

## **INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS CERÂMICOS PRODUZIDOS COM SÍLICA RESIDUAL DA CASCA DE ARROZ E FIBRA DE AÇO**

<sup>1</sup>dos Santos, P.R., <sup>1</sup>Nunes, A.S., <sup>1</sup>Tier, M.

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia - Universidade Federal do Pampa

Av. Tiarajú, 810 Ibirapuita – Alegrete/RS – CEP 97546-550  
paulasgd\_13@hotmail.com

### RESUMO

*O objetivo deste trabalho é utilizar a sílica da casca de arroz e as fibras de aço para produção de tijolos cerâmicos, buscando melhorar suas propriedades mecânicas em termos de resistência e ductilidade. Os materiais cerâmicos foram fabricados com substituição em volume de 15 e 20% de argila caulim por sílica da casca de arroz e 1 e 2% de fibras de aço. O programa experimental foi constituído por ensaios físicos (densidade de massa, porosidade aparente, retração linear de queima e variação de massa) e ensaios mecânicos (resistência à compressão e flexão em três pontos). Os resultados mostraram que conforme ocorre a substituição da argila pela sílica aumenta a densidade e diminui a porosidade, melhorando assim os resultados dos ensaios mecânicos. Com a adição da fibra de aço aumentou a porosidade diminuindo os resultados dos ensaios mecânicos, porém conferindo ao material maior ductibilidade.*

Palavras-chave: cerâmicas, sílica da casca de arroz e fibras de aço.

### INTRODUÇÃO

O Estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional de arroz. Segundo o IBGE (2016) a produção estimada para a safra de 2016 é de 8.433.761 toneladas o que corresponde a 71,2% em relação aos demais estados do Brasil. Os municípios que produzem a maior quantidade de arroz, conforme dados do IRGA (2016), estão localizados na fronteira oeste e no sul do estado, sendo eles: Uruguaiana, Itaqui, Santa Vitória do Palmar, Alegrete e São Borja.

A casca de arroz (CA) representa 23% do total da produção, um resíduo muitas vezes não aproveitado e descartado de forma incorreta <sup>(1)</sup>. Como alternativa para o aproveitamento desse resíduo, as indústrias de beneficiamento de arroz estão utilizando a CA como fonte de energia, pois as CA's apresentam um elevado poder calorífico (3200 Kcal/Kg). Por esse motivo, as CA's vêm sendo utilizadas como combustível em micros centrais termoelétricas para geração de eletricidade, tornando estas indústrias, em alguns casos, autos suficientes e até exportadoras de energia, o que resulta em ganhos econômicos e ambientais.

A queima controlada da CA gera um novo resíduo, a sílica da casca do arroz (SCA), chegando a representar 20% do volume da casca <sup>(6)</sup>. Geralmente as indústrias descartam as SCA's em solos ou aterros. Após grandes volumes, o solo não consegue mais absorvê-la, resultando em problemas ambientais e conseqüentemente na perda da biodiversidade.

A SCA possui elevado teor de sílica, chegando a níveis de até 98% de sílica, e, por esse motivo as cinzas possuem aplicabilidade em diversas áreas, como, eletrônica, construção civil, indústria química, cerâmicas entre outras <sup>(2)</sup>.

Em sua pesquisa sobre cerâmica refratária <sup>(8)</sup>, analisou o efeito da substituição parcial de 5, 10 e 20% da argila pela SCA, concluindo que, conforme aumenta-se a substituição de argila por SCA, é obtido um melhor empacotamento da mistura e assim, uma melhora nas propriedades mecânicas do material.

Algumas pesquisas como <sup>(5)</sup>, <sup>(3)</sup> e <sup>(7)</sup>, relatam que a adição de fibras de aço em compósitos de matriz cerâmica aumenta a confiabilidade do material, pois este reforço tem a capacidade de amplificar a tenacidade do material, limitando a propagação de trincas e conseqüentemente, melhorando a resistência do material.

Assim este trabalho propõe a utilização de SCA e fibras de aço em tijolos cerâmicos, esperando melhoras na resistência mecânica e na ductilidade do material desenvolvido.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As matérias-primas utilizadas para a fabricação das cerâmicas foram: argila caulim, sílica residual da queima da casca do arroz e fibras de aço.

