

7 - REFERÊNCIAS

- Anderson, J. Y., Bjurstrom, H., Azoulay, M., and Carlsson, B., 1985, "Experimental and Theoretical Investigation of the Kinetics of the Sorption of Water Vapor by Silica Gel", J. Chem. Soc., Faraday Trans. I, V. 80, pp. 2681-2692.
- Björström, H. , Karawachi & Carlsson, B, 1984, Int. J. Heat Mass Transfer, 27, No 11 2026-2036.
- Guilleminot, J.J., 1978, "Caractérisation de l'état stationnaire liquide-gaz-adsorbant lors de l'adsorption de gaz facilement condensable sur les zéolithes". PhD, Thesis , Dijon(FR) University.
- Gurgel, J.M., 1998, "Thermal conductivity of silica-gel/water, High Temperatures - High Pressures", V 30 pp. 315-320.
- Grenier, Ph, Bourdin, V. Sun, L.M. & Meunier, F., 1995, "Single-Step Thermal Method to Measure Intracrystalline Mass Diffusion in Adsorbents", AIChE Journal., 41) 2047-2057.
- Kärger, H. and Ruthven, 1989, "On the Comparison between Macroscopic and n.m.r. Measurements of Intracrystalline Diffusion in Zeolites", Zeolites, 9, 267.
- Khelifa, N., , 1984, "Das Adsorptionspaar Silicagel-Wasserdampf, Anwendung als Solares Klimatisierungssystem", Disertation Ludwig-Maximilians Universität, Munich.
- Lu, T.L., Charoensupaya D. and Lavan, Z., 1991, "Determination of Sorption rate and Apparent Solid-Side Diffusivity of Pure H₂O in Silica Gel Using a Constant Volume/Variable Pressure Apparatus", J. of Solar Energy Engineering, 11/1991, V. 113/257.
- Ruthven, D. , 1984, "Principles of Adsorption and Adsorption Process », J. Wiley.
- Sahnoune, H & Grenier Ph, 1989, "Mesure de la conductivité thermique d'une zéolithe", Chem. Eng. J., 40, 45-54.
- Sun, L. M & Meunier, F., 1987, "Non-isothermal Adsorption in a Bidisperse Adsorbent Pellet", Chem. Eng. Sci., 42 , 2899-2907.
- Sun, L. M & Meunier, F., 1987, "A Detailed Model for Non-isothermal Sorption in Porous Adsorbents", Chem. Eng. Sci., 42 , 1585.
- Tempelhoff, K., and Feldmann, K., 1975, Z. Phys. Chem., Vol. 256, p. 369.

efetuado a temperaturas próximas de 200 °C. Os estudos das difusividades são consistentes comparando com alguns investigadores (Anderson et al, 1985); Tempelhoff e Feldmann, 1975), (Grenier et al, 1995).

