas da queima da cama sobreposta de suínos para substituição parcial do cimento Portland., Universidade de São Paulo, 2005. doi:10.11606/D.74.2005.tde-17022006-152510.
- [27] S. Santos, Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho, (2006).
- [28] A. Tutsek, P. Bartha, Method of producing low-carbon, white husk ash, US4049464A, 1976.
- [29] D. de A. Dafico, L.R. Prudêncio Jr., Um Estudo Visando a Identificação Das Condições De Queima Da Casca De Arroz Para Produção De Pozolana Branca, (2002) 1671–1680.
- [30] S. Sugita, Method of producing active rice husk ash, US5329867A, 1993.
- [31] C.A.R. Silva, J.L. Akasaki, M.M. Tashima, S.T. Manfrim, J.P. Bernabeu, Influência de diferentes dosagens de cinza de casca de arroz na resistência à compressão de argamassas, (2003).
- [32] J.H.S. Rego, A.A. Nepomuceno, E.J.F. Pazini, F.L. Vieira, Estudo da viabilidade técnica da utilização da cinza de casca de arroz (CCA) residual como adição mineral ao cimento, (2006).
- [33] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5733: Cimento Portland com alta Resistência inicial, (1991).
- [34] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, (1996).
- [35] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento, (1982).
- [36] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 43: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal, (2003).
- [37] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11582: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier, (1991).
- [38] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos, (2015).
- [39] ASTM, ASTM C618 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM Int. (1992).
- [40] G. Socrates, Infrared and Raman characteristic group frequencies, 2004. doi:10.1002/jrs.1238.
- [41] P.K. Mehta, Natural Pozzolans: Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET Spec. Publ. 8 (1987) 1–33.
- [42] A.L. Castro, R.F.C. Santos, V.A. Quarcioni, S. Carlos, S. Paulo, Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha, *Cerâmica.* 63 (2017) 65–76. doi:10.1590/0366-69132017633652036.
- [43] N.B. Logsdon, C.C. Junior, Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira, *Cad. Eng. e Estruturas.* 18 (2002) 77–107. [http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1998/DO\\_NormanBarrosLogsdon.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1998/DO_NormanBarrosLogsdon.pdf) (accessed November 27, 2018).
- [44] E.J. Silva, Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil., UNESP, 2009.
- [45] V.M. Malhotra, M.H. Zhang, High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material, *ACI Mater. J.* 93 (1996) 629–636.
- [46] R.A. Tiboni, Utilização da cinza da casca de arroz de termoeletrica como componente do aglomerante de compósitos à base de Cimento Portland., Universidade de São Paulo, 2007.