Para avaliação do desempenho dos tijolos cerâmicos, foram realizados ensaios físicos de densidade aparente, porosidade aparente, retração linear de queima e

variação de massa e ensaios mecânicos de resistência à compressão e flexão em três pontos.

### Matérias-primas

A argila caulim foi fornecida pela empresa Helager Indústria e Comércio Ltda, originária da Vargem Grande do Sul/ SP. A SCA foi doada pela empresa Sílica Verde do Arroz Ltda situada em Alegrete/RS. A tabela 1 apresenta composição química das matérias-primas.

Tabela 1 - Composição química das matérias-primas

	Composição química da sílica	Composição química da argila caulim
Elemento	Porcentagem (%)	Porcentagem (%)
SiO <sub>2</sub>	91,480	57,830
CaO	0,360	0,130
MgO	0,320	0,360
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,050	2,250
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ND*	27,520
Na <sub>2</sub> O	-	< 0,001
K <sub>2</sub> O	1,400	1,870
TiO <sub>2</sub>	0,003	0,380
MnO	0,320	< 0,010
SO <sub>3</sub>	0,150	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,450	-
Perda ao fogo	3,500	8,630

Fonte: Sílica Verde do Arroz Ltda/ Helager Indústria e Comércio Ltda

As fibras de aço foram adquiridas junto a empresa Astra Fibras Metálicas, localizada na cidade de Itatiba, estado de São Paulo. As fibras são produzidas com aço inox pelo processo de trefilação a frio. A tabela 2 apresenta a composição química das fibras de aço.

Tabela 2 - Composição química da fibra de aço inox

Elemento	%
C	0,15
P	0,03
Mn	1,00
Si	1,50
Cr	17,00

Fonte: Astra Fibras Metálicas

### Produção dos tijolos cerâmicos

Foram realizadas seis formulações de tijolos cerâmicos. A primeira foi utilizada como referência e é constituída com 100% de argila caulim, a segunda formulação com 85% de argila caulim e 15% de sílica, a terceira formulação com 80% de argila caulim e 20% de sílica. Na quarta, quinta, sexta e sétima formulações foram realizadas substituições da segunda e terceira mistura pelas fibras de aço em teores volumétricos de 1% e 2%. A tabela 3 apresenta a nomenclatura utilizada para as amostras.

Tabela 3 - Nomenclatura das cerâmicas

Nomenclatura	Cerâmica
AC	100% de argila caulim
15CCA	85% de argila caulim e 15% de sílica
20CCA	80% de argila caulim e 20% de sílica
15CCA1FA	Mistura 15CCA com substituição de 1% de fibra de aço
15CCA2FA	Mistura 15CCA com substituição de 2% de fibra de aço
20CCA1FA	Mistura 20CCA com substituição de 1% de fibra de aço
20CCA2FA	Mistura 20CCA com substituição de 2% de fibra de aço

As matérias-primas foram misturadas juntamente com 12% de água em um misturador tipo planetário. O teor de umidade utilizado na mistura foi determinado através de testes preliminares, onde teores abaixo de 12%, apresentaram dificuldade no momento de extração da amostra da matriz.

Os corpos de prova foram compactados através de uma matriz macho-fêmea, que possui a capacidade de produzir duas amostras a cada prensagem. Cada molde

tem dimensão de 150 mm de comprimento, 30 mm de largura e 50 mm de espessura. A pressão utilizada foi de 20MPa, que corresponde a uma força de 180 kN para duas cavidades do molde. A velocidade adotada foi de 0,2 mm/minutos, até atingir a carga de 180 kN. As dimensões finais dos corpos de prova foram 150x30x20 (mm).

Após a prensagem dos corpos de prova ocorre a etapa de secagem, realizada durante 20 dias para eliminar a água de forma lenta e gradual e assim evitar tensões e defeitos nas peças. Após a secagem inicial, o material foi colocado em estufa na temperatura de  $105 \pm 10^\circ \text{C}$  por um período de 24 horas, para eliminar toda água proveniente do processo de prensagem.

