



PRODUÇÃO DE ALUMINOSSILICATOS A PARTIR DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E SUA UTILIZAÇÃO PARA REMOÇÃO DE ÍONS COBRE DE SOLUÇÕES AQUOSAS

F. A. Cunha¹; P. H. Britto-Costa¹; L. A. M. Ruotolo¹

1-Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos
Rod. Washington Luiz, km 235 – CEP: 135655-905 – São Carlos - SP – Brasil
Telefone: (16) 3351-8706 – Fax: (16) 3351-8266 – Email: plus@ufscar.br

RESUMO: Neste trabalho foi investigada a capacidade de troca iônica de íons cobre por aluminossilicatos (zeólitas) produzidos a partir de bagaço de cana-de-açúcar. Primeiramente foram produzidas cinzas através da calcinação da fuligem proveniente de uma caldeira da indústria sucroalcooleira. Para a produção das zeólitas as cinzas foram submetidas a um tratamento hidrotérmico em autoclave usando hidróxido de sódio. Verificou-se que a temperatura e o tempo de calcinação influenciam nas propriedades de troca iônica do material e as condições otimizadas apontam que esta etapa deve ser realizada a 600 °C, por 5 horas. Estudou-se também o efeito da diminuição da razão Si/Al, através da adição de uma fonte externa de Al, sobre as propriedades de troca iônica. A caracterização dos materiais sintetizados revelou a formação da zeólita P1 e que o tratamento hidrotérmico e a adição da fonte de alumínio alteraram a estrutura e a morfologia do material, levando a valores elevados de troca iônica, sendo o melhor valor obtido igual 140 mg g⁻¹ para uma razão Si/Al igual a 2,0.

PALAVRAS-CHAVE: troca iônica, aluminossilicatos, cinza de bagaço de cana-de-açúcar

ABSTRACT: In this work the sorption of copper ions using aluminosilicates (zeolites) obtained from sugar cane bagasse was investigated. Firstly, the ashes were produced by calcinating the fly ash collected in an ethanol plant. The zeolites were synthesized by the hydrothermal treatment of the ashes in autoclaves using sodium hydroxide. It was verified that calcination temperature and time have influence on the zeolite ion-exchange properties. Calcination at 600 °C during 5 hours optimizes the zeolite ion-exchange properties. It was also studied the effect of diminishing the Si/Al ratio on the ion-exchange through the addition of an external Al source. The XRD showed the formation of the P1 zeolite. The hydrothermal treatment and the addition of Al change the zeolite structure and morphology, also changing its ion-exchange properties. The best ion-exchange capacity was 140 mg g⁻¹ which was obtained using a Si/Al ratio of 2.0.

KEYWORDS: ion exchange; aluminosilicates; ash of sugar cane bagasse

1. INTRODUÇÃO

As cinzas são resíduos de várias indústrias que executam combustão, como por exemplo, a indústria sucroalcooleira, que queima o bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia. Dessa forma, esse setor produz toneladas de cinzas, que na sua maior parte é armazenada, devido ao alto custo de transporte e o baixo valor no mercado, não compensando a sua comercialização. Porém

até mesmo sua armazenagem acaba sendo uma dificuldade devido ao grande volume produzido (Fungaro e Bruno, 2009). Diante deste cenário é interessante transformar as cinzas em um produto de maior valor agregado e, conseqüentemente, em uma nova fonte de lucro para as empresas, reduzindo ainda o impacto ambiental negativo causado por sua disposição.

Várias pesquisas sobre a composição das cinzas foram realizadas, como as citadas em Gupta *et al.* (1998) e Gupta e Sharma (2003), que



mostram que as cinzas são constituídas principalmente por SiO_2 e Al_2O_3 , ou seja, são fontes de Si e Al, elementos fundamentais da estrutura básica de zeólitas. Zeólitas são aluminossilicatos cristalinos com estruturas tridimensionais constituídas por tetraedros formados por átomos de silício e alumínio ligados por átomos de oxigênio (Nibou *et al.*, 2010). A presença de Al^{3+} na estrutura resulta em cargas negativas, que serão compensadas por íons de metais alcalinos e alcalinos terrosos, denominados cátions de compensação, que aderem à estrutura, e são responsáveis pelas propriedades de troca iônica destes materiais. Adicionalmente, sua estrutura microporosa com cavidades de um tamanho bem específico, além de lhe conferir uma grande área superficial, também lhe confere seletividade e propriedades para troca iônica, adsorção e catálise.

