



SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE ZEÓLITAS OBTIDAS A PARTIR DE CINZAS VOLANTES DO CARVÃO DE CANDIOTA - RS

Débora Regina Strossi Pedrolo – debora_reginasp@hotmail.com
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química
Rua Engenheiro Luiz Englert
90040-040 – Porto Alegre – RS

Luci Kelin de Menezes Quines – kelinquines@yahoo.com.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química

Guilherme de Souza – guidesouza@gmail.com
Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC

Nilson Romeu Marcilio - nilson@enq.ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química

Resumo: Cinzas volantes de carvão são formadas no processo de queima de carvão nas usinas termelétricas, sendo o principal resíduo gerado por esta atividade. Sua disposição inadequada tem se tornado uma preocupação ambiental. Nas últimas décadas, cinzas de carvão têm sido utilizadas como matéria-prima para síntese de minerais aluminossilicatos microporosos, conhecidos como zeólitas. Neste trabalho, estudou-se a síntese e caracterização de zeólitas a partir de cinza volante de carvão da Mina de Candiota (RS). A síntese foi realizada por tratamento hidrotérmico usando solução alcalina de KOH com relação líquido/sólido = 2 mL/g. Os ensaios foram realizados a 100 e 150 °C, concentrações de 3 e 5 M de KOH e tempos de reação de 8, 24, 48 e 72 horas. A caracterização foi feita por FRX (composição química) e MEV (morfologia). Os resultados da caracterização das cinzas mostraram potencial para utilização desta como matéria-prima para síntese de zeólitas, pois apresenta em sua composição ~ 85 % de SiO₂ e Al₂O₃, precursores de zeólitas. Pelas análises de FRX observa-se diminuição nas concentrações de SiO₂ e Al₂O₃, pois estes quando são dissolvidos são sintetizados em zeólitas e parte permanece em solução. As variáveis estudadas influenciaram no aumento das concentrações de K₂O nos produtos de síntese sugerindo a formação de zeólitas. Análises MEV mostraram a formação de estruturas bem definidas e regulares nos ensaios 10, 11, 12 e 16, também sugerindo a formação de zeólitas. Deste modo, as cinzas volantes de carvão da mina de Candiota (RS) mostram-se matéria-prima promissora para síntese de zeólitas.

Palavras-chave: Cinzas de carvão, Zeólitas, Síntese hidrotérmica



SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZEOLITES FROM COAL FLY ASH OF CANDIOTA (RS)

Abstract: Coal fly ash are formed in coal-burning process for power generation in thermal power plants, the main waste generated by this activity. Their improper disposal has become an environmental concern. In the last few decades, fly ash has been used as a raw material for synthesis of microporous aluminosiliceous minerals known as zeolites. This paper presents a study about the synthesis and characterizations of zeolites obtained using coal fly ash from Candiota (RS) Mine. The synthesis was accomplished through the hydrothermal treatment using KOH alkaline solution with liquid/solid ratio = 2 ml/g. The tests were carried out at 100 and 150 °C, concentrations of 3 and 5 M KOH and reaction times of 8, 24, 48 and 72 hours. The characterization was held by XRF (chemical composition) and SEM (morphology). The results of the ash characterization show its potential as raw material for the zeolite synthesis, as it has ~ 85% SiO₂ and Al₂O₃, precursors of zeolites. The XRF analyses show decrease in SiO₂ and Al₂O₃ concentrations, as these when they are dissolved are synthesized in zeolites and part remains in solution. The variables influence the increase K₂O concentration in the synthesis product suggesting the formation of zeolite. SEM analysis present the formation of well defined and regular structure in tests 10, 11, 12 and 16, also suggesting the formation of zeolites. Thus, the coal fly of Candiota (RS) Mine is shown promising raw material for zeolite synthesis.

