

Artigo

Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e Potencialidades

Cacuro, T. A.; Waldman, W. R.*

Rev. Virtual Quim., 2015, 7 (6), 2154-2165. Data de publicação na Web: 7 de julho de 2015

<http://www.uff.br/rvq>**Fly-Ash from Biomass Burning: Applications and Potentialities**

Abstract: Brazil is one of the largest agricultural producers in the world and the disposal of its waste is an economic and environmental concern. With the emergence of newer opportunities in bioenergy, this article discusses some of the various lines of research on characterization and utilization of ashes, the final residue after burning the bagasse sugarcane and several kinds of biomass in thermoelectric. Ashes are a complex material, chemical and morphologically heterogeneous, composed of particles as cenospheres, silicates and unburned carbons. Some of the uses addressed in this paper are its use as adsorbents for industrial wastewater treatment, the use of cenospheres in composites, the use of the ash in construction as inert or pozzolanic materials and their use in agriculture as a source of nutrients and correction soil pH. We hope this article help to foster the interface of the chemistry community in Brazil and the research lines disclosed herein.

Keywords: Ashes; Fly-ash; Composites; Adsorption; Agroindustrial wastes.

Resumo

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo e a destinação de seus resíduos é uma preocupação econômica e ambiental. Com o surgimento das recentes oportunidades em bioenergia, este artigo aborda algumas das diversas linhas de pesquisa sobre caracterização e utilização de cinzas, o resíduo final após a queima do bagaço da cana-de-açúcar e de biomassa várias em termoelétricas. As cinzas são um material complexo, de composição química e morfológica heterogênea, compostas por partículas como cenosferas, silicatos e *unburned carbons*. Algumas das utilizações abordadas neste artigo são a sua utilização como adsorventes para tratamento de efluentes industriais, a utilização de cenosferas na confecção de compósitos, a utilização das cinzas na construção civil como material inerte ou pozzolânico e seu uso na agricultura como fonte de nutrientes e correção de pH do solo. Esperamos que este artigo auxilie a fomentar a interface da comunidade química no Brasil com as linhas de pesquisa aqui divulgadas.

Palavras-chave: Cinzas; Cinzas volantes; Compósitos; Adsorção; Resíduos agroindustriais.

* Universidade Federal de São Carlos campus Sorocaba Rodovia João Leme dos Santos, km 110, Itinga, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

✉ walter@ufscar.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20150127](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150127)

Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e Potencialidades

Thiago A. Cacuro, Walter R. Waldman*

Universidade Federal de São Carlos campus Sorocaba Rodovia João Leme dos Santos, km 110, Itinga, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

* walter@ufscar.br

Recebido em 27 de abril de 2015. Aceito para publicação em 23 de junho de 2015

1. Introdução
2. Características Gerais das Cinzas
3. Principais Utilizações das Cinzas
 - 3.1. Construção Civil
 - 3.2. Utilização na Agricultura
 - 3.3. Cenosferas
 - 3.4. Compósitos
 - 3.5. Adsorvente
4. Conclusão

1. Introdução

Este artigo tem como objetivo a divulgação da linha de pesquisa de cinzas provenientes da queima de biomassas, destacando suas potencialidades e aplicações tecnológicas, para fomentar a agregação de valor a este resíduo, tornando os processos de queima mais ambientalmente amigáveis e interessantes do ponto de vista econômico. Neste trabalho foram usadas bibliografias sobre a utilização de cinzas provenientes de biomassas de fontes diversas, como exemplos de utilizações e para ilustrar algumas possíveis potencialidades.

Em todo o mundo são gerados milhões de toneladas de resíduos provenientes de atividades agroindustriais,^{1,2} e o Brasil, como potência agrícola, é um dos maiores

produtores de resíduos agroindustriais do mundo. Dentre as principais culturas agroindustriais, podemos citar a soja, com 283,54 milhões de toneladas por ano,³ o milho, com 989,7 milhões de toneladas por ano,⁴ e a cana-de-açúcar, com 175 milhões de toneladas ano.^{5,6} A destinação dos resíduos gerados pelo processo de produção destas culturas é um problema, pois o seu descarte adequado representa um custo a mais no processo, além de representar um problema ambiental devido a sua contínua disposição no meio ambiente.⁴ Encontrar aplicações agregando valor a estes resíduos torna o processo produtivo mais sustentável, pois impede o impacto ao meio ambiente relativo ao descarte do resíduo e diminui o custo do tratamento deste resíduo para sua disposição.⁷

Na produção de álcool e açúcar, por

exemplo, a partir da cana-de-açúcar, podemos citar como resíduos gerados o bagaço, a torta de filtro, a vinhaça e a água de lavagem.⁸ O bagaço tem despertado interesse devido ao seu baixo custo e seu potencial calorífico, chegando a 4000 kcal/kg em condições ideais, em contraste com o potencial calorífico do carvão mineral que é 6000 kcal/kg,⁹ o que configura um bom custo benefício devido ao seu baixo custo de obtenção.⁸ Por esse motivo, seu principal uso é como combustível em fornalhas,^{10,11,12} aproximadamente 95 % de todo resíduo de bagaço gerado.¹³

