

## AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE ELEMENTOS METÁLICOS TÓXICOS PRESENTES NO EFLUENTE DO ATERRO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL USANDO ZEÓLITA SINTÉTICA

**Caio da S. MIRANDA; Juliana de C. IZIDORO, Sabine N. GUILHEN; Denise A. FUNGARO**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN–CNEN/SP – Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária – CEP 05508-000 – São Paulo – SP – Brasil  
E-mail: [caiomirand@gmail.com](mailto:caiomirand@gmail.com)

### RESUMO

A produção de energia elétrica usando carvão mineral gera diferentes tipos de resíduos que precisam ser dispostos adequadamente para não causar impactos ambientais significativos. Diversas técnicas têm sido adotadas para que haja a redução da lixiviação dos elementos metálicos tóxicos presentes nas cinzas. O preparo do aterro de cinzas usando camadas de calcário e argila foi usado como alternativa por uma usina termelétrica a carvão localizada na região sul do Brasil. A utilização das cinzas leves para a síntese de materiais de valor agregado, por outro lado, também pode amenizar esse problema pelo fato de reduzir a quantidade de resíduo a ser disposto. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a remoção de elementos tóxicos presentes no efluente de um aterro de cinzas usando zeólitas sintetizadas a partir dos próprios resíduos de combustão do carvão. Os ensaios foram realizados em batelada empregando-se 10 g de zeólita/L e 20 g de zeólita/L. A comparação entre as concentrações dos elementos do efluente antes e após o contato com a zeólita, bem como as análises de pH e condutividade foram realizadas. Os resultados indicaram que cromo e arsênio foram os principais elementos tóxicos presentes no efluente do aterro de cinzas que apresentavam concentração acima do permitido pela legislação ambiental. Após o tratamento com a zeólita, a concentração de arsênio no efluente reduziu de 1,09 mg/L para 0,275 mg/L na dose de 10 g/L e ficou abaixo do limite de detecção do equipamento (< 0,01) na dose de 20 g/L. Para o cromo, não houve alteração da concentração, enquanto uma elevação dos valores de pH e condutividade do efluente foi observada. O presente estudo sugere que a zeólita de cinzas leves de carvão podem ser usadas como forma de tratamento de efluentes contendo elevados níveis de arsênio.

**Palavras-chave:** Cinzas de carvão; Material zeolítico; Efluente de aterro de cinzas.

### ABSTRACT

*The production of electricity using mineral coal generates different types of wastes that need to be disposed properly so as not to cause significant environmental impacts. Several techniques have been adopted to reduce the leaching of the toxic metallic elements present in the ashes. The preparation of the ash landfill using layers of limestone and clay was used as an alternative by a coal-fired thermoelectric power plant located in southern Brazil. The use of fly ashes for the synthesis of value-added materials, on the other hand, can also minimize this problem by reducing the amount of waste to be disposed of. The objective of this work was to evaluate the removal of toxic elements present in the wastewater from an ash landfill using zeolites synthesized from the coal combustion residues. Batch tests were carried out using 10 g of zeolite/L and 20 g of zeolite/L. The comparison between the concentrations of the elements in the wastewater before and after the contact with the zeolite, as well as the pH and conductivity were determined. The results indicated that chromium and arsenic were the main toxic elements present in the wastewater from the ash landfill and both presented concentrations above that allowed by environmental legislation. After treatment with the zeolite, the concentration of arsenic in the wastewater reduced from 1.09 mg/L to 0.275 mg/L at the dose of 10 g/L and was below the limit of detection of the equipment (<0.01) at the dose of 20 g / L. For the chromium, there was no change in the concentration after treatment, while an increase in pH and conductivity of the effluent was observed. The present study suggests that coal fly ash zeolite can be used as a treatment of effluents containing high levels of arsenic.*

**Key-Words:** Coal ash; Zeolitic Material; Wastewater from ash landfill.

## 1 INTRODUÇÃO

A principal aplicação do carvão mineral no mundo atualmente é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas. O carvão mineral é um combustível fóssil e uma fonte de energia não renovável. Segundo dados da International Energy Agency (IEA) o carvão é responsável por 46% da produção de energia mundial (World Energy Council, 2016). No Brasil, segundo os dados da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), essa fonte energética é responsável por 1,5% da matriz energética do país, porém como possui grandes reservas, há uma previsão de aumento até 2023 para corresponder cerca de 5,35% do total (CRM, 2013).