Posteriormente a etapa de secagem, os corpos de prova foram sinterizados em temperatura de até  $1300^\circ\text{C}$  com taxa de aquecimento de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $150^\circ\text{C}$ , onde permaneceu por 10 min para eliminação da umidade superficial. Em seguida, com taxa de aquecimento de  $3^\circ\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $500^\circ\text{C}$  onde permaneceu também por 10 minutos para eliminação dos gases originados da combustão e reações do material. Posteriormente, a última taxa de aquecimento foi de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $1300^\circ\text{C}$  onde permaneceu por 30 minutos. O resfriamento foi realizado de forma natural dentro do forno após o seu desligamento. Após o processo de sinterização os corpos de prova apresentaram diferentes dimensões decorrentes do processo de sinterização, exibindo medidas médias de 135x27x17,5 (mm).

### Ensaio físicos

#### Densidade de massa

Realizado conforme a NBR ISO 5017 (ABNT, 2015), segundo a Equação (A).

$$DM = \frac{MS}{ME-MI} \times \rho_{líq} \quad (A)$$

Onde:

DM – densidade de massa aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

MS – massa do corpo de prova seco (g);

ME– Massa do corpo de prova encharcado (g);

MI – Massa do corpo de prova imerso (g);

$\rho_{\text{liq}}$  – Densidade do líquido de imersão (g/cm<sup>3</sup>).

#### Porosidade aparente

A porosidade aparente indica a porcentagem entre o volume de poros abertos do corpo de prova em relação ao seu volume total e foi calculado conforme a NBR ISO 5017 (ABNT, 2015) pela Equação (B).

$$PA (\%) = \frac{(ME - MS)}{(ME - MI)} \times 100 \quad (B)$$

Onde:

PA – porosidade aparente (%);

ME – massa do corpo de prova encharcado (g);

MS – massa do corpo de prova seco (g);

MI – massa do corpo de prova imerso(g).

#### Retração linear de queima e variação de massa

A retração linear foi calculada através da Equação (D), utilizando um paquímetro digital com resolução de 0,05 mm para aferir as medidas.

$$RLQ (\%) = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (D)$$

Onde:

RLQ – retração linear de queima (%);

C<sub>o</sub> – comprimento inicial (cm);

C<sub>f</sub> – comprimento final (cm).

A variação de massa deve é calculada através da Equação (E), sendo necessária a utilização de balança com precisão de 0,01 g.

$$VM (\%) = \frac{M_o - M_f}{M_o} \times 100 \quad (E)$$

Onde:

VM – Variação de massa (%);

$M_o$  – Massa inicial (g);

$M_f$  – Massa final (g).

### Ensaio mecânicos

#### Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado seguindo as orientações da NBR 10059-2 (ABNT, 2014). A resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) foi determinada através da equação (F).

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (F)$$

Onde:

$\sigma_c$  – Resistência à compressão à temperatura ambiente (MPa);

P – Carga atingida no momento da ruptura (N);

A – Área da seção transversal (mm<sup>2</sup>).

O ensaio foi realizado em uma prensa com capacidade de carga de 200kN, com velocidade de 0,2 mm/min.

Para a execução deste ensaio foi preciso cortar os corpos de prova com as seguintes dimensões médias, 25mm de comprimento, 27mm de largura e 17,5mm de espessura.

#### Resistência à tração na flexão em três pontos

A resistência à tração na flexão foi analisada por testes de flexão em três pontos, seguindo orientações da NBR 5014 (ABNT, 2012) e determinada pela equação (G).

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2ab^2} \quad (G)$$

Onde:

$\sigma_f$  – Resistência a flexão em três pontos (MPa);

F – Carga atingida no momento da ruptura (N);

L – Distância entre os apoios (mm);

- a – Largura do corpo de prova (mm);
- b – Altura do corpo de prova (mm).

O ensaio foi realizado utilizando-se uma máquina de ensaio universal marca Shimadzu, com capacidade de carga de 5 kN, e a velocidade utilizada foi de 0,15mm/min. As dimensões médias dos corpos de prova são 135 mm de comprimento, 27 mm de largura e 17,5mm de espessura.