A utilização do bagaço da cana-de-açúcar como combustível gera outros sub-resíduos: a fuligem (partículas muito finas, resultantes da combustão e que se depositam na caldeira), as cinzas geradas na caldeira e as cinzas volantes (*fly ash*, em inglês). As cinzas volantes podem ser definidas como as partículas finas que se levantam junto com os gases gerados pela combustão, são capturadas nas chaminés, geralmente por filtros hidrostáticos, antes que sejam liberadas para o ambiente.¹⁴

A composição das cinzas podem variar de acordo com o material utilizado e com os parâmetros do processo de incineração, como a temperatura, o tempo de incineração e a porcentagem de umidade do material incinerado, configurando-se assim como um material de composição e morfologia heterogêneas.¹¹ A média de geração de cinzas pela combustão é de 6,2 kg de cinzas para cada 260 kg de bagaço de cana-de-açúcar seco incinerado,¹³ com isso gerando uma proporção de em média 24 g de cinzas para cada 1 quilograma de bagaço total queimado (2,4 % em massa).

2. Características Gerais das Cinzas

As cinzas possuem uma composição heterogênea tanto em sua morfologia, com partículas de diferentes formas e tamanhos, quanto em sua composição química, variando em função dos parâmetros do processo de

incineração como a temperatura e o tempo de incineração e do tipo de biomassa incinerada.¹ Portanto, as propriedades de cinzas obtidas de diferentes biomassas, e até de cinzas de mesma biomassa obtidas com diferentes parâmetros de queima, podem variar e, conseqüentemente, sua eficiência nas diferentes aplicações.^{1,6,8}

Em relação à morfologia, as cinzas são compostas principalmente por três tipos de partículas:^{8,16}

- O material orgânico das cinzas, também conhecido na literatura como *unburned carbon* ou carbono não queimado (Figura 1A), é o resíduo dos materiais lignocelulósicos, sendo sua quantidade dependente da eficiência do processo de combustão e porcentagem de água no bagaço. Quando encontrado em grande quantidade, é indício de uma baixa eficiência no processo de incineração.^{17,18}
- Partículas de silicatos, dióxido de silício (SiO₂), (Figura 1B) compõe cerca de 60 % das cinzas e são derivadas da areia e do quartzo oriundo da lavoura que se fixam ao material e permanecem nele mesmo após a lavagem, persistindo após a incineração. São encontradas como sílica amorfa e na forma de cristais.^{8,15,18} Em análises de EDS feitas pelos autores (Figura 2), pode-se observar que o silicato é o componente da cinza mais rico em silício.
- Durante o processo de incineração são formadas espécies de óxidos de diferentes metais, que se agregam formando as partículas conhecidas como cenosferas (Figura 1C e 1D), compostas de óxidos como K₂O, MgO, P₂O₅ e CaO,¹⁴ que representam cerca de 32 % das cinzas. Podem ser visualizadas em diferentes tamanhos e com diferentes morfologias, sendo as cenosferas encontradas ocas, com ou sem poros e também variando quanto a sua composição.^{19,20}

Apesar da variação na porcentagem de partículas orgânicas (*unburned carbons*) presentes nas cinzas variar de acordo com os parâmetros do processo de incineração e a umidade do material, a relação entre as

partículas inorgânicas é de aproximadamente 1/3 de cenosferas para 2/3 de silicatos.^{2,20}

A diferença na morfologia das cenosferas mostrada nas figuras 1C, cenosferas de cinzas

volantes, e 1D, cenosferas de cinzas da caldeira, se deve à diferença de condições de queima, em diferentes lugares de um mesmo processo.