Uma grande quantidade de carvão mineral é requerida para a geração de energia elétrica, e partir da queima deste combustível, são gerados vários tipos de resíduos, que são: cinzas volantes ou leves, cinzas pesadas ou de fundo, escória da caldeira e o subproduto do processo de dessulfurização, processo que foi implantando recentemente no Brasil.

Os principais sistemas de retenção de cinzas usados nas usinas termelétricas com o objetivo de impedir sua emissão na atmosfera são: filtro de mangas, filtro ciclone e precipitador eletrostático. As cinzas mais pesadas bem como as escórias caem no fundo da fornalha e são retiradas do processo pela parte inferior da caldeira.

Materiais particulados podem causar danos as vias aéreas mais profundas do trato respiratório, sendo esse risco inversamente proporcional ao seu tamanho. Além disso, há um risco também por apresentar compostos tóxicos em sua composição, por essas razões quando lançados no ar, as cinzas podem ser consideradas poluentes atmosféricos (Braga, et. al. 2001).

Estudos de pesquisadores como Depoi et al (2008) e Quispe et al. (2012) mostraram que resíduos de usinas térmicas a carvão possuem em sua composição química elementos tóxicos como As, Cd, Mo, Pb, Tl, U, Zn e Hg. Sendo assim, a disposição deste tipo de material no solo torna-se inviável devido à possibilidade de contaminação do solo e dos corpos d'água. Além disso, a poeira silicosa das cinzas pode atingir a população local pela ação do vento sobre a superfície das bacias de sedimentação (Silva e Boit, 2010).

A aplicação dos resíduos provenientes da queima do carvão na síntese de materiais alternativos pode contribuir para a redução dos impactos ambientais causados por sua destinação inadequada.

A valorização de resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis como um bem social de valor econômico pode gerar trabalho e promover a cidadania, além disso, essa visão é defendida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010).

A reciclagem das cinzas pode reduzir a disposição destes resíduos no solo, porém, devido à grande quantidade em que são geradas, uma parte ainda necessita de destinação adequada. Diversas técnicas têm sido adotadas para que a redução da lixiviação dos elementos metálicos tóxicos presentes nas cinzas possa ser diminuída. O preparo de aterro de cinzas usando camadas de calcário e argila, por exemplo, é usado como alternativa por uma usina térmica a carvão no sul do Brasil. Esse tipo de aterro possui sistema de drenagem que canaliza o material lixiviado para um corpo hídrico. Esse efluente deve apresentar concentrações de elementos tóxicos abaixo dos limites permitidos pela legislação ambiental.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a remoção de elementos tóxicos presentes no efluente de um aterro de cinzas usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leve de carvão. A transformação de um resíduo em um produto de valor agregado e sua aplicação no tratamento dos efluentes líquidos in situ da mesma usina contribui de forma significativa com a sustentabilidade de usinas térmicas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 SÍNTESE DE MATERIAL ZEOLÍTICO

O material zeolítico foi sintetizado a partir da amostra de cinza volante proveniente do filtro de mangas de usina térmica a carvão do sul do Brasil.

O material adsorvente foi preparado a partir da mistura de 20 g de cinzas com 160 mL de NaOH 3,5 mol L<sup>-1</sup> (Henmi, 1987). A mistura foi aquecida em estufa à 100 °C por 24 h. A suspensão foi filtrada e o produto sólido foi seco em estufa a 80 °C por 12 h e nomeado no presente estudo como ZCM.

## 2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para analisar a composição química da cinza volante (CM) e do material zeolítico sintetizado a partir dela (ZCM), foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raio X (FR-X) modelo S8 Tiger, da marca Bruker do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## 2.3 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

As amostras de cinza e material zeolítico foram colocadas em um porta amostra de vidro e analisadas em um difratômetro de raio X (DR-X) Rigaku modelo Miniflex II com monocromador e com radiação Cu K- $\alpha$ , gerada a 30 kV e 15 mA. A velocidade de varredura era de 0,05% e com  $2\theta$  variando entre 5 e 80 graus.