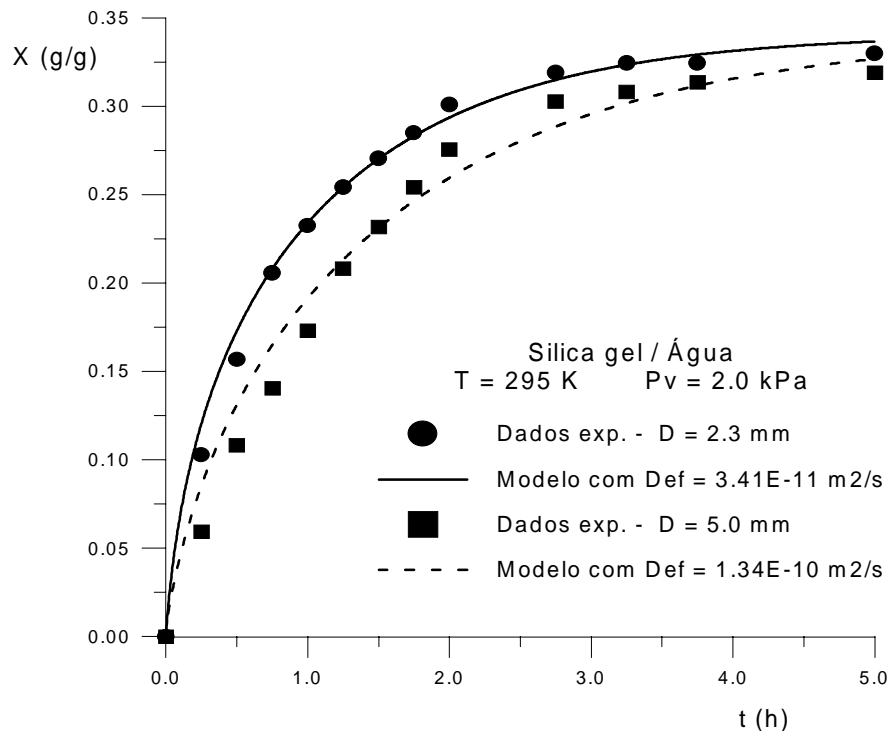


Figura 3 - Influência do diâmetro da partícula na taxa de adsorção.

5 - CONCLUSÕES

Determinação da cinética de adsorção de água em sílica gel mostra que a D_{ef} aumenta com tamanho do grão. Esta observação é consistente com o modelo desenvolvido e é devido aos efeitos de geometria e de temperatura. A maior cinética de adsorção verificada na zeólita é de interesse prático para utilização desde que se tenha fonte térmica para a sua regeneração com temperaturas em torno de 150 °C. A taxa de adsorção da água pela sílica gel, é entretanto, mais lenta, mas tem a vantagem de necessitar de temperaturas mais baixas para regeneração, em torno de 90 °C o que é compatível com energia solar usando tecnologia simples. Os valores de difusividade efetivas encontradas estão, aqui, levando em conta a difusividade de massa entre ar e vapor de água. O modelo desenvolvido está de acordo com os dados experimentais e valores encontrados na literatura além da vantagem de ser facilmente acoplado para uma modelização de um reator adsorativo.

6 - AGRADECIMENTOS:

Este trabalho foi patrocinado por CNPQ (Proc. N° 350163/91-0).

Tabela 2 - Resultados dos coeficientes de difusão de vapor d'água em zeólita e sílica gel com pressão de 2.0 kPa.

Exp.	ADSORVENTE	d (mm)	D_{eff} (m^2/s)
1	SILICA GEL	2.3	3.41 E -11
2	SILICA GEL	3.5	4.10 E -11
3	SILICA GEL	4.0	5.37 E -11
4	SILICA GEL	5.0	1.34 E -10
6	ZEOLITA	1.0	1.02 E-10
7	ZEOLITA	3.0	1.27 E-10
8	ZEOLITA	4.0	1.60 E-10