Diversos efluentes industriais possuem metais pesados em solução, tais como Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , entre outros. Esses poluentes não biodegradáveis podem causar sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente e, devido a isso, existe uma rigorosa legislação para o controle do descarte de efluentes com essa característica. Diante disto, o desenvolvimento de novos processos para a remoção dos metais de águas residuárias vem sendo cada vez mais estudado com o objetivo de se obter métodos mais eficientes e menores custos.

Visando a possibilidade de se utilizar as cinzas geradas como resíduos na indústria sucroalcooleira, este trabalho avaliou a capacidade de remoção de íons Cu^{2+} presentes em soluções aquosas diluídas, por zeólitas produzidas a partir de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Reagentes

A cinza utilizada era proveniente da calcinação da fuligem gerada na queima do bagaço de cana-de-açúcar na caldeira da Usina Califórnia, de Parapuã-SP. A fuligem foi coletada na saída do lavador de gases e submetida a diferentes condições de calcinação para a obtenção das cinzas. As cinzas, por sua vez, foram submetidas a diferentes tratamentos para a obtenção das zeólitas. Os reagentes usados foram NaOH $3,5 \text{ mol L}^{-1}$, H_2O_2 30% m/v e isopropóxido de alumínio. Para os experimentos de troca iônica foram usadas soluções de Cu^{2+} ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) com diferentes

concentrações iniciais. Todos os reagentes utilizados eram de grau analítico e as soluções foram preparadas usando água deionizada.

2.2. Preparação das zeólitas

Primeiramente, a fuligem coletada foi separada da areia por flotação, filtradas, secas em estufa a 100°C , maceradas e finalmente peneiradas. Para calcinação e síntese das zeólitas foi usada a fuligem passante pela peneira de 50 mesh ($< 297 \text{ mm}$). A fuligem foi calcinada em mufla a diferentes temperaturas e tempos de calcinação. Posteriormente as cinzas obtidas passaram por dois diferentes tipos de tratamento, descritos no Quadro 1. Após esses tratamentos, o material resultante era filtrado e seco em estufa a 60°C por 24 horas.

Nos experimentos em que se adicionou uma fonte adicional de alumínio (isopropóxido de Al) – tratamento C – foi utilizada a fuligem passante pela peneira de 400 mesh ($d_p < 38 \mu\text{m}$), as quais foram calcinadas em mufla por 8 horas a 600°C . As cinzas obtidas foram adicionadas a autoclaves, juntamente com diferentes quantias de isopropóxido de alumínio. Também eram adicionados ao sistema $8,0 \text{ mL}$ de NaOH $3,5 \text{ mol L}^{-1}$ para cada grama de cinza.

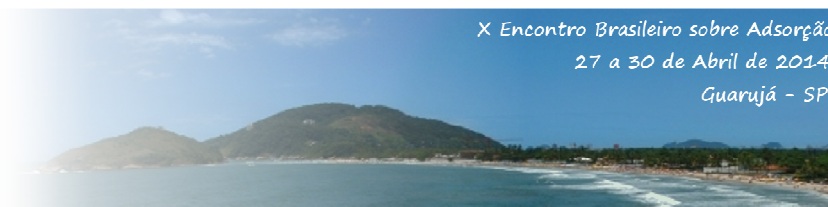
2.3. Caracterização dos materiais

Para a identificação das estruturas dos materiais as amostras foram analisadas por difração de raios-X usando um difratômetro Siemens, modelo D5005, radiação $\text{CuK}\alpha$ com filtro de Ni, 40 kV, 40 mA e varredura de $2^\circ/\text{min}$.

A morfologia das cinzas submetidas aos diferentes tratamentos foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando um microscópio Phillips, modelo XL 30 FEG.

2.4. Troca iônica

Cada amostra sintetizada teve sua capacidade de remoção de íons Cu^{2+} avaliada pela adição de uma quantia pré-estabelecida de cinza em Erlenmeyers contendo um volume preciso de solução contendo íons Cu^{2+} . Os Erlenmeyers foram mantidos sob agitação em um *shaker* a 150 rpm e 30°C por 24h, a fim de garantir que o equilíbrio termodinâmico fosse atingido. Ao final do experimento, a solução foi separada das cinzas por filtração simples e sua concentração determinada por espectrofotometria de absorção atômica (Variam, modelo EspectraAA200). A capacidade de troca após atingido o equilíbrio (q_{eq}) foi calculada usando a Equação 1,



$$q_{eq} = \frac{(C_0 - C_f) \times V}{m_s} \quad (01)$$

onde C_0 e C_f são as concentrações inicial e final do adsorbato na solução, respectivamente; V é o volume de solução e m_s a massa de cinza utilizada.