Keywords: Coal ash, Zeolite, Hydrothermal synthesis

1. INTRODUÇÃO

O carvão mineral é responsável pela produção de cerca de 40 % da produção mundial de eletricidade (WORLD ENERGY COUNCIL, 2013). O cenário brasileiro é favorável à utilização do carvão fóssil para geração de energia, pois segundo os membros do Comitê Brasileiro do World Energy Council (2013), o Brasil possui quantidade remanescente de carvão de 6,640 milhões de toneladas, sendo 6,630 milhões de toneladas recuperáveis. As reservas brasileiras são compostas por carvão do tipo linhito e sub-betuminoso, as maiores jazidas situam-se nos estados do Rio Grande do Sul (89,25 %) e Santa Catarina (10,41 %). Dentre essas, a jazida de Candiota (RS) representa 38 % de todo o carvão nacional (ANEEL, 2008).

Quase toda a produção de carvão atual do Brasil é classificada como carvão energético, dos quais mais de 85 % é utilizado como combustível de centrais elétricas e o restante em plantas industriais. O carvão brasileiro é considerado de baixa qualidade, com alto teor de cinzas e baixo teor de carbono, o que torna seu uso fora das regiões de depósitos inviável (WORLD ENERGY COUNCIL, 2013). Devido a isto, as 5 termelétricas brasileiras que utilizam carvão mineral como fonte para geração de energia estão situadas próximas às jazidas carboníferas no sul do País.

Uma vez que a queima de carvão mineral em larga escala para geração de energia começou nos anos 90, milhões de toneladas de cinzas e subprodutos relacionados têm sido gerado (AHMARUZZAMAN, 2010). Cinzas leves, ou volantes (granulometria < 100 µm), resultantes da combustão do carvão representam 80 % dos resíduos gerados, enquanto as cinzas pesadas, ou de fundo, representam 20 % (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2012). Uma maior atenção tem sido dada quanto aos métodos de disposição e utilização principalmente das cinzas volantes. Portanto, a utilização eficaz de cinzas volantes de carvão tem sido um problema mundial (WANG *et al.*, 2015).

A eliminação desse resíduo tem se tornado cada vez mais preocupante do ponto de vista ambiental, visto que, muitas vezes é feita uma disposição irregular em minas abandonadas, lagoas, aterros ou descarte a céu aberto. Esse material sofre lixiviação ao longo do tempo, contaminando



águas subterrâneas e solos. Desta forma, investigações de potenciais aplicações deste resíduo sólido têm se tornado cada vez mais necessária.

De acordo com Yao *et al.* (2015), dentre as aplicações das cinzas volantes, em torno de 20 % é utilizada na produção de concreto, o restante é disposto no meio ambiente. Desta maneira, em resposta à preocupação crescente com ambiente, se torna necessário o desenvolvimento de novas aplicações para esse resíduo, buscando minimizar os impactos negativos desse material quando descartado no solo e água (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2015). Nesse sentido, destaca-se a síntese de zeólitas a partir da cinza de carvão como alternativa promissora de aproveitamento deste coproduto.

A síntese de zeólitas tem ganhado notoriedade como uma das utilizações mais eficazes para as cinzas volantes de carvão, possivelmente, devido à composição semelhante das cinzas volantes com alguns materiais vulcânicos, precursores das zeólitas naturais, tais como Si e Al, que são os precursores de zeólitas. (QUEROL *et al.*, 2002; YAO *et al.*, 2015).

Zeólitas são minerais aluminossilicatos porosos com uma estrutura tridimensional composta de tetraedros de $[AlO_4]$ e $[SiO_4]$, caracterizada por um sistema regular de canais e cavidades, que confere a esse material propriedades, tais como troca iônica, peneira molecular, catálise e adsorção (BANDURA *et al.*, 2016).