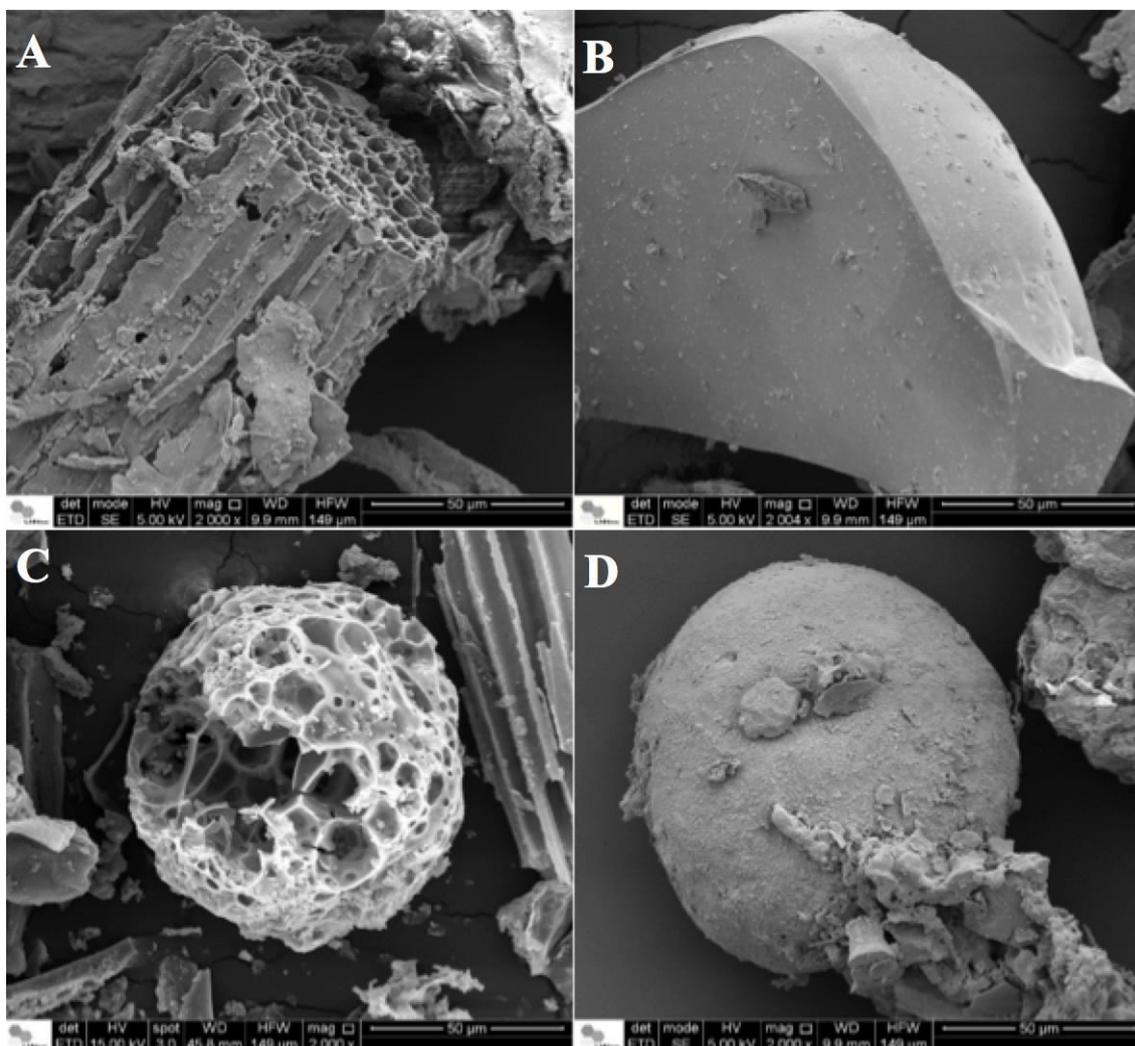


Figura 1. Componentes de cinzas da queima de biomassa: partículas de matéria orgânica (A); partículas de sílica (B). Partículas esféricas (cenosferas) de óxidos metálicos, presente nas cinzas volantes (C) e presente nas cinzas da caldeira (D). Micrografias obtidas no desenvolvimento da dissertação de mestrado de um dos autores deste artigo e já apresentadas em evento científico²¹

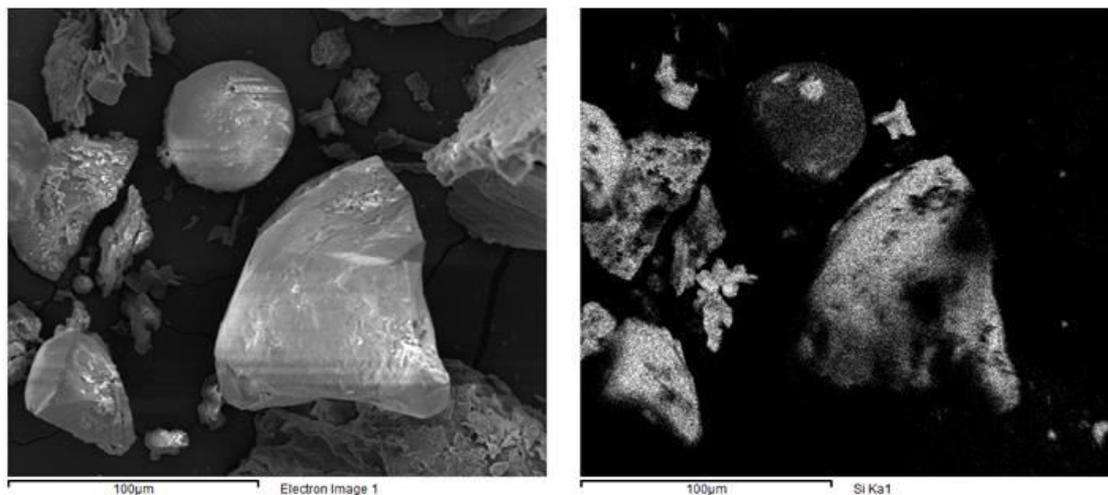


Figura 2. Micrografia de silicato junto à cenosfera (esquerda) e EDS na mesma região para o silício (direita). *Resultado obtido no trabalho de mestrado desenvolvido pelos autores deste trabalho. As condições e equipamentos usados para a obtenção destes resultados foram as mesmas do trabalho apresentado no VII MICROMAT ²¹

3. Principais Utilizações das Cinzas

3.1. Construção Civil

Sendo um resíduo com baixo valor agregado e grande quantidade de sílica, as cinzas são uma alternativa atraente e viável para substituição da areia em construção civil.^{22,8}

Embora a areia seja um material de baixo custo, sua logística de transporte causa um aumento de seu custo final.²³ Com o uso de cinzas consegue-se um menor custo, aumentando a eficiência na produção de materiais cimentícios pela redução dos custos. Este uso também diminui o impacto ambiental das usinas de beneficiamento de cana-de-açúcar pela reutilização do resíduo gerando lucro, que de outra forma geraria custos com seu tratamento e descarte.^{8,24,25,26} O processo de incorporação das cinzas como material inerte em substituição parcial de outros materiais de maior custo, apesar de usual, agrega pouco valor ao material.