Quadro 1. Tipos de tratamento aplicados à cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Amostras	Tratamento
S	A fuligem era calcinada, porém nenhum tratamento químico era aplicado
A	Tratamento A: calcinação e oxidação com 55 mL H_2O_2 30% m/v, em refluxo a 60°C, por 24 horas
B	Tratamento B: calcinação e reação em autoclave com NaOH 3,5 mol L ⁻¹ , por 24 horas, em estufa a 100 °C
C	Tratamento C: análogo ao tratamento B, com adição de isopropóxido de alumínio como fonte de alumínio

As amostras foram codificadas indicando-se, respectivamente, o tipo de tratamento, a temperatura e o tempo utilizados para a calcinação da fuligem. Assim, a amostra B-600-4 indica o material sintetizado após o tratamento B utilizando a cinza obtida pela calcinação da fuligem a 600 °C por 4 horas. Nos casos em que houve a adição de isopropóxido de alumínio, a codificação era acrescida da indicação da razão silício/alumínio no gel de síntese. Assim, a amostra C-600-8-Si/Al 3,0 indica o material produzido após o tratamento C com uma razão Si/Al 3,0 utilizando a cinza obtida pela calcinação da fuligem a 600 °C por 8 horas, por exemplo.

2.5. Efeito do pH

Para verificar a influência do pH foram adicionados 40 mL de solução contendo 100 ppm de Cu^{2+} em Erlenmeyers e o pH monitorado por

um pHmetro. Para atingir o pH desejado foram utilizadas soluções concentradas de H_2SO_4 e NaOH. Quando atingido o pH desejado, foram adicionadas 50 mg da cinza calcinada a 600°C por 24 horas e submetida ao tratamento B. Foi investigada a faixa de pH de 1,0 a 4,5.

2.6. Cinética de troca iônica

A cinética de troca iônica foi determinada adicionando-se 100 mg de cinza a 80 mL da solução de Cu^{2+} 100 ppm. O experimento foi realizado em uma célula de troca iônica, encamisada para controle da temperatura, e com agitação magnética vigorosa, conforme ilustrado na Figura 1.

Após a solução ter atingido a temperatura desejada, adicionou-se a cinza e a partir deste momento iniciava-se a contagem do tempo. Em intervalos de tempo pré-estabelecidos eram coletadas amostras para posterior análise de concentração de cobre por absorção atômica. As amostras eram coletadas com um pipetador automático com ponteira com filtro para evitar a remoção de partículas. O volume de solução permanecia praticamente inalterado uma vez que o volume coletado de cada amostra era de apenas 50 μ L.

O processo descrito foi realizado para três temperaturas diferentes (30, 45 e 60°C).

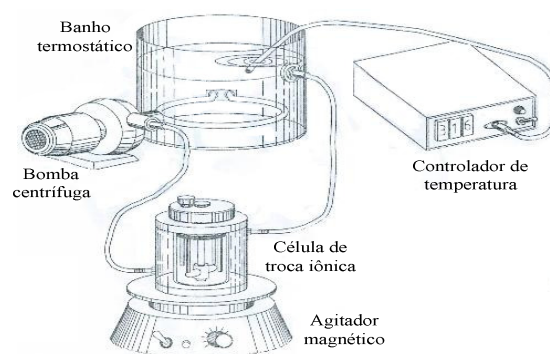


Figura 1. Representação esquemática do sistema usado nos experimentos cinéticos.

2.7. Isotermas

As isotermas foram obtidas a partir de soluções com diferentes concentrações de íons cobre. Um volume de 50 mL destas soluções foram adicionados a Erlenmeyers juntamente com uma massa exata da cinza obtida após calcinação a 600 °C por 8 horas e com o tratamento C utilizando-se uma razão Si/Al = 2. Os Erlenmeyers



foram mantidos sob agitação em um *shaker* a 150 rpm e 30°C por 48 horas para garantir que o equilíbrio termodinâmico fosse alcançado. As suspensões foram filtradas e a concentração final determinada por espectrofotometria de absorção atômica.

