



REMOÇÃO DE VERMELHO DO CONGO DE SOLUÇÃO AQUOSA POR ZEÓLITAS DE CINZAS DE CARVÃO: ESTUDO CINÉTICO E ANÁLISE DE ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO

REMOVAL OF CONGO RED FROM AQUEOUS SOLUTION BY ZEOLITES FROM COAL ASHES: KINETIC STUDY AND EQUILIBRIUM ISOTHERMS ANALYSES

FUNGARO, Denise Alves¹; REVA, Jenna²; IZIDORO, Juliana de Carvalho¹

¹ Centro de Química e Meio Ambiente, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN – CNEN/SP), Av. Professor Lineu Prestes, 2242, CEP: 05508-000, São Paulo - SP, Brasil
*e-mail: dfungaro@ipen.br

² Faculté des Sciences, Université de Nice-Sophia Antipolis, 06108 Nice, France
*e-mail: revajenna@yahoo.fr

Received 17 April 2009; received in revised form 13 July 2009; accepted 14 July 2009

RESUMO

A adsorção de vermelho do congo de solução aquosa foi realizada usando-se zeólitas de cinzas de carvão como adsorventes de baixo custo. As amostras de cinzas de carvão foram convertidas em zeólitas ZM e ZC por tratamento hidrotérmico usando parâmetros de síntese diferentes. Os materiais foram caracterizados por análise físico-química e estudos de FR-X e DR-X. As cinéticas e isotermas de adsorção foram estudadas. O tempo suficiente para atingir o equilíbrio foi de 1200 min para os ambos adsorventes. As isotermas de adsorção ajustaram-se ao modelo de Langmuir com capacidade de adsorção máxima entre 7,86 e 16,6 mg/g para ZC e ZM, respectivamente. Eficiências de remoção entre 80 a 85% foram alcançadas.

Palavras-chave: zeólita, adsorção, vermelho do congo, cinzas de carvão.

ABSTRACT

The adsorption of congo red from aqueous solution was carried out using zeolites synthesized from fly ashes as low-cost adsorbents. The fly ashes samples were converted to zeolites ZM and ZC by hydrothermal treatment using different synthesis parameters. The materials were characterized by physical-chemical analysis and XFR and XDR studies. The adsorption kinetics and isotherms were studied. It was found that the sufficient time to attain equilibrium was 1200 min for both adsorbents. The adsorption isotherms can be fitted by Langmuir model with maximum adsorption capacity of 7.86 and 16.6 mg/g for ZC and ZM, respectively. Removal efficiencies between 80 and 85% were attained.

Keywords: zeolite, adsorption, congo red, coal ashes.

Introdução

A indústria têxtil desempenha um papel importante na economia de muitos países. No Brasil, esta indústria se destaca entre os oito setores mais importantes da atividade industrial, ocupando os primeiros lugares em empregos diretos e em faturamento.

Atualmente, aproximadamente 10.000 corantes são produzidos em escala industrial. Destes, cerca de 2.000 encontram-se disponíveis para a indústria têxtil. No Brasil, das aproximadamente 20 t/ano de corantes consumidos pela indústria têxtil, cerca de 20% são descartados como efluentes. A principal fonte desta perda corresponde à fixação incompleta dos corantes à fibra durante o processo de tingimento (Guaratini e Zanoni, 2000; Zanoni e Carneiro, 2001).

Os corantes, mesmo presentes em pequenas quantidades, são visualmente detectáveis e causam sérios problemas de natureza estética nos corpos d'água receptores. Além de problemas estéticos, a maioria dos corantes comercialmente usados é resistente à biodegradação, à fotodegradação e à ação de agentes oxidantes.

Outros problemas causados comumente pelos corantes são: afetam significativamente a atividade fotossintética da vegetação em geral pela redução da penetração da luz solar; podem ser tóxicos a certas formas da vida aquática devido à presença de metais substituintes e cloreto, e alguns são carcinogênicos e mutagênicos; podem interferir em certos tratamentos operacionais de água residuária municipal como a desinfecção ultravioleta e o sistema de lodos ativados (Houk, 1992).