## RESULTADOS

### Ensaio físicos

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos com os ensaios de densidade, porosidade aparente, retração linear de queima e variação da massa após a queima das amostras.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios físicos

Nomenclatura	Densidade	Porosidade	Retração Linear de Queima	Varição de massa
AC	2,18 ± 0,016	7,01 ± 0,352	9,674 ± 0,161	8,197 ± 0,058
15CCA	2,20 ± 0,006	1,69 ± 0,091	11,961 ± 0,200	6,998 ± 0,057
20CCA	2,23 ± 0,013	1,62 ± 0,156	12,123 ± 0,133	6,931 ± 0,070
15CCA1FA	2,23 ± 0,007	4,98 ± 0,405	5,224 ± 0,181	6,106 ± 0,255
15CCA2FA	2,24 ± 0,021	7,77 ± 0,935	4,489 ± 0,180	6,701 ± 0,115
20CCA1FA	2,27 ± 0,011	5,23 ± 1,079	5,768 ± 0,273	5,606 ± 0,084
20CCA2FA	2,28 ± 0,007	7,68 ± 0,782	4,686 ± 0,447	5,215 ± 0,160

Nos ensaios físicos quanto à densidade houve uma pequena variação, aumentando com a substituição da argila caulim pela SCA, devido ao melhor empacotamento, proporcionando, dessa forma menor porosidade.

A análise dos resultados obtidos com a porosidade aparente permitiu identificar que, conforme aumentou o teor de substituição de argila pela SCA, houve uma diminuição na porosidade aparente, porém conforme aumenta-se a quantidade de fibras ocorre o acréscimo na porosidade aparente.

Os resultados de retração linear e a variação de massa após a queima indicam que a inclusão de fibras de aço proporcionou redução significativa na retração linear e na variação de massa, quando comparado a cerâmica de referência.

### Ensaio mecânicos

## Resistência à compressão

Os resultados obtidos através do ensaio de resistência à compressão são apresentados na figura 1 e as curvas típicas tensão x deslocamento na figura 2. É possível observar um pequeno aumento na resistência a compressão conforme aumenta-se a porcentagem de SCA na cerâmica de referência e uma redução significativa da resistência nas amostras com fibras de aço.

