

doi <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2022id7961>
ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 10/09/2023

APROVADO 16/11/2023

PUBLICADO ON-LINE 18/12/2024

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 25/02/2025

EDITORA ASSOCIADA

Profa. Dra. Gardênia Marinho Cordeiro

Avaliação experimental em diferentes configurações de leitos adsortivos

-  Herbert Melo Vieira ^[1] *
-  Joselma Araújo de Amorim ^[2]
-  Márcio Gomes da Silva ^[3]
-  José Josimar Soares ^[4]
-  Francisco José Araújo Melo ^[5]
-  José Maurício Alves de Matos Gurgel ^[6]

[1] herbert.melo@academico.ufpb.br

[2] joselmaaraujo@yahoo.com.br

[5] fjameloufupb@gmail.com

[6] jm.gurgel@cear.ufpb.br

Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil

[3] mgcefet@gmail.com

Instituto Federal da Paraíba (IFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil

[4] josimar.soares@ifam.edu.br

Instituto Federal do Amazonas (IFAM), Manaus, Amazonas, Brasil

* Autor para correspondência.

RESUMO: Este trabalho apresenta resultados experimentais de pesquisa sobre a cinética de adsorção de água em diferentes configurações de leitos adsortivos cilíndricos, preenchidos com sílica-gel. O estudo tem como objetivo propor uma configuração que maximize a taxa de adsorção, de modo a permitir, posteriormente, a construção de equipamentos adsortivos com eficiência cinética aprimorada, melhor transferência de calor e desempenho geral. Para a avaliação dos leitos porosos, foi montado um aparato experimental, conectando-se, por meio de válvulas, os leitos porosos a um evaporador, possibilitando a análise de diferentes fluxos adsortivos. Na configuração de fluxo radial, o adsorvente é confinado entre a tela e a parede interna do leito; para configuração de fluxo axial, o leito poroso é totalmente preenchido com o adsorvente. Em uma terceira configuração, uma tela retangular é posicionada na parte central do leito poroso, permitindo que o adsorvente ocupe apenas metade do volume desse leito. A caracterização e a comparação da cinética de adsorção entre as três configurações estudadas foram conduzidas com base em termogramas obtidos por meio de termopares colocados no interior dos leitos. A variação da taxa adsorvida em função do tempo permitiu caracterizar e comparar a cinética da adsorção dessas três configurações. Os resultados experimentais demonstraram que o leito com a tela concêntrica apresentou maior taxa adsortiva, permitindo que essa configuração seja aplicada a um sistema de refrigeração por adsorção.

Palavras-chave: adsorção; leito poroso; refrigeração; sílica-gel; termopares.

Experimental evaluation in different configurations of adsorption beds

ABSTRACT: This paper presents experimental results on water adsorption kinetics in different configurations of cylindrical beds filled with silica gel. The study aims to propose a configuration that maximizes the adsorption rate, thereby enabling the future development of adsorption devices with enhanced kinetic efficiency, improved heat transfer, and higher overall performance. An experimental setup was assembled to evaluate the porous beds, which were connected by valves to an evaporator, allowing for the analysis of different adsorptive flows. In the radial flow configuration, the adsorbent is sandwiched between a screen and the inner wall



of the bed, whereas in the axial configuration, the bed is fully filled with the adsorbent. In another configuration, a rectangular screen is centrally positioned inside the bed, so that the bed is only half-filled with the adsorbent. The characterization and comparison of adsorption kinetics among the three studied configurations were conducted based on thermograms obtained from the thermocouples placed inside the beds, as well as on the variation of the adsorption rate over time. The results show that the bed with a concentric screen has the highest adsorption rate, suggesting that this configuration has a potential to be applied in adsorption-based refrigeration systems.

Keywords: *adsorption; porous bed; refrigeration; silica gel; thermocouples.*

1 Introdução

Os leitos adsorptivos, de modo geral, apresentam uma camada espessa de material adsorptivo, o que dificulta o escoamento e a transferência de calor de modo uniforme através do leito. O estudo apresentado neste trabalho tem como objetivo verificar, entre três configurações de leitos adsorptivos, qual delas alcança a máxima concentração de adsorbato em um intervalo de tempo, para que, posteriormente, essa configuração possa ser aplicada em leitos porosos de sistemas adsorptivos.

A adsorção é um fenômeno que ocorre por meio da ligação de um componente, na fase gasosa ou líquida, em uma superfície sólida. A dessorção é o processo de remoção do líquido ou do gás da superfície sólida (Masel, 1996). A adsorção é mais intensa em substâncias como carvão ativado, argilas ativadas, alumina, bauxita ativada e sílica-gel, as quais são tratadas e particuladas de modo a apresentar uma área superficial bastante elevada em relação à sua massa. A adsorção é um processo em que moléculas se acumulam na camada interfacial do sólido, composta pela fase gasosa, que reside no campo de força da superfície sólida, e pela camada superficial do sólido (Dabrowski, 2001). O fluido que se acumula na interface do material sólido é denominado adsorbato, enquanto a superfície sólida onde o adsorbato se acumula é chamada de adsorvente (Ruthven, 1984).

De acordo com Albright (2008), a característica mais importante para um adsorvente é sua capacidade de adsorção, que corresponde à quantidade de adsorbato (fluido) retido pelo adsorvente (sólido). A capacidade de adsorção do sólido depende da temperatura, da pressão e da concentração do fluido adsorptivo. Os adsorventes mais utilizados em processos industriais são sílica-gel, carvão ativado, alumina ativada e zeólita. A sílica-gel possui características polares e afinidade pela água, sendo também conhecida como um adsorvente hidrofílico (Suzuki, 1990). Experimentalmente, Chang, Chen e Chung (2005) investigaram a influência da espessura da camada de sílica-gel e do tamanho das partículas no desempenho de transferência de calor e massa em um leito poroso, verificando que partículas de sílica-gel com diâmetro médio de 1,5 mm adsorvem/dessorvem o adsorbato (água) mais rapidamente do que partículas de 3 mm. Leitos porosos com camadas de sílica-gel de menor espessura apresentaram taxas de transferência de calor mais elevadas. Um estudo sobre a dinâmica de refrigeradores por adsorção, voltado à otimização do processo adsorptivo, foi realizado por Riffel (2008), que analisou o coeficiente de desempenho e a potência frigorífica específica, observando que os sistemas de refrigeração térmica são fortemente influenciados pelas condições operacionais e pela geometria do trocador de calor.