3. RESULTADOS

3.1. Efeito da calcinação

A Figura 2 mostra os resultados de perda de massa da fuligem de bagaço de cana-de-açúcar em função da temperatura utilizada. A perda de massa da cinza está associada principalmente à combustão do carbono presente nas amostras, sendo o seu valor máximo de aproximadamente 58%, obtido com a queima por 5 horas a 800 °C.

Verifica-se que calcinação a 300 °C não é eficiente para remover todo o carbono da amostra, no entanto, a calcinação a 600 °C por 4 horas remove praticamente todo o conteúdo de carbono. Aumentando-se a temperatura para 800 °C a cinética de remoção do carbono aumenta, reduzindo para aproximadamente 3 horas o tempo necessário para se atingir a perda máxima de massa. Diante destes resultados, foi escolhida como a melhor condição de calcinação aquela de 600 °C e 4 horas, pois apesar de que a 800 °C o tempo se reduz para 3 horas, o custo e as dificuldades de se trabalhar a esta temperatura não seriam justificados.

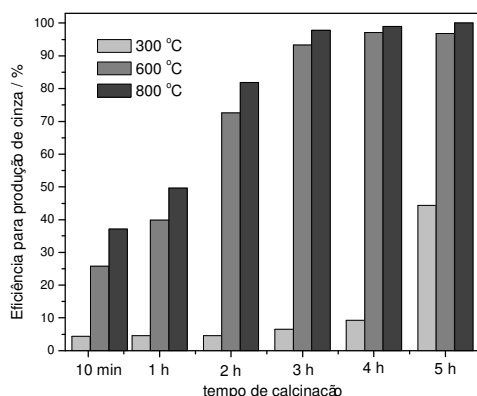


Figura 2. Eficiência de produção de cinza em função do tempo e da temperatura de calcinação.

3.2. Caracterização dos materiais

A Figura mostra os difratogramas de raios-X (DRX) para a fuligem e para as cinzas calcinadas a 600°C por 4h sem nenhum tratamento

e submetidas ao tratamento B. Os picos mais intensos do difratograma referem-se ao dióxido de silício na forma de quartzo. No difratograma para a fuligem verifica-se que há o surgimento de uma saliência na curva entre os ângulos 20 e 30°, indicando o material amorfo correspondente ao carbono não queimado na caldeira. Já para as amostras calcinadas, essa saliência deixou de existir, indicando que a calcinação foi eficiente para remover o carbono. Além disso, para 2θ entre 36,7° e 42,5°, a amostra sem calcinação não possui picos, ao passo que esses aparecem após a calcinação. Quando submetida ao tratamento hidrotérmico com NaOH, houve o surgimento de novos picos em 2θ iguais a 23, 42, 55 e 63°. Esses picos indicam a formação de aluminossilicatos.

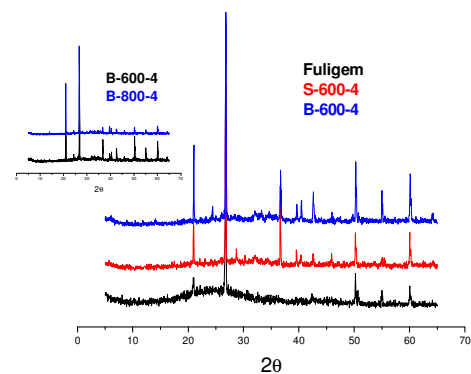


Figura 3. DRX das amostras calcinadas a diferentes temperaturas e com diferentes pré-tratamentos.

A Figura 4 mostra micrografias de MEV para os diferentes materiais. Verifica-se que tanto a calcinação quanto o tratamento com peróxido de hidrogênio causam uma mudança morfológica na estrutura, porém os materiais formados não possuem geometria definida. Quando as cinzas foram calcinadas a 600°C e tratadas com hidróxido de sódio houve a formação de um material com uma morfologia diferente: partículas esféricas com tamanho variando de 2 a 5 μm. No material submetido ao mesmo tratamento hidrotérmico, porém calcinado a 800°C, não houve a formação das partículas esféricas.