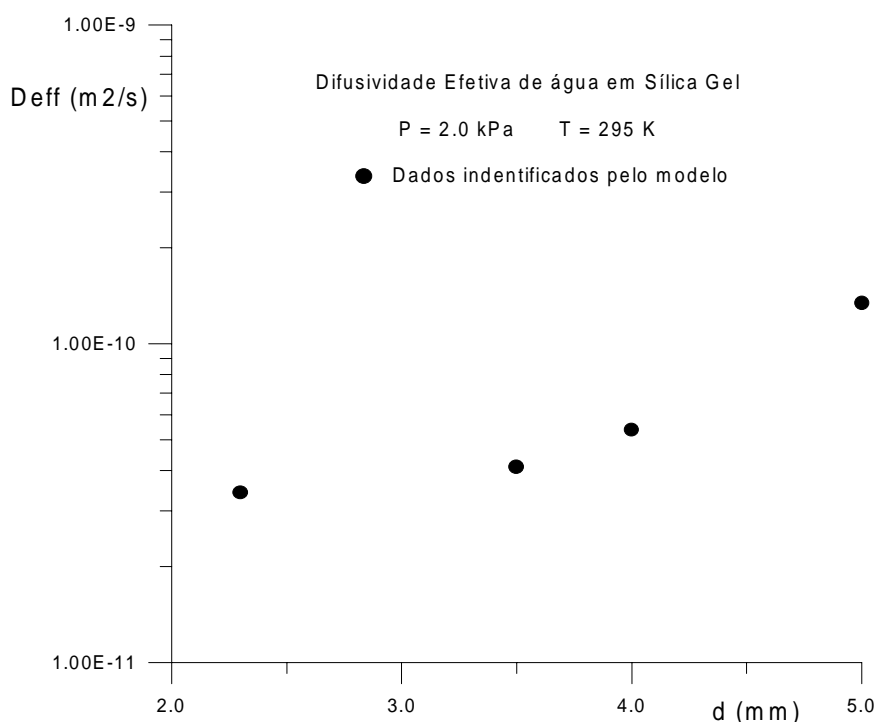


Figura 2 - Dependência da Difusividade Efetiva (D_{eff}) em função do tamanho dos grãos.

Esta observação é consistente com o modelo desenvolvido e este fenômeno não é devido apenas ao efeito de temperatura, mas também há um efeito de geometria que causa este aumento, o que é proporcional com a relação quadrada entre os diâmetros do grão (é ignorado o efeito de calor térmico à partícula).

Na tabela 2 são mostrados uma diferença entre a taxa de adsorção de água para sílica gel e para zeólita. Este resultado é de grande valia já que mostra e importância em se utilizar o zeolite como adsorvente para sistemas de refrigeração se o procedimento de regeneração for

Assumindo a concentração da superfície do grão em equilíbrio com a pressão de gás de vapor d'água e temperatura da sala, então a concentração é calculada por Dubinin (Ruthven,1984):

$$\chi(R,t) = C1 * EXP\{-C2 * (T * Ln (Ps/Pc))^N\} \quad (3)$$

onde:

C1, C2 e N são constantes de Dubinin (tabela 2); Ps = pressão de saturação; Pc = pressão parcial de vapor d'água; T = temperatura dos grãos.

A condição inicial para o problema é:

$$X(r,t) = 0 \text{ (grãos completamente secos)} \quad (4)$$

$$T(r,0) = \text{Temperatura do ambiente} \quad (5)$$

A quantidade de adsorbato que penetra no grão por cada intervalo de tempo é:

$$Ma = \Delta t \ A \ \rho_s \ D_{ef} \ \left. \frac{\partial \chi}{\partial r} \right|_R \quad (6)$$

onde:

A é a área da superfície externados grãos; ρ_s é a densidade de sólido adsorvente.

O balanço de energia em um grão isotérmico é dado por:

$$(Ms Cs + \Sigma Ma Ca) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Qs Ma}{\Delta t} + (h_R + h_C)(T - Ta) \quad (7)$$

onde:

(Ms Cs) e (Ma Ca) são os calores específicos da amostra úmida; Qs é a entalpia de adsorção de massa; (hr + hc) são os coeficiente de transferência de calor global (condução e radiação para o ambiente).

O modelo é resolvido usando diferenças finitas em um esquema semi-implicito. Os resultados experimentais confrontados como modelo permitiram a identificação das propriedades através de uma análise de erros dos mínimos quadrados.

4 - RESULTADOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA.

Alguns dos resultados são mostrados na tabela 2 e na fig. 2 e 3. Todas as experiências foram executadas dentro de uma sala a 22 °C e com uma pressão que corresponde a 2 kPa de pressão parcial de vapor de água contido no ar úmido. Figuras 2 e 3 e tabela 2 mostram que a difusividade efetiva da massa de água em sílica gel e zeolita aumenta com o aumento do diâmetro do grão.

zeolita, três amostras com os seguintes diâmetros (1.0 mm, 3.0 mm e 4.0 mm). As amostras, antes das medidas foram preparadas, aquecendo-as em uma estufa a aproximadamente 200 °C por 25 h.

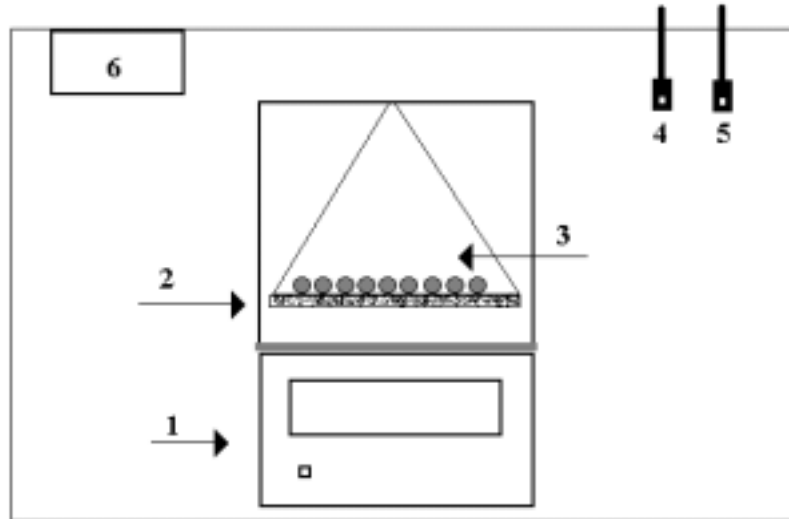


Figura 1 - Equipamento Experimental. (1) balança digital. (2) tela fina de aço. (3) amostra (4) sensor de temperatura de bulbo seco. (5) sensor de temperatura de bulbo úmido. (6) controle temperatura da sala do sistema.

3 – MODELIZAÇÃO MATEMÁTICA

Os grãos adsorventes oferecem diferentes resistências à transferência de massa: a resistência na superfície externa do adsorvente, e a resistência nos microporos e macroporos (fase molecular ou regime de Knudsen). Modelo detalhado foi apresentado por (Sun e Meunier, 1987). Aqui é apresentado um modelo efetivo e simplificado. Neste modelo é assumido uma difusividade de massa efetiva, D_{ef} . As partículas são consideradas completamente esféricas e com diâmetro uniforme. A pressão e temperatura do gás circunvizinho são constantes. O campo de temperatura nos grãos, como são de pequenas dimensões, é calculado pela análise global. A equação de difusão de massa é então:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} = \frac{1}{D_{ef}} \frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (1)$$

onde:

X (Kg de água / Kg do adsorvente seco); D_{ef} (m^2/s) é a difusividade efetiva de massa.

As condições limites são:

$$\left(\frac{\partial \chi}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (2)$$

como sílica gel e a zeólita são ambos sugeridos para estes propósitos. A análise do comportamento térmico dos reatores adsorvivos (dissecantes) é muito sensível à transferência de calor e massa em seu leito poroso. Logo, torna-se necessário o conhecimento das cinéticas de sorção destes materiais. A sílica gel, aqui estudada, é produzida comercialmente por Kalichemie*, e conhecida como "tipo R Sorbead", apresentado-se em grãos esféricos, com diâmetro entre 2 e 5 mm.. Os grãos de zeólita, também de forma esférica, com diâmetro entre 1 e 4 mm, são comercializados pela CECA. Na tabela 1 são apresentadas algumas de suas propriedades.

Tabela 1 - Silica gel (Gurgel,1988) e Zeolita (Sahnoune e Grenier, 1989), dados. C1,C2 e N são constantes de equação de Dubinin (Eq. N°5) foi determinado por (Khelifa, 1984) para sílica-gel/água e determinado por (Guilleninot, 1978) para zeolite/água

	SILICA GEL	ZEOLITA
d [mm]	2.3/3.5/4.0/5.0	4, 3, 1
ϵ [porosidade]	0.37	0.37
λ_s [w m ⁻¹ K ⁻¹]	0.7	0.18
ρ_s [kg m ⁻³]	1270	1184
Cp [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	1074	980
C1= W ₀ $\rho(T)$ [-]	0.407	0.27
C2 [K ⁻¹]	2.27 E-3	1.8 E -7
N	1	2

Diversas investigações experimentais e teóricas para determinação da cinética de difusão de massa em processos de adsorção foram realizadas, nos últimos 30 anos, com diferentes técnicas para medição de coeficientes de difusão utilizadas em Kärger e Ruthven(1989), Grenier et al(1995), Anderson et al(1985) e Lu et al(1991).

O presente trabalho, é uma contribuição na determinação da diffusividade efetiva da água (presente no ar úmido) em sílica gel e zeólita, quando submetidos à pressões de 2.0 kPa, o que corresponde a uma pressão parcial de vapor de água média presente em ambientes a serem climatizados.

2 - DETERMINAÇÃO DA DIFUSÃO DE MASSA

Todo o aparato experimental foi colocado dentro de uma sala climatizada (com temperatura e umidade controladas), como pode ser visto na fig.1. O equipamento consiste em: uma balança digital onde a amostra é colocada e pesada, em instrumentos para medidas das propriedades psicométricas: temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. O procedimento experimental consiste em colocar a amostra seca (o que se consegue deixando-a passar um certo tempo dentro de uma estufa a uma temperatura previamente estipulada) sobre uma tela de aço. Os grãos são espaçados corretamente para prevenir interferência entre as partículas e submetidos em seguida a uma temperatura e pressão de ar úmido da sala. A pressão de vapor de água parcial na sala é calculada através de relações de psicométricas. O conseqüente aumento do peso da amostra é medido por unidade de tempo. Quatro amostras de sílica gel, de tamanhos diferentes (2.3 mm, 3.5 mm, 4.0 mm e 5.0 mm), foram testadas e para

DIFUSIVIDADE APARENTE DE AR ÚMIDO EM SÍLICA GEL E ZEÓLITA

J.C. Santos¹, P.P. S. Couto Jr.², L.S.Andrade F⁰³, J.M. Gurgel

UFPB/DTM/CPGEM/Laboratório de Energia Solar, e-mail: gurgel@les.ufpb.br

C.P. 5115, CEP 58051-970, João Pessoa - PB - Brasil

1-UFPB/CT/CPGEM

2-UFPB/CT/CGEM/CNPq

3-UFPB/CT/DTCC/CPGEM

Resumo

É apresentada uma técnica bastante simples para a determinação experimental dos coeficientes de difusão de massa aparente de ar úmido em grãos de sílica gel e zeólita. As experiências são realizadas através da pesagem contínua das amostras, inicialmente anidras e em seguida submetidas a uma atmosfera de ar úmido controlada à uma pressão parcial de vapor d'água de 2 kPa. Os coeficiente são obtidos através da comparação dos resultados experimentais que são confrontados com os obtidos através de uma modelização matemática do fenômeno estudado. O modelo desenvolvido é simples, e considera um coeficiente global efetivo que leva em conta todas as resistências enfrentadas pelo vapor d'água para se difundir-se no grão. Os resultados obtidos, mostram que a sílica gel e a zeólita apresentam taxas e cinéticas de adsorção diferentes, quando submetidos às mesmas condições de trabalho. Os resultados apresentados são bastante úteis no desenvolvimento de sistemas de ar condicionado em ciclo aberto usando disseccantes.

Palavras – chave: Difusão de massa, Sílica gel, Zeólita, Adsorção

1 – INTRODUÇÃO

Em sistemas de refrigeração, os CFC's aparecem como os principais responsáveis pela destruição da camada de ozônio. Desta forma, o desenvolvimento de outras tecnologias alternativas têm sido objeto de inúmeras pesquisas. Dentre elas, se destacam os sistemas disseccantes, que além de utilizarem substâncias não tóxicas, se apresentam como uma opção extremamente viável na diminuição do consumo de energia elétrica, que fica limitada apenas para controlar o fluxo de ar e de circulação de água. Nestes sistemas, o princípio de funcionamento é baseado em resfriamento evaporativo. Para isto, ar úmido do ambiente é insuflado e secado através da sua passagem por um leito disseccante, e em seguida resfriado através de um processo de umidificação adiabática, obtendo-se desta forma uma temperatura e umidade de conforto térmico. Para a regeneração do leito disseccante, pode ser usado energia solar ou outras fontes de energia provenientes de processos térmicos industriais. Disseccantes