Kubota *et al.* (2008) desenvolveram e testaram, experimentalmente, um leito poroso compacto, formado por dutos aletados, todos preenchidos com sílica-gel e envolvidos por uma tela de aço inoxidável. O protótipo foi testado em várias temperaturas de regeneração e resfriamento em diversos tempos de ciclos. Os pesquisadores verificaram que essa configuração contribuiu para uma maior taxa de transferência de calor e de massa. A partir dos resultados experimentais, obtidos por Amorim *et al.* (2013), em um leito adsorativo preenchido com sílica-gel, constatou-se que o aumento do fluxo de ar elevava consideravelmente a taxa adsorativa do leito.

O estudo da cinética de adsorção dos diferentes leitos adsorativos avaliados neste artigo permitirá definir uma configuração com uma rápida taxa adsorativa, visto que o aumento dessa taxa contribui para a eficiência de diversos sistemas adsorativos, como os *chillers* adsorativos. Esses dispositivos são, frequentemente, volumosos e mais caros devido à necessidade de uma quantidade maior de adsorvente. De acordo com Santos *et al.* (2021), sistemas de refrigeração por adsorção, aplicados em ar condicionado, podem funcionar com uma baixa fonte de calor e um fluido refrigerante ambientalmente amigável, tornando esses dispositivos bastante promissores. Nesses sistemas, a desumidificação do ar é obtida com leitos compactados com materiais dessecantes, como sílica-gel, alumina ativada e zeólita.

Chakraborty, Saha e Aristov (2014) avaliaram o resfriamento específico e o coeficiente de desempenho de um leito adsorativo de sílica-gel por meio de simulação numérica. Constatou-se que o aumento da camada e do tamanho dos grãos de sílica reduziu o coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração e a capacidade de resfriamento específico, concluindo-se que esses parâmetros devem ser considerados no desenvolvimento desses sistemas. Em virtude da baixa transferência de calor e massa, os sistemas de refrigeração por adsorção apresentam desempenho limitado.

Dawoud e Aristov (2003) realizaram um estudo experimental sobre a cinética de adsorção de vapor d'água em sílica-gel microporosa, mesoporosa e alumina, comparando-os com dois compósitos impregnados com CaCl_2 . Os estudiosos observaram que a sílica microporosa adsorveu cerca de duas vezes mais vapor de água do que a sílica mesoporosa e a alumina, mas apresentou uma cinética de adsorção mais lenta; nos compósitos, houve aumento na massa de água adsorvida e menor cinética de adsorção em comparação com os demais materiais adsorativos.

Xia *et al.* (2008) desenvolveram um equipamento para determinar o equilíbrio de adsorção da sílica-gel pelo método gravimétrico, permitindo constatar que a capacidade adsorativa da sílica variou de 0,03 kg/kg a 0,3 kg/kg e que a equação de Freundlich modificada apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. Para um bom funcionamento de um sistema de refrigeração por adsorção, a capacidade adsorativa da sílica-gel é um parâmetro fundamental na otimização de equipamento adsorativos. Nesse contexto, visando aumentar a capacidade de adsorção, Aristov *et al.* (2002) desenvolveram uma família de adsorventes por meio do confinamento do sal higroscópico (CaCl_2) nos poros abertos da sílica-gel. Os resultados mostraram um aumento na capacidade adsorativa da sílica, de 0,1 g/g para 0,75 g/g – em ambos os casos, os experimentos foram realizados a 28 °C e pressão de 2,34 kPa.

Para reduzir custo e aumentar o desempenho, este trabalho propõe e avalia uma configuração simples de leito poroso, distinta dos sistemas de leitos tradicionais, que normalmente são totalmente preenchidos com o material adsorvente, o que interfere no desempenho de sistemas de refrigeração por adsorção. Este trabalho apresenta uma avaliação experimental de configurações de leitos adsorativos que permitam um escoamento mais livre do adsorbato, com boa transferência de calor e massa.

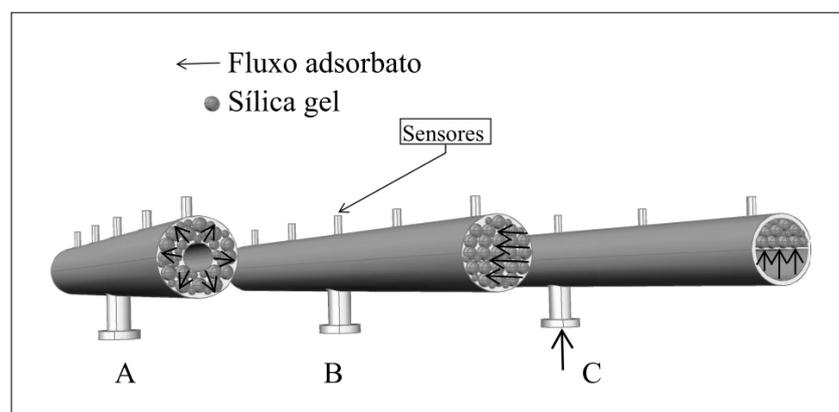
Na sequência do artigo, a seção de materiais e métodos (seção 2) descreve os tipos e dimensões dos leitos adsorptivos, configurações, posicionamento dos sensores de temperaturas, equipamentos utilizados e o procedimento adotado para determinar a quantidade de massa de água adsorvida em cada configuração de leito adsorptivo avaliada. Na seção 3, são apresentados os resultados e discussões, incluindo os termogramas e as massas adsorvidas, permitindo a determinação da melhor configuração avaliada. Por fim, a seção 4 traz as conclusões deste trabalho.