A identificação das fases cristalinas foi realizada com o auxílio do programa de computador Search-Match e do banco de dados de padrões de difração do *International Centre for Diffraction Data (ICDD)/Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS)*. Essa análise foi realizada no Centro de Células a Combustível e Hidrogênio (CCCH) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE LÍQUIDO

O efluente líquido escolhido para o presente estudo foi coletado diretamente do sistema de drenagem do aterro de cinzas utilizado por usina térmica a carvão do sul do Brasil. A amostra foi nomeada no presente trabalho como DA1. O pH deste efluente foi determinado pelo peagâmetro MSTecnopon – Mod. MPA 210 e a condutividade foi determinada pelo condutivímetro Orion – Modelo 150.

A concentração de arsênio presente no efluente foi determinada por meio da técnica de espectrofotometria de absorção atômica com

atomização por forno de grafita (GF-AAS) enquanto que a concentração de todos os outros elementos foram determinados por espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio (ICP-OES – *Spectro - Arcos*).

## 2.5 ESTUDOS DE REMOÇÃO DE ÍONS METÁLICOS TÓXICOS

Diferentes quantidades de material zeolítico (0,5 g; 1 g) foram colocados em contato com alíquotas de 50 mL do efluente DA1 em três diferentes béqueres de 150 mL. Esses ensaios corresponderam às doses de 10g/L e 20g/L (massa de zeólita/ volume do efluente) respectivamente (Moreno et al., 2001; Prasad&Mortimer, 2011).

As suspensões foram agitadas à 120 rpm por 1 h. Após esse período, o líquido foi separado por filtração. Posteriormente 10 mL do sobrenadante foi separado para a análise de pH e condutividade, enquanto que o restante da alíquota foi enviado para a determinação de concentração por meio da técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio (ICP-OES) após a acidificação, com HNO<sub>3</sub> concentrado. As suspensões foram agitadas à 120 rpm

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DA CINZA

A composição química da cinza precursora do material zeolítico é mostrada na Tabela 1. As cinzas apresentam como principais compostos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

De acordo com a *American Society for Testing and Materials (ASTM C618)*, as cinzas que possuem conteúdo total de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> acima de 70% e baixo teor de CaO (máximo de 12%) são consideradas como cinzas classe F (Ahmaruzzaman, 2010). Portanto, a amostra de CM se enquadra na definição de cinzas classe F.

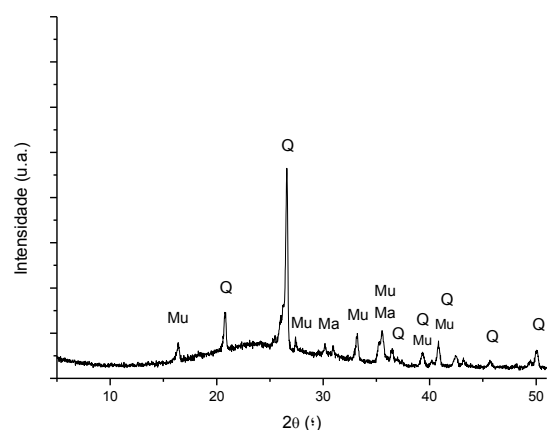
Tabela 1 – Composição química da amostra de cinzas volante determinada por FR-X

Componente	(% em massa)
SiO <sub>2</sub>	49,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,86
CaO	2,06
K <sub>2</sub> O	2,74
SO <sub>3</sub>	1,65
TiO <sub>2</sub>	1,20
MgO	1,02
Na <sub>2</sub> O	1,23
ZnO	0,682
MnO	0,061
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,097
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,048
PbO	0,049
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16
ZrO <sub>2</sub>	0,099
Rb <sub>2</sub> O	0,014
SrO	0,029
NiO	0,011
CuO	0,022
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,028
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,082
MoO <sub>3</sub>	0,03
BaO	<0,001
Perda ao Fogo	8,00
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,19

O teor de silício e alumínio estava acima de 70% para a amostra indicando que este material pode ser usado para a síntese de materiais adsorventes alternativos (Querol et al., 2002; Fungaro et al., 2009; Ahmaruzzaman, 2010; Izidoro et al., 2012; Ciocinta, et al., 2013). A relação SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 2,19 é um valor concordante com outros estudos (Shiguemoto et al., 1993; Izidoro, 2013).