Os azocorantes, que se caracterizam por apresentarem um ou mais grupamentos -N=N- ligados a sistemas aromáticos, representam cerca de 60% dos corantes atualmente utilizados no mundo, sendo extensivamente utilizados no tingimento de fibras têxteis.

O vermelho do congo é um corante direto diazo, o qual é conhecido por metabolizar benzidina, uma substância carcinogênica. A exposição ao corante causa reação alérgica e possível choque anafilático (Bhattacharyya e Sharma, 2004). É uma molécula de difícil biodegradação devido a sua estabilidade estrutural. É usado em indústrias têxtil, de impressão, de papel, de borracha e de plásticos

e em medicina no diagnóstico de amiloidose. A sua produção foi abandonada em muitos países, porém no Brasil, México, Índia e Argentina este corante ainda continua sendo usado.

Entre vários tipos de tratamento, a adsorção é uma das técnicas que tem sido empregada com sucesso na efetiva remoção de corantes (Kunz *et al.*, 2002). Este processo encontra grande aplicação industrial, pois associa custos operacionais relativamente baixos com elevadas taxas de remoção. Além disso, em alguns casos possibilita a recuperação do corante sem perda de sua identidade química por ser um método não destrutivo. O carvão ativado é o mais popular e eficiente adsorvente usado. Entretanto, o alto custo restringe o seu uso, principalmente em países em desenvolvimento.

Uma alternativa viável ao carvão ativado é a utilização de resíduos sólidos que podem ser reciclados e usados como adsorventes de baixo custo e, para este fim, diversos resíduos orgânicos e industriais tem sido testados (Sanghi *et al.*, 2002).

As cinzas de carvão mineral são constituídas basicamente de sílica e alumina sendo possível convertê-las em material zeolítico por tratamento hidrotérmico com em meio alcalino (Querol *et al.*, 2002). O conteúdo de zeólita varia entre 20 - 99% dependendo das condições do processo. As substâncias tóxicas que a cinza contém são removidas na solução básica que é encaminhada para tratamento e/ou re-aproveitamento posterior.

Estudos recentes demonstraram que as cinzas de carvão provenientes da região sul do Brasil continham altos teores dos elementos As, U, Mo, Hg, Pb e Cd que foram facilmente lixiviados pela água (Depoi *et al.*, 2008). A transformação das cinzas de carvão em material zeolítico adsorvente, um produto de alto valor agregado, é uma tecnologia muito significativa para mitigar o impacto ambiental causado pela disposição inadequada deste resíduo.

Os principais fatores que influenciam a síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão são: tipo e composição das cinzas; tipo e concentração do meio alcalino; pressão, temperatura; tempo de reação; relação volume da solução alcalina/ massa das cinzas; uso de promotores (sementes, direcionadores).

O material zeolítico preparado com as cinzas de carvão coletadas em usina termelétrica

situada no nordeste do Paraná mostrou-se eficiente na remoção de íons metálicos em água e em efluentes de galvanoplastia e na remediação de solo contaminado (Fungaro e Silva, 2002; Fungaro *et al.*, 2004; Fungaro e Izidoro 2006a, 2006b, Izidoro e Fungaro, 2007). Resultados promissores foram encontrados na remoção do azul de metileno de solução aquosa (Fungaro *et al.*, 2005, 2009; Bruno, 2008).

A conversão clássica alcalina das cinzas de carvão utiliza geralmente solução de hidróxido de sódio ou potássio com diferentes concentrações, temperatura de 80 a 200 °C, tempo de reação de 3 a 48 h e uma variação nos outros parâmetros de ativação. Pelo menos 15 tipos diferentes de zeólitas poderão ser produzidas a partir de uma mesma cinza de carvão pela variação dos parâmetros de ativação (Moreno *et al.*, 2001). Cada tipo de zeólita irá apresentar propriedades de adsorção características.

O propósito deste estudo foi investigar a influência da variação dos parâmetros de ativação usados na síntese de zeólita a partir de cinzas de carvão na eficiência de remoção do corante vermelho do congo de solução aquosa.

Parte Experimental

2.1. Materiais

Todos os reagentes usados foram de grau analítico. As soluções do vermelho do congo (CI 22120) foram preparadas a partir da diluição de solução estoque com água ultrapura do sistema Millipore Milli-Q.