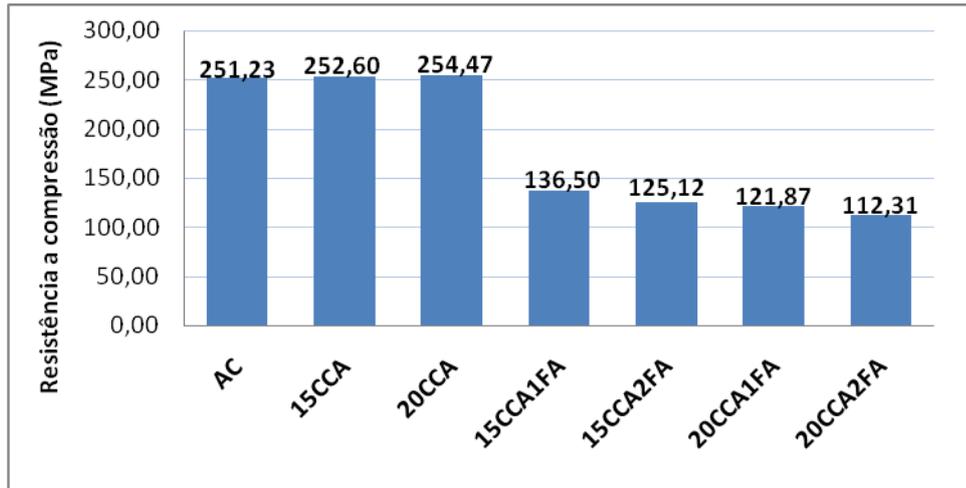


Figura 1 - Gráfico da resistência à compressão para cada tipo de material

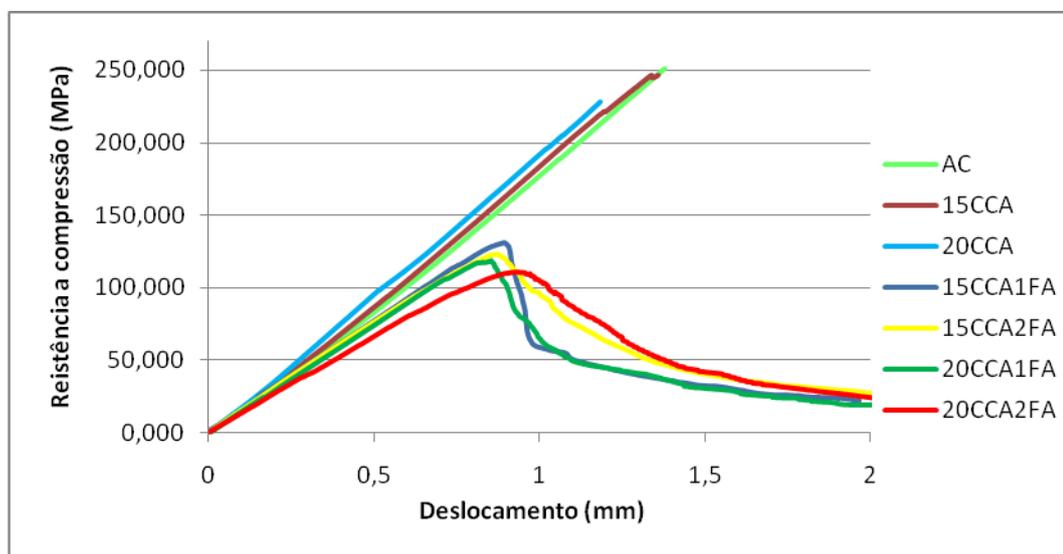


Figura 2 – Curvas típicas obtidas no ensaio de compressão

O aumento da porosidade resulta na diminuição da resistência mecânica. Conforme analisado a porosidade diminui consideravelmente com o acréscimo da SCA e houve um acréscimo com o aumento da quantidade de fibras <sup>(4)</sup>.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão demonstram que a cerâmica com argila e a cerâmica com SCA apresentaram uma ruptura de forma frágil. Nas cerâmicas com fibras houve um acréscimo na ductibilidade. E as amostras não romperam totalmente ao final do ensaio.

#### Resistência à tração na flexão em três pontos

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos através do ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos. Observam-se um aumento significativo da resistência à flexão na cerâmica de referência e uma redução significativa da resistência nas amostras com fibras de aço.

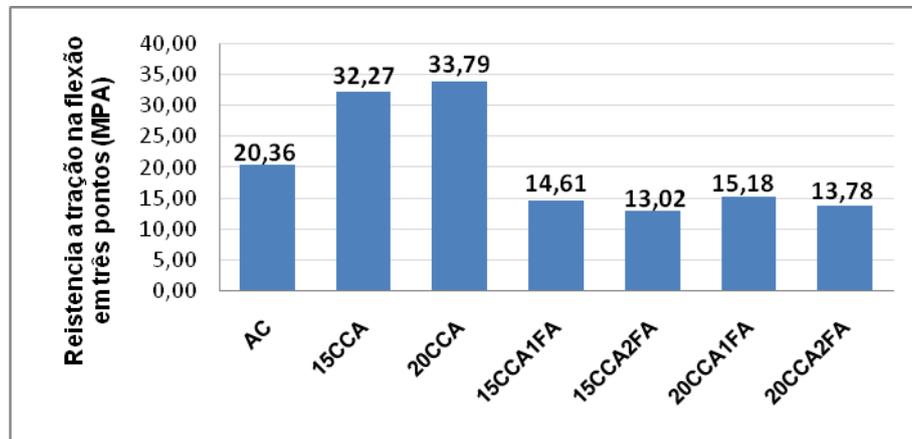


Figura 3 - Gráfico da resistência à tração na flexão em três pontos para cada tipo de material

O comportamento típico da tensão *versus* deslocamento de todas as misturas é apresentado na Figura 4.