As fases cristalinas identificadas para a amostra de cinzas são mostradas na Figura 1. A amostra de CM apresentou as fases cristalinas quartzo, mulita e magnetita. Essas fases são tipicamente encontradas neste tipo de material e foram identificadas em outros estudos (Umaña, 2002; Jha et al., 2008; Widiastutiet al., 2014; Yuet al., 2016).

Figura 1 - Difratoograma da amostra de CM (Q = Quartzo, Mu = Mulita e Ma = Magnetita)



### 3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO MATERIAL ZEOLÍTICO

A composição química do material zeolítico é mostrada na Tabela 2. Os principais compostos presentes na amostra de ZCM foram SiO<sub>2</sub> e a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que apresentaram conteúdos de 33,5 e 23,0 %, respectivamente. Teores acima de 10% foram observados para o ferro e sódio. O sódio foi incorporado à estrutura da zeólita devido ao método de síntese convencional utilizado. A relação de Si/Al entre ~1,5 – 3,8, indica a formação de zeólita com teores intermediários de silício, as quais são de interesse no tratamento de efluentes, tais como a drenagem ácidas de minas.

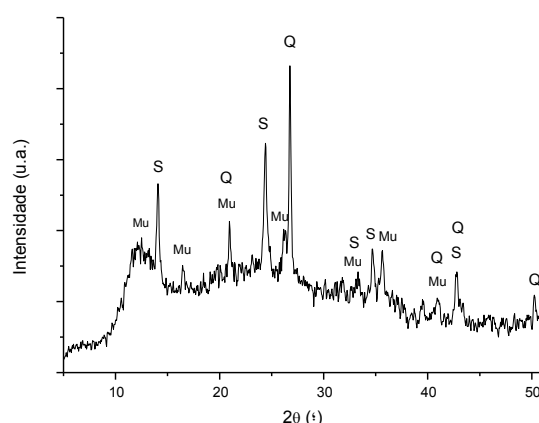
Tabela 2 – Composição química da amostra de material zeolítico determinada por FR-X

Componente	(% em massa)
SiO <sub>2</sub>	33,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,9
Na <sub>2</sub> O	10,7
CaO	2,12
K <sub>2</sub> O	0,383
SO <sub>3</sub>	1,74
TiO <sub>2</sub>	1,43
MgO	1,06
ZnO	0,65
MnO	0,067
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,024
PbO	0,07
ZrO <sub>2</sub>	0,123
SrO	0,034
NiO	<0,001
CuO	0,018
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,037
Cl	<0,001
BaO	0,018
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,003
Ce <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,04
Perda ao Fogo	13,1
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,46

O material zeolítico também apresentou quantidades inferiores a 10% de elementos como titânio, cálcio, enxofre, magnésio, chumbo, entre outros. Este baixo conteúdo desses íons metálicos é importante, uma vez que elevada quantidade de impurezas pode inviabilizar o uso deste material.

O difratograma da amostra de ZCM é mostrado na Figura 2. As fases encontradas no material zeolítico foram quartzo, mulita e sodalita. Quartzo e mulita estavam também presentes na cinza precursora e não foram dissolvidos nas condições de síntese aplicadas, portanto, permaneceram no material resultante.

Figura 2 - Difratograma da amostra de ZCM (Q = Quartzo, Mu = Mulita e Ma = Magnetita)



A zeólita formada foi do tipo sodalita, de fórmula  $1.08 \text{ Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.68 \text{ SiO}_2 \cdot 1.8 \text{ H}_2\text{O}$ . Esse tipo de zeólita possui alta estabilidade térmica e suporta variações de temperatura que podem ocorrer durante a síntese hidrotérmica. É um material funcional atrativo para uma grande gama de aplicações, tais como: remoção de metais pesados e corantes de água; dessalinização de água do mar e outras soluções salinas; materiais ópticos; estocagem de hidrogênio; separação de hidrogênio; catálise e oclusão de pigmento (Naskaretal, 2011).

