



## TRATAMENTO DAS CINZAS DE CASCA DE ARROZ PARA SÍNTESE DE SÍLICA AMORFA E ADSORVENTE PARA CONTROLE DE NO<sub>x</sub> E SO<sub>2</sub> DE GASES DE COMBUSTÃO

Luize Kehl Bickel<sup>1,2</sup> (luizekehl@gmail.com), Rodrigo Eckert Renner<sup>1,2</sup> (rodrigoeckertrenner@hotmail.com), Gabriel Meneghetti Faé Gomes<sup>1,2</sup> (gmfae@unisinis.br)

1 UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
2 FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL - CIENTEC

### RESUMO

Visando uma alternativa para o destino do resíduo agroindustrial gerado pela produção de arroz e a diminuição do impacto ambiental causado pelo mesmo, o presente estudo tem como objetivo tratar a cinza da casca do arroz (CCA) para duas finalidades distintas. A primeira parte do estudo objetiva a síntese de um adsorvente capaz de adsorver simultaneamente os gases provenientes da combustão de combustíveis fósseis, destacando o carvão mineral que emite tanto SO<sub>2</sub> quanto NO<sub>x</sub>. Na segunda parte, relatamos a síntese da sílica amorfa a partir de diferentes métodos de purificação da cinza. O rendimento do processo de síntese em função da percentagem de SiO<sub>2</sub> obtida foi relacionado com parâmetros de processo: necessidade de purificação da cinza e razão de impregnação de NaOH.

**Palavras-chave:** Cinza da casca de arroz; sílica; adsorvente.

## RICE HUSK ASH TREATMENT FOR THE SYNTHESIS OF AMORPHOUS SILICA AND ADSORBENTS USED AS CONTROLLER OF NO<sub>x</sub> AND SO<sub>2</sub> OF FLUE GASES

### ABSTRACT

Attending to an alternative to the destination of an industrial waste to decrease environmental damage, the present study has as objective the development of ways to treat the rice husk ash, by two different routes. The first part of this study, is the synthesis of an adsorbent capable of adsorbing combustion gases, highlighting mineral coal, that generates SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. The second part is concerned to the synthesis of amorphous silica from different purification methods. The efficiency of the synthesis in function of the percentage of SiO<sub>2</sub> was related with the process parameters: need of ash purification and the rate of NaOH impregnation.

**Keywords:** Rice husk ash; silica; sorbent.

### 1. INTRODUÇÃO

O aumento da produção agrícola gerou uma preocupação acerca do destino final dos resíduos, como a casca de arroz (CCA), que uma vez convertida termicamente via combustão, gera uma cinza cujo principal componente é o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), que apresenta um teor de 74% até 97%, variando nestes parâmetros com o processo e a temperatura da queima (DELLA *et al.*, 2002 e Pode, 2016). A influência das condições de combustão está relacionada à morfologia da sílica, que se difere entre sílica amorfa, mais reativa e pode ser utilizado para pozolanas, e a cristalina. O aumento da temperatura de combustão tende a diminuir significativamente a porcentagem de não queimados presentes na cinza, reduzindo, assim, a absorção de água, configurando uma cinza mais clara, denominada cristalina, com a devida temperatura de queima. A cinza amorfa já possui normalmente uma reatividade maior e é indicada para pozolanas (TASHIMA *et al.*, 2005).



A discussão acerca do como se deve utilizar esse resíduo agroindustrial envolve diversas áreas de pesquisa. Sabe-se que a cinza pode ser utilizada como incremento no cimento, principalmente no cimento *Portland*. No entanto, outros usos da CCA, especialmente quando na sua forma amorfa, podem ser desenvolvidos de maneira a aumentar significativamente o seu valor agregado. Possíveis alternativas podem ser exploradas, valendo-se da pozzolanidade e do alto teor de sílica presente neste resíduo, como a síntese de um adsorvente para controle de emissões atmosféricas e síntese de sílica amorfa.

O adsorvente pode ser sintetizado com a utilização de compostos que contenham uma quantidade considerável de sílica para reagirem com compostos à base de cálcio, que, em presença de água, reagem e formam reações pozzolânicas ( $x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ), gerando silicatos de cálcio, capazes de adsorver  $\text{SO}_2$ , que posteriormente pode ser impregnado à um óxido metálico para adsorver, em conjunto,  $\text{NO}_x$  (LAU *et al.*, 2013).