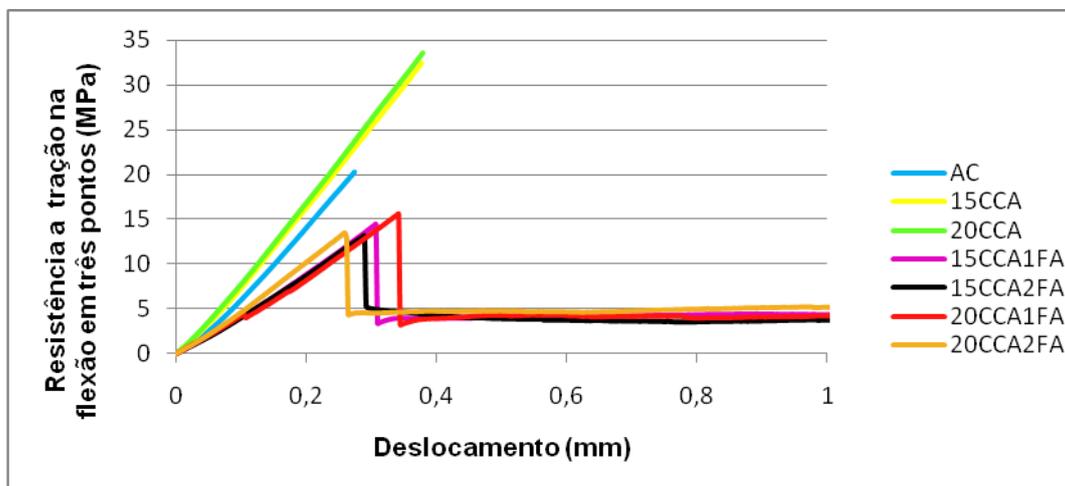


Figura 4 – Gráfico tensão *versus* deslocamento obtidas do ensaio de flexão para cada tipo de material

Observa-se que a ruptura nas amostras com argila e argila com SCA ocorreu de forma frágil e com baixo deslocamento. No entanto, a presença de fibras nas amostras resultou em um aumento pequeno na absorção de energia na parte pós-pico da curva, vale ressaltar que essas amostras foram ensaiadas até o deslocamento de 4mm e não romperam, porém como ocorre pequena variação a partir de 1 mm de deslocamento e para melhor visualização das curvas o gráfico foi reproduzido apenas até o deslocamento de 1mm. As fibras têm influência no controle da abertura de fissura, aumento a ductilidade do material <sup>(5)</sup>.

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova, foi possível observar a viabilidade do aproveitamento da sílica da casca do arroz para a produção de cerâmica, devido ao aumento da resistência a compressão e a tração na flexão. Apesar das fibras de aço reduzirem a resistência a mesma pode ser utilizada dependendo da resistência e da forma que deseja-se o comportamento do material, já que a mesma melhorou a ductibilidade das amostras.

## REFERÊNCIAS

- (1) DELLA, V.P.; KUHN, I.; HOTZA, D. **Caracterização da cinza da casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica**. Revista Química Nova, v. 24, nº 6, 2001.
- (2) FOLLETO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL, U. L.; JAHN, S. L. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**- Revista Química Nova, Vol. 28, nº 6, p. 1055-1060, 2005.
- (3) MEDEIROS, J. **Refratários de Elevada Tenacidade para Uso em Aplicações Críticas na Indústria do Refino de Petróleo**. 2012. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- (4) PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. **Bauxitas Refratárias: Composição Química, Fases e Propriedades – Parte II**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.
- (5) PEMBERTON, S.R; et al. **The fracture energy of metal fibre reinforced ceramic composites (MFCs)**. Composites Science and Technology 71, p.266–275, 2011.
- (6) POUHEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza da casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 173 f. Tese de

Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

(7) RAMBO, D. A. S. **Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras de Aço Híbridas: Aspectos Materiais e Estruturais**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

(8) SOBROSA, F. Z. **Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz**. 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia ) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

### **INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMIC MATERIALS MANUFACTURED WITH RICE HUSK RESIDUAL SILICA AND STEEL FIBER**

#### **ABSTRACT**

*The purpose of this project is to use the rice husk silica and the steel fibers to produce ceramic bricks, seeking to improve their mechanical properties in terms of strength and ductility. The materials were manufactured with volume replacement of 15% and 20% of kaolin clay by rice husk silica, and it was added 1% and 2% of steel fibers. The experimental program was established by physical tests (bulk density, apparent porosity, linear firing shrinkage, and weight variation) and mechanical tests (unconfined compression strength and three points flexural test). The results showed that the substitution of the clay by the silica increases the density and decreases the porosity of the specimens, thus improving the results of mechanical tests. With the addition of steel fibers, the porosity increases inducing the reduction of the mechanical tests results, however it confers greater ductility to the material.*

Key-words: ceramic, rice husk silica e steel fibers.