### 3.3 ESTUDOS DE REMOÇÃO DE ÍONS METÁLICOS

A Tabela 3 mostra a concentração dos elementos metálicos presentes no efluente antes (DA1) e após o tratamento com material zeolítico em duas doses diferentes, bem como a variação nos

valores de pH e condutividade. As concentrações máximas e o pH permitidos para o lançamento de efluentes em corpos d'água, segundo legislação

ambiental vigente (CONAMA, 2001), também são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise de efluente de aterro de cinzas antes e após tratamento com ZCM

Componente	DA1 (mg.L <sup>-1</sup> )	ZCM (mg.L <sup>-1</sup> )		CONAMA* (mg.L <sup>-1</sup> )
		(Dose 10 g.L <sup>-1</sup> )	(Dose 20 g.L <sup>-1</sup> )	
Cr	0,15	0,155	0,157	0,1
Mn	0,133	< 0,1	< 0,1	1,0
Ni	1,11	0,012	0,013	2,0
Cd	0,0430	< 0,01	< 0,01	0,2
Zn	0,112	< 0,01	< 0,01	5,0
Mg	5,5	0,323	0,134	-
Ca	1052	93	41,6	-
Fe	0,49	0,243	0,133	15,0
Co	2,0	< 0,01	< 0,01	-
As	1,09	0,275	< 0,01	0,5
pH	6,43	8,19	11,08	5 a 9
Condutividade	5,41 (mS/cm)	10,85 (mS/cm)	14,3 (mS/cm)	-

(\*) RESOLUÇÃO No 430, de 13 DE MAIO DE 2011

Conforme é mostrado na Tabela 3, o efluente DA1 não está de acordo com os parâmetros de lançamento para os elementos Cr e As, portanto, deve ser tratado antes de seu descarte.

Observou-se que o material zeolítico apresentou remoção significativa para os elementos Ni, Cd, Zn e Co, independentemente da dose,

enquanto que a remoção dos elementos Mg, Ca, Fe e As, foi maior quanto maior a dose utilizada.

Os resultados mostraram que o material zeolítico não é eficiente para remoção de cromo em nenhuma das doses usadas. Em relação ao Mn, devido ao limite de detecção do equipamento usado no presente estudo, novos testes são necessários

para avaliar se esse material tem potencial para a remoção desse íon.

Conforme mostra a Tabela 3, quanto maior foi a dose de zeólita usada, maior foi o pH da solução tratada. Esse comportamento já era esperado uma vez que esse material foi sintetizado com NaOH, o que contribui para a alcalinidade da solução final. Portanto, é importante determinar se a remoção observada para os elementos foi causada por processo de troca iônica propriamente dito e/ou por precipitação dos elementos na solução alcalina como relatado no estudo de Moreno et al. (2001). O aumento do valor da condutividade com o aumento da quantidade de material zeolítico usado no tratamento do efluente pode ser atribuído à lixiviação de alguns elementos presentes no sólido.

#### 4 CONCLUSÃO

1. As cinzas de carvão utilizadas no presente estudo foram adequadas para servir de material de partida para a síntese de zeólita sodalita usando tratamento hidrotérmico convencional.

2. O efluente do aterro de cinzas deve ser tratado, pois os valores de concentração dos elementos tóxicos Cr e As excedem os valores permitidos pela legislação.

3. O material zeolítico apresentou remoção significativa para os elementos Ni, Cd, Zn, Co, Mg, Ca, Fe e As.

4. De acordo com os resultados observados, conclui-se que a dose de 10 g L<sup>-1</sup> é suficiente para a remoção do arsênio presente no efluente do aterro de cinzas.

5. Estudos adicionais são necessários para promover a remoção do cromo desse tipo de efluente.

#### 5 REFERÊNCIAS

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. *Prog. Energ. Combust.*, v. 36, p. 327-363, 2010.

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; BÖHM, G. M.; SALDIVA, P. H. N. Poluição Atmosférica e seus Efeitos na Saúde Humana. Faculdade de Medicina da USP, REVISTA USP, São Paulo, n.51, p. 58-71 São Paulo, 2001 Disponível em:

<<http://www.periodicos.usp.br/revusp/article/viewFile/35099/37838>> Acessado em: 24/01/17.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº. 430, de 13 de Maio de 2011.** Brasília DF, n. 92, 16 de Maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em 01 de Março de 2017.