3.3. Sorção de íons Cu²⁺

3.3.1. Influência do pH inicial

O efeito do pH da solução sobre a capacidade de troca iônica é de grande importância, uma vez que nos efluentes industriais



pode haver uma grande variação de pH. O pH exerce influência na remoção de metais e compostos orgânicos pois pode modificar o caráter dos íons trocáveis e o caráter do trocador iônico.

Como pode ser observado na Figura 5, em baixos valores de pH a capacidade de troca iônica foi praticamente nula, o que pode ser atribuído ao fato que em baixos valores de pH há um excesso de cargas positivas que tornam a carga superficial das partículas também positiva, desfavorecendo então a troca iônica e criando uma competição entre íons H^+ e Cu^{2+} pelo sítios ativos do material. Assim, quando se aumenta o pH observa-se um aumento da capacidade de troca iônica, o que pode ser atribuído a uma menor competição dos íons cobre com os prótons pelo sítio de troca. Os melhores resultados foram obtidos para os pHs de 4,0 e 4,5, resultado semelhante ao obtido no trabalho de Fungaro e Silva (2002), no qual o pH ótimo foi de 4,5. O pH natural da solução de íons cobre é de aproximadamente 4,5, dessa forma, não foi necessário o ajuste do pH nos experimentos posteriores de troca iônica. O aumento do pH para valores maiores que 4,5 provocava a precipitação dos íons cobre após a adição da cinza.

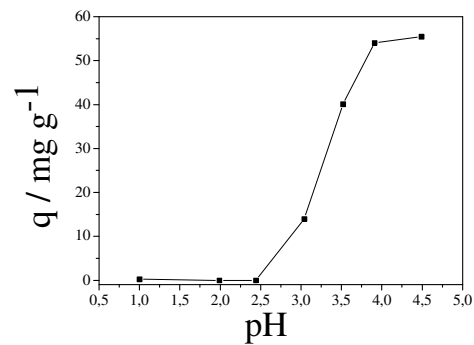


Figura 5. Capacidade de troca iônica em função do pH. $C_0 = 93 \text{ mg L}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$.

3.3.2. Capacidade de troca iônica

Os resultados da troca iônica para amostras obtidas sob diferentes condições de calcinação e com os tratamentos A e B são mostrados na Figura 6. Verifica-se que a fuligem possui baixa capacidade de remoção, o que também foi observado por Gupta e Sharma (2003). Após a calcinação a 600 °C e a obtenção da cinza observa-se que não houve um aumento expressivo de q_{eq} , no caso da calcinação a 800 °C os resultados em termos de remoção foram piores. O tratamento com peróxido de hidrogênio (tratamento A) não apresentou nenhuma melhoria em termos de remoção dos íons cobre, pelo contrário, as amostras submetidas a esse tratamento apresentaram piores resultados que aqueles obtidos com o material apenas calcinado a 600 °C.

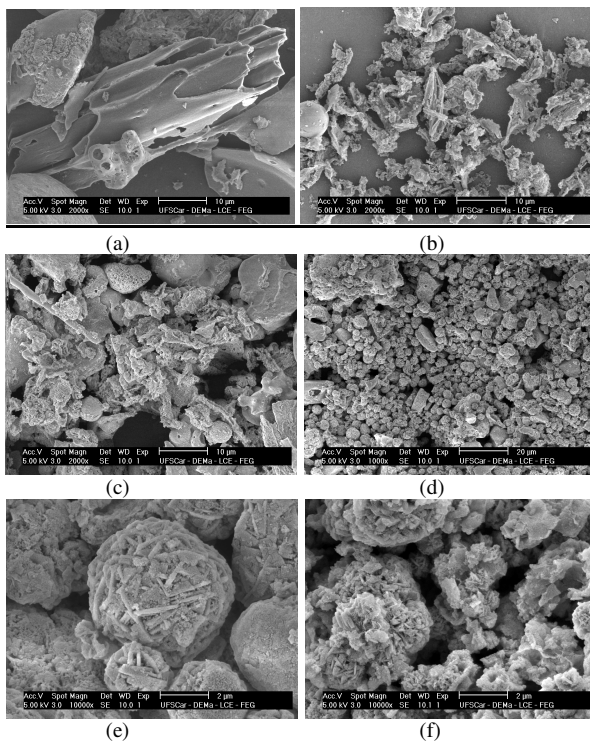


Figura 4. Micrografias MEV: (a) fuligem; (b) cinza S-600-4; (c) cinza A-600-4; (d)-(e) cinza B-600-4 e (f) cinza B-800-4.