Há aplicação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na preparação de materiais cimentícios onde o material não seja usado como inerte e sim com incremento de

propriedades do cimento. No caso das cinzas, caso elas auxiliem na propriedade aglomerante que forma os materiais cimentícios, diz-se que este material tem "atividade pozolânica". Pozolana é definida por "material silicoso ou sílico-aluminoso que, quando finamente moído e na presença de água, gera propriedades aglomerantes e reagentes com hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentícias."²⁷ A atividade pozolânica das cinzas se dá, portanto, devido à presença de sílica amorfa, que reagindo com o hidróxido de cálcio forma silicatos de cálcio hidratado que faz a reação de aglomeração necessária para as propriedades cimentícias.^{2,8} A quantidade de sílica amorfa encontrada nas cinzas pode variar de acordo com o processo de incineração, como mostrado no trabalho de Souza *et al.* (2007)¹¹ que caracterizou e avaliou essa atividade comparando-a com o cimento Portland em eficiência quanto à atividade pozolânica. Segundo os autores, os resultados atenderam ao requisito da NBR 12653:1992 de índice de atividade pozolânica mínimo superior a 75%.²⁸

Macedo⁸ investigou o uso de cinzas em argamassas, qualificando o produto de acordo com sua atividade pozolânica e chegou a resultados satisfatórios quanto à

substituição parcial de material argiloso pelas cinzas de cana-de-açúcar.

O uso de cinzas para atividade pozolânica diminui o impacto ambiental e o custo da preparação de materiais cimentícios, pois substitui compostos de maior custo, evitando, ao mesmo tempo, a disposição das cinzas no ambiente, tornando o processo de fabricação de materiais cimentícios mais sustentável.² No entanto melhores estudos ainda se fazem necessários para melhorar a atividade pozolânica através da maior obtenção de sílica amorfa nas cinzas, através de um melhor controle do processo de incineração. Ainda é necessário o desenvolvimento de um processo ideal de incineração quanto ao tempo e a temperatura, para a obtenção de cinzas mais padronizadas, com menor custo e maior quantidade de sílica amorfa.^{29,30,2}

3.2. Utilização na Agricultura

As cinzas e as tortas de filtro são resíduos comumente encontrados e amplamente utilizados como adubo em lavouras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.³¹ Dentre as vantagens no uso das cinzas na agricultura podemos destacar sua utilização como corretor de pH do solo, pois as cinzas têm pH alcalino.¹⁵ Esta alcalinização do solo pode ser explicada segundo o autor, devido a liberação pelas cinzas no solo de íons Ca^{2+} , Na^+ , Al^{3+} e íons de OH^- .³² As cinzas também podem ser usadas para melhorar a capacidade de retenção da água devido ao aumento da microporosidade do solo com a disposição das cinzas.^{15,33}

Como exemplos de utilização temos o trabalho de Garg *et al.*³⁴ que estudou as alterações nas propriedades químicas e físicas do solo com a utilização de cinzas volantes e seu efeito sobre o rendimento e o crescimento do trigo plantado, observando um aumento no rendimento deste em comparação com o solo não tratado. Também foi observada redução na

densidade, aumento na condutividade hidráulica saturada e na umidade do solo, além de um aumento na capacidade de retenção do solo.

Basu *et al.*¹⁴ fez uma revisão sobre a utilização das cinzas na agricultura e destacou como principais vantagens em sua utilização: a) a capacidade de melhorar as propriedades do solo, como a mudança da textura do solo com a utilização de quantidades controladas de cinzas, b) o controle de pH do solo e c) o aumento da capacidade de retenção de água pelo solo. Quanto à sua utilização para nutrição do solo, destaca que as cinzas volantes possuem nutrientes essenciais para o solo como Cálcio, Ferro, Manganês e Potássio, além de elementos como Boro, Selênio e Molibdênio. Porém também possui metais que podem ser tóxicos para as plantas, como o alumínio, por exemplo, portanto sua utilização deve ser feita com cautela, pois embora estes elementos sejam nutrientes necessários para as plantas, caso sejam depositados no solo em grandes quantidades podem causar toxicidade, como no caso do Boro, um micronutriente que em grandes quantidades é tóxico às plantas.