CRM. Carvão Gaúcho Gerando Energia e Desenvolvimento Social. Porto Alegre: CRM, [2013]. 43 f. (não paginado), il.

CIOCINTA, R. C., HARJA, M., BUCUR, D., BUEMA, G. Optimization of the conditions for conversion of coal ash into zeolite material. *Jornal of Food, Agriculture & Environment*, v.11, n. 1, 1108-1112, 2013.

DEPOI, F.S.; POZEBON, D.; KALKREUTH, W.D. Chemical characterization of feed coals and combustion-by-products from Brazilian power plants. *Int. J. Coal Geol.*, v. 76, p. 227-236, 2008.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2ª ed. 1997. 212p.

HENMI, T. Synthesis of hydroxi-sodalite (“zeolite”) from waste coal ash. *Soil Science Plant Nutrition.*, v.33, p. 517 – 521, 1987.

FUNGARO, D.A., IZIDORO, J.C., BRUNO, M. Aplicação de material zeolítico sintetizado de cinzas de carvão como adsorvente de poluentes em água. *Ecl. Quím.*, v.34, n. 1, p. 45-50, 2009.

IZIDORO, J. C., FUNGARO, D. A., SANTOS, F. S., WANG, S. Characteristics of Brazilian coal fly ashes and their synthesized zeolites. *Fuel Proc. Tech.*, v. 97, p. 38-44, 2012.

IZIDORO, J. C. Síntese e caracterização de zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão. 2013. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

JHA, V. K., MATSUDA, M., MIYAKE, M. Resource recovery from coal fly ash waste: na overview study.

**Journal of the Ceramic Society of Japan.** v. 116. n. 2., 167-175, 2008.

MORENO, N., QUEROL, X., & CARLES, A. (2001). Utilisation of zeolites synthesized from coal fly ash for the purification of AMDs. *Environmental Science & Technology*, 35, 3526–3534

PRASAD, B., AND MORTIMER, R.J. (2011). "Treatment of acid mine drainage using fly ash zeolite." *Water Air Soil Poll.*, 218(1-4), 667-679

QUEROL, X., MORENO, N., UMANÃ, J. C., ALASTUEY, A., HERNANDEZ, E., LÓPEZ-SOLER, A., PLANA, F. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. *Int. Journal Coal Geol.*, v.50, p. 413 - 423, 2002.

QUISPE, D.; PEREZ-LOPEZ, R.; SILVA, L. F.; NIETO, J. M. Changes in of hazardous elements during coal combustion in Santa Catarina power plant (Brazil). *Fuel*, v. 94, p. 495-503, 2012.

NASKAR, M. K.; KUNDU D.; CHATTERJEE, M. Effect of process parameters on surfactant-based synthesis of hydroxysodalite particles. *Mater. Lett.* v.65, p.436-438, 2011.

SILVA, L.F.O.; BOIT, K.M. Nanominerals and nanoparticles in feed coal and bottom ash: implications for human health effects. *Environ. Monit Assess.* v. 74, p. 187-197, 2011.

SHIGEMOTO, N., HAYASHI, H., MIYUARA, K. Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with hydroxide prior to hydrothermal reaction. *J. Mater. Sci.*, v. 28, p. 4781-4786, 1993.

UMANÃ- PENÃ, J. C. **Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón.** 2002. Tese (Doutorado)- Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha.

WIDIASTUTI, N., HIDAYAH, M. Z. N., PRASEY TOKO, D., FANSURI, H. Synthesis of zeolite X-carbon from coal bottom ash for hydrogen storage material. *Adv. Mat. Lett.* v.5, n.8, 453-458, 2014. WORLD ENERGY COUNCIL - <<http://www.worldenergy.org/>>. Acessado em 24/01/2017.

YU, J., YANG, Y., CHEN, W., XU, D., GUO, H., LI, K., LIU, H. The synthesis and application of zeolitic material from fly ash by one-pot method at low temperature. *Green Energy & Environment* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.gee.2016.07.002>