A síntese de zeólitas é convencionalmente realizada pelo tratamento hidrotérmico clássico, que se dá em três etapas na presença de solução alcalina, geralmente hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH). No qual, primeiramente ocorre a dissolução das fases de Si e Al presentes nas cinzas (sílica amorfa, quartzo e mulita), após ocorre a reação de formação de gel a partir dos íons de alumínio e silício na superfície das partículas de cinzas, e por fim ocorre a cristalização a partir do aluminossilicato formado (IZIDORO, 2013). Após a ativação, o tamanho das partículas de cinza diminui, devido ao ataque alcalino sobre a superfície das partículas de cinzas volantes, subsequente nucleação e cristalização de pequenos minerais zeolíticos, resultando num aumento da área superficial específica. Este aumento na área superficial facilita melhores características de sorção no produto final (KOSHY & SINGH, 2016).

A alta razão Al/Si proporciona às zeólitas alto potencial de troca iônica, especialmente para metais pesados e amônio. Portanto, materiais zeolíticos sintetizados podem ter aplicações significativas em tecnologias de descontaminação de águas residuárias (QUEROL *et al.*, 2001). Possuem também grande capacidade de adsorção devido à sua estrutura microporosa formada por poros de dimensões definidas, que funcionam como peneiras moleculares, permitindo a entrada de moléculas menores e barrando a entrada das maiores (FERRET, 2004). Zeólitas possuem propriedades de adsorção favoráveis, que podem ser utilizadas para separação e purificação de gases (WANG *et al.*, 2015) porém, segundo Querol *et al.*, (2001) mais pesquisas devem ser realizadas para desenvolver aplicações nesta área.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi sintetizar zeólitas, a partir de cinzas volantes geradas durante a combustão do carvão da Mina de Candiota (RS), por tratamento hidrotérmico alcalino clássico com hidróxido de potássio comercial e água de abastecimento público, visando tornar o processo mais próximo das condições industriais. Também foi avaliada a influência das variáveis de síntese, concentração da solução alcalina, tempo e temperatura de reação, a partir de cinza, nos percentuais de K_2O dos materiais sintetizados.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para a síntese de zeólitas foram utilizadas cinzas volantes geradas durante a combustão do carvão da Mina de Candiota (RS). As cinzas foram coletadas, em um único lote, diretamente do leito pulverizado da Usina Termelétrica Presidente Médici, e acondicionadas em embalagem plástica sem

nenhum tratamento prévio. A base utilizada foi o KOH comercial (pureza $\geq 90\%$) da marca HR. As soluções alcalinas foram feitas utilizando água de abastecimento público da cidade de Porto Alegre (RS). Os recipientes para as reações hidrotérmicas foram reatores cilíndricos de aço-inox com cápsula interna de teflon com volume de 150 mL.

2.2. Síntese de zeólitas

Os ensaios de síntese de zeólitas foram realizados conforme o método de tratamento hidrotérmico clássico (QUEROL, 1997; FERRET, 2004) com variação na concentração da solução alcalina, temperatura e tempo de reação, conforme pode ser observado na Tabela 1. Esse método se baseia na adição de um determinado volume de solução alcalina a uma massa de cinzas diretamente em reator, o qual é submetido a aquecimento por um determinado tempo. Neste trabalho utilizou-se como solução alcalina hidróxido de potássio (KOH). Assim, a síntese das zeólitas foi realizada com relação solução alcalina/cinzas (v/m) igual a 2 mL/g para todos os ensaios, na qual 80 mL de solução (determinada concentração) foi adicionado a 40 g de cinzas em reator de aço-inox com cápsula interna de teflon de 150 mL. Posteriormente, o reator contendo a suspensão composta por solução alcalina e cinzas (v/m) foi submetido a aquecimento por um determinado tempo de reação. O produto resultante da ativação térmica foi filtrado em filtro de papel (Qualy, diâmetro = 21 cm, porosidade = 14 μm), no qual o material sintetizado (retentado) foi lavado com relação 1:2 de água de abastecimento público (160 mL). Por fim, as amostras foram secas a 100 °C por 24 horas.