2 Materiais e métodos

Os leitos porosos estudados, denominados leitos A, B e C, foram desenvolvidos em tubos de cobre com 1 m de comprimento e 0,38 m de diâmetro interno, utilizando-se telas de aço inoxidável e material adsorvente (sílica-gel). Esses leitos porosos (Figura 1) apresentam as seguintes características: o leito A é constituído por uma tela circular concêntrica de 0,01 m de diâmetro – o adsorvente é armazenado entre a tela e a parede interna, permitindo o escoamento livre do adsorbato pela parte central e sua adsorção de forma radial; o leito B não possui tela concêntrica, estando completamente preenchido com o adsorvente, de modo que o adsorbato é adsorvido axialmente ao longo do leito poroso; o leito tipo C possui uma tela plana retangular, axialmente fixada na parte central do tubo de cobre, permitindo que o adsorvente fique localizado apenas em uma metade do leito, enquanto a outra metade permanece livre para o escoamento do adsorbato.

Nas configurações dos leitos A e B, o adsorbato tem acesso ao adsorvente de duas maneiras: pela extremidade do leito e pela parte central. No leito C, o adsorbato sempre entra pela parte central do leito, conforme indicado na Figura 1.

Figura 1 ▶
Leitos porosos utilizados no estudo experimental.
Fonte: elaborado pelos autores

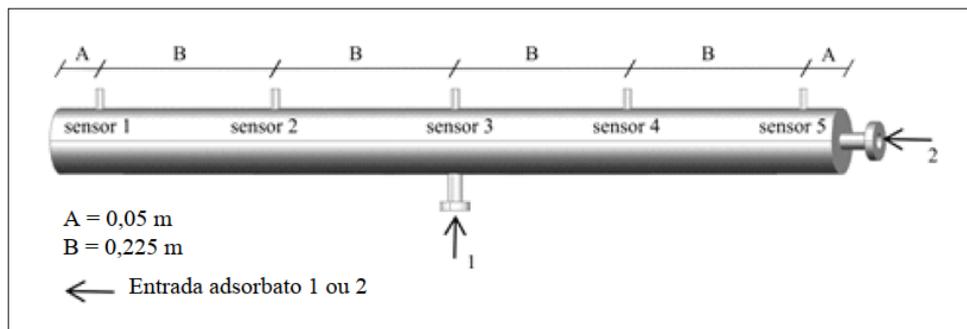


2.1 Trabalho experimental

Em cada leito poroso, foram instalados cinco sensores de temperatura do tipo PT-100 Classe A, com um limite de erro de $\pm (0,15 + 0,002.t) ^\circ\text{C}$, conforme a norma DIN-IEC 751/85. Esses sensores possuem uma resistência de 100Ω a $0 ^\circ\text{C}$ e são constituídos por um fio de platina com coeficiente de resistência de $0,00392 \Omega/^\circ\text{C}$. As temperaturas internas foram medidas com os sensores posicionados a aproximadamente 0,015 m da superfície externa do tubo de cobre que envolve o leito, utilizando-se poços feitos de dutos de cobre, com diâmetro semelhante ao do sensor PT-100 (4 mm), preenchidos com pasta térmica. O calor gerado durante o processo de adsorção provoca o aumento da temperatura ao longo do leito, indicando que o adsorbato está sendo

adsorvido. Os sensores foram distribuídos conforme apresentado na Figura 2, com os sensores das extremidades (sensores 1 e 5) colocados a 0,05 m das extremidades do leito poroso e os sensores internos (sensores 2, 3 e 4) distribuídos uniformemente a uma distância de 0,225 m. Os sensores são conectados a um módulo de aquisição de dados da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), modelo Spider8, com 8 canais de entradas paralelas. Os dados adquiridos são convertidos e armazenados através do software Catman® Profissional 4.5.

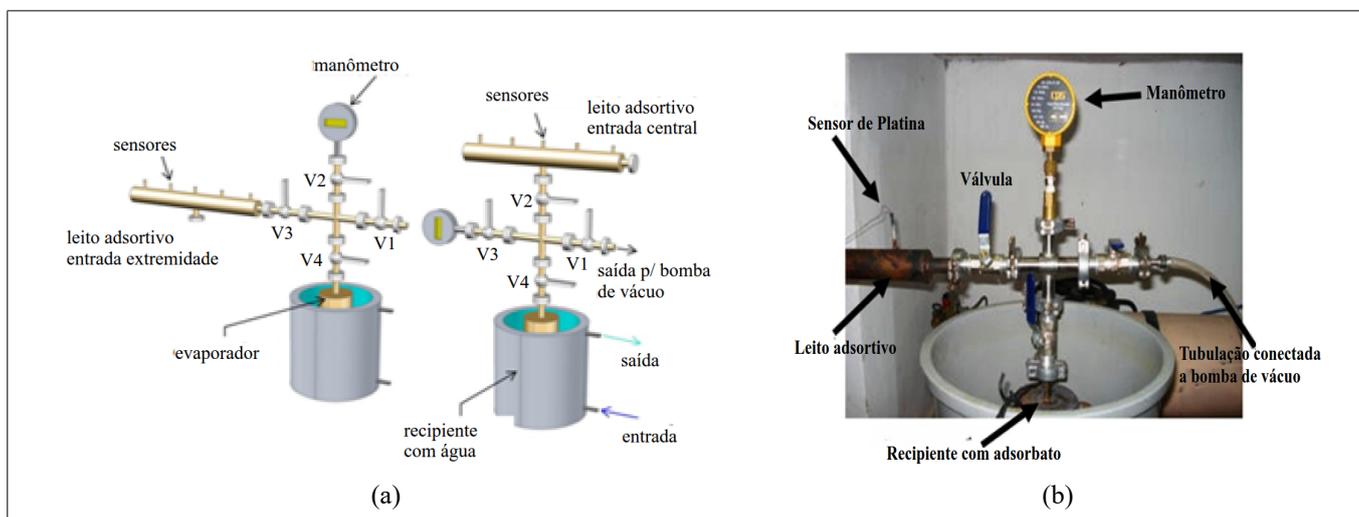
Figura 2 ▶
Distribuição dos sensores ao longo do reator.
Fonte: elaborado pelos autores



O adsorbato utilizado foi a água pura deionizada, enquanto o adsorvente foi sílica-gel impregnada com cloreto de cobalto, que apresenta coloração azul quando seca e muda para rosa ao atingir a saturação, indicando a perda da capacidade adsortiva. A sílica-gel, com granulometria entre 4 mm e 8 mm, foi colocada nos leitos porosos conforme se vê na Figura 1. Ao atingir a saturação, a sílica-gel foi regenerada em uma estufa elétrica a 120 °C por pelo menos 24 horas. Após a regeneração, o material foi imediatamente recolocado no leito, sendo deixado para resfriar até a temperatura ambiente, momento em que o leito com o material adsorvente foi pesado em uma balança digital Bel Mark k30 com capacidade para 30 kg e precisão mínima de 5 g.