2.2. Preparação de zeólitas de cinzas de carvão

As cinzas de carvão da Usina Termelétrica de Figueira, localizada no Paraná, foram utilizadas no estudo. As zeólitas foram preparadas a partir de cinzas leves retidas no filtro manga (ZM) e cinzas leves retidas no filtro ciclone (ZC). As cinzas de carvão foram modificadas por tratamento hidrotérmico com variação das seguintes condições experimentais: concentração da solução de NaOH; tempo de reação; temperatura e relação massa de cinza/volume da solução de NaOH (Tabela 1). As condições da síntese foram selecionadas a partir de estudos realizados para o sistema azul de metileno/zeólita (Fungaro *et al.*, 2005, 2009; Bruno, 2008).

O procedimento para o tratamento

hidrotérmico foi o seguinte: a amostra contendo cinzas de carvão foi misturada com solução de NaOH e aquecida em estufa. Após o fim do processo de síntese, a fase sólida foi separada por filtração e a solução alcalina foi estocada para retornar ao processo. O material zeolítico foi lavado com água deionizada até pH ~11 e seco em estufa a 50 °C por 12 h. O efluente alcalino emitido no processo de lavagem vai para um tanque para posterior tratamento de neutralização.

2.3. Estudos sobre a remoção do corante

A remoção do vermelho do congo em solução aquosa pelas zeólitas foi realizada por processos descontínuos. Alíquotas de 100 mL de solução do corante de concentração conhecida (faixa de 20 a 480 mg/L) foram colocadas em béqueres de 250 mL com 1 g de zeólita e agitadas em agitador mecânico na temperatura de 25 °C à 120 rpm. Após um tempo de contato, entre 10 a 1440 min, uma amostra era retirada, o sobrenadante foi separado por centrifugação e a concentração final nesta solução foi determinada. A concentração do corante vermelho do congo foi determinada por espectrofotometria UV-Visível (espectrofotômetro Cary 1E da Varian), no comprimento de onda correspondente a absorvância máxima, $\lambda_{max} = 500$ nm, em pH=5. A capacidade de adsorção do adsorvente (q em mg/g) foi calculada conforme a Equação 1:

$$q = \frac{V(C_0 - C_f)}{M} \quad (1)$$

onde V (L) é o volume da solução de corante, C_0 (mg/L) é a concentração inicial da solução de corante, C_f (mg/L) é a concentração final da solução de corante obtida após um tempo t e M (g) é a massa de zeólita. O tempo de equilíbrio utilizado para obtenção das isotermas foi determinado a partir dos estudos cinéticos.

2.4. Caracterização das zeólitas de cinzas de carvão

A composição química foi determinada por Fluorescência de Raios-X (Rigaku RIX-3000). A composição mineralógica foi obtida por Difração de Raios-X (Rigaku, modelo Multiflex). A superfície específica BET foi determinada pelo equipamento BET Surface Área Analyser – Versão 3.11 – Quanta-Chrome Corporation – Nova 1200. A massa específica das zeólitas foi determinada por Pictômetro. Micromeritics – Accupyc 1330. A capacidade de troca catiônica

(CTC) do material zeolítico foi obtida usando solução de acetato de sódio e de amônio (Scott *et al.*, 2002). O pH das zeólitas foi determinado na solução sobrenadante da mistura de 0,1 g com 10 mL de água após 24 h de agitação (Onda ion Analyser).

Resultados e Discussão

3.1. Caracterização dos materiais adsorventes

As cinzas de carvão constituíam-se principalmente de alumina e sílica (15-19%). Ambas as cinzas apresentaram uma relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ muito baixa (0,98-1,2) comparada com a maioria das cinzas leves de carvão (~ 2 m/m) (Zeng *et al.*, 2002). Esta característica em conjunto com o conteúdo relativamente baixo das impurezas de óxidos de Fe, Ca e S confere um alto potencial para o uso destas amostras como matéria-prima para a síntese de zeólitas com baixo teor de silício. Algumas propriedades físico-químicas das zeólitas de cinzas de carvão são mostradas na Tabela 2.