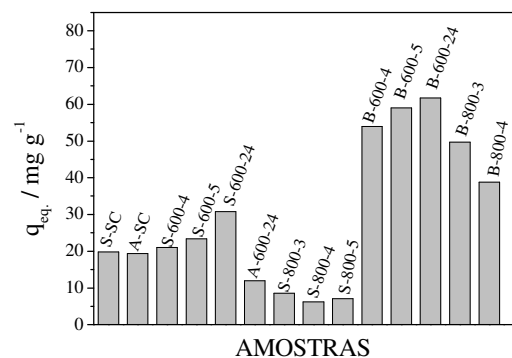


Figura 6. Capacidade de troca iônica em função das condições de preparação dos materiais. $C_0 = 91,4 \text{ mg L}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$.

Um grande aumento da capacidade de troca iônica ocorreu quando as cinzas foram obtidas por calcinação a 600 °C e submetidas ao tratamento com NaOH (tratamento B). Nota-se que as amostras calcinadas a 800 °C removeram menos



íons Cu^{2+} , indicando que as modificações estruturais e morfológicas observadas nas análises de raios-X e MEV, respectivamente, afetaram negativamente a capacidade de troca iônica do material. Constatou-se ainda que, para as amostras calcinadas a $600\text{ }^\circ\text{C}$, a capacidade de troca iônica aumentou com o tempo de calcinação, sendo que a maior quantidade removida ocorreu para a amostra calcinada por 24 horas. Porém esse aumento não foi significativo a ponto de viabilizar a calcinação por tempo tão prolongado. Conclui-se, portanto, que a melhor temperatura e tempo de calcinação, considerando-se o resultado de capacidade de troca iônica, foram de $600\text{ }^\circ\text{C}$ e 5 horas, respectivamente.

3.3.3. Cinética de troca iônica

Para os experimentos cinéticos foi utilizada a amostra B-600-4. A Figura 7 mostra o grau de cobertura (q/q_{eq}) em função do tempo de troca iônica para diferentes temperaturas. Nota-se que o processo é rápido nos primeiros 10 minutos e depois se torna lento. Além disso, a cinética é dependente da temperatura, pois com o aumento desta, há um incremento na velocidade do processo, como também observado por Hirano (1999) em seus estudos sobre troca iônica de íons cobre utilizando resinas comerciais. Dessa maneira, o experimento conduzido a $60\text{ }^\circ\text{C}$ apresentou a maior velocidade de remoção, sendo está a única condição em que o tempo de 2 horas foi suficiente para que o equilíbrio fosse alcançado.

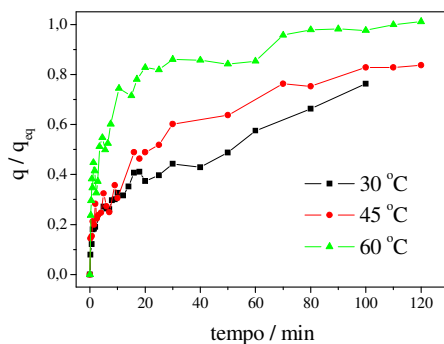


Figura 7. Grau de cobertura em função do tempo para diferentes temperaturas.

3.4. Efeito da adição de fonte de alumínio ao gel de síntese

Para determinar a quantidade de alumínio existente nas cinzas foi feita análise de absorção atômica deste elemento, que revelou a existência de $49\text{ mg Al}^{3+}/\text{g}$ de cinza. Utilizando-se análise de ICP (*Inductively Coupled Plasma*) determinou-se também

a quantidade de silício na matéria-prima e obteve-se o valor de 335 mg Si/g de cinza. Dessa forma, verificou-se que a razão Si/Al nas cinzas é de 6,84.

Para investigar o efeito da adição de fonte de alumínio ao gel de síntese, foram acrescentadas diferentes quantias de isopropóxido de alumínio ao sistema. A partir da massa de isopropóxido de alumínio foi possível calcular a quantidade de Al^{3+} que foi acrescentada ao sistema reacional. Com isso, calculou-se a razão Si/Al presente no gel de síntese para cada amostra.

