

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 Araujo Melo^[5], José Maurício Alves de Matos Gurgel^[6]

^[1] herbert.melo@academico.ufpb.br, ^[2] joselmaaraujo@yahoo.com.br, ^[5] fjameloufpb@gmail.com, ^[6] jm.gurgel@cear.ufpb.br. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil.

^[3] mgcefet@gmail.com. Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Brasil

^[4] josimar.soares@ifam.edu.br. Instituto Federal do Amazonas (IFAM), Brasil

* autor correspondente

Resumo

Resultados experimentais da cinética de adsorção de água em diferentes configurações de leitos adsortivos são apresentados neste trabalho. Os leitos têm o formato cilíndrico e são preenchidos com sílica-gel. Este trabalho consiste em propor uma configuração que apresente a maior taxa adsortiva, permitindo posteriormente a construção de equipamentos adsortivos com maior cinética adsortiva, melhor transferência de calor e eficiência. Para a avaliação dos leitos porosos, foi montado um aparato experimental, com os leitos conectados por válvulas a um evaporador, possibilitando a avaliação de diferentes fluxos adsortivos. Para um fluxo radial, o adsorvente está confinado entre a tela e a parede interna do leito e para um fluxo axial, o leito poroso tem todo o seu volume preenchido com o adsorvente. Em outra configuração avaliada, o leito era formado por uma tela retangular localizada na parte central do leito poroso, permitindo que o preenchimento com o adsorvente ocorra apenas na metade do leito. A obtenção de termogramas, por meio de termopares colocados no interior dos leitos e da variação da taxa adsorvida em função do tempo, permitiu caracterizar e comparar a cinética da adsorção dessas três configurações estudadas. 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; refrigeração; sílica gel; leito poroso; termopares.

Experimental evaluation in different configurations of adsorptive beds

Abstract

Experimental results of water adsorption kinetics in different adsorption bed configurations are presented in this work. The beds have a cylindrical shape and are filled with silica gel. This work consists of proposing a configuration that presents the highest adsorptive rate, subsequently allowing the construction of adsorptive equipment with greater adsorptive kinetics, better heat transfer and efficiency. To evaluate the porous beds, an experimental apparatus was set up, with the beds connected by valves to an evaporator, enabling the evaluation of different adsorptive flows. For a radial flow, the adsorbent is confined between the screen and the inner wall of the bed and for an axial flow, the porous bed has its entire volume filled with the adsorbent. In another configuration evaluated, the bed was formed by a rectangular screen located in the central part of the porous bed, allowing the filling with the adsorbent to occur only in half of the bed. Obtaining thermograms, using thermocouples placed inside the beds and the variation of the adsorbed rate as a function of time, made it possible to characterize and compare the adsorption kinetics of these three studied configurations. The experimental results demonstrated that the bed with the concentric screen presented a higher adsorptive rate, allowing this configuration to be applied to an adsorption refrigeration system.

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

1. Introdução

Os leitos adsortivo de um modo geral apresentam uma camada espessa de material adsortivo, dificultando o escoamento e a transferência de calor de modo uniforme por meio do leito. O estudo adsortivo apresentado neste trabalho tem como finalidade, verificar entre três configurações de leitos

adsortivos, qual apresentará em um intervalo de tempo, a máxima concentração de adsorbato, para que, posteriormente, essa configuração seja aplicada em leitos porosos de sistemas adsortivos.

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 retirada do líquido ou gás da superfície sólida (Masel, 1996). A adsorção ocorre com maior intensidade nas substâncias, como o carvão ativado, as argilas ativadas, alumina, bauxita ativada, sílica gel, que foram particuladas e tratadas de modo a apresentarem uma área superficial bastante superior em relação a sua massa. A adsorção é um processo onde moléculas são acumuladas na camada interfacial do sólido sendo composta por duas partes, a do gás que reside no campo de força da superfície sólida e a camada superficial do sólido Dabrowski (2001). O fluido que se acumula na interface do material sólido é chamado de adsorbato, e a superfície sólida onde o adsorbato é acumulado, é denominado de adsorvente (Ruthven, 1984).