Os difratogramas das zeólitas (não apresentados) revelaram a formação da zeólita Na-P1 após o tratamento hidrotérmico alcalino juntamente com hidroxissodalita. No difratograma da ZM foi identificada também a presença da zeólita faujasita. Os picos de quartzo e mulita provenientes das cinzas que não reagiram e que fazem parte do material zeolítico também foram identificados.

3.2. Efeito do tempo de contato

O efeito do tempo de agitação na adsorção do vermelho do congo sobre ZC e ZM é mostrado na Figura 1. A remoção foi rápida nos estágios iniciais de contato e gradualmente decresceu até atingir o equilíbrio. O tempo de equilíbrio foi 1200 min para ambos adsorventes. A forma simples e contínua das curvas até a saturação sugeriu uma cobertura por monocamada das moléculas do corante na superfície dos adsorventes.

3.3. Modelagem cinética

O comportamento transiente do processo de adsorção do vermelho do congo pelos adsorventes foi analisado usando os modelos cinéticos de pseudo-primeira-ordem de Lagergren (Ho e Mckay, 1998a), pseudo segunda-ordem de Ho e McKay (Ho *et al.*, 1996), e modelo da difusão intrapartícula (Weber e Morris, 1963). A validade destes modelos pode

ser avaliada pelos gráficos lineares de cada equação: $\log(q_e - q_t)$ vs t para o modelo de pseudo primeira-ordem, t/q_t vs t para o modelo de pseudo segunda-ordem e q_t vs $t^{1/2}$ para a difusão intrapartícula.

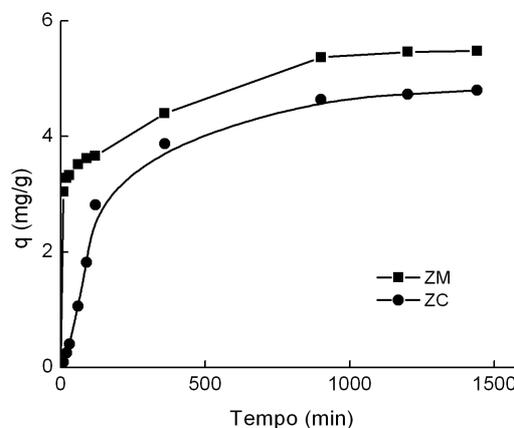


Figura 1 - Efeito do tempo de agitação sobre a capacidade de adsorção do vermelho do congo sobre zeólitas ($C_0 = 70,0$ mg/L; pH=5).

Os parâmetros cinéticos do processo de adsorção do vermelho do congo sobre as zeólitas foram obtidos pelas regressões lineares dos gráficos de cada modelo (Tabela 3). A velocidade de adsorção inicial (h em mg/g min) foi calculada a partir da constante pseudo-segunda-ordem (Ho *et al.*, 1996).

A avaliação quantitativa dos modelos foi realizada pela comparação dos coeficientes de correlação. Os resultados mostraram que processo de adsorção se ajustou melhor ao mecanismo de pseudo-primeira-ordem para ZC e pseudo-segunda-ordem ZM. No sistema vermelho do congo/ZC, o processo de adsorção é controlado por difusão. Já no sistema vermelho do congo/ZM deve estar envolvido no controle da velocidade um mecanismo de adsorção ativada ou quimissorção (Ho e Mckay, 1998b). A adsorção ativada é um tipo de adsorção de caráter intermediário entre a adsorção física e a química. Os valores da velocidade de adsorção inicial (h) confirmaram que a velocidade de adsorção do vermelho do congo é maior sobre ZM do que sobre ZC conforme já havia indicado os estudos da dependência da capacidade de adsorção com o tempo de contato.

3.4. Estudos de Equilíbrio de adsorção

As Figuras 2 e 3 mostram as isotermas de adsorção do vermelho do congo sobre as

zeólitas ZC e ZM, respectivamente.