Tabela 1 - Condições dos ensaios de síntese de zeólitas com variação da concentração molar da solução de KOH em água, do tempo e da temperatura de reação.

Ensaio	T (°C)	[KOH] (mol/L)	Tempo (h)
1	100	3	8
2			24
3			48
4			72
5		5	8
6			24
7			48
8			72
9	150	3	8
10			24
11			48
12			72
13		5	8
14			24
15			48
16			72

2.3. Caracterização da cinza e do material zeolítico

A análise química elementar da cinza e das fases zeolíticas formadas foi determinada por Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) (Shimadzu, XRF-1800) no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As amostras em pó foram prensadas utilizando-se pastilhas metálicas com ácido bórico (relação massa de amostra/massa de ácido bórico de 1/3), a partir de análise semi-quantitativa.

A avaliação da morfologia da cinza de carvão e das zeólitas obtidas a partir do tratamento hidrotérmico alcalino, foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As amostras



foram dispostas em suporte de alumínio (*Stubs*), fixadas em fita adesiva de carbono, para a metalização com uma fina camada de ouro a fim de torná-las condutoras. A análise foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura, marca Carl Zeiss, modelo EV050, a 20 kV, no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização da cinza e dos materiais sintetizados

A determinação da composição química da cinza é bastante importante tanto com relação aos elementos majoritários quanto aos elementos traços presentes em sua composição, pois estes influenciam fortemente no seu potencial de aplicação e também determinam o impacto do seu descarte no meio ambiente (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2012). Os resultados da análise química por fluorescência de raios X da cinza volante e dos materiais zeolíticos estão apresentados na Tabela 2.

Conforme pode ser observado, aproximadamente 85 % da composição da cinza é de óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), o que confere a esse material um potencial para a síntese de zeólitas, pois os elementos destes óxidos, Si e Al, são os principais componentes das estruturas zeolíticas. A relação Si/Al da cinza de carvão estudada foi de 3,32. Estes resultados estão de acordo com alguns estudos reportados na literatura para as cinzas de carvão da mina de Candiota (RS) (LACERDA, 2015; ZEN, 2016; CARDOSO *et al.*, 2015). Segundo Belviso *et al.* (2015), a relação Si/Al desempenha um importante papel na composição da zeólita que pode ser formada. Porém, segundo Querol *et al.* (1997), a quantidade absoluta e o tipo de zeólitas não são somente dependentes da relação Si/Al, pois outras variáveis de síntese influenciam no processo de zeolitização, como concentração da solução alcalina, temperatura e tempo de reação.

A diminuição das concentrações de SiO_2 e Al_2O_3 no material zeolítico pode estar relacionada com a presença de parte desses compostos em solução após a síntese, solução que é separada do material zeolítico por filtração durante o processo de síntese. De acordo com Ferret (2004), no processo hidrotérmico de síntese de zeólitas a partir de cinzas ocorre a dissolução dos óxidos de silício e alumínio, no qual, parte desses compostos solubilizados é sintetizado em material zeolítico e uma pequena parte permanece em solução, o que resulta na redução desses óxidos quando se compara com a cinza. Fato que justifica o observado por fluorescência de raio X no presente estudo.

O aumento das concentrações de K_2O nos produtos de síntese também sugere a formação de zeólitas, devido à incorporação de cátions de compensação K^+ no material zeolítico, visto que a solução alcalina de ativação utilizada foi KOH. É possível observar que nas condições de síntese a 100 °C, o tempo apresentou influência nas quantidades de K_2O incorporados no material zeolítico, pois com o aumento do tempo de reação ocorreu um aumento da concentração deste composto nos materiais sintetizados. Além disso, nessa temperatura de síntese, foi possível observar que a concentração da solução alcalina também influenciou nas quantidades de óxido de potássio. Pois quando se compara os ensaios com solução alcalina de 3 mol/L com os ensaios a 5 mol/L um aumento nos percentuais deste composto, nos mesmos tempos de reação, foram observados. Ao se comparar a quantidade de K_2O do ensaio 4 com o 8, tem-se valores superiores desse composto nos mesmos tempos e temperatura de reação, 15,67 % e 18,36 %, respectivamente.

Além disso, a temperatura de síntese também influenciou nos resultados de K_2O . Nos ensaios 1 ao 8, com temperatura de 100 °C, as concentrações variaram de 12,73 % a 18,36 %. Já nos ensaios 9 ao 16, onde a temperatura de síntese foi de 150 °C, as concentrações de K_2O variaram de 14,96 % a 25,64 %. Comparando as temperaturas na mesma concentração da solução alcalina, 3 mol/L, a maior concentração de K_2O foi de 15,67 %, à 100 °C e 72 h. Para esta mesma concentração



Tabela 2 - Composição química da cinza e dos materiais zeolíticos.

Composição química	Concentração (%)																
	Cinza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	67,13	52,35	53,77	50,31	51,62	50,74	48,71	47,91	45,22	52,15	51,00	50,19	48,34	49,88	47,92	42,35	46,76
Al ₂ O ₃	17,85	15,70	16,17	15,12	12,84	13,24	15,07	12,79	14,55	12,30	14,56	13,17	12,91	12,48	12,69	11,97	11,32
Fe ₂ O ₃	7,38	9,99	8,07	7,78	7,44	8,32	7,12	7,35	7,41	8,26	7,04	5,57	7,67	7,49	7,05	8,66	6,93
K ₂ O	2,32	12,73	12,57	14,74	15,67	16,59	16,27	18,04	18,36	15,33	14,96	16,78	17,42	17,34	18,82	25,64	20,61
CaO	2,13	2,32	2,08	2,11	2,03	2,34	1,97	1,97	1,97	2,05	1,79	1,61	1,81	2,01	1,83	2,03	1,83
TiO ₂	0,91	1,08	0,98	0,92	0,89	0,97	0,85	0,88	0,89	0,97	0,87	0,67	0,84	0,93	0,84	0,71	0,86
SO ₃	0,76	0,14	-	0,08	0,08	0,08	0,06	0,07	0,09	0,11	0,06	0,09	-	0,09	0,07	0,11	0,08
MgO	0,54	0,63	0,54	0,51	0,43	0,53	0,48	0,50	0,45	0,48	0,50	0,48	0,48	0,45	0,42	-	0,41
MnO	0,05	0,09	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06
ZrO ₂	0,05	0,08	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,09	0,04
ZnO	0,04	0,07	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
SrO	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,05	0,03
Rb ₂ O	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,05	0,03
Y ₂ O ₃	0,01	-	-	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	-	0,02	0,01	0,01	0,02	-	-	-	0,01
CO ₂	0,55	4,74	5,55	8,21	8,75	6,91	9,25	10,26	10,86	8,08	9,01	11,27	10,29	9,13	10,18	8,21	11,01
Na ₂ O	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NiO	-	-	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Si/Al	3,32	2,95	2,94	2,94	3,55	3,38	2,86	3,31	2,75	3,74	3,09	3,36	3,31	3,53	3,33	3,12	3,65

REALIZAÇÃO



CORREALIZAÇÃO



INFORMAÇÕES

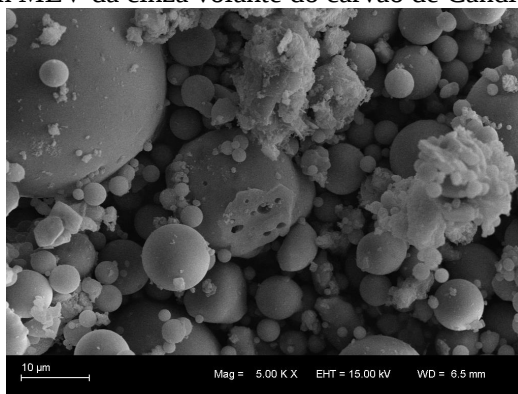
abes-rs@abes-rs.org.br
51 3212.1375

de solução, à 150 °C, a maior concentração de K_2O foi de 17,43 % à 72h. Para concentração de 5 mol/L, a maior concentração de K_2O a 100 °C, foi de 18,36 % em 72 h, já a 150 °C, foi de 25,64 % em 48 h.