De acordo com Albright (2008), a característica mais importante para um adsorvente é a sua capacidade de adsorção, sendo essa a quantidade de adsorbato (fluido) retido pelo adsorvente (sólido). A capacidade de adsorção do sólido é um parâmetro dependente da temperatura, da pressão e da concentração do fluido adsortivo. Os adsorventes mais utilizados em processos industriais são a sílica gel, o carvão ativado, alumina ativada e a zeólita. A sílica gel tem características polares, tendo afinidade pela água, conhecida também por adsorventes hidrofílicos (Suzuki, 1990). Experimentalmente, Chang, Chen e Chung (2005) verificaram a influência da espessura da camada de sílica gel e o tamanho das partículas no desempenho na transferência de calor e massa em um leito poroso, verificando, experimentalmente, que as partículas de sílica gel com diâmetro médio de 1,5 mm adsorvia/dessorvia mais rapidamente o adsorbato (água) quando comparado com a sílica gel de 3 mm. O leito poroso onde a sílica gel foi condicionada em camadas com espessuras menores tiveram maiores taxas de transferência de calor. Um estudo da dinâmica de refrigeradores por adsorção, para otimizar o processo adsortivo, foi desenvolvido por Riffel (2008) quanto ao seu coeficiente de desempenho e potência frigorífica específica, que observou os sistemas de refrigeração térmica sendo altamente influenciados pelas condições instantâneas de operação e que, as respostas são igualmente influenciadas, pela geometria do trocador de calor.

Kubota *et al.* (2008) desenvolveram e testaram, experimentalmente, um leito poroso compacto, formado por dutos aletados, que eram todos preenchidos com sílica gel, e todo o conjunto envolvido com uma tela de aço inoxidável. O protótipo foi testado em várias temperaturas de regeneração e de resfriamento em diversos tempos de ciclos. No entanto, observou-se que essa configuração contribuiu para uma maior taxa de transferência de calor e de massa. A partir de resultados experimentais obtidos por Amorim *et al.* (2012) em um leito adsortivo preenchido com sílica gel, verificou que com o aumento do fluxo de ar, a taxa adsortiva do leito aumentava consideravelmente.

Com o estudo da cinética de adsorção dos diferentes leitos adsortivos avaliados neste artigo, permitirá definir uma configuração de leito adsortivo, que tenha uma rápida taxa adsortiva, haja vista, que o aumento da taxa adsortiva contribui para a elevação da eficiência de diversos sistemas adsortivos, a exemplos, os *chiller* adsortivos. Na maioria das vezes, esses dispositivos são volumosos e mais caros devido à necessidade do uso de uma maior quantidade de adsorvente. De acordo com Santos *et al.* (2021), os sistemas de refrigeração por adsorção, aplicados em ar condicionado, podem funcionar através da utilização de uma baixa fonte de calor e fluido refrigerante que não agride o meio ambiente, o que torna esses dispositivos bastante promissores. Nesses sistemas, a desumidificação do ar é obtida usando o leito compactado com materiais dessecantes, como a sílica gel, alumina ativada e zeólita.

Chakraborty, Saha e Aristov (2014) avaliaram o resfriamento específico e o coeficiente de desempenho de um leito adsortivo de sílica gel, através da simulação numérica. Foi verificado que com o aumento da camada e do tamanho dos grãos de sílica, ocorreu uma diminuição do coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração, e no poder de resfriamento específico, concluindo que esses dois parâmetros devem ser levado em consideração no desenvolvimento desses sistemas. Devido à baixa transferência de calor e massa, dos sistemas de refrigeração por adsorção, o desempenho é baixo.

Dawoud e Aristov (2003) apresentaram um estudo experimental da cinética de adsorção de vapor d'água em sílica gel microporosa, mesoporosa e alumina em comparação com os dois

compósitos impregnados com CaCl_2 . A conclusão é que a sílica microporosa apresentou cerca de duas vezes mais vapor de água quando comparado com a sílica mesoporosa e a alumina, no entanto, teve uma cinética de adsorção mais lenta, para os compósitos foi observado um aumento na massa de água adsorvida e menor cinética de adsorção em comparação aos outros materiais adsorventes estudados.

Xia *et al.* (2008) desenvolveram um equipamento para determinar o equilíbrio de adsorção da sílica gel, por meio do método do peso, onde foi possível, determinar que a capacidade adsorvente da sílica, variou de 0,03 a 0,3 kg/kg, observando também que a equação de Freundlich modificada apresentou o melhor ajuste com os dados experimentais. Para um bom funcionamento de um sistema de refrigeração por adsorção, a capacidade adsorvente da sílica gel, é um parâmetro fundamental para a otimização de equipamento adsorventes. Com esse propósito, para aumentar a capacidade de adsorção desse adsorvente, 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 demonstraram um aumento na capacidade adsorvente da sílica, que antes, era de 0,1 g/g e com a impregnação do sal teve sua capacidade adsorvente aumentada para 0,75 g/g, em ambos os casos, foram realizados a temperatura de 28 °C e pressão de 2,34 kPa.