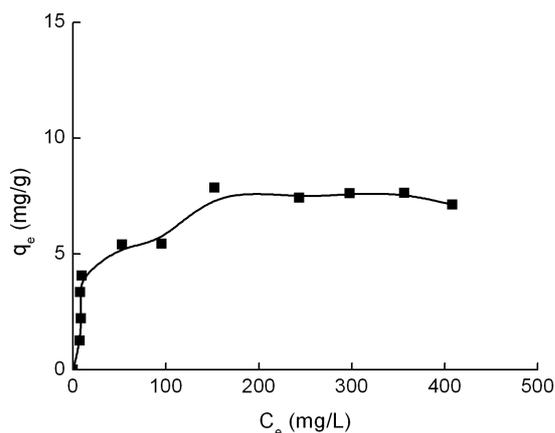


Figura 2 - Isotherma de adsorção do vermelho do congo sobre ZC ($T=25\text{ }^\circ\text{C}$).

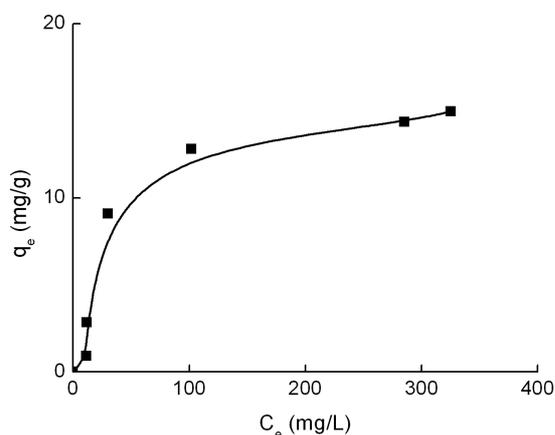


Figura 3 - Isotherma de adsorção do vermelho do congo sobre ZM ($T=25\text{ }^\circ\text{C}$).

As isotermas de sistemas líquido/sólido podem ser classificadas de acordo com suas formas que são determinadas pelo mecanismo de adsorção e, portanto, esta classificação pode ser usada para o diagnóstico da natureza da adsorção.

O comportamento das isotermas de ambos adsorventes correspondeu à isoterma Tipo L2 indicando a formação de uma monocamada saturada de moléculas do soluto sobre a superfície do adsorvente e que a afinidade de adsorção aumenta com o aumento da concentração do adsorbato até a saturação (Giles *et al.*, 1960).

Os dados de adsorção foram analisados usando-se os modelos de Langmuir e Freundlich que são os mais freqüentemente usados para descrever isotermas para aplicações em tratamento de águas e efluentes (Perrich 1981; Faust e Aly, 1987).

Os parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich foram determinados por regressão linear das equações linearizadas e estão listadas na Tabela 4. O valor do coeficiente de correlação (R) mostrou que os dados experimentais se ajustaram ao modelo da isoterma de Langmuir para a adsorção do vermelho do congo sobre ambas as zeólitas. A capacidade máxima de adsorção do vermelho do congo sobre ZM foi 53% maior do que sobre zeólita ZC. Este fato é atribuído à presença de faujasita na mistura das fases zeolíticas da ZM, que apresenta maior tamanho de poro do que a zeólita Na-P1 e às partículas de tamanhos menores da cinza retida no filtro manga, matéria-prima da zeólita.

A Tabela 5 compara as capacidades de adsorção do vermelho do congo sobre zeólitas e sobre alguns adsorventes. Os valores obtidos para ZC são comparáveis com os aqueles obtidos com a lama vermelha ativada. A capacidade de adsorção das zeólitas é maior do que a das cinzas leves de carvão.

Conclusão

As zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão ZC e ZM, preparadas a partir de parâmetros do tratamento hidrotérmico diferentes, mostraram-se eficientes como materiais adsorventes de baixo custo na remoção do corante vermelho do congo em solução aquosa. Eficiências de remoção entre 80 a 85% foram alcançadas. As isotermas de equilíbrio das zeólitas se ajustaram ao modelo de Langmuir atingindo capacidade máxima de adsorção de 16,6 mg/g para ZM e 7,86 mg/g para ZC.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e à Carbonífera do Cambuí Ltda pelas amostras de cinzas de carvão

Referências Bibliográficas

- 1) BHATTACHARYYA, K. G., Sharma, A., **Azadirachta indica leaf powder as an effective biosorbent for dyes: a case study with aqueous Congo red solutions**, Journal of Environmental Management (2004) 71 217-229.
- 2) BRUNO, Mariza, **Utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão na remoção de corante em água**, Dissertação de Mestrado, São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2008.
- 3) DEPOI, F. S., Pozebon, D., Kalkreuth, W. D., **Chemical characterization of feed coals and combustion-by-products from Brazilian power plants**. International Journal of Coal Geology (2008) 76 227-236.
- 4) FAUST, S. D., Aly, O. M., **Adsorption Process for Water Treatment**, Stoneham. Butterworths Publishers 1987.
- 5) FUNGARO, D. A., Silva, M. G., **Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água**, Química Nova (2002) 25 1081-1085.
- 6) FUNGARO, D. A., Flues, M. S-M., Celebroni, A. P., **Estabilização de solo contaminado com zinco usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão** Química Nova (2004) 27 582-585.
- 7) FUNGARO, D. A., Izidoro, J. C., Almeida, R. S., **Remoção de compostos tóxicos de solução aquosa por adsorção com zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão** Eclética Química (2005) 30 1-8.
- 8) FUNGARO, D. A., Izidoro, J. C., **Estudo da remoção de íons metálicos em água utilizando zeólitas sintetizadas com cinzas de carvão** Tchê Química (2006a) 3 21-30.
- 9) FUNGARO, D. A.; Izidoro, J. C., **Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão**, Química Nova (2006b) 29, 735-740.
- 10) FUNGARO, D. A., Bruno, M., Grosche, L. C., **Adsorption and kinetic studies of methylene blue on zeolite synthesized from fly ash**, Desalination and Water Treatment (2009) 2 231-239.
- 11) Guaritini, C. C. I., Zanoni, M. V. B., **Corantes Têxteis**, Química Nova, (2000) 23 71-78.
- 12) GILES, C. H., Macewan, T. H., Nakhua, S. N., Smith, D., **Studies in adsorption, 11. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids**, Journal of Chemical Society of London (1960) 3973-3993.
- 13) HO, Y. S., Wase, D. A. J., Forster, C. F., **Kinetic studies of competitive heavy metal adsorption by sphagnum moss peat**, Environmental Technology (1996) 17 71-77.
- 14) HO, Y. S., Mckay, G., **The kinetics of sorption of basic dyes from aqueous solution by sphagnum moss peat**, The Canadian Journal of Chemical Engineering (1998a) 76 827-827.
- 15) HO, Y. S., Mckay, G. **Sorption of dye from aqueous solution by peat**, Chemical Engineering Journal (1998b) 70 115-124.
- 16) HOUK, V. S., **The genotoxicity of industrial-wastes and effluents**, Mutation Research (1992) 277 91-138.
- 17) Izidoro, J. C., Fungaro, D. A., **Utilização de resíduos de usinas termelétricas a carvão na síntese de zeólitas e sua aplicação na remoção de Zn²⁺ e Cd²⁺ em água**, Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento (2007) 9 101-106.
- 18) KUNZ, A., Peralta-Zamora, P., Moraes, S. G., Durán, N., **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis**, Química Nova (2002) 25 78-82.
- 19) MALL, I. D., Srivastava, V. C., Agarwal, N. K., Mishra, I. M., **Removal of congo red from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon: Kinetic study and equilibrium isotherm analyses**, Chemosphere 61 (2005) 492-501.
- 20) MORENO, N., Querol, X., Ayora, C., Fernández-Pereira, C., Janssen-Jurkovicová, M., **Utilization of zeolites synthesized from coal fly ash for the purification of acid mine waters**, Environmental Science & Technology (2001a) 35a 3526-3534.
- 21) NAMASIVAYAM, C., Arasi, D. J. S. E., **Removal of congo red from wastewater by adsorption onto waste red mud**, Chemosphere 34 (1997) 401-417.
- 22) PERRICH, J. R., **Activated carbon adsorption for waste water treatment**. Boca Raton. CRC Press, 1981.
- 23) QUEROL, X., Moreno, N., Umaña, J. C., Alastuey, A., Hernández, E., López-Soler, A., Plana, F., **Synthesis of zeolites from coal ash: an overview**, International Journal of Coal Geology, (2002) 50 413-423.
- 24) RAO, V. V. B., Rao, R. M., **Adsorption studies on treatment of textile dyeing industrial effluent by flyash**, Chemical Engineering Journal 116 (2006) 77-84.
- 25) SANGHI, R., Bhattacharya, B., **Review on decolorisation of aqueous dye solutions by**