3.4.1. Caracterização dos materiais

A Figura 8(a) mostra os difratogramas de raios-X para os materiais sintetizados utilizando diferentes razões Si/Al. Nota-se que a amostra C-600-8-Si/Al-2,0, que corresponde àquela com o melhor desempenho para a remoção de íons cobre (vide Figura 9), possui alguns picos inexistentes nos outros materiais. Também se observa que a adição de isopropóxido de alumínio causou surgimento de um pico em 2θ igual a 13° . A posição de muitos picos coincide com o trabalho de Fungaro e Bruno (2009), que obtiveram a zeólita Na-P1.

As imagens de MEV para a amostra C-600-8-Si/Al-2,0 mostram que houve novamente uma alteração da morfologia do material. As partículas assemelham-se a bastonetes de aproximadamente 400 nm que se agrupavam formando partículas maiores. Essa morfologia não foi observada para as amostras C-600-8-Si/Al-2,3 e C-600-8-Si/Al-3,0, as quais apresentaram morfologias semelhantes às da Figura 4 (d)-(e).

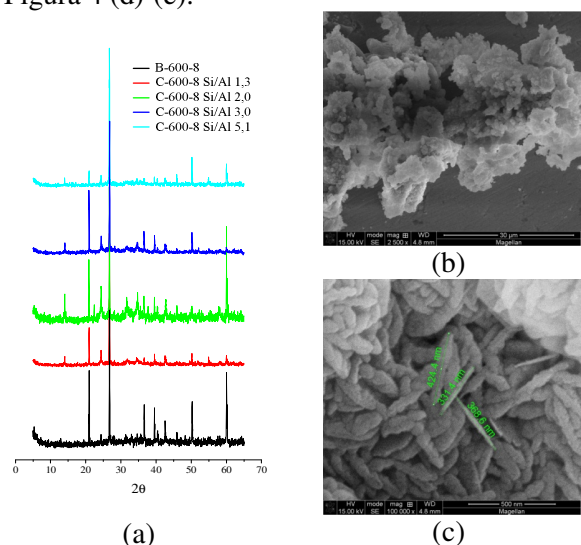


Figura 8. (a) DRX dos materiais obtidos em função da razão isopropóxido de Al/cinza; (b) e (c) Imagens MEV da amostra C-600-8-Si/Al-2,0: (b) 7500X e (c) 100.000X.



3.4.3. Sorção de íons Cu^{2+}

A influência da presença de alumínio em proporções diferentes pode ser observada na Figura 9. Verifica-se que com a adição da fonte de Al e a diminuição da razão Si/Al há um aumento da capacidade de troca iônica. Isso ocorre porque a estrutura terá um maior número de átomos Si substituídos por Al, resultando em mais cargas negativas na estrutura e, conseqüentemente, em um maior número de cátions de compensação.

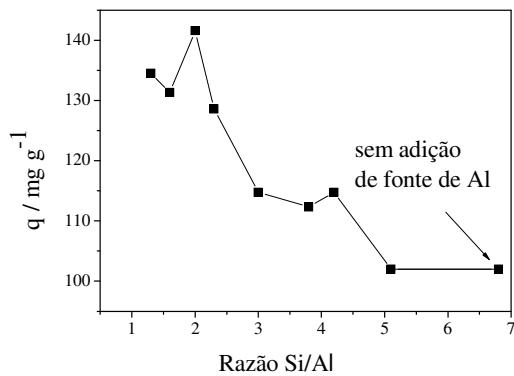


Figura 9. Capacidade de troca iônica em função da razão Si/Al. Condições da troca iônica: $C_0 = 389$ mg/L, $V = 40$ mL; $m \sim 0,050$ g, $T = 30$ °C, agitação a 150 rpm por 24 h. Cinza utilizada: B-600-8.

3.4.4. Isoterma

Os modelos comumente encontrados na literatura para descrever os dados experimentais das isotermas de adsorção em tratamento de águas e efluentes são os modelos de Langmuir e Freundlich.

A Figura 10 mostra a isoterma de troca iônica de íons cobre para o material C-600-8-Si/Al-2,0. A isoterma observada foi de classe H, da qual se infere que a superfície do adsorvente possui alta afinidade pelo soluto adsorvido (Giles *et al.*, 1960).