A utilização de cinzas na agricultura é considerada por muitos como ambientalmente correta, devido à utilização de todos os resíduos no processo de produção³³ Jala³⁵, no entanto, destaca que não são levadas em conta a acumulação e a persistência destas cinzas, que devido a sua lenta degradação, podem levar a um problema ambiental ainda maior caso ocorra uma incorreta utilização deste resíduo, devido a acumulação de componentes presentes nas cinzas que se em grandes quantidades apresentam toxicidade as plantas. Uma grande barreira para a utilização das cinzas como nutriente na agricultura é seu baixo nível de Nitrogênio, nutriente essencial na agricultura.¹⁵

3.3. Cenóferas

Cenóferas são produzidas durante a incineração e são compostas por uma mistura de óxidos metálicos. Sua morfologia e composição são variadas.²² Nas Figuras 3A e 3B pode-se observar a abundância elementar relativa obtida de uma amostra de cinzas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), uma ferramenta do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os pontos em vermelho mostram a abundância relativa de cada óxido nas amostras visualizadas. Cenóferas são materiais porosos e por isso podem ser usadas como isolantes térmicos. A sua porosidade, aliada à sua composição (mistura de óxidos metálicos), permite sua utilização como catalisadores.³⁶

Devido ao potencial e às suas variadas aplicações, as cenóferas estão sendo alvo de diversos estudos e já apresentam algumas aplicações industriais como visto em Deepthi *et al.*³⁷, que estudou a utilização das cenóferas de cinzas volantes como agregado em concentrações de 10% a 30% de cenóferas, para aumentar a resistência de compósitos com polietileno de alta densidade, além de aumentar resistência a

tração e diminuir densidade. Para aumentar a interação entre a matriz orgânica do polietileno e o material inorgânico, foi realizado um tratamento na superfície das cenóferas com um agente de ligação de silano e o maleato de HDPE-g-dibutil como agente de compatibilização com a matriz polimérica. O autor mostra que a utilização das cinzas expostas ao tratamento aumentou as propriedades mecânicas de resistência a tração e a estabilidade térmica do compósito.

Já Rohatgi *et al.*¹⁹ usou as cenóferas como material de preenchimento, para confecção de compósitos de poliéster e cinzas volantes. Os compósitos mostraram um aumento no módulo de elasticidade, com melhor resultado para 4.9% em volume de cenóferas quando comparados com a matriz de poliéster pura, no entanto acima de 22% em volume de cenóferas, há uma perda de resistência no compósito. Assim com um aumento de mais de 110% no módulo de elasticidade, e apenas uma ligeira diminuição na sua resistência, o compósito estudado representa uma possibilidade de diminuição significativa no peso final nas estruturas confeccionadas devido à estrutura “oca” das cenóferas.

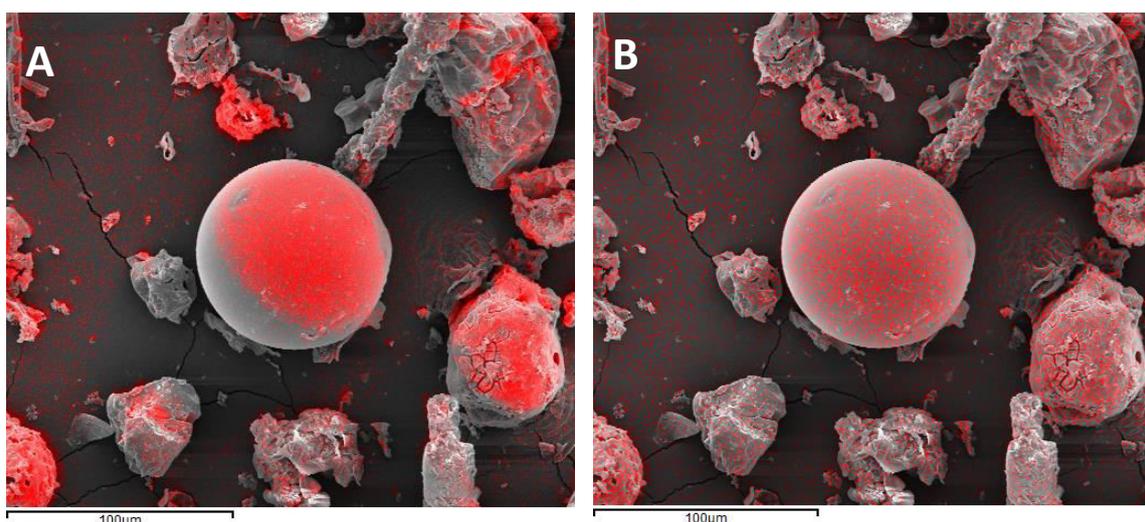


Figura 3. EDS das cinzas de cana-de-açúcar no espectro do alumínio (A) e no espectro do ferro (B), onde os pontos em vermelho demonstram a abundância relativa do elemento. Micrografias obtidas no desenvolvimento da dissertação de mestrado de um dos autores deste artigo

3.4. Compósitos

Compósitos são materiais multicomponentes, compostos por pelo menos dois materiais com propriedades distintas, interfaceados entre si. Podem ser feitos compósitos a partir de combinações, por exemplo, entre metais, polímeros e cerâmicas. Um compósito deve ter uma propriedade distinta dos materiais isolados usados no compósito.^{38,39}

Apesar da utilização das cenosferas na confecção de compósitos, como vista no item anterior, as cinzas como um todo, sem separação, também são utilizadas como agregado para a preparação de compósitos. A utilização de cinzas em compósitos é uma atividade relativamente nova quando comparada com a utilização das cinzas em construção civil, no entanto já possui um significativo conjunto de estudos na literatura, além de apontar para um significativo potencial econômico.^{40,39,41}

Nath *et al.*⁴² preparou compósitos de cinzas volantes modificados com hidróxido de sódio (NaOH) em matriz de álcool polivinílico (PVA) que apresentaram boa resistência mecânica e biodegradabilidade. Em outro trabalho, do mesmo grupo de pesquisa, Nath *et al.*⁴³ preparou compósitos de polipropileno isostático (PP) reforçados com cinzas volantes nas proporções 20, 45 e 60 % em massa. Observou-se um acréscimo em sua elasticidade e resistência no teste de tração nos compósitos com 20 % de cinzas volantes em comparação com o PP puro.