- low cost adsorbents**, Coloration Technology, (2002) 118 250-269.
- 26) SCOTT, J., Guang, D., Naeramitarnasuk, K., Thabuot, M. **Zeolite synthesis from coal fly ash for the removal of lead ions from aqueous solution**, Journal of Chemical Technology & Biotechnology (2002) 77 63-69.
- 27) TOR, A., Cengeloglu, Y., **Removal of congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud**, Journal of Hazardous Materials 138 (2006) 409-415.
- 28) WEBER, W. J., Morris, J. C., **Kinetics of adsorption carbon from solutions**, Journal of Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineering (1963) 89 31-60.
- 29) ZANONI, M. V., Carneiro, P. A., **O descarte dos corantes têxteis**, Ciência Hoje (2001) 29, 61-64.
- 30) ZENG, R., Umana, J. C., Querol, X., Lopez-Soler, A., Plana, F., Zhuang, X., **Zeolite synthesis from a high Si-Al fly ash from East China**, Journal of Chemical Technology & Biotechnology (2002) 77 267-273.

Tabela 1 - Parâmetros de ativação do tratamento hidrotérmico usado nas cinzas de carvão.

Condições	[NaOH] (mol L ⁻¹)	t ¹ (h)	T (° C)	M _{cinza} · V _{sol} ² (g mL ⁻¹)	Produtos Zeolíticos
1	4,0	21	90	0,1	ZM
2	3,5	24	100	0,125	ZC

(1) tempo da reação; (2) relação massa de cinza/volume de solução de NaOH

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas das zeólitas cinza de carvão.

	ZC	ZM
pH (em água)	11	11
Área Superficial Específica (m ² g ⁻¹)	38,99	131,5
Massa específica (g cm ⁻³)	2,65	2,36
CTC (meq 100 g ⁻¹)	137,6	152,2

Tabela 3 - Parâmetros cinéticos para a remoção do vermelho do congo sobre zeólitas.

Adsorvente	Pseudo- 1ª ordem			
	K ₁ (min ⁻¹)	R ₁		
ZC	3,57 x 10 ⁻³	0,993		
ZM	3,80 x 10 ⁻³	0,991		
	Pseudo- 2ª ordem			
	K ₂ (g/mg min)	h (mg/g min)	q _e (mg/g)	R ₂
ZC	4,52 x 10 ⁻⁴	1,64 x 10 ⁻²	6,22	0,962
ZM	4,61 x 10 ⁻³	1,45 x 10 ⁻¹	5,60	0,999
	Difusão IntraPartícula			
	K _i (mg/g min ^{0,5})	R _i		
ZC	1,41 x 10 ⁻¹	0,949		
ZM	9,71 x 10 ⁻²	0,845		

Tabela 4 - Parâmetros dos modelos de isoterma de Langmuir e Freundlich para os corantes RL16 e IC sobre os adsorventes.

Adsorvente	Langmuir		
	Q ₀ (mg/g)	b (L/mg)	R
ZC	7,86	0,049	0,995
ZM	16,6	0,026	0,996
	Freundlich		
	K _f [*]	n	R
ZC	1,32	3,22	0,890
ZM	1,38	2,29	0,898

(*) (mg/g) (L/mg)^{1/n}

Tabela 5 – Comparação da capacidade máxima de adsorção do vermelho do congo sobre vários adsorventes.

Adsorventes	Q ₀ (mg/g)	Referências
Cinza leve de carvão - 30°C a 50 °C	3,98 - 4,13	Rao e Rao, 2006
Cinza leve de bagaço de cana de açúcar	11,9	Mall <i>et al.</i> , 2005
Lama vermelha	4,05	Namasivayam e Arasi, 1997
Lama vermelha ativada	7,08	Tor e Cengeloglu, 2006
ZC	7,86	Presente estudo
ZM	16,6	Presente estudo