Foram avaliados os modelos de Langmuir e Freundlich, porém apenas o primeiro ajustou-se aos dados experimentais da Figura 10. Através de uma regressão linear (apêndice da Figura 10), foram calculados os parâmetros do modelo mostrado na Equação 2, onde Q_0 é a capacidade de sorção de saturação da monocamada, e o parâmetro “b” é a constante de equilíbrio. Os valores obtidos para essas variáveis foram de 135,1 mg g⁻¹ e 0,083 L g⁻¹, respectivamente. A partir destes parâmetros, foi possível calcular o fator adimensional de

separação R_L (Equação 3), que indica a preferência do soluto pela fase sólida ou pela fase líquida e também prediz se isoterma é irreversível ($R_L=0$), favorável ($0 < R_L < 1$), linear ($R_L=1$) ou desfavorável ($R_L > 1$). Os valores deste parâmetro para todos os experimentos estiveram entre 0 e 1, indicando um processo favorável.

$$q_e = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (02)$$

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad (03)$$

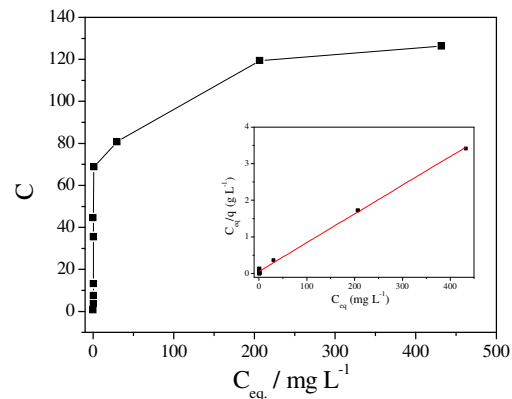


Figura 10. Isoterma de troca iônica.

4. CONCLUSÕES

Verificou-se que a capacidade de troca é influenciada pelas condições de calcinação da fuligem e pelo tratamento químico utilizado. O tratamento químico empregando hidróxido de sódio leva a melhores resultados de troca iônica. A temperatura de calcinação mais adequada é a de 600 °C, pois produz os melhores resultados de troca iônica. Apesar do tempo de calcinação de 4 horas ser adequado para a remoção do carbono das cinzas, a calcinação por 5 horas produz melhores resultados em termos de remoção dos íons metálicos. A cinética de troca iônica foi rápida nos primeiros 10 minutos e aumentou consideravelmente em função do aumento da temperatura. Tanto o tratamento com hidróxido de sódio, como a adição de isopropóxido de alumínio causaram mudanças na estrutura, na



morfologia do material e na capacidade de troca iônica para íons cobre. A razão Si/Al que apresentou melhor eficiência na remoção de Cu^{2+} foi de 2,0.

Comparando-se o melhor valor de capacidade obtido neste trabalho ($141,6 \text{ mg g}^{-1}$) com o obtido por Hirano (1999) utilizando resinas comerciais em concentrações de cobre semelhantes ($46,7 \text{ mg g}^{-1}$), constata-se que os aluminossilicatos obtidos a partir da cinza de bagaço de cana-de-açúcar são materiais promissores para serem utilizados como trocadores iônicos visando a remoção de íons metálicos.

5.REFERÊNCIAS

- FUNGARO, D. A.; BRUNO, M. Remoção de azul de metileno de solução aquosa usando zeólitas sintetizadas com amostras de cinzas de carvão diferentes. *Quim. Nova*, v. 32, p. 955-959, 2009.
- Fungaro, D. A.; Silva, M. G. Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água. *Quim. Nova*, v. 25, p. 1081, 2002
- GUPTA, V. K.; SHARMA, S. Removal of zinc from aqueous solutions using bagasse fly ash - a low cost adsorbent. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 42, p. 6619-6624, 2003.
- GUPTA, V. K.; SHARMA, S.; YADAV, I. S.; MOHAN, D. Utilization of bagasse fly ash generated in the sugar industry for the removal and recovery of phenol and p-nitrophenol from Wastewater. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, v. 71, p. 180-186, 1998.
- NIBOU, D.; MEKATELA, H.; AMOKRANEA, S.; BARKATB, M.; TRARI, M. Adsorption of Zn^{2+} ions onto NaA and NaX zeolites: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *J. Hazard. Mat.*, v. 173, p. 637-646, 2010.
- GILES, C. H.; MACEWAN, T. H.; NAKHWA, S. N.; SMITH, D. Studies in adsorption. Part XI. *J. Chem. Soc.*, v. 111, p. 3973-3993, 1960.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro.