

# UMA REVISÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE QUEIMA NA COMPOSIÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ VISANDO PRODUÇÃO DE SÍLICA

## A REVIEW ON THE EFFECT OF BURNING PROCESSES IN THE COMPOSITION OF RICE HUSK ASH FOR THE PRODUCTION OF SILICA

Aline F. Camargo<sup>1</sup>; Danieli Brandler<sup>2</sup>; Tatiani A. Modkovski<sup>3</sup>; Thamarys Scapini<sup>4</sup>; Helen Treichel<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS *campus* Erechim. Email: alinefrumi@gmail.com, danielibrandler@gmail.com, tatianiandressa@gmail.com; thami.scapini01@gmail.com.

<sup>5</sup>Professora Doutora do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS *campus* Erechim. Email: helentreichel@gmail.com

### RESUMO

Este trabalho buscou relatos recentes na literatura sobre a utilização da casca do arroz (CA) em processos de queima visando a produção de sílica. Em primeiro momento, relatou-se a caracterização da casca de arroz, realizada por diferentes autores, para quantificações de seus componentes e a partir disso foi possível identificar elementos presentes na rede que compõe este resíduo, que são de extrema importância para escolha do processo de queima a ser adotado. Dois diferentes grupos de processos de combustão da CA foram analisados: queima controlada e não controlada. A utilização de um pré-tratamento ao processo de queima também foi analisado objetivando a obtenção de cinzas com maior grau de pureza em relação ao percentual de sílica amorfa. A transformação das cinzas em energia e biomateriais que podem ser aplicados na construção civil, indústria de vidros, cerâmicas etc, reduzem os danos ambientais causados pela emissão de gases do efeito estufa, descarte em aterro sanitário ou despejo indevido no solo. A extração de subprodutos com valor agregado, é uma maneira de reduzir o consumo de matéria-prima proveniente do meio ambiente colaborando para o desenvolvimento econômico sustentável.

**Palavras-chave:** Caracterização; Processos de combustão; Casca de arroz; Cinza da casca de arroz; Sílica

### ABSTRACT

This research aimed to look at recent literature on the use of rice husk (RH) in the burning processes for the production of silica. First, the characterization of the rice husk was carried out, by different authors, for quantifications of its components and from this it was possible to identify the elements that composed this residue, which are of extreme importance for choosing the burning process to be implemented. Two different groups of combustion processes were analyzed: controlled and uncontrolled burning. The use of pretreatment for the burning process was also analyzed in order to obtain the ashes with a higher degree of purity in relation to the percentage of amorphous silica. The transformation of ashes into energy and biomaterial can have a wide variety of applications in material science such as in construction industry, the glass industry or in ceramics, etc, consequently reducing the damage caused by greenhouse gas emissions, reducing landfills waste or being improperly disposed in the soil. The extraction of value-added by-products is a way to reduce the consumption of raw materials from the environment, contributing to sustainable economic development.

**Keywords:** Characterization; Combustion processes; Rice husk; Rice husk ash; Silica.

## 1. INTRODUÇÃO

O arroz é um dos alimentos mais consumidos no mundo. Este cereal é consumido por cerca de dois terços da população mundial, sendo a Ásia e China responsáveis por mais de 50% da sua produção (Borresen; Ryan, 2014). O Brasil encontra-se entre os dez maiores produtores do mundo, com um consumo aproximado de 25,0 kg.ano<sup>-1</sup> *per capita* (Fang *et al.*, 2014; Mataveli *et al.*, 2016).

A transformação industrial do arroz gera toneladas de subprodutos anualmente, principalmente considerando-se que 20% do peso do grão é casca de arroz (CA), a qual geralmente é queimada ou transportada para aterros, causando impactos ambientais relevantes (Antônio *et al.*, 2018). Portanto, a CA é um subproduto agrícola abundante principalmente tratando-se dos países com forte base econômica alavancada na produção de arroz (Mohamed; Mkhali; Barakat, 2015).

Por tratar-se de um subproduto com alto potencial energético, as indústrias de produção de arroz muitas vezes utilizam sua casca para geração de energia por meio do processo de combustão (Blisset *et al.*, 2017). Esta queima de biomassa é utilizada como combustível em caldeiras e diminui o impacto ambiental associado a destinação deste resíduo no ambiente, neutralizando a geração de CO<sub>2</sub> e a dependência do uso de combustíveis fósseis (Eliche-Quesada *et al.*, 2017). Porém, sob condições não controladas de queima, as cinzas geradas apresentam grande potencial cancerígeno e quando liberadas para o ambiente podem causar riscos à saúde humana e animal (Blisset *et al.*, 2017).

A sílica amorfa presente na composição das cinzas da casca de arroz (CCA) é um resíduo com grande potencial econômico obtido por meio da queima controlada (Santasnachok; Kurniawan; Hinode, 2015). As partículas de sílica sintetizadas a partir de CCA, após processo de purificação, têm diversas aplicações potenciais, podendo ser utilizadas como matéria-prima no processo produtivo de indústrias de vidro, eletrônica, química, cerâmica, siderúrgica e construção civil ou para produção de materiais de silício ou de carvão ativado (Sankar *et al.*, 2016; Santasnachok; Kurniawan; Hinode, 2015). Quando as cinzas são geradas por processo de queima incontrolada não há valor residual econômico agregado, além de se tratar de um resíduo com alto grau de periculosidade e, por se tratar de um pó fino, é de fácil inalação, aumentando o risco à saúde de operadores e população local (Blisset *et al.*, 2017).

A CA muitas vezes é queimada em campos abertos visando a eliminação desse resíduo, acarretando em grave poluição ambiental, problemas a saúde de espécies locais, além da perda do potencial energético inerente a grande parte destes subprodutos agrícolas (Lim *et al.*, 2012; Mor; Chhoden; Ravindra, 2016). Estudos recentes buscam tecnologias para o aumento da eficiência da conversão da CA em energia térmica e das cinzas geradas no processo de combustão para produção de matéria-prima para outros processos produtivos, buscando a minimização da geração de resíduos e podendo substituir fontes não renováveis de energia (Stempfle *et al.*, 2014).

Neste contexto, este artigo apresenta uma revisão referente a utilização de CA para geração de energia térmica e da CCA como matéria-prima em processos produtivos. Para tanto, serão apresentadas as tecnologias e as aplicações atuais associadas tanto a CA como a CCA, apresentando também os elementos que compõe esses produtos.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DE ARROZ

Essa seção discorre sobre o levantamento de dados referente a caracterização da CA e as quantificações de seus componentes.

A CA é o resíduo proveniente do processo de beneficiamento do arroz para comercialização (Mor; Chhoden; Ravindra, 2016). Segundo Olupot *et al.* (2016), 150 megatoneladas de CA foram geradas mundialmente no ano de 2015. Esse resíduo tem alto poder calorífico e o seu uso como fonte de energia tem sido amplamente estudado (Shen, 2016; Zhang; Lin, 2012).

A ênfase atual pela redução do consumo de recursos naturais busca a utilização de subprodutos como matéria-prima para diversos processos industriais e a CA surge nesse contexto como uma alternativa promissora na produção de energia pelo processo de combustão e de sílica amorfa a partir de suas cinzas (Eliche-Quesada *et al.*, 2017). Para Fernandes *et al.* (2017) a combustão da CA para produzir energia térmica é uma solução adequada, sustentável e economicamente viável.

Estudos indicam que a CA é composta por constituintes orgânicos (74%) e inorgânicos (26%). Os constituintes orgânicos incluem celulose, hemicelulose, lignina, L-arabinose, ácido metil glucurônico, D-galactose e algumas proteínas e vitaminas que normalmente são removidas da casca durante o processo de queima (Sharma; Williams; Zangvil, 1984; Yalçin; Sevinç, 2001). Para Sankar

*et al.* (2016), a parte inorgânica da CA é composta de sílica (80%), juntamente com alguns constituintes inorgânicos em menores quantidades como óxido de alumínio (3,93%), óxido sulfúrico (0,78%), óxido de ferro (0,41%), óxido de cálcio (3,84%), óxido de magnésio (0,25%), óxido de sódio (0,67%), óxido de potássio (1,45%) e 8,56% perde-se no momento da queima.

Outros autores como Bakar; Yahya; Gan (2016) também relatam que as cascas de arroz são compostas por hemicelulose, celulose e lignina totalizando cerca de 75 a 90% da massa total das cascas. Para He *et al.* (2013) e Touhami *et al.* (2017), a CA é composta por aproximadamente 40% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica e a quantidade desses elementos pode ser influenciada pela variedade do arroz, condição climática e localização geográfica do plantio. Além disso, a lignocelulose (lignina, celulose e hemicelulose) é formada por diversos carboidratos que podem produzir energia térmica, além de reduzirem as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera (Chen *et al.*, 2013).

A CA é um resíduo biológico agrícola fibroso, insolúvel em água e de baixo teor nutritivo, utilizado como aditivo em fertilizantes, combustível, geração de energia térmica em caldeiras e principalmente para produção de sílica amorfa para aplicação comercial (Bazargan; Bazargan; McKay, 2015; Pode, 2016; Rosa *et al.*, 2015).

Segundo estudos analisados, a partir da caracterização química das cascas de arroz é possível identificar elementos presentes na rede que compõe este resíduo, que são de extrema importância para determinação do processo de queima a ser adotado. Na Tabela 1 são abordados alguns estudos de caracterização das cascas de arroz.

### 3. PROCESSOS DE QUEIMA DA CASCA DE ARROZ

O processo de combustão da CA pode ser dividido em dois grandes grupos: queima controlada e não controlada, sendo a primeira priorizada para utilização em grande escala principalmente pelas características das cinzas geradas (Soltani *et al.*, 2015). A queima é classificada assim, porque para obtenção de sílica de qualidade é necessário que após a queima as cinzas sejam compostas por sílica amorfa com baixo carbono residual e área superficial elevada e uniforme, e estas características serão obtidas através do controle da queima do resíduo (Blissett *et al.*, 2017).

O processo de queima da CA quando não controlado pode gerar cinzas com teor de sílica cristalina, tornando-se um resíduo sem valor agregado e com alto potencial de contaminação ambiental (Blissett *et al.*, 2017). Por conta disso, o controle de variáveis de processo é extremamente importante, principalmente para otimização de processos de geração de energia e produção de sílica com baixo grau de interferentes.

Estudos atuais buscam o melhoramento energético de processos de queima controlada por meio da variação de fluxos de energia, temperatura, tempo de queima (Kwofie; Ngadi; Sotocinal, 2017), utilização de catalisador no caso de leitos fluidizados, otimização de processos de transferência de calor e massa (Liu *et al.*, 2017), tratamentos químicos anteriores a queima (Adams; Mulaba-Bafubandi, 2014; Bakar; Yahya; Gan, 2016; Gomes *et al.*, 2016; Gu *et al.*, 2013; Gu *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2014), minimização das perdas de calor (Kwofie; Ngadi; Sotocinal, 2017), remoção de CO<sub>2</sub> e CO dos gases gerados no processo (Zhao *et al.*, 2012) e principalmente busca-se o alto teor de sílica nas cinzas geradas para que seja possível a comercialização e uso em diversas áreas que serão abordadas em seção posterior deste trabalho.

As características das cinzas são fortemente influenciadas pelo processo de combustão e da composição da CA, podendo haver variação na coloração e composição, o que pode ser influência do teor de carbono, utilização de diferentes temperaturas de tratamento, pré e pós-purificação com diferentes agentes, resultando diferentes estruturas e graus de pureza (Soltani *et al.*, 2015). Neste sentido, Fernandes *et al.* (2016) desenvolveram em seu estudo a comparação de três tipos de queima da CA, Forno de Grelha Móvel, Leito Fluidizado e Câmara de Combustão, visando apresentar a influência de diferentes processos de queima para amostras de CA que possuíam características semelhantes. As

cinzas resultantes dos processos de queima analisados apresentaram diferentes colorações e teores de sílica de 90,02% para Forno de Grelha Móvel, 96,71% para Leito Fluidizado e 93,61% para Combustão.

O sistema de queima por pirólise é atualmente um dos mais investigados para combustão da CA, principalmente por ser um processo que decompõe termicamente a biomassa em compostos químicos com baixo peso molecular (Huang *et al.*, 2018). O resultado da pirólise são resíduos sólidos como cinzas e carvão, bio-óleos que podem ser utilizados como combustíveis e vapores como CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> (Hsu; Huang; Kuo, 2015). Combinado a reatores de conversão termoquímica de energia como fornalhas e gaseificação mostrou-se um processo promissor na obtenção de sílica na forma amorfa (Liu *et al.*, 2017).

O processo de gaseificação é um processo de oxidação parcial da biomassa carbonosa por meio de agentes gaseificadores, como oxigênio, vapor e CO<sub>2</sub>, para geração de gás energético (Kook *et al.*, 2016), sendo esta uma alternativa para combustão de biomassa de baixa densidade (Soltani *et al.*, 2015). Os parâmetros essenciais de controle do processo são a razão de equivalência (ER), agente de gaseificação, temperatura de leito e catalisador (Kook *et al.*, 2016).

O ER é um fator importante para avaliação do desempenho do processo de gaseificação da biomassa (Zhao *et al.*, 2012), esta razão é caracterizada pela proporção estequiométrica de ar para combustível, sendo o produto entre a proporção de oxidante para biomassa pelo coeficiente estequiométrico de oxidante para biomassa. Teoricamente quando ER igual a 1 considera-se que a combustão foi completa (Kook *et al.*, 2016), para queima da CA diversos autores sugerem valores de ER entre 0,2-0,35 (Behainne; Martinez, 2014; Kook *et al.*, 2016; Manatura *et al.*, 2017; Thakkar *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2012).

O agente de gaseificação normalmente é ar ou vapor e a escolha depende da finalidade do processo de gaseificação, podendo o foco ser o resíduo gerado (cinza) ou o vapor produzido pela queima (Kook *et al.*, 2016). A temperatura do leito do reator de gaseificação em leito fluidizado é de extrema importância para o maior rendimento e eficiência. Estudos mostram que quanto maior a temperatura maior o rendimento em relação a produção de cinzas, porém este fator é limitado pelos materiais de construção dos reatores e pela geração de alcatrão e NO<sub>x</sub> no vapor, o que reduz o desempenho do equipamento e a temperatura de fusão das cinzas. Além disso quanto maior a temperatura de queima maior a quantidade de CO<sub>2</sub> presente nas cinzas (impureza). Isso ocorre porque a CA é convertida rapidamente e o tempo é limitado para queima do CO<sub>2</sub> que fica preso nas cinzas (Kook *et al.*, 2016).

Estudos mostram que a gaseificação por processo de leito fluidizado é uma tecnologia termoquímica que apresenta excelentes resultados de conversão de biomassa em energia por possuir características de flexibilidade em termos de matéria-prima para combustão, excelente taxa de transferência de calor (superior a grande parte dos demais processos) e baixo teor de carbono (Gomes *et al.*, 2017; Kook *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Thakkar *et al.*, 2016).

A CA possui baixas densidade e esfericidade tornando-se desfavorável para o processo de fluidização no leito, ainda assim essa turbulência pode ser favorável para a quebra do esqueleto das cinzas tornando o carbono preso disponível para conversão (Kook *et al.*, 2016; Soltani *et al.*, 2015). Em temperaturas elevadas, a presença de CO<sub>2</sub> e CO no gás diminui, ficando uma maior quantidade destes compostos nas cinzas, reduzindo o teor de pureza do subproduto gerado (Kook *et al.*, 2016). Para melhoramento do processo de fluidização da CA no leito, pesquisas estão sendo realizadas com base na mistura de agentes catalisadores no leito de areia de silício ou quartzo, como dolomite calcinada e olivina, para formação de um leito multi-sólido com maior estabilidade para fluidização da CA e maior facilidade para remoção da cinza por corrente de gás, além da minimização da produção de alcatrão (Kook *et al.*, 2016; Soltani *et al.*, 2015).

Por ser uma tecnologia que apresenta resultados excelentes de conversão térmica da CA em cinzas com alto teor de sílica amorfa, Chen *et al.* (2015) aumentaram a escala de um reator de leito fluidizado para testes em escala industrial avaliando a velocidade na produção da cinza, temperatura e eficiência de produção e ainda a qualidade da cinza produzida. Os autores constataram que em temperatura excedente a 725 °C ocorreu a cristalização da sílica e inferior a 625 °C não obtiveram

eficiência de conversão. A queima em escala industrial em temperaturas entre 660-720 °C apresentou silício em estrutura amorfa de 95% e menor quantidade de carbono residual.

A combustão controlada em Forno Mufla é um processo de queima utilizado em pequena escala e quando otimizado gera compostos de silício com alto grau de pureza (Bakar; Yahya; Gan, 2016). O principal parâmetro da combustão em forno é a temperatura de queima, sendo que esta apresenta grande divergência entre autores que ocorre principalmente por fatores de processo, escala e objetivo de estudo (Soltani *et al.*, 2015).

Blissett *et al.* (2017) desenvolveram um estudo de combustão controlada em reator TORBED, uma tecnologia promissora de combustão de biomassa capaz de gerar cinzas com baixo carbono residual e sílica amorfa de alta pureza (acima de 95%). Esta pesquisa foi desenvolvida com o principal objetivo de aumentar as informações de controle operacional para otimização de processo no reator. Os resultados mostraram atuação em ampla faixa de temperatura de 700 a 900°C sem geração de sílica amorfa.

Simundi (2017) relata que a estrutura amorfa da sílica é obtida por meio da queima da casca de arroz em uma temperatura abaixo de 700°C. A extração de sílica amorfa a partir da casca de arroz é comumente realizado por meio de um isolamento da sílica, utilizando um meio alcalino e logo após ser calcinado em altas temperaturas até que todo o material orgânico seja convertido em CO<sub>2</sub> (Marin *et al.*, 2015).

Outro assunto de grande relevância para os processos de queima de CA para obtenção de sílica com alto teor de pureza é o pré-tratamento que será abordado na seção subsequente.

### **3.1. Pré-tratamento da casca de arroz**

A utilização de um pré-tratamento no processo de queima objetiva a obtenção de cinzas com maior grau de pureza em relação ao percentual de sílica amorfa (Lee *et al.*, 2017).

O processo de pré-tratamento químico consiste basicamente na imersão das cascas de arroz em soluções que afetam a estabilidade térmica de impurezas metálicas e posteriormente em água destilada para neutralizar o pH das amostras e carrear os metais removidos por meio do processo de secagem podendo ser em estufa e liofilização (Gu *et al.*, 2013).

Muitos autores sugerem que o pré-tratamento das cascas de arroz com soluções ácidas, líquidos iônicos, água e outros compostos anterior ao tratamento térmico podem ser eficazes para o rompimento da rede celulose-hemicelulose-lignina aumentando a acessibilidade para subsequente hidrólise enzimática e remoção da maioria das impurezas metálicas presentes na CA (Abraham *et al.*, 2016; Bakar; Yahya; Gan, 2016; Lee *et al.*, 2017; Soltani *et al.*, 2015). O resíduo sólido resultante após o pré-tratamento possui alto teor de celulose e processado por hidrólise enzimática é utilizado para produção de glicose e posteriormente fermentado para produção de etanol (Abraham *et al.*, 2016), além da obtenção de sílica com alto teor de pureza. Na Tabela 2 são relacionadas soluções e líquidos iônicos propostos para processo de pré-tratamento.

| Composição (%)                        |                    |      |                   |           |      |       |       |     |      |     |      |                  |          |         |                  | Propriedades físicas       |                                               |                |
|---------------------------------------|--------------------|------|-------------------|-----------|------|-------|-------|-----|------|-----|------|------------------|----------|---------|------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|----------------|
| Refer.                                | C<br>Elemen<br>tar | H    | Mater.<br>Volátil | C<br>Fixo | N    | S     | O     | Mg  | K    | Na  | Ca   | SiO <sub>2</sub> | Celulose | Lignina | Lignoceu<br>lose | Tam. de<br>partíc.<br>(µm) | Densidade<br>Aparente<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | Umidade<br>(%) |
| Ahmed<br><i>et al.</i><br>(2016)      | N/E                | N/E  | N/E               | N/E       | N/E  | N/E   | N/E   | N/E | N/E  | N/E | N/E  | 38,3             | N/E      | N/E     | N/E              | N/E                        | N/E                                           | N/E            |
| Chen<br><i>et al.</i><br>(2013)       | N/E                | N/E  | N/E               | N/E       | N/E  | N/E   | N/E   | N/E | N/E  | N/E | N/E  | 15<br>-<br>28    | 35 – 40  | 20 - 25 | 72 - 85          | N/E                        | 100 - 122                                     | N/E            |
| Fernande<br><i>s et al.</i><br>(2017) | N/E                | N/E  | N/E               | N/E       | N/E  | N/E   | N/E   | N/E | N/E  | N/E | N/E  | N/E              | 50       | 30      | N/E              | N/E                        | N/E                                           | N/E            |
| Franco<br><i>et al.</i><br>(2017)     | N/E                | N/E  | N/E               | N/E       | N/E  | N/E   | N/E   | N/E | N/E  | N/E | N/E  | N/E              | N/E      | N/E     | N/E              | 105                        | N/E                                           | 7,0            |
| Olupot<br><i>et al.</i><br>(2016)     | 29,98              | 4,46 | 58,78             | 14,77     | 0,36 | 0,005 | 38,25 | N/E | N/E  | N/E | N/E  | N/E              | 36,10    | 10,58   | N/E              | N/E                        | 88,82                                         | N/E            |
|                                       | -                  | -    | -                 | -         | -    | -     | -     |     |      |     |      |                  |          | -       |                  |                            | -                                             |                |
|                                       | 34,48              | 5,59 | 66,37             | 17,75     | 0,63 | 0,041 | 43,36 |     |      |     |      |                  |          | 13,47   |                  |                            | 124,26                                        |                |
| Thakkar<br><i>et al.</i><br>(2016)    | 35,7               | 1,9  | 69,83             | 10,65     | 4,6  | N/E   | 38,2  | N/E | N/E  | N/E | N/E  | N/E              | N/E      | N/E     | N/E              | 800 -<br>1000              | 145                                           | 9,8            |
| Touhami<br><i>et al.</i><br>(2017)    | 36,56              | 4,66 | N/E               | N/E       | 0,40 | 0,03  | 54,23 | N/E | N/E  | N/E | N/E  | N/E              | N/E      | N/E     | N/E              | N/E                        | N/E                                           | N/E            |
| Zhang<br><i>et al.</i><br>(2017)      | 40,80              | 5,7  | 73,50             | 14,70     | 1,2  | N/E   | 40,50 | 621 | 3980 | 256 | 1584 | N/E              | N/E      | N/E     | N/E              | N/E                        | N/E                                           | N/E            |

Tabela 1. Resumo de estudos sobre a composição e propriedades físicas da CA

N/E = Não encontrado/ não citado no artigo de referência. Obs: No estudo de Fernandes et al. (2017) os demais componentes foram quantificados apenas para a cinza e não para a CA cru, sem nenhum tipo de tratamento.

Tabela 2. Compostos citados em literatura para pré-tratamento da CA

| Referência                     | Processo de queima empregado | Pré-tratamento                                                                                              | Condições de queima  | Obs                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bakar; Yahya; Gan (2016)       | Forno Mufla                  | Ácido Clorídrico<br>Ácido Sulfúrico<br>Ácido Nítrico                                                        | 600°C<br>2 horas     | Obtenção de sílica com teor de pureza maior que 99%                                                                                                                   |
| Lee <i>et al.</i> (2017)       | Pirólise                     | Cloreto de hidrogênio<br>Ácido Sulfúrico<br>Ácido Oxálico<br>Hidrogenossulfato de 1-butil-3-metilimidazólio | 800 °C<br>48 horas   | Relação de teor de pureza:<br>HCl (98,0 %)<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (99,6 %)<br>C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (98,0%)<br>Líq. Iônico (99,5 %) |
| Gu <i>et al.</i> (2013)        | Forno mufla                  | Ácido Clorídrico                                                                                            | 620 °C               | Teor de pureza da sílica: 99,92%                                                                                                                                      |
| Yu <i>et al.</i> (2014)        | Pirólise                     | Líquido iônico 1-etil-3-metilimidazólio<br>+<br>Hidrólise enzimática                                        | 600°C<br>2 e 3 horas | Aplicação do pré-tratamento com foco na produção de bio-SiO <sub>2</sub> e combustível através da hidrólise enzimática                                                |
| Gomes <i>et al.</i> (2016)     | Leito Fluidizado             | Cloreto de hidrogênio<br>Água a 200 e 250°C                                                                 | 850 °C               | Comparação entre as soluções de pré-tratamento                                                                                                                        |
| Adams; Mulaba-Bafubandi (2014) | Forno mufla                  | Água destilada                                                                                              | 800 °C<br>6 horas    | Aplicação das cinzas na remoção da turbidez de águas                                                                                                                  |
| Gu <i>et al.</i> (2015)        | Pirólise                     | Ácido Clorídrico                                                                                            | 300 – 800 °C         | Buscou a purificação com diferentes condições. Obteve teores de purificação de 95,85 a 99,62 %.                                                                       |

#### 4. CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS DA CASCA DE ARROZ

Esta seção aborda a caracterização das CCA, onde foi realizado um levantamento a partir de bibliografias da quantificação dos seus componentes.

A CCA é proveniente da queima controlada da CA (Fernandes *et al.*, 2017). Pode (2016) evidencia que em 2014 a produção mundial de CCA era de 29 milhões de toneladas e que em 2015 a estimativa era de 30 milhões de toneladas.

O grande volume de CCA gerado durante o processo de queima torna esse resíduo um limitante de espaço, e quando não descartado corretamente pode causar graves impactos ambientais. Por outro lado, quando a combustão da CA é conduzida de maneira controlada este resíduo apresenta alto valor agregado, isso devido a sua substancial quantidade de sílica amorfa que pode ser utilizada na produção de materiais para aplicações práticas (Pode, 2016).

Diferentes estudos afirmam que a CCA é eficiente para a utilização em materiais cerâmicos, eletrônicos, na construção civil, etc. (Eliche-Quesada *et al.*, 2017). A inserção da CCA na fabricação de diferentes materiais implica na redução das emissões de gases efeito estufa que seriam gerados durante o processo fabril convencional (Prasara-a; Gheewala, 2017).

O aproveitamento da CCA e de seus componentes constituintes dependem de sua caracterização física e química, e estas características estão interligadas a inúmeros fatores, entre eles, o processo de

combustão, os aspectos geográficos e as condições de plantio e colheita do arroz (Fernandes *et al.*, 2017; Sheen, 2016).

Algumas das principais características químicas provêm do processo de queima e quando os parâmetros de combustão, como a velocidade; temperatura de operação e tempo acontecem de forma eficiente, produzem cinzas com alto teor de  $\text{SiO}_2$  e com baixo teor de carbono (Chen *et al.* 2015), este baixo teor de carbono facilita a posterior extração da sílica das CCA (Gomes *et al.*, 2017). Estas características podem ser observadas na Tabela 3, onde o principal constituinte da CCA é o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) chegando em alguns casos atingir mais de 98% da composição química elementar total.

Na tabela 3, pode-se observar que a composição química das RHAs descritas variou apenas ligeiramente, principalmente nos níveis de  $\text{SiO}_2$ . Os elementos mais comuns presentes em RHA são Al, Ti, Fe, Ca, Mn, Mg, Na, K, S e P, os quais a variabilidade é devida a fatores geográficos, ano de colheita, fertilizantes e agroquímicos utilizados na plantação do arroz (Della; Kühn; Hotza, 2002). Nesse sentido, estes fatores podem explicar a variação entre os níveis de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  e  $\text{P}_2\text{O}_3$ , nas diferentes CCAs descritas.

Fernandes *et al.* (2016) avaliou três diferentes processos de queima da CA, Forno de Grelha Móvel (RHA MG), Leito Fluidizado (RHA FB) e Câmara de Combustão (RHA S). A figura 1 demonstra os difratogramas de difração de raios X (DRX) apresentados pelos autores para os três tipos de CCAs obtidos. Por meio da análise de DRX, os autores descrevem que há a ocorrência de picos largos, e que a sílica amorfa é caracterizada por “halos de amorfismo”, que ocorrem entre os ângulos de 15 a 30 ( $2\theta$ ) e são visíveis nos espectros da sílica presente nas amostras RHA FB e RHA S. Por sua vez, os picos de RHA MG indicaram que a sílica presente neste tipo de CCA é a cristobalita, a qual possui estrutura cristalina.

A sílica pode cristalizar em diferentes fases, dependendo da temperatura e da pressão adotada. A cristobalita é uma forma alotrópica de sílica que é estável na faixa de 1470-1705 °C, embora também possa ocorrer fora de seu domínio de estabilidade, como uma fase metaestável (Fernandes *et al.*, 2016).

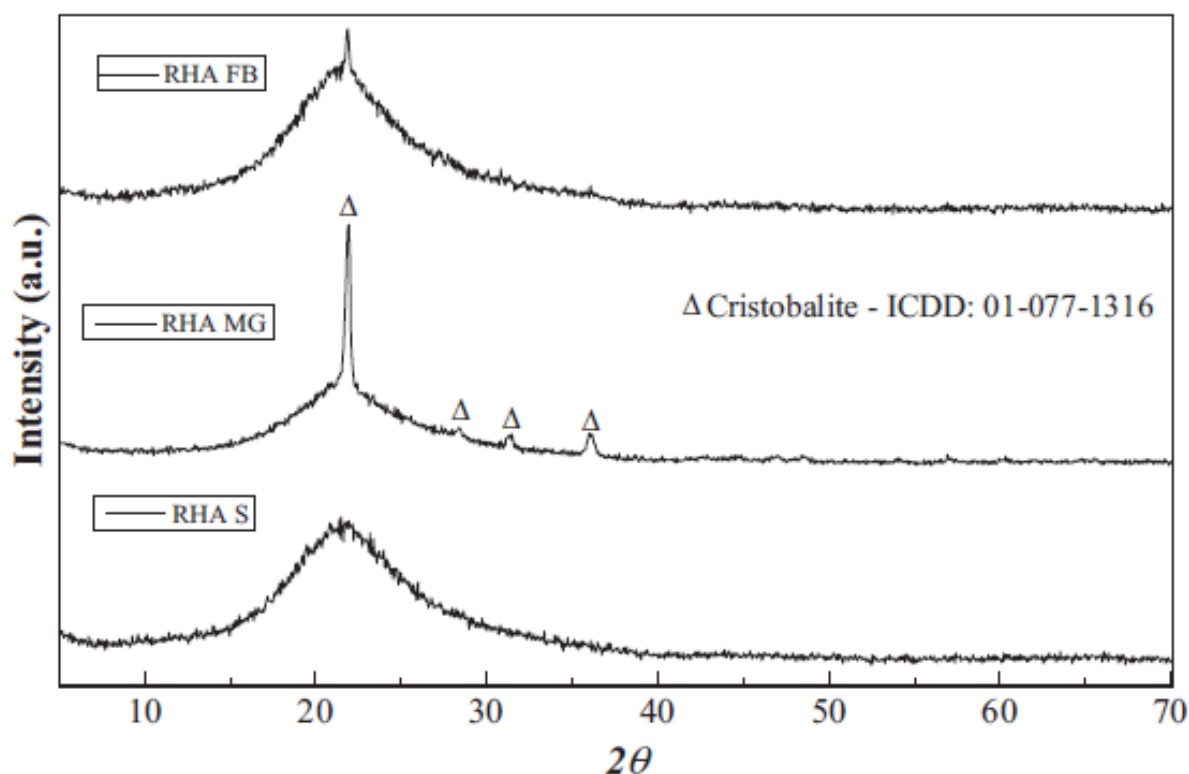


Figura 1. Difratogramas de difração de raios X.

Fonte: Fernandes *et al.* (2016).

## 5. APLICAÇÕES DA SÍLICA

Extrair a sílica das CCA com elevado teor de pureza tem como objetivo obter um material com potencial para diversas aplicações tecnológicas. Utilizar essa sílica em materiais inorgânicos, como vidros, refratários, tubos cerâmicos e abrasivos são técnicas que já se mostram consolidadas (Fernandes; Sabino; Rossetto, 2014).

No Brasil, a sílica é um material muito utilizado para uma ampla gama de aplicações comerciais, como: agricultura, onde é matéria-prima para a fabricação de silicatos de potássio, na indústria de higiene pessoal e cosméticos, indústria de bebidas, sendo utilizada para remover compostos indesejáveis à cerveja, indústria sucroalcooleira, indústria farmacêutica e também para produção de sílica gel (Fernandes; Sabino; Rossetto, 2014).

Mejía; Gutiérrez; Montes (2016) encontraram na CCA uma alternativa viável para aplicação como aglutinante de cimento comparável com Cimento Portland, com alta resistência mecânica para o setor de construção. A sílica é adequada para uso como material pozolânico em concreto por melhorar a microestrutura da zona de transição interfacial entre o cimento e o agregado (Chopra; Siddique; Kunal, 2015). Diversos outros estudos relatam as vantagens da adição de sílica de CA às matrizes de concreto, incluindo aumento da resistência à compressão, rugosidade exigida pelo revestimento superhidrófobo do concreto, além de reduzir as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera pelas indústrias de cimento (Chopra; Siddique; Kunal, 2015; Mejía; Gutiérrez; Montes, 2016; Rukson; Chindaprasirt, 2014).

Os materiais fotoluminescentes à base de sílica, têm sido estudados devido às suas amplas aplicações em fotônica, biomedicina, diagnósticos médicos e terapia (Zhang *et al.*, 2017). Liu *et al.* (2015) avaliou a sílica modificada com carbono mesoporoso fotoluminescente para aumento de eficiência que foi preparada através da calcinação de CCA tratadas com HCl a 550 °C durante 6 h, tendo como resultado um material com características excelentes e forte fotoluminescência.

Awadallah *et al.* (2017) utilizam o pó de nanosilica amorfa extraído da CA como suporte catalisador para partículas de NiO durante a reação de decomposição de metano. Os componentes metálicos ativos se agregam rapidamente na superfície do suporte de sílica amorfa devido à fraca interação entre os componentes do catalisador, levando a uma dispersão de metal e a desativação. No trabalho o autor obteve resultados significativos na redução de partículas, sugerindo que o catalisador possui um grande potencial de aplicação na produção de hidrogênio pela decomposição de metano.

Os silicatos são muito utilizados como adsorventes para óleos orgânicos e metais pesados, devido ao baixo custo, por não causarem grandes danos ambientais e por possuírem excelentes propriedades de adsorção. No trabalho de Zhang *et al.* (2017), os adsorventes de metais feitos de silicato, incluindo silicato de magnésio, silicato de zinco, silicato de níquel e silicato de cobalto, foram preparados com o uso de CA como fonte de silício, obtendo-se resultados promissores na produção de adsorventes.

Em relação à produção de materiais cerâmicos refratários, Sobrosa *et al.* (2017) avaliou a substituição da argila de caulim por sílica de CA em diferentes porcentagens. A eficácia da substituição foi analisada em termos de densidade, porosidade aparente, resistência à tração e à compressão, choque térmico e composição mineralógica resultando em um material com aumento da resistência mecânica sem diminuir a resistência ao choque térmico, substituindo 10% da argila pela sílica da CA.

É relatado também que a sílica é um material com grande avanço para a administração de medicamentos e sistemas de imagem. Os materiais de nanosilica ainda tem funções em outras aplicações médicas, como em vacinas e aplicações na área de genética (Mebert *et al.*, 2017).

Tabela 3. Composição elementar da CCA relacionada ao processo de queima.

| Referência                                  | SiO <sub>2</sub><br>(%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | TiO <sub>2</sub><br>(%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | CaO<br>(%) | MnO<br>(%) | MgO<br>(%) | Na <sub>2</sub> O<br>(%) | K <sub>2</sub> O<br>(%) | SO <sub>3</sub><br>(%) | P <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | Outros<br>(%) | Processo de<br>queima | T (°C)<br>empregada           | Tipo de<br>sílica |
|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|
| Deng <i>et al.</i> (2016)<br>China          | 98.64                   | 0.38                                  | 0.03                    | 0.238                                 | 0.249      | N/E        | 0.218      | 0.12                     | 0.125                   | N/E                    | N/E                                  | N/E           | Pirólise              | 600                           | Sílica<br>amorfa  |
| Alvarez <i>et al.</i> (2014)<br>Espanha     | 98.0                    | 0.52                                  | 0.02                    | 0.11                                  | 0.23       | 0.01       | 0.11       | 0.10                     | 0.38                    | N/E                    | 0.08                                 | 0.42          | Pirólise              | 400, 450<br>500 e 600         | N/E               |
| Fernandes <i>et al.</i><br>(2016)<br>Brasil | 96.71                   | 0.09                                  | N/E                     | 0.01                                  | N/E        | 0.01       | N/E        | N/E                      | 0.69                    | 0.06                   | 0.23                                 | N/E           | Leito<br>fluidizado   | 700                           | Sílica<br>amorfa  |
| Bakar; Yahya; Gan<br>(2016) Malásia         | 95.77                   | 0.046                                 | N/E                     | 0.05                                  | 0.667      | 0.054      | 0.397      | 1.259                    | 0.618                   | 0.653                  | 0.459                                | 0.027         | Mufla                 | 500, 600,<br>700, 800,<br>900 | Sílica<br>amorfa  |
| Chen <i>et al.</i> (2015)<br>China          | 94.8                    | 1.27                                  | N/E                     | 0.56                                  | 0.45       | N/E        | 0.19       | 0.12                     | 0.62                    | N/E                    | 1.49                                 | 0.50          | Leito<br>fluidizado   | 650, 675,<br>700, 725,<br>750 | Sílica<br>amorfa  |
| Lee <i>et al.</i> (2017)<br>Coreia          | 94.7                    | 0.08                                  | N/E                     | 0.06                                  | 1.42       | 0.18       | 0.54       | 0.09                     | 1.70                    | N/E                    | N/E                                  | 1.23          | Pirólise              | 800                           | Sílica<br>amorfa  |
| Hossain <i>et al.</i> (2017)<br>Índia       | 92.81                   | N/E                                   | 0.112                   | 0.312                                 | 0.417      | N/E        | 0.212      | 2.658                    | 1.021                   | 0.132                  | 1.071                                | 1.255         | N/E                   | 500                           | Sílica<br>amorfa  |
| Sobrosa <i>et al.</i> (2017)<br>Brasil      | 91.48                   | N/E                                   | 0.003                   | 0.05                                  | 0.36       | 0.32       | 0.32       | 0.04                     | 1.40                    | 0.15                   | 0.45                                 | N/E           | Leito<br>fluidizado   | 650                           | Sílica<br>amorfa  |

N/E = Não encontrado/ não citado no artigo de referência.

## **6. CONCLUSÃO**

As tecnologias que visam a valorização econômica de resíduos agroindustriais estão a cada nova pesquisa buscando maior interação com a realidade industrial, seja para produção de energia térmica e elétrica, fabricação de biomateriais ou biocombustíveis. Esses processos, principalmente da substituição parcial da utilização de combustíveis fósseis por meio da queima da biomassa, reduz os danos ambientais causados pela emissão de gases do efeito estufa, descarte em aterro sanitário ou despejo indevido no solo, além disso a extração de subprodutos com valor agregado, como é o caso da sílica extraída do processo de combustão controlada da casca de arroz, apresenta uma maneira de reduzir a extração de matéria-prima do meio ambiente colaborando para o desenvolvimento econômico sustentável.

A utilização da casca de arroz em caldeiras de combustão controlada para geração de energia térmica e posteriormente o uso das cinzas para produção de um composto com valor agregado, o qual pode ser utilizado em diferentes processos industriais, apresenta um ciclo fechado com geração de resíduo zero, onde todo o resíduo é convertido em energia e matéria-prima que poderão ser aplicados na construção civil, indústria de vidros, cerâmicas, etc.

Nesta revisão buscou-se o conhecimento de estudos referentes ao tratamento da casca de arroz e suas possíveis aplicações, demonstrando que o desenvolvimento de pesquisas nessa área é extremamente relevante, pois as variáveis a se considerar são amplas e deverão promover a utilização efetiva da biomassa obtida através do processo de beneficiamento dos resíduos da casca do arroz, já que é primordial o tratamento desses resíduos, sendo que o arroz encontra-se entre os cereais com maior produção em nível mundial, o que acarreta no grande volume de cascas de arroz geradas.

Ainda, por meio dessa revisão pode-se concluir que os diferentes processos de queima da CCA têm forte influência na estrutura e no teor de pureza da sílica obtida, principalmente quando se trata da temperatura utilizada no processo. Portanto, é fundamental que o processo de queima da CCA esteja de acordo com as aplicações finais desejadas que se deseja dar a sílica produzida.

## **7. REFERÊNCIAS**

- ABRAHAM, A.; MATHEW, A. K.; SINDHU, R.; PANDEY, A.; BINOD, P. Potential of rice straw for bio-refining: An overview. *Bioresource Technology*, [s.l.], v.215, p.29-36, set. 2016.
- ADAMS, F. V.; MULABA-BAFUBIANDI, A. F. Application of rice hull ash for turbidity removal from water. *Physics And Chemistry of the Earth, Parts A/b/c*, [s.l.], v.72-75, p.73-76, 2014.
- AHMED, M. N.; ABD EL-GAWAD, M. W.; MOHAMED, G. M.; ELSHAMI, A. A. Introducing rice husk after utilizing new technology as anticorrosive pigments in organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, [s.l.], v.101, p.309-321, 2016.
- ALVAREZ, J.; LOPEZ, G.; AMUTIO, M.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, [s.l.], v.128, p.162–169, 2014.
- ANTÓNIO, J.; TADEU, A.; MARQUES, B.; ALMEIDA, J. A. S.; PINTO, V. Application of rice husk in the development of new composite boards. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v.176, p.432-439, jul. 2018.

AWADALLAH, A. E.; SOLYMAN, S. M.; ABOUL-ENEIN, A. A.; AHMED, H. A.; ABOUL-GHEIT, N. A. K.; HASSA, S. A. Effect of combining Al, Mg, Ce or La oxides to extracted rice husk nanosilica on the catalytic performance of NiO during CO<sub>x</sub>-free hydrogen production via methane decomposition. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [s.l.], v.42, n.15, p.9858-9872, abr. 2017.

BAKAR, R. A.; YAHYA, R.; GAN, S. N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. *Procedia Chemistry*, [s.l.], v.19, p.189-195, 2016.

BAZARGAN, A.; BAZARGAN, M.; MCKAY, G. Optimization of rice husk pretreatment for energy production. *Renewable Energy*, [s.l.], v.77, p.512-520, 2015.

BEHAINNE, J. J. R.; MARTINEZ, J. D. Performance analysis of an air-blown pilot fluidized bed gasifier for rice husk. *Energy For Sustainable Development*, [s.l.], v.18, p.75-82, fev. 2014.

BLISSETT, R.; SOMMERVILLE, R.; ROWSON, N.; JONES, J.; LAUGHLIN, B. Valorisation of rice husks using a TORBED® combustion process. *Fuel Processing Technology*, [s.l.], v.159, p.247-255, maio 2017.

BORRESEN, E. C.; RYAN, E. P. Rice Bran: A Food Ingredient with Global Public Health Opportunities. In: WATSON, R.; PREEDY, V.; ZIBADI, S. (Eds). *Wheat And Rice In Disease Prevention And Health*, 2014. p.301-310.

CHEN, H.; WANG, W.; MARTIN, J. C.; OLIPHANT, A. J.; DOERR, P. A.; XU, J. F.; DEBORN, K. M.; CHEN, C.; SUN, L. Extraction of lignocellulose and synthesis of porous silica nanoparticles from rice husks: A comprehensive utilization of rice husk biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, [s.l.], v.1, p.254-259, 2013.

CHEN, G.; DUA, G.; MAA, W.; YANA, B.; WANG, Z.; GAO, W. Production of amorphous rice husk ash in a 500 kW fluidized bed combustor. *Fuel*, [s.l.], v.144, p.214-221, 2015.

CHOPRA, D.; SIDDIQUE, R.; KUNAL. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosystems Engineering, Índia*, v.130, p.72-80, fev. 2015.

DELLA, V.p.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters*, [s.l.], v.57, n.4, p.818-821, dez. 2002.

DENG, M.; ZHANG, G.; ZENG, A. Y.; PEI, X.; HUANG, R.; LIN, J. Simple process for synthesis of layered sodium silicates using rice husk ash as silica source. *Journal of Alloys and Compounds*, [s.l.], v.683, p. 412-417, 2016.

ELICHE-QUESADA, D.; FELIPE-SESÉ, M. A.; LÓPEZ-PÉREZ, J. A.; INFANTES-MOLINA, A. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. *Ceramics International*, [s.l.], v.43, n.1, p.463-475, 2017.

FANG, Y.; SUN, X.; YANG, W.; MA, N.; XIN, Z.; FU, J.; LIU, L.; LIU, M.; MARIGA, A. M.; ZHU, X.; HU, Q. Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China. *Food Chemistry*, [s.l.], v.147, p.147-151, mar. 2014.

FERNANDES, L.; SABINO, M. G.; ROSSETTO, H. L. Método de extração de sílica da casca do arroz. *Cerâmica*, [s.l.], v.60, p.160-163, 2014.

FERNANDES, I. J.; CALHEIRO, D.; KIELING, A. G.; MORAES, C. A. M.; ROCHA, T. L. A. C.; BREHM, F. A.; MODOLO, R. C. E. Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy. *Fuel*, [s.l.], v.165, p.351-359, 2016.

FERNANDES, I. J.; SÁNCHEZ, F. A. L.; JURADO, J. R.; KIELING, A. G.; ROCHA, T. L. A. C.; MORAES, C. A. M.; SOUSA, V. C. Physical, chemical and electric characterization of thermally treated rice husk ash and its potential application as ceramic raw material. *Advanced Powder Technology*, [s.l.], v.28, n.4, p.1228-1236, 2017.

FRANCO, D. S. P.; CUNHA, J. M.; DORTZBACHER, G. F.; DOTTO, G. L. Adsorption of Co (II) from aqueous solutions onto rice husk modified by ultrasound assisted and supercritical technologies. *Process Safety and Environmental Protection*, [s.l.], v.109, p.55-62, 2017.

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*, [s.l.], v.4, n.2, p.2278-2290, jun. 2016.

GU, S.; ZHOU, J.; LUO, Z.; WANG, Z.; NI, M. A detailed study of the effects of pyrolysis temperature and feed stock particle size on the preparation of nanosilica from rice husk. *Industrial Crops And Products*, [s.l.], v.50, p.540-549, out. 2013.

GU, S.; ZHOU, J.; YU, C.; LUO, Z.; WANG, Q.; SHI, Z. A novel two-staged thermal synthesis method of generating nanosilica from rice husk via pre-pyrolysis combined with calcination. *Industrial Crops And Products*, [s.l.], v.65, p.1-6, mar. 2015.

HE, J.; JIE, Y.; ZHANG, J.; YU, Y.; ZHANG, G. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites, *Cement & Concrete Composites*, [s.l.], v.37, p.108–118, 2013.

HOSSAIN, S. K. S.; MATHUR, L.; SINGH, P.; MAJHI, M. R. Preparation of forsterite refractory using highly abundant amorphous rice husk silica for thermal insulation. *Journal of Asian Ceramic Societies*, [s.l.], v.5, n.2, p.82-87, jun. 2017.

HUANG, A.; HSU, C.; HOU, B.; KUO, H. Production and separation of rice husk pyrolysis bio-oils from a fractional distillation column connected fluidized bed reactor. *Powder Technology*, [s.l.], v.323, p.588-593, jan. 2018.

HSU, C.; HUANG, A.; KUO, H. Analysis of the Rice Husk Pyrolysis Products from a Fluidized Bed Reactor. *Procedia Engineering*, [s.l.], v.102, p.1183-1186, 2015.

KOOK, J. W.; CHOI, H. M.; KIM, B. H.; RA, H. W.; YOON, S. J.; MUN, T. Y.; KIM, J. H.; KIM, Y. K.; LEE, J. G.; SEO, M. W. Gasification and tar removal characteristics of rice husk in a bubbling fluidized bed reactor. *Fuel*, [s.l.], v.181, p.942-950, out. 2016.

KWOFIE, E. M.; NGADI, M.; SOTOCINAL, S. Thermodynamic evaluation of a rice husk fired integrated steam and hot air generation unit for rice parboiling. *Energy*, [s.l.], v.128, p.39-49, jun. 2017.

LEE, J. H.; KWON, J. H.; LEE, J.; LEE, H.; CHANG, J. H.; SANG, B. Preparation of high purity silica originated from rice husks by chemically removing metallic impurities. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, [s.l.], v.50, p.79-85, jun. 2017.

LIM, J. S.; MANAN, Z. A.; ALWI, S. R. W.; HASHIM, H. A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, [s.l.], v.16, n.5, p.304-3094, 2012.

LIU, Y.; WANG, Z.; ZENG, H.; CHEN, C.; LIU, J.; SUN, L.; WANG, W. Photoluminescent mesoporous carbon-doped silica from rice husks. *Materials Letters, China*, v.142, p.280-282, mar. 2015.

LIU, Y.; WANG, Y.; GUO, F.; LI, X.; LI, T.; GUO, C.; CHANG, J. Characterization of the gas releasing behaviors of catalytic pyrolysis of rice husk using potassium over a micro-fluidized bed reactor. *Energy Conversion And Management, China*, v.136, p.395-403, mar. 2017.

MANATURA, K. T.; LU, J.; WU, K.; HSU, H. Exergy analysis on torrefied rice husk pellet in fluidized bed gasification. *Applied Thermal Engineering, Taiwan*, v.111, p.1016-1024, jan. 2017.

MATAVELI, L. R. V.; BUZZO, M. L.; ARAUZ, L. J.; CARVALHO, M. F. H.; ARAKAKI, E. E. K.; MATSUZAKI, R.; TIGLEA, P. Total Arsenic, Cadmium, and Lead Determination in Brazilian Rice Samples Using ICP-MS. *Journal Of Analytical Methods In Chemistry*, [s.l.], v.2016, p.1-9, 2016.

MEBERT, A. M.; BAGLOLE, C. J.; DESIMONE, M. F.; MAYSINGER, D. Nano engineered silica: Properties, applications and toxicity. *Food And Chemical Toxicology*, [s.l.], v.109, p.753-770, nov. 2017.

MEJÍA, J. M.; GUTIÉRREZ, R. M.; MONTES, C. Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v.118, p.133-139, abr. 2016.

MOHAMED, R. M.; MKHALID, I. A.; BARAKAT, M. A. Rice husk ash as a renewable source for the production of zeolite and its characterization. *Arabian Journal of Chemistry*, [s.l.], v.8, n.1, p.4-53, 2015.

MOR, S.; CHHODEN, K.; RAVINDRA, K. Application of agro-waste rice husk ash for the removal of phosphate from the waste water. *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v.129, p.673-680, 2016.

OLUPOT, P.W.; CANDIA, A.; MENYA, E.; WALOZI, R. Characterization of rice husk varieties in Uganda for biofuels and their techno-economic feasibility in gasification. *Chemical Engineering Research and Design*, [s.l.], v.107, p.63-72, 2016.

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

PRASARA-A, J.; GHEEWALA, S. H. Sustainable utilization of rice husk ash from Power plants: A review. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v.167, p.1020-1028, nov. 2017.

ROSA, L.C.; SANTOR, C.G.; LOVATO, A.; ROSA, C.S.; GUTHS, S. Use of rice husk and sunflower stalk as a substitute for glass wool in thermal insulation of solar collector. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v.104, p.90-97, 2015.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Use of Rice Husk-Bark ash in producing self-compacting concrete. *Advances in Civil Engineering*, [s.l.], v.2014, p.1-6, 2014.

SANKAR, S.; SHARMA, S.K.; KAUR, N.; LEE, B.; KIM, D. Y.; LEE, S.; JUNG, H. Biogenerated silica nanoparticles synthesized from sticky, red, and brown rice husk ashes by a chemical method. *Ceramics International*, [s.l.], v.42, n.4, p.4875-4885, 2016.

SANTASNACHOK, C.; KURNIAWAN, W.; HINODE, H. The use of syntheses sized zeolites from power plant rice husk ash obtained from Thailand as adsorbent for cadmium contamination removal from zinc mining. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [s.l.], v.3, n.3, p.2115-2126, set. 2015.

SHARMA, N. K.; WILLIAMS, W. S.; ZANGVIL, A. Formation and Structure of Silicon Carbide Whiskers from Rice Hulls. *Journal Of The American Ceramic Society*, [s.l.], v.67, n.11, p.715-720, nov. 1984.

SHEN, Y. Rice husk silica derived nanomaterials for sustainable applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v.80, p.453–466, nov. 2016.

SOBROSA, F.Z.; STOCHERO, N.P.; MARANGON, E.; TIER, M.D. Development of refractory ceramics from residual silica derived from rice husk ash. *Ceramics International*, [s.l.], v.43, n.9, p.7142-7146, 2017.

SOLTANI, N.; BAHRAMI, A.; PECH-CANUL, M. I.; GONZALES, L. A. Review on the physic chemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*, [s.l.], v.264, p.899-935, mar. 2015.

STEMPFLE, F.; RITTER, B. S.; MULHAUPT, R.; MECKING, S. Long-chain aliphatic polyesters from plant oils for injection molding, film extrusion and electro spinning. *Green chemistry*, [s.l.], v.6, p. 2008-2014, 2014.

THAKKAR, M.; MAKWANA, J. P.; MOHANTY, P.; SHSH, M.; SINGH, V. In bed catalytic tar reduction in the auto thermal fluidized bed gasification of rice husk: Extraction of silica, energy and cost analysis. *Industrial Crops And Products*, [s.l.], v.87, p.324-332, set. 2016.

TOUHAMI, D; ZHU, Z; BALAN, W. S; JANAUN, J; HAYWOOD, S; ZEIN, S. H. Characterization of rice husk-based catalyst prepared via conventional and microwave carbonisation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [s.l.], v.5, n.3, p.2388-2394, jun. 2017.

YALÇIN, N.; SEVINÇ, V. Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramics International*, [s.l.], v.27, n.2, p.219-224, jan. 2001.

YU, X.; TIAN, J.; XIE, H.; SHEN, H.; WANG, Q. The integrated production of microbial lipids and bio-SiO<sub>2</sub> from rice husks by anorganic electrolytes pretreatment technology. *Bioresource Technology*, [s.l.], v.153, p.403-407, fev. 2014.

ZHANG, C.; LIN, J. Defect-related luminescent materials: synthesis, emission properties and applications. *Chemical Society Reviews*, [s.l.], v.41, n.23, p.7938-7961, 2012.

ZHANG, S.; GAO, H.; LI, J.; HUANG, Y.; ALSAEDI, A.; HAYAT, T.; XU, X.; WANG, X. Rice husks as a sustainable silica source for hierarchical flower-like metal silicate architectures assembled into ultrathin nanosheets for adsorption and catalysis. *Journal Of Hazardous Materials*, [s.l.], v.321, p.92-102, jan. 2017.

ZHAO, Y.; SUN, S.; CHE, H.; GUO, Y.; GAO, C. Characteristics of cyclone gasification of rice husk. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [s.l.], v.37, n.22, p.16962-16966, nov. 2012.