Os elevados teores de óxido de ferro nas cinzas de carvão e, conseqüentemente, nas zeólitas eram esperados, devido às elevadas concentrações desses compostos no carvão proveniente da mina de Candiota.

Na Figura 1 está apresentada a micrografia da cinza de carvão, a qual confirma que as cinzas volantes de carvão são compostas principalmente por partículas esféricas de tamanhos variáveis e, ocasionalmente, partículas de carvão não queimado também são observadas. De acordo com Rohde *et al.* (2006), as condições de queima do carvão determinam a morfologia das partículas das cinzas volantes. Quando a queima ocorre na forma pulverizada, as cinzas resultantes contêm predominantemente partículas esféricas e partículas com formas irregulares, concordando com o apresentado na Figura 1.

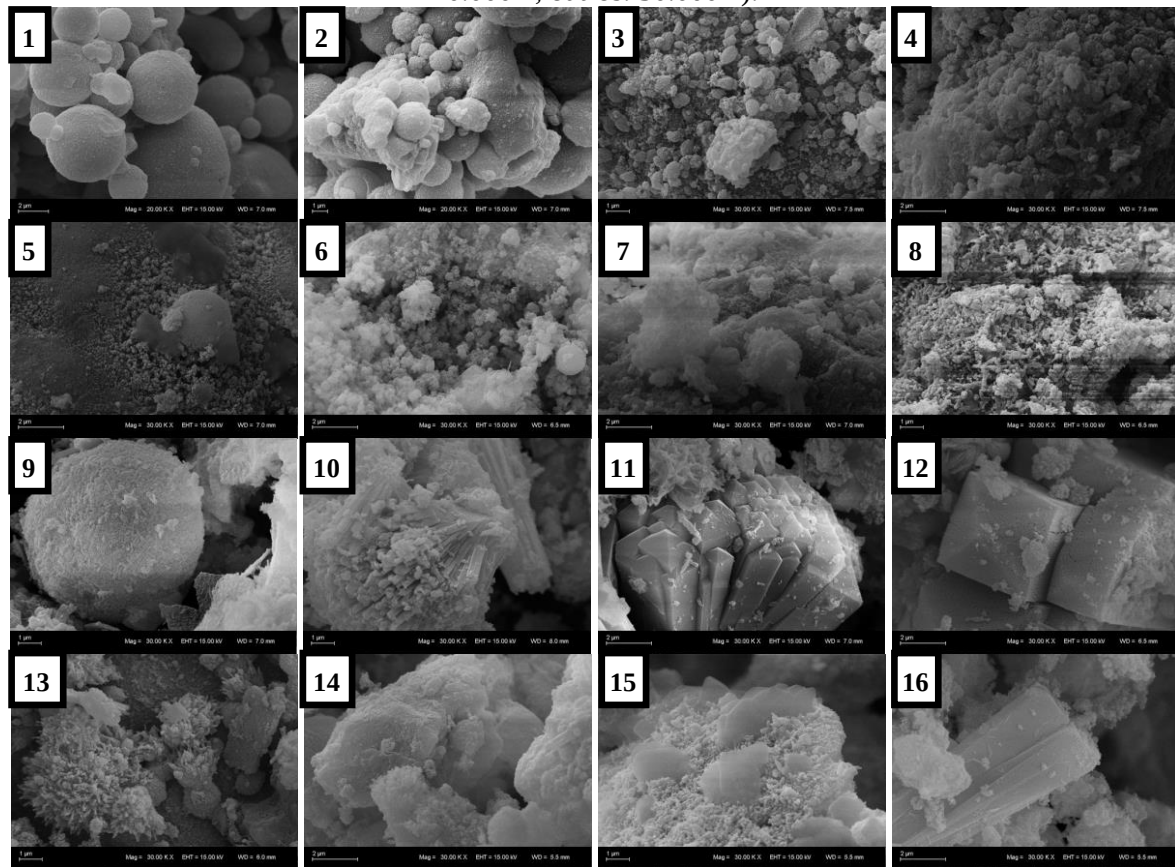
Figura1 – Imagem MEV da cinza volante do carvão de Candiota (RS) (5.000 x).



A Figura 2 apresenta as imagens de MEV dos materiais zeolíticos sintetizados. Comparando-se as Figuras 1 e 2, que mostram as morfologias da cinza e dos materiais sintetizados, é possível observar que houve mudança morfológica desses materiais após a síntese hidrotérmica com KOH. Nas imagens dos materiais sintetizados nos ensaios 10, 11 e 12 é possível observar estruturas bem definidas e regulares, o que sugere a formação de zeólitas na temperatura de 150 °C, 3 M de KOH em tempos de reação de 24, 48 e 72 horas. O mesmo é observado na imagem do ensaio 16, nas condições de síntese de 150 °C, 5 M de KOH e 72 horas de tempo de reação.

No ensaio 1 observa-se partículas esféricas provavelmente de cinzas não reagidas, indicando que as condições de síntese de 100 °C, 3 M e 8 horas podem não ter sido suficientes para ocorrer a reação de formação de zeólitas. Nos ensaios 2 e 3 observa-se formas irregulares, indicando um possível início de reação. Neste caso, as condições de síntese zeolítica desses ensaios, temperatura de 100 °C, solução alcalina 3M e tempos de 24 e 48 h, não foram suficientes para que houvesse a total reação das cinzas em zeólitas. No ensaio 9, onde as condições de síntese foram de 150 °C, 3 M e 8 h, observa-se a presença de esferas recobertas por partículas, essas estruturas podem estar relacionadas com o fato de que as zeólitas precipitam sobre a superfície das partículas de cinzas que não reagiram durante a síntese hidrotérmica (SINGH & KOLAY, 2002).

Figura 2 – Imagens MEV das estruturas zeolíticas obtidas a partir de cinzas volantes (Ensaio 1 e 2: 20.000 x, outros: 30.000 x).



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados preliminares obtidos é possível afirmar que zeólitas podem ser sintetizadas, a partir de cinzas volantes do carvão da mina de Candiota (RS), pelo processo de tratamento hidrotérmico clássico utilizando como base KOH comercial e água de abastecimento público. As análises de FRX revelam que os elementos SiO_2 e Al_2O_3 são componentes majoritários das cinzas, representam cerca de 85 % do material, como esses elementos são precursores para a formação de zeólitas, fica evidente que as cinzas geradas da combustão do carvão de Candiota apresentam potencial para síntese de zeólitas. O aumento das concentrações de K_2O nos produtos de síntese também confirma a incorporação de cátions de compensação K^+ nos materiais zeolíticos. Pelas imagens MEV é possível observar padrões zeolíticos bem definidos nos ensaios 10, 11, 12 e 16, nas condições de 150 °C, 3 e 5 M e tempos de 24, 48 e 72 h, sugerindo a efetiva formação de zeólitas. Todas as variáveis de síntese, temperatura, tempo e concentração da base, influenciaram no processo de formação de zeólita. No entanto, a identificação das zeólitas obtidas nas diferentes condições de síntese estudadas deve ser realizada a partir da análise de difração de raios X (DRX), próxima etapa deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ª ed. Brasília: Aneel, 2008.



AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, p. 327-363, 2010.

BANDURA, L.; PANEK, R.; ROTKO, M.; FRANUS, W. Synthetic zeolites from fly ash for an effective trapping of BTX in gas stream. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 223, p. 1-9, 2016.

BELVISO, C.; GIANNOSSA, L. C.; HUERTAS, F. J.; LETTINO, A.; MANGONE, A.; FIORE, S. Synthesis of zeolites at low temperatures in fly ash-kaolinite mixtures. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 212, p. 35-47, 2015.

CARDOSO, A. M.; HORN, M. B.; FERRET, L. S.; AZEVEDO, C. M. N.; PIRES, M. Integrated synthesis of zeolites 4A and Na-P1 using coal fly ash for application in the formulation of detergents and swine wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 287, p. 69-77, 2015.

FERRET, L. S. **Zeólitas de cinzas de carvão: síntese e uso**. Porto Alegre, 154 p., 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GAREA, A.; FERNÁNDEZ, I.; VIGURI, J. R.; ORTIZ, M. I.; FERNÁNDEZ, J.; RENEDO, M. J.; IRABIEN, J. A. Fly-ash/calcium hydroxide mixtures for SO₂ removal: structural properties and maximum yield. **Chemical Engineering Journal**, v. 66, p. 171-179, 1997.

IZIDORO, J. C. **Síntese e caracterização de zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão**. São Paulo, 148 p., 2013. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Autarquia associada à Universidade de São Paulo.

KOSHY, N.; SINGH, D. N. Fly ash zeolites for water treatment applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, p. 1460-1472, 2016.

LACERDA, L. V. **Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de cinzas volantes de carvão mineral utilizado na usina termoeletrica de Candiota-RS**. Porto Alegre, 66 p., 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

QUEROL, X.; MORENO, N.; UMAÑA, J. C.; ALASTUEY, A.; HERNÁNDEZ, E.; LÓPEZ-SOLER, A.; PLANA, F. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. **International Journal of Coal Geology**, v. 50, p. 413-423, 2002.

QUEROL, X.; PLANA F.; ALASTUEY, A.; LÓPEZ-SOLER, A. Synthesis of Na-zeolites from fly ash. **Fuel**, v. 76, n. 8, p. 793-799, 1997.

QUEROL, X.; UMAÑA, J. C.; PLANA, F.; ALASTUEY, A.; LOPEZ-SOLER, A.; MEDINACELI, A.; VALERO, A.; DOMINGO, M. J.; GARCIA-ROJO, E. Synthesis of zeolites from fly ash at pilot plant scale. Examples of potential applications. **Fuel**, v. 80, p. 857-865, 2001.

ROCHA JUNIOR, C. A. F.; SANTOS, S. C. A.; SOUZA, C. A. G.; ANGÉLICA, R. S.; NEVES, R. F. Síntese de zeólitas a partir de cinza volante de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica. **Cerâmica**, v. 58, p. 43-52, 2012.

ROHDE, G. M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais**. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. 202 p.



SINGH, D. N., KOLAY, K. Simulation of ash-water interaction and its influence on ash characteristics. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 28, p.267-299, 2002.

WANG, J.; LI, D.; JU, F.; HAN, L.; CHANG, L.; BAO, W. Supercritical hydrothermal synthesis of zeolites from coal fly ash for mercury removal from coal derived gas. **Fuel Processing Technology**, v. 136, p. 96-105, 2015.

WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources. Inglaterra e País de Gales. 2013.

YAO, Z. T.; JI, X. S.; SARKER, P. K.; TANG, J. H.; GE, L. Q.; XIA, M. S.; XI, Y. Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. **Earth-Science Reviews**, v. 141, p. 105-121, 2015.

ZEN, B. P. **Síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão e aplicação como adsorventes**. Porto Alegre, 111 p. 2016. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.