A CCA também pode ser usada como fonte alternativa para a produção de sílica de uso industrial, por se tratar de um método de obtenção economicamente viável (Kamath e Proctor, 1998; Kalapathy *et al.*, 2000; Yalçin e Sevinç, 2001, Lima *et al.*, 2011 e Fernandes *et al.*, 2014). Entre as diversas aplicações que a sílica amorfa possui, ressaltamos as seguintes (i) indústria cerâmica e de produção de vidro, sendo utilizado para alterar as propriedades mecânicas do material, (ii) indústria de telecomunicações para a produção de fibra óptica (iii) indústria alimentícia, como aditivo em alimentos a fim de mantê-los secos, (iv) indústria farmacêutica e cosmética, (v) indústria agrícola, (vi) indústria de extração e mineração, (vii) indústria de construção civil, na concepção de concretos de alto desempenho, (viii) indústria de energia solar, para a fabricação de painéis fotovoltaicos e (ix) indústria eletrônica, para a fabricação de semicondutores, microchips e produtos eletrônicos (Pode, 2016, Vassilev *et al.*, 2016)

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo procurar diferentes destinações para um subproduto que muito se via como resíduo, gerando duas matérias-primas para produtos de maior valor agregado: adsorvente para  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$  em gases de combustão e síntese de sílica amorfa.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Cinza da casca do arroz

As CCAs utilizadas neste estudo foram obtidas através da combustão da casca do arroz em leito fluidizado borbulhante. A cinza utilizada se enquadra no perfil amorfo, apresentando em torno de 15% de cristalinidade, e de baixa reatividade.

A composição química quanto aos óxidos da CCA foi constatada por fluorescência de raios X (FRX), sendo as devidas porcentagens em massa apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. FRX da CCA

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{SO}_3$
86.0%	5.12%	1.26%	1.12%	1.82%	0.48%	0.48%	0.05%	0.17%	2.79%

Um pré-tratamento da CCA foi aplicado para ambas as sínteses. Na cinza (i) não foi aplicado nenhum tratamento, somente armazenado em local seco. A cinza (ii) foi purificada com HCl para remoção de materiais inorgânicos indesejados. Foram misturadas 40 g de CCA com 500 mL de HCl 10%. Após o procedimento, a CCA foi filtrada e seca a 110 °C por 24h. A cinza (iii) foi purificada com água destilada. Foram misturadas 40g de CCA com 500mL de água destilada. A mistura foi aquecida a 105 °C sob agitação constante por 2h, filtrada e seca a 110°C por 24h. Para a síntese do adsorvente foi empregado somente a cinza (iii). Já para a síntese da sílica amorfa, foram utilizadas as cinzas (i),(ii) e (iii).



### 3.2. Síntese do adsorvente

Para a síntese do adsorvente, foram utilizados os seguintes processos: método de hidratação com água, tendo como resultado uma solução de CCA/CaO, valendo-se de parâmetros de controle, onde foram observados a quantidade de água, temperatura da hidratação, tempo de hidratação, quantidade de CCA e quantidade de CaO, e o método de impregnação de poros. Para este último, Dahlan *et al.* (2008) apresenta o princípio de impregnar um óxido metálico à solução CCA/CaO, que foi procedida pela utilização do metal em seu formato de nitrato,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , observando-se uma medida de 5% em massa de óxido metálico.

**Tabela 2.** Parâmetros de controle para impregnação com CaO

H <sub>2</sub> O	CCA	CaO	Tº	t
110mL	15g	6g	250°C	16h

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de impregnação da CCA com CaO. Adicionou-se a quantidade de CCA e CaO à quantidade de água destilada. Sob agitação magnética e temperatura de 250°C, com o auxílio de um condensador para que ocorresse o refluxo da água, durante 16h. Após o tempo de reação, constatou-se alcalinidade na solução, o que aponta que as reações pozolânicas ocorreram, formando silicatos de cálcio e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . A solução CCA/CaO foi submetida à filtração à vácuo, lavando-se o sólido duas vezes com água.

O método de impregnação consiste em impregnar óxidos metálicos no sólido após o processo de hidratação. A impregnação forma uma espécie de cobertura de óxido metálico sobre os silicatos, criando um composto recoberto de óxido, que possibilita então a adsorção tanto do  $\text{NO}_x$ , por parte da cobertura do óxido metálico, quanto  $\text{SO}_2$ , pelos silicatos de cálcio.

O método foi prosseguido de acordo com as quantidades dos parâmetros da Tabela 3. Adicionou-se a massa de CCA+CaO, proveniente do processo de hidratação, o nitrato do metal que deseja-se fazer a impregnação, sob agitação magnética e temperatura ambiente (25°C), durante 2h.

**Tabela 3.** Parâmetros de controle para impregnação com  $\text{Fe}_2(\text{NO}_3)_3$

CCA+CaO	$\text{Fe}_2(\text{NO}_3)_3$	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
21.3g	2.9g	100mL

Passado o tempo de reação, o agente adsorvente foi submetido a uma filtração a vácuo, e posteriormente seco a 110°C durante 24h. A fim de se eliminar os voláteis presentes no adsorvente então pronto, o sólido foi encaminhado a um forno Mufla, a uma temperatura de 500°C, durante 2h.

### 3.3. Síntese da sílica amorfa

A sílica foi extraída da cinza da casca de arroz adaptando o método utilizado por Gomes *et al.* (2016). As cinzas, previamente tratadas e secas, foram submetidas a diferentes razões de impregnação de NaOH e, posteriormente, a neutralização com ácido acético.

Para que hajam parâmetros de comparação entre os resultados obtidos a partir dos diferentes métodos aplicados, é utilizada a medida padrão de 40g de CCA para cada experimento. Essas 40g são misturadas com NaOH com diferentes razões de impregnação, sendo elas de 0,4, 0,6 e 0,8. A mistura é aquecida a 105 °C sob agitação constante por 3 horas, para que ocorra a solubilização da sílica amorfa. Após, a mistura é filtrada para a obtenção de silicato de sódio líquido. Para que ocorra a neutralização e, conseqüentemente, a precipitação da sílica, é adicionado à mistura o ácido acético 7M. Então, a mistura é aquecida a 100°C por 1h para que ocorra a precipitação da sílica. Posteriormente, é filtrada, resultando em uma parte sólida que é seca na estufa a 110°C por 24h, e uma parte líquida, que é descartada. Para a purificação da sílica obtida, e remoção de impurezas, é aplicada uma nova lavagem com água destilada. Após



seca, a sílica é pesada e encaminhada para verificação do grau de pureza. Neste trabalho, foram utilizados dois fatores determinantes: (i) razão de impregnação de NaOH e (ii) método de purificação da cinza. No total, foram realizados 9 ensaios, como mostrado na Tabela 4, de modo a formar todas as combinações possíveis entre os fatores (i) e (ii). Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

**Tabela 4.** Parâmetros de controle para a síntese da sílica

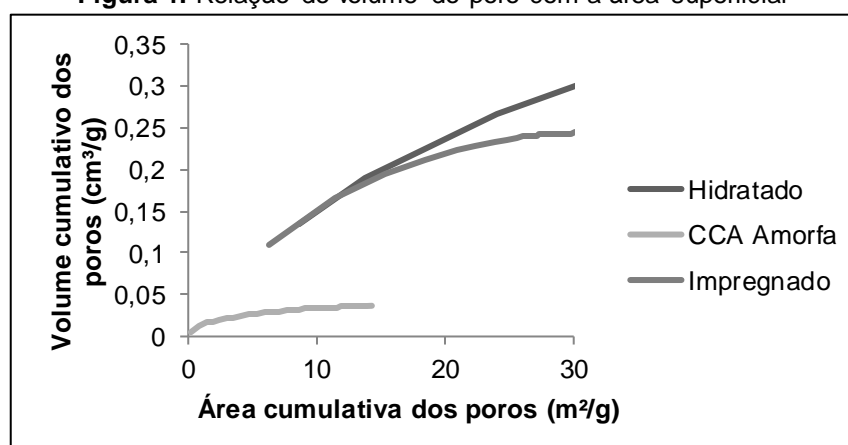
ENSAIO	CINZA	IMPREGNAÇÃO (g NaOH/ g CCA)
1	(i)	0,4
2	(i)	0,6
3	(i)	0,8
4	(ii)	0,4
5	(ii)	0,6
6	(ii)	0,8
7	(iii)	0,4
8	(iii)	0,6
9	(iii)	0,8

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Adsorvente

Conforme aponta a Figura 1, a partir da análise BET, e considerando as propriedades aglomerantes, aglutinantes e coligativas das reações pozolânicas, pode-se aferir um aumento nas Áreas e nos Volumes Cumulativos dos poros. Isso se deve pelo rearranjo molecular, criando condições favoráveis para a existência de sítios ativos, capazes de promover a pozolanicidade. A diferença entre os Volumes Cumulativos das substâncias Hidratadas e Impregnadas é devido ao próprio ferro, que ao ocorrer a impregnação, ocupa alguns sítios ativos, diminuindo então o volume total.

**Figura 1.** Relação do volume do poro com a área superficial



Montanheiro *et al.* (2003) apresenta que a atividade pozolânica em dado composto pode ser apresentada pelo desencadeamento das reações pozolânicas. Estas reações ocorrem quando a pozolana em seu estado amorfo entra em contato com o óxido de cálcio em presença de água. Netto (2009) reporta que as ligações presentes na molécula óxido de silício são vulneráveis ao óxido de cálcio, devido a forte instabilidade presente na CCA, juntamente com a presença de



água, formam um composto com propriedades aglomerantes, chamado silicato de cálcio hidratado.

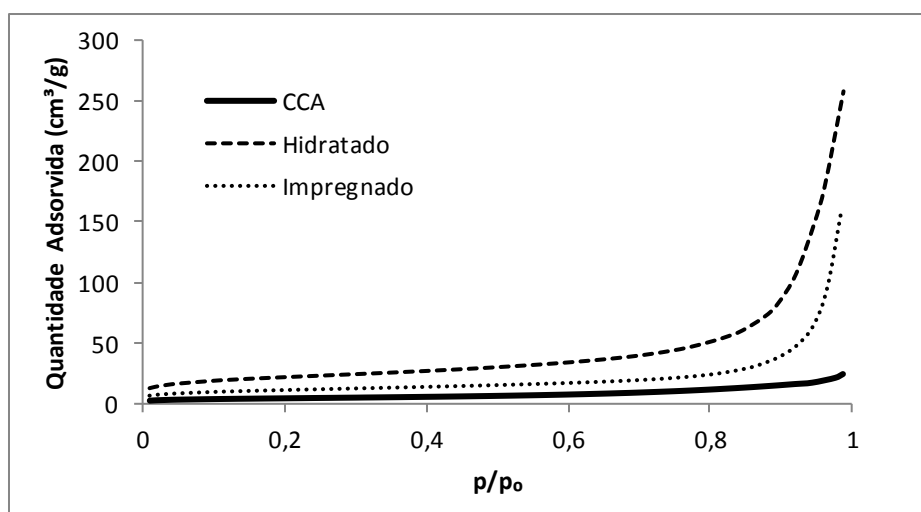
Hoppe Filho (2008) mostra que o mecanismo de reação do silicato de cálcio hidratado pode ser descrito pela formação de íons, com a CCA e o óxido de cálcio em água, tanto por parte do óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), formando  $\text{SiO}_3^{2-}$ , quanto do óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), formando  $\text{Ca}^+$ , sendo ambos consumidos gradativamente para a formação do silicato.

Conforme apresentado na literatura e consta nos resultados da análise obtidos por BET, as reações pozolânicas puderam ter êxito na sua formação, por terem aumentado o volume cumulativo dos poros, possibilitando assim a captura dos compostos.

#### 4.1.2. Isotermas de adsorção

A Figura 1 apresenta os resultados das isotermas de adsorção. Pela figura, observa-se um aumento da capacidade de adsorção tanto do material hidratado quanto do material impregnado, sendo que o material adquiriu uma diminuição na sua capacidade adsorvente quando o ferro foi introduzido no tratamento via impregnação. A partir da isoterma, verifica-se que o material apresenta um comportamento de fissorção de sólidos macro e mesoporosos. (Rouquerol *et al.* 1998 )

**Figura 2.** Isotermas lineares de adsorção com  $\text{N}_2$ , do composto hidratado, do composto impregnado e da cinza amorfa

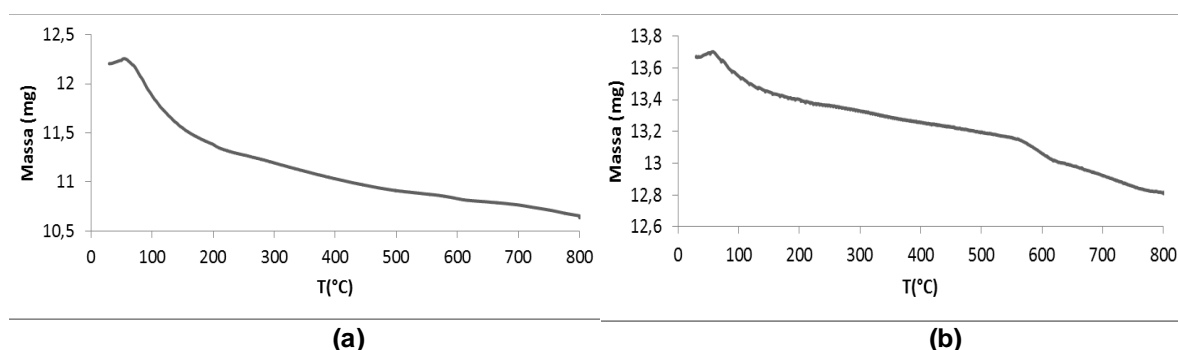


#### 4.1.3. Análise Termogravimétrica e Difração de Raio X

Nas análises termogravimétricas, conforme apresentado na Figura 3, os picos de perda de massa são representados pela decomposição térmica da substância que forma o composto. De 30°C até 370°C ocorre a decomposição do silicato de cálcio hidratado, de 370°C até 525°C ocorre a decomposição da Portlandita, da faixa de 525°C até 1000°C, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio e da hematita.

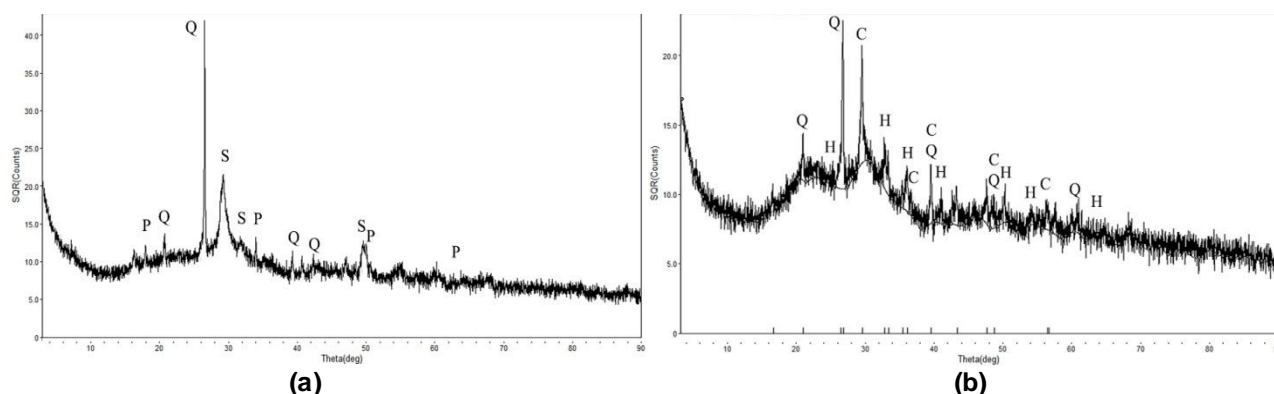


**Figura 3.** Análise termogravimétrica do material hidratado (a) e do material impregnado (b)



A Figura 4 já apresenta os difratogramas do material hidratado (a) e impregnado (b), onde foram detectados picos de silicato de cálcio (**S**) hidratado no composto hidratado, fundamental para a adsorção de  $\text{SO}_2$ . Já no composto impregnado, a monocamada formada pela impregnação do ferro (**H**) foi detectada, presente no formato de óxido de ferro.

**Figura 4.** Difração de Raios X (DRX) do composto hidratado (a) e impregnado (b). (**Q**)- Quartzo; (**S**)- Silicato de cálcio hidratado; (**P**)-Portlandita; (**C**)-Calcita; (**H**)-Hematita



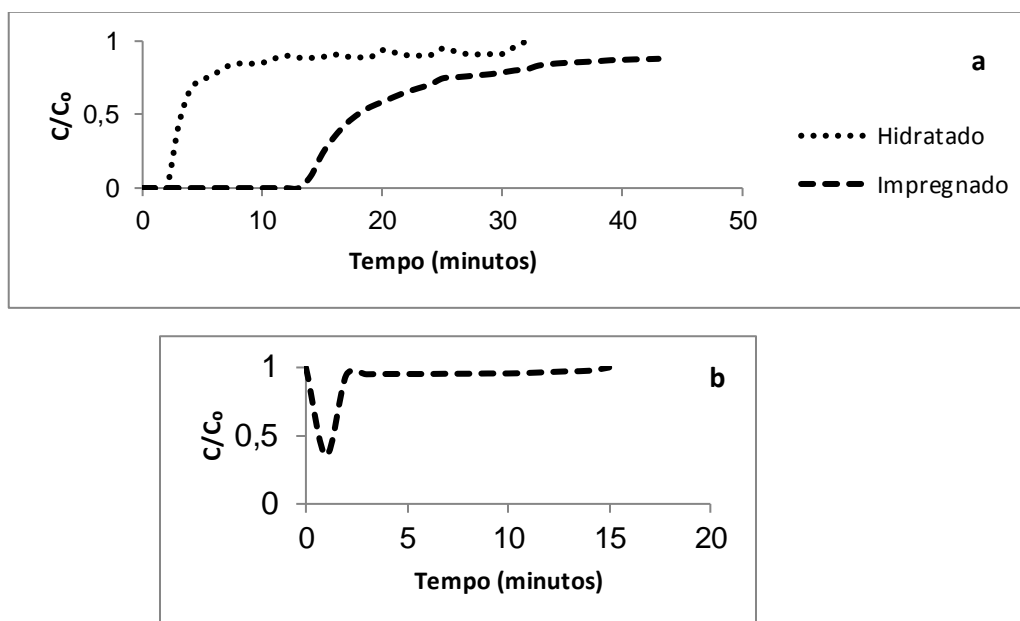
#### 4.1.4. Ensaios de Adsorção

As Figuras 5a,b e c, apresentam os resultados dos ensaios de adsorção para o  $\text{SO}_2$  dos materiais hidratado (5a), impregnado (5b) e adsorção de  $\text{NO}$  para o material impregnado (5c). Os materiais foram capazes de adsorver os gases em estudo com uma boa capacidade até o período onde ocorre a saturação dos sítios ativos. Uma vazão de 300 ml/min, à 1 atm e 25°C, foi empregado para cada 1.2g de catalisador presente. Os gases  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$  foram utilizados em concentrações de 2000 e 500 ppm volumétrico, respectivamente.

A Figura 5 apresenta os testes de adsorção dos materiais em dada condição. O composto hidratado foi capaz de adsorver  $\text{SO}_2$  com eficácia por 15 minutos, onde ocorre a saturação dos poros. Já o impregnado foi capaz de adsorver  $\text{SO}_2$  por aproximadamente 20 minutos, e  $\text{NO}$  por 25 minutos.



**Figura 5.** Teste de adsorção de SO<sub>2</sub> dos materiais hidratado e impregnado (a) e de NO para o composto impregnado (b)



## 4.2. Rendimentos da Sílica com Ácido Acético

Os três tipos de sílica sintetizados, a partir das três diferentes cinzas, conforme descrito na seção 3.1, foram submetidos à análise termogravimétrica, conforme apresentado na Figura 6. O comportamento do material com o aumento da temperatura em atmosfera oxidante, mostra, em um primeiro momento, o desprendimento da umidade do material até uma temperatura em torno de 100°C.

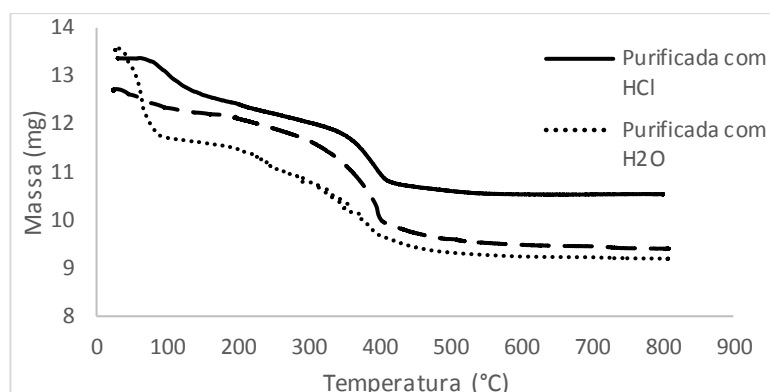
Na sequência, pode-se visualizar a pureza da sílica formada quanto à presença de compostos voláteis e degradados termicamente. Destaca-se a perda de massa na temperatura próxima a 400°C, provavelmente devido à degradação térmica de acetato de sódio, que possui uma temperatura de degradação de 394°C, formado devido ao procedimento de síntese empregado e também ao pH de precipitação da sílica.

Na sequência, os rendimentos das sílicas obtidas foram comparados entre si, a fim de determinar as amostras que obtiveram melhor rendimento final, conforme apresentado na Figura 7. As cinzas (i), (ii) e (iii) foram usadas como controle para avaliar a influência da purificação da cinza na pureza final da sílica sintetizada.

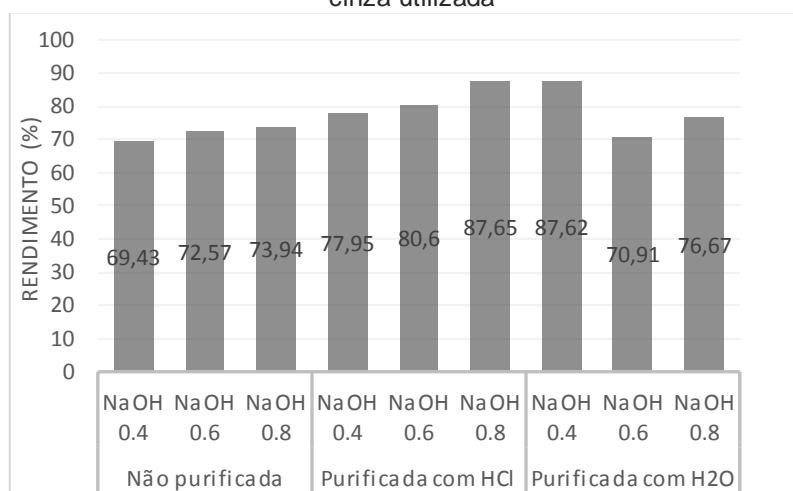
Para as sílicas obtidas a partir das CCAs (i) e (ii), o aumento da razão de impregnação de NaOH gerou um aumento no rendimento. Contudo, isso não ocorre para as sílicas obtidas a partir da CCA (iii). Os rendimentos são similares, o que não permite determinar uma relação entre a purificação da CCA e o rendimento final do dióxido de silício.



**Figura 6.** Variação da massa em função da temperatura do composto obtido através das cinzas purificada com HCl, purificada com água e não purificada



**Figura 7.** Rendimento médio final das sílicas obtidas em função da razão de impregnação de NaOH e da cinza utilizada



A tabela 5 apresenta os diâmetros médios da sílica obtida a partir de cada tipo de cinza, i, ii e iii, obtidos a partir de granulometria a laser. Verifica-se que o diâmetro das sílicas obtidas através dos diferentes processos apresenta variações. A sílica obtida a partir da CCA não purificada (i) apresenta um diâmetro médio maior, enquanto que a sílica obtida através das CCAs purificadas com HCl (ii) e H<sub>2</sub>O (iii) apresentam um diâmetro médio menor, e similares entre si.

**Tabela 5.** Diâmetros médios das sílicas sintetizadas a partir das diferentes cinzas.

CINZAS	D <sub>p</sub> (µm)
i	97,9
ii	27,32
iii	27,25





## 4.2.1 Otimização da Síntese com Ácido Acético

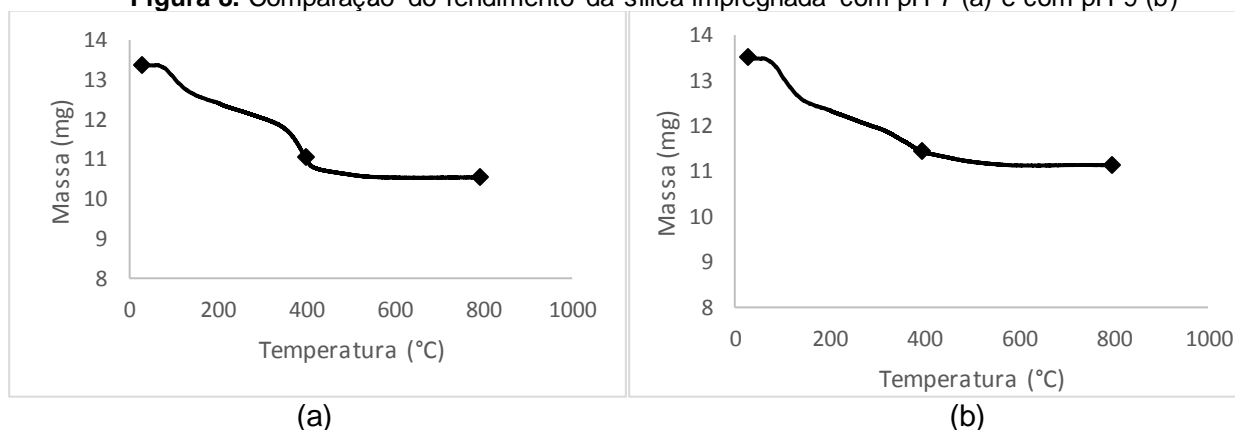
Como alternativa para otimizar a síntese da sílica, foi estudada a influência da quantidade de ácido acético nas sínteses, por meio da comparação de sílica obtida através de diferentes quantidades de adição de ácido para a precipitação, que foram medidas através do pH final da mistura, conforme mostra a tabela 6. Esta comparação foi realizada devido à evidência de formação do acetato de sódio no procedimento de síntese, conforme mostrado na Figura 6.

**Tabela 6.** Comparação entre os rendimentos de sílica obtidos através de diferentes pH

CINZA	pH	RENDIMENTO (%)
ii	7	78,83
ii	9	87,65

Como a sílica é insolúvel em pH <10, foram comparados os compostos obtidos com pH 7 e pH 9, e, em ambos os casos, houve a precipitação da sílica. Contudo, o volume maior de ácido ocasionou uma maior formação de acetato de sódio, influenciando no rendimento da amostra, como mostra a Tabela 6. Na figura 8, temos as análises termogravimétricas de duas amostras estudadas. Pela figura, pode-se verificar que, na amostra de pH 7, houve uma perda de 17,9% de massa na temperatura de aproximadamente 400°C, que pode ser associada ao desprendimento do acetato de sódio, enquanto na amostra de pH 9, na mesma faixa de temperatura, a perda de massa foi de 10,8%.

**Figura 8.** Comparação do rendimento da sílica impregnada com pH 7 (a) e com pH 9 (b)



## 5. CONCLUSÃO

Quanto à síntese de um material adsorvente de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> a partir da CCA, os tratamentos de hidratação, principalmente, e impregnação apresentaram um aumento significativo no volume cumulativo dos poros formados, o que, por sua vez, mostrou uma capacidade de adsorção maior em comparação com a CCA. A partir dos resultados de DRX, pode-se destacar a formação de silicato de cálcio na primeira parte do tratamento e hematita no tratamento via impregnação. Os ensaios com SO<sub>2</sub> mostraram uma adsorção total do SO<sub>2</sub> antes de 15 minutos para as condições empregadas, a partir do qual os sítios ativos passaram a não adsorver este gás. Para o NO, já obteve-se uma saturação em um período menor do que 5 minutos para uma relação C/C<sub>0</sub> em pouco menos de 0,4.

Quanto à síntese de sílica, verificou-se uma importante perda de massa, via termogravimetria, na temperatura em torno de 400°C. Esta perda de massa, por sua vez, está provavelmente relacionada com a formação de acetato de sódio devido ao procedimento de síntese. Ao mesmo



tempo, o controle do pH na precipitação de 7,0 para 9,0 mostrou uma importante redução na formação deste composto na sílica. Os rendimentos das sílicas ficaram entre 69,43% e 87,65% para os ensaios, mostrando uma tendência de aumento com o aumento da razão de impregnação, mas não com a preparação inicial da cinza. Importante considerar a redução do diâmetro da sílica sintetizada a partir da purificação da cinza, de 97,9  $\mu\text{m}$  para 27  $\mu\text{m}$ .

## REFERÊNCIAS

- DAHLAN, I.; LEE, K.T.; KAMARUDDIN, A. H.; MOHAMED, A.R. Removal of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}$  over rice husk ash (RHA)/CaO – Supported metal oxides. *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 3, p. 109-116, 2008.
- DAHLAN, I.; LEE, K.T.; KAMARUDDIN, A. H.; MOHAMED, A.R. Sorption of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}$  from simulated flue gas over rice husk ash (RHA)/CaO/ $\text{CeO}_2$  sorbent: Evaluation of deactivation Kinect parameters. *Journal of Hazardous Materials*, v. 185, p. 1609-1613, 2011.
- DELLA, V.P., KÜHN, I., HOTZA, D.. Rice Husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters*, v. 57 p. 818-821, 2002.
- FERNANDES, L., SABINO, M.G., ROSSETTO, H.L. Método de extração de sílica da casca do arroz. *Cerâmica*, v.60, p 160-163, 2014.
- GOMES, G.M.F, PHILIPSEN, C., BARD, E.K., ZEN, L.D, SOUZA, G. Rice husk bubbling fluidized bed combustion for amorphous silica synthesis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.4, p. 2278-2290, 2016.
- HOPPE FILHO, J. Mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. Universidade de São Paulo (USP), Tese de Doutorado, 2008.
- KAMATH, S.R.; PROCTOR, A. Silica gel from rice husk ash: preparation and characterization. *Cereal Chemistry* v. 75, p. 484-487, 1998.
- KALAPATHY, U.; PROCTOR, A.; SHULTZ, J. A simple method for production of pure silica from rice hull ash. *Bioresource Thechnology*, v. 73, p. 257-262, 2000.
- KILLIC, O.; ACARKAN, B.; AY, S. FGD investments as partof energy policy: a case study for Turkey. *Energy Policy*, v. 62, p. 1461-1469, 2013.
- LAU, L.C., LEE, K.T., MOHAMED, A.R. Effect of operating conditions towards simultaneous removal of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}$  using: role as sorbent and catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.1, p. 755-761, 2013.
- LIMA, S.P.B de, Vasconcelos, R.P. de, PAIVA, O. A., CORDEIRO, G.C., CHAVES, M.R. de M., FILHO, R.D.T., FAIRBAIRN, E. de M.R. Production of silica gel from residual rice husk ash. *Química Nova*, v.34, p.71-75, 2011.
- LIN, R.; SHIH, S.; LIU, C.. Characteristics and reactivities of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / silica fume sorbents for low-temperature flue gas desulfurization. *Chem. Eng. Science*, v. 58, p. 3659-3668, 2003.
- MONTANHEIRO, T.J.; YAMATOMO, J.K.; KIHARA, Y. Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: Difratria de raios x como método alternativo. *Revista do Instituto Geológico*, v. 24(1/2), p. 1-9, 2003.



NETTO, R.M. Materiais Pozolânicos. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Trabalho de conclusão de curso, 2006.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 53, p. 1468-1485, 2016.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 53, p. 1468-1485, 2016.

ROUQUEROL, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. Adsorption by powders and porous solids, 1º ed., Academic Press; Londres, 1998.

TASHIMA, M.M., FIORITI, C.F., AKASAKI, J.L., BERNABEU, J.P., SOUSA, L.C., MELGES, J.L. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: Método de produção e atividade pozolânica. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2005.

VASSILEV, S.V., BAXTER, D., ANDERSEN, L.K., VASSILEVA, C.G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges. Fuel, v. 105, p.19-39, 2013.

YALÇIN, N.; SEVINÇ, V. Studies on silica obtained from rice husk. Ceramics International, v. 27, p. 219-224, 2001.