Figura 3 ▼
(a) Esquema dos protótipos dos leitos adsorventes. (b) Foto de um dos protótipos.
Fonte: elaborado pelos autores

Os leitos porosos foram acoplados a um evaporador – um recipiente cilíndrico, com válvula do tipo globo para controle da passagem do adsorbato. A evaporação da água no evaporador resulta na diminuição da temperatura e pressão, o que reduz a capacidade adsortiva do leito. Para manter temperatura e pressão constantes, o evaporador foi submerso em um tanque de, aproximadamente, 30 L de água (Figura 3), mantida a 28 °C por uma resistência elétrica controlada por termostato, assegurando que o vapor de água chegasse ao leito a uma temperatura e pressão constantes de 28 °C e 4,29 kPa, respectivamente.



Uma bomba de vácuo, modelo DV-142N-250 (motor de ½ HP), foi utilizada para remover o ar do leito poroso, que foi evacuado por um período de 30 minutos. Ao final desse tempo, o leito foi mantido a uma pressão de, aproximadamente, 0,1 kPa, indicada por um manovacuômetro conectado ao sistema. Antes da adição do adsorbato no evaporador, todo o ar foi removido de seu interior e, em seguida, foram adicionados 1,5 L de adsorbato, com o auxílio de uma mangueira.

A pressão no evaporador foi mantida constante, a 4,29 kPa, correspondente à pressão de saturação do adsorbato (água) a 30 °C, conforme descrito anteriormente. Antes de se iniciarem os experimentos com os leitos porosos, foram realizadas análises da capacidade adsorptiva da sílica-gel. A sílica-gel, com granulometria variando entre 4 mm e 8 mm, foi colocada em uma estufa a 120 °C durante 24 horas, para regeneração. Após esse período, foi rapidamente retirada da estufa e colocada em um dessecador para evitar a adsorção de umidade do ambiente.

A sílica-gel foi resfriada até atingir a temperatura ambiente dentro do dessecador. Em seguida, foi pesada e colocada no leito adsorptivo. A quantidade de massa de sílica-gel utilizada em cada configuração de leito adsorptivo foi a seguinte: no leito tipo A, o adsorvente foi armazenado entre a parede externa da tela concêntrica e a parede interna do duto que envolvia a sílica e a tela, conforme representado na Figura 1, com capacidade de armazenamento de 0,7 kg. Na configuração tipo B, o material adsorvente preencheu todo o duto, sendo possível o armazenamento de 1 kg de sílica-gel. Para o leito adsorptivo tipo C, o material adsorvente ocupou metade do volume do duto, com a outra metade reservada ao escoamento do adsorbato (ver Figura 1), armazenando uma massa de 0,470 kg de sílica-gel.

Os leitos adsorptivos com fluxo radial (tipo A) e axial (tipo B) foram conectados ao evaporador de duas formas distintas, permitindo que o adsorbato (vapor de água) chegasse ao leito adsorptivo pela extremidade ou pela parte central, conforme apresentado na Figura 3. No protótipo à direita da Figura 3a, observa-se o sensor, o manômetro e o evaporador, onde se encontra o adsorbato, todos utilizados em todas as configurações de leito adsorptivo avaliadas neste estudo.

Após o preenchimento do leito adsorptivo com sílica-gel, este foi conectado ao evaporador e se iniciou o processo de remoção do ar de dentro desse leito, por meio de uma bomba de vácuo, pois a presença de ar atmosférico interfere no desempenho da capacidade adsorptiva do adsorvente. Com a bomba de vácuo conectada à válvula 1 e mantendo-se as válvulas 1, 2 e 3 abertas, o ar foi continuamente removido por um período de, aproximadamente, 30 minutos, até que a pressão no leito adsorptivo atingisse 0,1 kPa. Após essa etapa, a válvula 1 (V1) foi fechada e a válvula 4 (V4) aberta, permitindo a passagem do adsorbato (vapor de água) para o leito adsorptivo.

O processo de adsorção, de natureza exotérmica, ocorre com liberação de calor, o qual eleva a temperatura do leito, fenômeno registrado pelos sensores e que serve como indicativo de que o adsorbato está sendo adsorvido ao longo de todo o leito.

Para determinar a massa em cada configuração, foi adotado o seguinte procedimento: as válvulas foram fechadas conforme a configuração de entrada (pelas extremidades ou pela parte central), evitando a entrada de ar atmosférico no leito poroso e no evaporador. A massa do leito (adsorvente) mais o adsorbato foi medida no momento do desacoplamento do leito adsorptivo, que foi, em seguida, reconectado ao evaporador. Com a abertura da válvula 1 (V1), o ar foi retirado das conexões entre o evaporador e o leito poroso, minimizando a presença de ar atmosférico no sistema. Em seguida, a válvula 1 foi fechada novamente e, dependendo do ponto de entrada do adsorbato, as válvulas 3 (V3), 4 (V4) e 2 (V2) foram reabertas. Esse procedimento permitiu a determinação da massa de água adsorvida e a continuidade do processo até a saturação do leito.

A massa do leito poroso foi medida a cada hora, e a diferença entre a massa do leito no final (M_{Afinal}) e a massa anterior ($M_{Aanterior}$) determinou a massa de água adsorvida. Dividindo-se essa massa pela massa de adsorvente (sílica-gel) utilizada no leito adsorvente ($M_{Adsorvente}$), obteve-se a concentração de adsorbato ($X_{adsorbato}$), conforme a Equação 1:

$$X_{adsorbato} = \frac{M_{Afinal} - M_{Aanterior}}{M_{Adsorvente}} \quad (1)$$

3 Resultados e discussões

O estudo experimental das taxas adsorptivas dos leitos porosos teve como objetivo verificar qual configuração de leitos apresentaria maior concentração de adsorbato em um determinado intervalo de tempo. A entrada do adsorbato nos leitos porosos com fluxo axial e radial foi realizada pela extremidade ou pela parte central, avaliando-se cada possibilidade. No leito poroso com metade de seu volume preenchido com adsorvente, o adsorbato entrava pela parte central e se difundia pelo volume vazio abaixo do leito.

Os termogramas obtidos, relacionados ao calor gerado (exotérmico) durante o processo adsorptivo nos leitos com fluxo radial de adsorbato, com entrada pela extremidade (Figura 4) e pela parte central (Figura 5), indicaram que o vapor de água percorreu todo o leito poroso, visto que todos os cinco sensores registraram aumento de temperatura quando a válvula do evaporador (V4) foi aberta (Figura 3). De acordo com Rady (2009), as partículas de sílica-gel que estão na entrada do leito adsorptivo saturam mais rapidamente, promovendo uma rápida diminuição da temperatura, devido à diminuição do calor de sorção liberado. Observou-se, neste trabalho, que os sensores 5 e 1 (ver Figura 2) apresentaram menores picos de temperatura em todas as configurações estudadas. No sensor 5, esse resultado pode ser atribuído ao contato direto com o vapor de água fria vindo do evaporador; no sensor 1, devido à pouca quantidade de adsorbato que chega ao extremo do leito poroso durante o processo de saturação, pois grande parte do adsorbato é adsorvido antes.

Figura 4 ►

Leito poroso tipo A com fluxo radial de adsorbato com entrada pela extremidade.

Fonte: dados da pesquisa

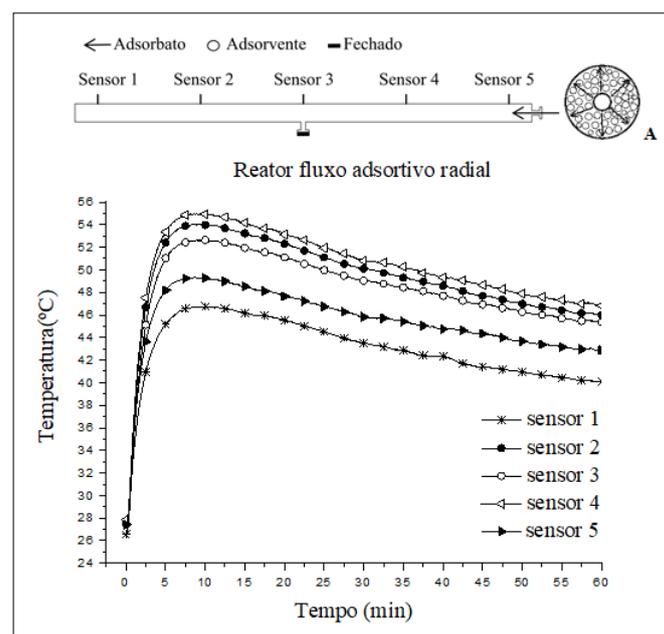
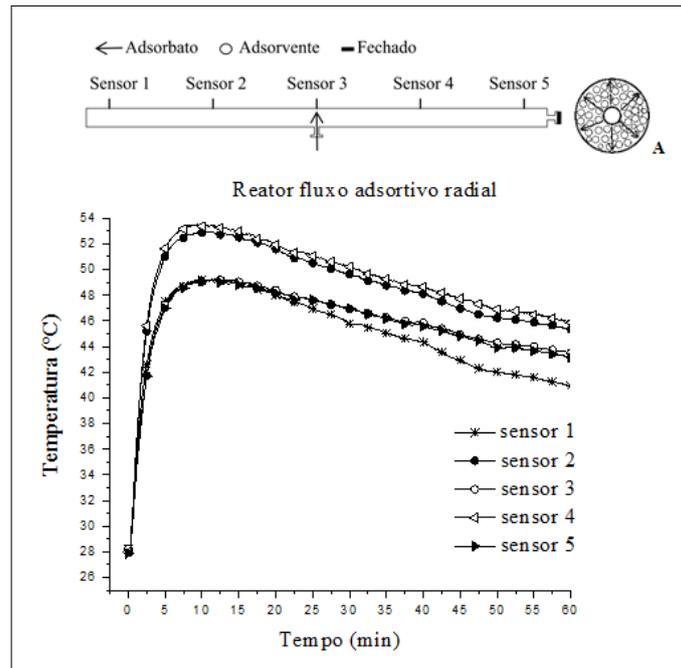


Figura 5 ►

Leito poroso tipo A com fluxo radial de adsorbato com entrada pela parte central.

Fonte: dados da pesquisa



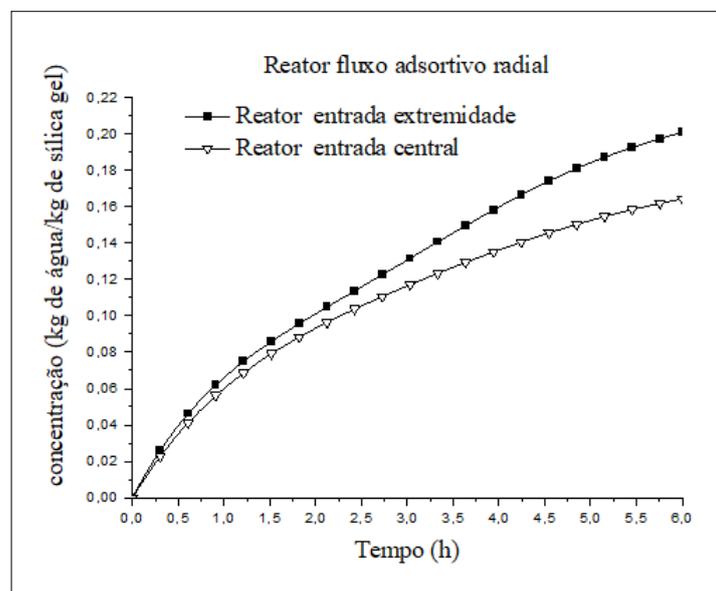
De acordo com Oliveira, Lima e Lima (2011), a porosidade do leito influencia diretamente seu comportamento térmico, devido a maiores irregularidades na direção radial. Essa direção apresenta maiores gradientes de temperatura, também influenciados pelas irregularidades no empacotamento do leito, que possui uma porosidade média de 0,41 ml de volume vazio/ml de partículas. A transferência de calor no sentido axial pode ocorrer por condução molecular e desigualdade no fluxo do fluido.

As taxas dos leitos adsorptivos com fluxo radial foram avaliadas pelas concentrações de adsorbato, medidas a cada hora. Os resultados indicam que, durante o período adsorptivo, o leito com entrada pela extremidade apresentou concentração de adsorbato superior ao leito com entrada central, conforme mostrado na Figura 6. Ao entrar pela extremidade, o adsorbato flui livremente ao longo do leito, com menor perda de carga; quando entra pelo centro, entretanto, ele é rapidamente adsorvido e desvia em um ângulo de 90° para alcançar as extremidades, o que reduz a taxa adsorptiva.

Figura 6 ►

Concentração no leito poroso com fluxo radial: entrada pela extremidade e pela parte central.

Fonte: dados da pesquisa



Para o leito adsorativo com fluxo axial, todo o volume é ocupado pelo adsorvente. Nessa configuração, também foi avaliada a entrada do adsorbato pela extremidade ou pela parte central. Os termogramas gerados mostraram que o adsorbato escoava ao longo de ambas as configurações de leitos adsorativos, com registros de aumento das temperaturas no interior do leito em todos os cinco sensores, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 ▶

Leito poroso tipo B com fluxo axial de adsorbato entrando pela extremidade.

Fonte: dados da pesquisa

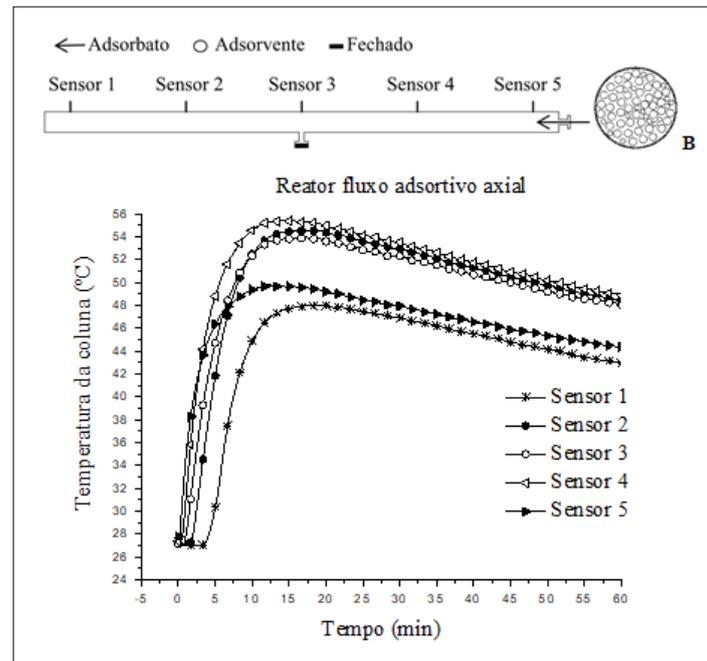
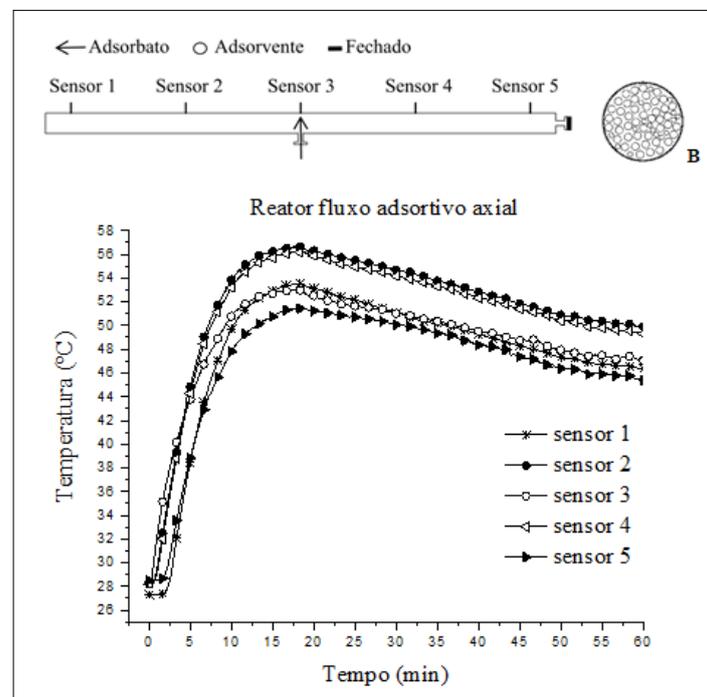


Figura 8 ▶

Leito poroso tipo B com fluxo axial de adsorbato entrando pela parte central.

Fonte: dados da pesquisa

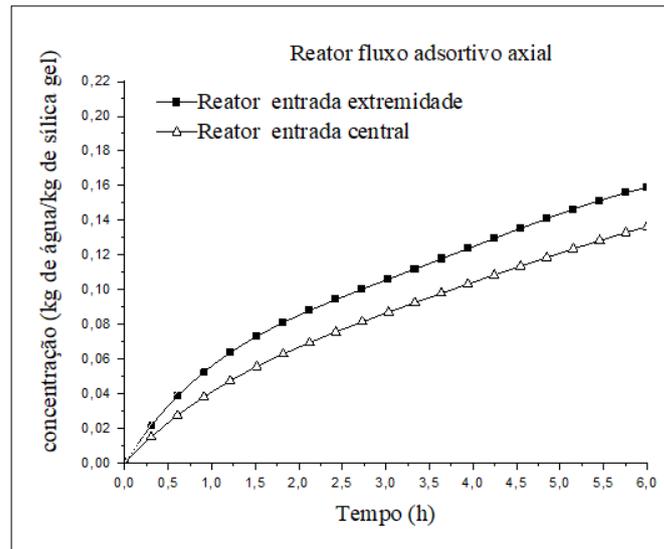


Na Figura 9 são apresentadas as medidas obtidas da concentração de adsorbato adsorvido pelos leitos porosos, considerando as entradas pela extremidade e pela parte central do leito com fluxo axial. Observa-se que o leito com entrada do adsorbato pela extremidade apresentou maiores taxas de adsorção em comparação ao leito com entrada

pela parte central, o que pode ser atribuído aos mesmos fatores observados para o leito com fluxo radial. Nos leitos com entrada pela parte central, houve maior dificuldade para o escoamento do adsorbato, resultando em uma taxa de adsorção inferior.

Figura 9 ►

Concentração no leito poroso com fluxo axial com entradas pela extremidade e parte central.
Fonte: dados da pesquisa



Para o leito poroso tipo C, que tinha uma das metades do seu volume ocupada com o adsorvente e a outra metade livre para o escoamento do adsorbato (entrando pela parte central inferior), foi observado o mesmo perfil de curvas das configurações anteriores. Verificou-se que, em todos os sensores, houve registro de elevação de temperatura ao longo de todo o leito poroso. Assim como no leito poroso com fluxo radial, o tempo necessário para que os sensores registrassem o pico de temperatura foi de, aproximadamente, oito minutos, indicando que o adsorbato escoava com facilidade por todo o leito, conforme mostrado na Figura 10. Ao se comparar a taxa de adsorção do leito poroso tipo C com os demais leitos estudados, verificou-se que ele apresentou as menores taxas de adsorção, com valores um pouco acima daqueles indicados pelo leito poroso com fluxo axial e entrada central, como ilustrado na Figura 11.

Figura 10 ►

Leito poroso tipo C com metade do volume preenchido e adsorbato entrando pela parte central.
Fonte: dados da pesquisa

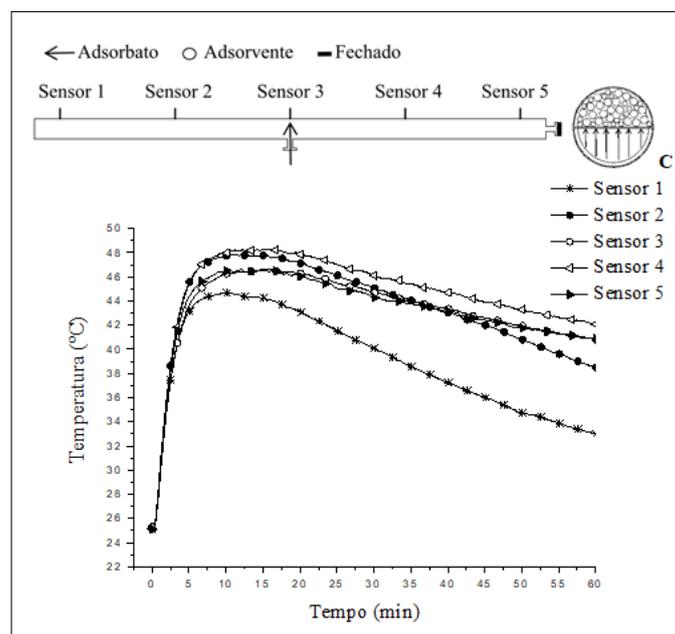
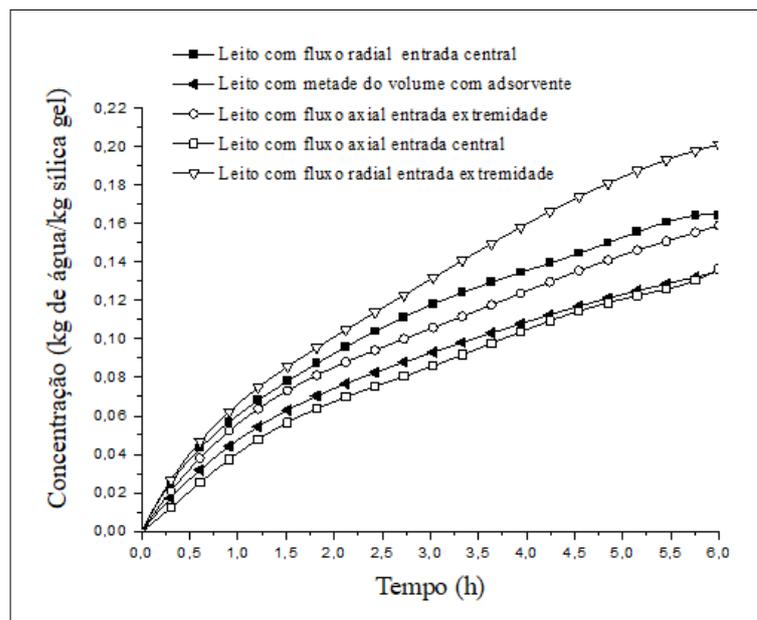


Figura 11 ►

Comparação da taxa de adsorção entre os leitos porosos estudados.

Fonte: dados da pesquisa



O tempo necessário para que a temperatura atinja o pico, conforme mostrado nos termogramas, é um indicativo do grau de dificuldade de escoamento do adsorbato (água) ao longo do leito adsorativo. Observou-se que a configuração de leito com fluxo axial (tipo B) levou mais tempo para atingir a máxima temperatura – em média 12 minutos (Figuras 7 e 8). Para as demais configurações avaliadas, esse tempo foi reduzido: para o leito poroso com fluxo radial (tipo A), a média foi de 7 minutos (Figuras 4 e 5); para o leito poroso com metade do volume ocupado com sílica (tipo C), a média foi de 8 minutos (Figura 10), indicando que o escoamento do adsorbato ocorre de forma mais rápida nas configurações dos tipos A e C.

4 Conclusões

Os leitos porosos avaliados apresentam características distintas em relação ao sentido do fluxo adsorativo e ao ponto de entrada do adsorbato no leito, que poderia ser pela extremidade ou pela parte central do leito poroso. A finalidade deste estudo foi propor uma configuração que facilitasse o escoamento do adsorbato, de forma rápida e eficaz, pelo leito, visando à aplicação posterior em um sistema de refrigeração por adsorção. Os termogramas obtidos nos experimentos indicaram que o adsorbato (vapor de água) se difundiu ao longo de todo o leito. No entanto, para o leito poroso com fluxo axial, cujo volume fora totalmente preenchido pelo adsorbente, verificou-se, por meio dos termogramas, que os sensores nas extremidades levaram mais tempo para registrar elevação de temperatura devido aos efeitos adsorativos. Nos leitos dos tipos A e C, os termogramas indicaram uma rápida difusão do adsorbato ao longo do leito poroso, em comparação com o leito do tipo B, pois o tempo para que os sensores registrassem a temperatura máxima foi menor.

Para cada caso estudado, também foi avaliada a concentração de adsorbato. Os leitos porosos com fluxo radial apresentaram maiores concentrações de adsorbato durante o período de seis horas de adsorção, em comparação com as outras configurações. Na comparação entre os dois leitos com fluxo radial, o que tinha entrada de adsorbato pela extremidade registrou maior concentração de adsorbato para o mesmo período de tempo. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que o leito adsorativo com entrada de adsorbato pela extremidade e fluxo radial apresentou as maiores concentrações de adsorbato em relação

a todas as outras configurações estudadas. Conclui-se que a tela concêntrica desempenha papel importante, pois os leitos porosos que contavam com sua presença apresentaram maiores concentrações de adsorbato e menor tempo de saturação do adsorvente (sílica-gel), em comparação com as demais configurações avaliadas.

Os resultados apresentados neste trabalho serviram de base para a construção de um leito adsorativo, a ser aplicado em um sistema de refrigeração por adsorção para climatização de ambientes. Estes resultados preliminares abrem, portanto, possibilidades de se realizarem novos estudos com diferentes configurações e pares de adsorbato/adsorvente. Para que as medições de temperaturas sejam mais uniformes ao longo do leito, é recomendada a adição de mais sensores de temperatura, assim como de sensores de pressão, além do desenvolvimento de um sistema que permita a medição contínua da massa adsorvida pelo leito, sem a necessidade de desacoplamento do leito adsorativo.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Laboratório de Meios Porosos (LAMPA), pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho.

Financiamento

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Processos números: 307612/2020-1 e 405096/2021-6.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

VIEIRA, H. M.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. **AMORIM, J. A.; SILVA, M. G.; SOARES, J. J.; MELO, F. J. A.; GURGEL, J. M. A. M.:** análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ALBRIGHT, L. F. (ed.). **Albright's Chemical Engineering Handbook**. New York: CRC Press, 2008.

AMORIM, J. A.; VIEIRA, H. M.; ANDRADE, C. H. T.; MEDEIROS, J. M.; SANTOS, J. C.; GURGEL, J. M. Experimental sorption dynamic in packed bed of silica gel. **Journal of Porous Media**, v. 16, n. 6 p. 515-525, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v16.i6.30>.

ARISTOV, Y. I.; RESTUCCIA, G.; CACCIOLA, G.; PARMON, V. N. A family of new working materials for solid sorption air conditioning systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, n. 2, p. 191-204, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00072-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00072-2).

CHAKRABORTY, A.; SAHA, B. B.; ARISTOV, Y. I. Dynamic behaviors of adsorption chiller: Effects of the silica gel grain size and layers. **Energy**, v. 78, p. 304-312, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.015>.

CHANG, K.-S.; CHEN, M.-T.; CHUNG, T.-W. Effects of the thickness and particle size of silica gel on the heat and mass transfer performance of a silica gel-coated bed for air-conditioning adsorption systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 14-15, p. 2330-2340, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.12.020>.

DABROWSKI, A. Adsorption: from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 93, n. 1-3, p. 135-224, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8).

DAWOUD, B.; ARISTOV, Y. Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 2, p. 273-281, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00288-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00288-0).

KUBOTA, M.; UEDA, T.; FUJISAWA, R.; KOBAYASHI, J.; WATANABE, F.; KOBAYASHI, N.; HASATANI, M. Cooling output performance of a prototype adsorption heat pump with fin-type silica gel tube module. **Applied Thermal Engineering**, v.28, n. 2-3, p. 87-93, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.014>.

MASEL, R. I. **Principles of adsorption and reaction on solid surfaces**. Toronto: Wiley, 1996.

OLIVEIRA, L. G.; LIMA, W. C. P. B.; LIMA, A. G. B. Transporte de calor em regime permanente em um reator cilíndrico circular de leito fixo: um estudo experimental. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 1, p. 48-58, 2011. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/168>. Acesso em: 23 nov. 2023.

RADY, M. A. Experimental and numerical investigations on the performance of dehumidifying desiccant beds composed of silica-gel and thermal energy storage particles. **Heat Mass Transfer**, v. 45, p. 545-561, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-008-0459-4>.

RIFFEL, D. B. **Estudo teórico e experimental da dinâmica e da otimização de refrigeradores térmicos por adsorção**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. New York: Wiley, 1984.

SANTOS, J. C.; LIMA, J. A.; GURGEL, J. M.; MARCONDES, F. Modelling and simulation of water vapor adsorption in silica gel bidisperse beds. **Journal of the**

Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 43, 313, 2021.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s40430-021-03018-0>.

SUZUKI, M. **Adsorption Engineering**. Tokyo: Kodansha, 1990.

XIA, Z. Z.; CHEN, C. J.; KIPLAGAT, J. K.; WANG, R. Z.; HU, J. Q. Adsorption equilibrium of water on silica gel. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 53, n. 10, p. 2462-2465, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1021/je800019u>.