Sengupta e Mukhopadhyay,⁴⁴ prepararam um compósito com uma proposta sustentável, utilizando dois resíduos: cinza volante e polipropileno reciclado. As cinzas volantes foram modificadas com ácido palmítico em diversas concentrações e incorporadas à matriz de PP, que apresentou aumento na resistência à tração.

Como exemplo de compósitos inorgânicos, Purnomo⁴⁵ estudou a viabilidade de cinzas como fonte de carbono para a

preparação de compósitos zeólito/grafite. Subramaiana *et al.*⁴⁶ encontrou nas cinzas volantes uma fonte de carbono utilizando os materiais carbonosos (*unburned carbon*) que não foram totalmente incinerados, para a preparação de carbono poroso como adsorvente e suporte de catalisador para a remoção de COV (Compostos orgânicos voláteis).

3.5. Adsorvente

As cinzas são uma alternativa de baixo custo e ambientalmente correta para o tratamento de efluentes industriais. Devido a sua eficácia no uso como adsorvente, as cinzas se mostram uma alternativa viável de custo reduzido ao tradicional uso do carvão ativado para retirada de íons metálicos e corantes de efluentes aquáticos.^{47,48}

A atividade adsorvente das cinzas ocorre principalmente devido às partículas conhecidas como carbono não queimado (*unburned carbon*), portanto sua capacidade adsorvente está diretamente ligada à quantidade destas partículas nas cinzas.

Barbosa *et al.*⁴⁷ testaram a eficácia da utilização de cinzas volantes de biomassa na retirada de íons chumbo de efluentes aquáticos de esgoto industrial, com redução dos níveis de Pb^{2+} nos esgotos industriais após o tratamento com as cinzas. Cetin e Pehlivan⁴⁹ comparou as cinzas volantes da queima do carvão com o carvão ativado quanto à capacidade de remoção de níquel (Ni^{2+}) e zinco (Zn^{2+}) em solução aquosa. As cinzas volantes apresentaram baixa adsorção de metais quando comparadas com o carvão ativo, no entanto segundo o autor, as cinzas volantes possuem uma cinética de adsorção aceitável para o processo, com a vantagem de redução do custo do processo devido ao baixo custo das cinzas volantes. Taha⁵⁰ obteve 95 % de retirada de Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , e Cr^{2+} com o uso de cinzas volantes de bagaço da cana-de-açúcar para tratamento de águas de esgoto industrial. Shah *et al.*⁵¹ utilizou as

cinzas volantes do bagaço da cana-de-açúcar para a síntese de zeólitos através do método de tratamento hidrotérmico para a retirada de chumbo (Pb^{2+}) e Cádmio (Cd^{2+}) de efluentes aquosos. Obtendo um zeólito com alta capacidade de retirada destes metais de soluções aquosas.

Shah *et al.*⁴⁸ caracterizou as cinzas volantes do bagaço de cana-de-açúcar e determinou, em comparação com outros tipos de cinzas, sua capacidade de adsorção aplicada ao tratamento de efluentes aquáticos contaminados com corantes. Observou-se melhor porosidade e capacidade de adsorção para as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar quando comparado com outros tipos de cinzas propostos no trabalho. Determinou-se também que as cinzas volantes são eficazes e de baixo custo para tratamento de efluentes com corantes. Kumar *et al.*⁵² testou o uso de cinzas volantes como adsorventes para a retirada de azul de metileno de soluções aquosas, chegando à conclusão que as cinzas volantes mostram eficiência na remoção de azul de metileno de soluções aquosas tendo sua melhor eficiência de adsorção em soluções com pH 8.

4. Conclusão

Diversas alternativas viáveis para a destinação e reutilização das cinzas estão sendo pesquisadas, desenvolvidas e outras já praticadas. Como principais exemplos de utilização das cinzas temos a utilização como material inerte na construção civil e como material com atividade pozolânica na confecção de concretos, no entanto esta utilização depende das quantidades de sílica amorfa presentes nas cinzas. Outro exemplo de utilização é como adsorvente, em substituição ao carvão ativado na retirada de metais e corantes de meios aquosos, que mesmo tendo uma atividade adsorvente menor que a do carvão ainda se mostra uma alternativa viável pelo seu baixo custo de obtenção. A maior barreira para a utilização das cinzas em larga escala em suas diversas

potencialidades é a sua heterogeneidade, devido à falta de padronização no processo de queima. Este é um fator que dificulta a sua utilização pela indústria, que necessita de uniformidade da matéria prima para ser utilizada em seus processos produtivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME), do Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), em Campinas/SP, pelo uso das instalações e equipamentos, à Capes pela concessão da Bolsa de estudos e ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji, pelas sugestões na escrita do artigo.

Referências Bibliográficas

- Teixeira, S. R.; de Souza, A. E.; Santos, G. T. A.; Peña, A. F. V.; Miguel, A. G. Sugarcane bagasse ash as a potential quartz replacement in red ceramic. *Journal of the American Ceramic Society* **2008**, *91*, 1883. [CrossRef]
- Cordeiro, C. C.; Filho, R. D. T.; Fairbairn, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. *Química Nova* **2009**, *32*, 82. [CrossRef]
- SEAB – Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento Rural Departamento de Economia Rural. Soja – Análise da Conjuntura Agropecuária. Novembro de 2013. [Link]
- Sítio da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Índice de Safras. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>>. Acesso em: 12 março 2015.
- UNICA. Setor Sucroenergético - Mapa da Produção. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&acao=visualizar&idTabela=1610&safra=2013%2F2014&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2>>

[CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR>](#). Acesso em: 11 março 2015.

⁶ Sítio da Statista. Produção de Cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.statista.com/statistics/249679/total-production-of-sugar-worldwide/>>.

Acesso em: 10 março 2015.

⁷ Spadotto, C. A. Gestão de Resíduos: Realizações e desafios no setor sucroalcooleiro. EMBRAPA Meio Ambiente. Disponível em: <<http://webmail.cnpma.embrapa.br/download/p/360.pdf>>. Acesso em: 27 agosto 2014.

⁸ Macedo, P. C.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual Paulista, 2009. [Link]

⁹ Paoliello, J. M. M.; *Dissertação de mestrado*, Universidade Estadual Paulista, 2006. [Link]

¹⁰ Barbieri, L.; Andreola, F.; Lancellotti, I.; Taurino, R. Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorization in clay matrix bricks. *Waste Management* **2013**, *33*, 2307. [CrossRef]

¹¹ Souza, G. N.; Formagini, S.; Custódio, F. O.; Silveira, M. M.; *Resumos do 49º Congresso Brasileiro Do Concreto*, São Paulo, Brasil, 2007.

¹² Fiomari, M. C.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual Paulista, 2004. [Link]

¹³ Federação Das Indústria Do Estado De São Paulo/ Centro das Indústrias Do Estado de São Paulo. Boletim Informativo. Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar). São Paulo, 2001, 90. [Link]

¹⁴ Basu, M.; Pande, M.; Bhadoria, P. B. S.; Mahapatra, S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Progress in Natural Science* **2009**, *19*, 1173. [CrossRef]

¹⁵ Ahmaruzzaman, M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* **2010**, *36*, 327. [CrossRef]

¹⁶ Maroto - Valer, M. M.; Taulbee, D. N.; Hower, J. C. Characterization of differing forms of unburned carbon present in ash

separated by density gradient centrifugation. *Fuel* **2001**, *80*, 800. [CrossRef]

¹⁷ Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Tavares, L. M.; Fairbairn, E. R. M. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement & Concrete Composites* **2008**, *30*, 410. [CrossRef]

¹⁸ Hwang, J. Y.; Sun, X.; Li, Z. Unburned Carbon from Fly Ash for Mercury Adsorption: I. Separation and Characterization of Unburned Carbon. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering* **2002**, *1*, 39. [Link]

¹⁹ Rohatgi, K. P.; Matsunaga, T.; Gupta, N. Compressive and ultrasonic properties of polyester/fly ash composites. *Journal of Material Science* **2009**, *44*, 1485. [CrossRef]

²⁰ Vassilev, S. V.; Vassileva, G. C. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel* **2007**, *86*, 1490. [CrossRef]

²¹ Cacuro, T. A.; Waldman, W. R.; *Resumos do VIII Congresso de microscopia de materiais*, Campinas, Brasil, 2014.

²² González, A.; Navia, R.; Moreno, N. Fly ashes from coal and petroleum coke combustion: current and innovative potential applications. *Waste Management & Research* **2009**, *27*, 976. [CrossRef]

²³ Petrucci, G. R. *Concreto de cimento Portland*. Ed. Globo: São Paulo, 1978.

²⁴ Santos, M. R.; Formagini, S. *Resumos da Internacional ACI/CANMET Conference On High Performance Concrete Structures And Materials*, Manaus, Brasil, 2008. [Link]

²⁵ Valenciano, M. C.; Freire, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola* **2004**, *24*, 484. [Link]

²⁶ Bayat, B. Combined removal of zinc (II) and cadmium (II) from aqueous solutions by adsorption onto high-calcium Turkish fly ash. *Water Air Soil Pollution* **2002**, *136*, 69. [CrossRef]

²⁷ Massazza, F.; Lea's, E. *Em Chemistry of Cement and Concrete*; Hewlett, P. C., ed.; J. Wiley: New York, 1988, cap. 10.

- ²⁸ ABNT NBR 12653:1992. Materiais pozolânicos – Especificação *apud* Freitas, E.S. Caracterização Da Cinza Do Bagaço Da Cana-De-Açúcar Do Município de Campos Dos Goytacazes Para Uso Na Construção Civil. Dissertação de mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes/RJ, 2005. [\[Link\]](#)
- ²⁹ Nunes, I. H. S.; Vanderlei, R.V.; M.; Secchi, M.; ABE, M. A. P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. *Revista Tecnológica* **2008**, *17*, 39. [\[Link\]](#)
- ³⁰ Ganesan, K.; Rajagopal, K.; Thagavel, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites* **2007**, *29*, 515. [\[CrossRef\]](#)
- ³¹ Lima, S. A.; Sales, A.; Moretti, J. P.; Almeida, F. C. R.; Santos, T. J.; *Resumos do VI Congresso Internacional Sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas*, Córdoba, Argentina, 2010.
- ³² Pandey, V. C.; Singh, N. Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agriculture Ecosystem Environment* **2010**, *136*, 16. [\[CrossRef\]](#)
- ³³ Sarkar, A.; Rano, R. Water holding capacities of fly ashes: effect of size fractionation. *Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects* **2007**, *29*, 471. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁴ Garg, R. N.; Pathak, H.; Das, D. K.; Tomar, R. K. Use of Flyash And Biogas Slurry For Improving Wheat Yield And Physical Properties Of Soil. *Environmental Monitoring and Assessment* **2005**, *107*, 9. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁵ Jala, S.; Goyal, D.; Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production– a review. *Bioresource Technology* **2006**, *97*, 1136. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁶ Blissett, R. S.; Rowson, N. A. A review of the multi-component utilizations of coal fly ash. *Fuel* **2012**, *97*, 1. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁷ Deepthi, M. V.; Sharma, M.; Sailaja, R. R. N.; Anantha, P.; Sampathkumaran, P.; Seetharamu, S. Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene–fly ash Cenospheres composites. *Materials and Design* **2010**, *31*, 2051. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁸ Silva, R. V.; *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, 2003. [\[Link\]](#)
- ³⁹ Vinson, J. R.; Sierakowski, R. L. The Behavior of Structures Composed of Composite Materials: Springer Science & Business Media 2006.
- ⁴⁰ Guhanathan, S.; Saroja, D. M.; Murugesan, V. Effect of coupling agents on the mechanical properties of fly ash/polyester particulate composites. *Journal Applied Polymer Science* **2001**, *82*, 1755. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴¹ Gu, J.; Wu, G.; Zhao, X. Preparation of high damping fly ash/epoxy composites. *Journal of Functional Material* **2007**, *38*, 764. [\[Link\]](#)
- ⁴² Nath, D. C. D.; Bandyopadhyay, S.; Boughton, P.; Yu, A.; Blackburn, D.; White, C. Chemically modified fly ash for fabricating super-strong biodegradable poly(vinyl alcohol) composite films. *Journal of Material Science* **2010**, *45*, 2625. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴³ Nath, D. C. D.; Bandyopadhyay, S.; Boughton, P.; Yu, A.; Zeng, Q.; Das, T.; Blackburn, D.; White, C. Structure-property interface correlation of fly ash–isotactic polypropylene composites. *Journal of Material Science* **2009**, *44*, 6078. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁴ Sengupta, S.; Ray, D.; Mukhopadhyay, A. Sustainable Materials: Value-Added Composites from Recycled Polypropylene and Fly Ash Using a Green Coupling Agent. *Sustainable Chemical Engineering* **2013**, *6*, 574. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁵ Purnomo, C. W. Utilization of bagasse fly ash for carbon–zeolite composite preparation. *Journal of Porous Materials* **2013**, *20*, 1305. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁶ Subramanian, S.; Pande, G.; Weireld, G.; Giraudon, J. M.; Lamoine, J. F.; Batra, V. S. Sugarcane bagasse fly ash as an attractive agro-industry source for VOC removal on porous carbon. *Industrial Crops and Products* **2013**, *49*, 108. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁷ Barbosa, R.; Lapa, N.; Lopes, H.; Günther, A.; Dias, D.; Mendes, B. Biomass fly ashes as low-cost chemical agents for Pb removal from synthetic and industrial wastewaters. *Journal of Colloid and Interface Science* **2014**, *424*, 27. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁸ Shah, A. K.; Ali, Z. M.; Laghari, A. J.; Shah, S. F. A. Utilization of Fly Ash as Low-Cost Adsorbent for the Treatment of Industrial Dyes Effluents- A Comparative Study. *Journal*

of Engineering and Technology **2013**, 2, 1. [\[Link\]](#)

⁴⁹ Cetin, S.; Pehlivan, E. The use of fly ash as a low cost, environmentally friendly alternative to activated carbon for the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2007**, 298, 83. [\[CrossRef\]](#)

⁵⁰ Taha, G. M. Utilization of Low-Cost Waste Material Bagasse Fly Ash in Removing of Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺ and Cr³⁺ from Industrial Waste Water. *Ground*

Water Monitoring & Remediation **2006**, 26, 137. [\[CrossRef\]](#)

⁵¹ Shah, B.; Mistry, C.; Shah, A. Seizure modeling of Pb (II) and Cd (II) from aqueous solution by chemically modified sugarcane bagasse fly ash: isotherms, kinetics, and column study. *Environmental Science and Pollution Research* **2013**, 20, 2193. [\[CrossRef\]](#)

⁵² Kumar, K. V.; Ramamurthi, V.; Sivanesan, S. Modeling the mechanism involved during the sorption of methylene blue onto fly ash. *Journal of Colloid and Interface Science* **2005**, 284, 14. [\[CrossRef\]](#)