Visando reduzir custo e aumento do desempenho, procura-se neste trabalho, propor e avaliar uma configuração simples de leito poroso, que tenha uma configuração diferente dos sistemas de leitos tradicionais, normalmente estes leitos são todos preenchidos com o material adsorvente o que interfere no desempenho dos sistemas de refrigeração por adsorção. Este trabalho mostra uma avaliação experimental de configurações de leitos adsorventes que possibilite um escoamento mais livre do adsorbato, com boa transferência de calor e massa.

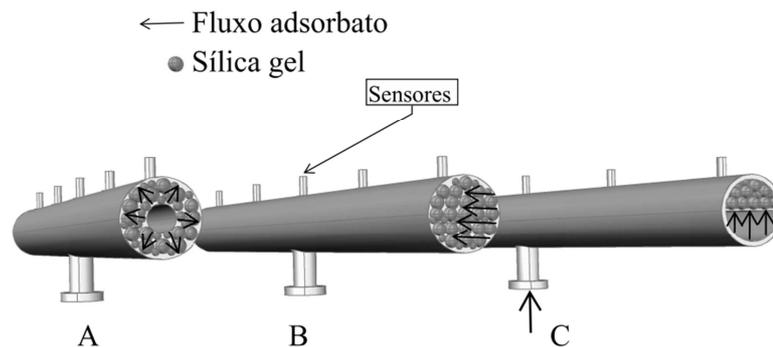
No restante do artigo, na seção de materiais e métodos (seção 2) deste trabalho são descritos os tipos e as dimensões dos leitos adsorventes, configurações, posicionamento dos sensores de temperaturas, equipamentos utilizados e procedimento adotado para determinação da quantidade da massa de água adsorvida em cada configuração avaliada de leito adsorvente. Na seção 3, os resultados e as discussões são apresentados, os termogramas e massa adsorvidas obtidos, permitindo a determinação da melhor configuração de leito adsorvente avaliados. Por fim, na seção 4, as conclusões deste trabalho.

2 Materiais e métodos

Os leitos porosos estudados foram denominados leitos A, B e C, desenvolvidos em tubos de cobre, com 1 m de comprimento e 0,38 m de diâmetro interno, telas de aço inoxidável e material adsorvente (sílica gel). Esses leitos porosos, que foram avaliados neste trabalho (Figura 1), apresentam as seguintes características cada um: o leito A é formado por uma tela circular concêntrica de 0,01 m de diâmetro, ficando o adsorvente armazenado entre a tela e a parede interna do leito adsorvente, o que dessa forma foi possível permitir que o adsorbato escoe livremente pela parte central do leito e seja adsorvido radialmente; o leito B não apresenta a tela concêntrica, ficando todo preenchido com o adsorvente, o adsorbato adsorvido axialmente ao longo do leito poroso; o leito tipo C foi constituído por uma tela plana retangular que se encontra axialmente fixada na parte central do tubo de cobre, permitindo que o adsorvente fique condicionado apenas na metade do leito poroso e a outra metade esteja livre para o escoamento do adsorbato.

Nas configurações dos leitos A B, o adsorbato poderia ter acesso ao adsorvente de duas maneiras. A primeira por uma das extremidades do leito poroso e a segunda forma, pela parte central do leito (Figura 2). Para o leito C o adsorbato sempre entrava pela parte central do leito poroso conforme indicado na Figura 1.

Figura 1 – Leitos porosos usados no estudo experimental

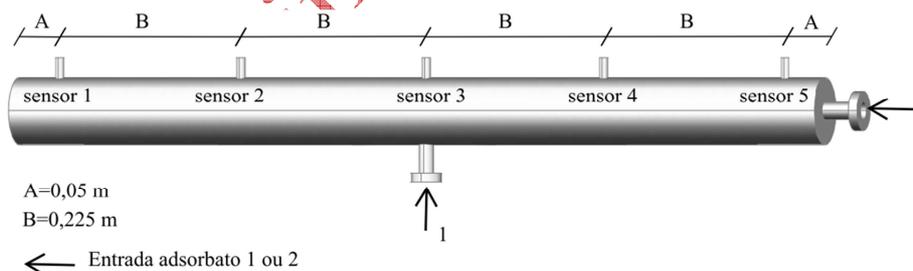


Fonte: elaborado pelos autores

2.1 Trabalho experimental

Em cada leito poroso foram colocados cinco sensores de temperatura do tipo PT-100 Classe A com um limite de erro, segundo a norma DIN-IEC 751/85, de $\pm(0,15 + (0,002.t) \text{ } ^\circ\text{C})$. Esses sensores possuem uma resistência de $100 \text{ } \Omega$ a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ e são constituídos por um fio de platina com resistência de $0,00392 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$. As temperaturas no interior do leito foram medidas por meio do posicionamento dos sensores a uma distância aproximada de $0,015 \text{ m}$ da superfície externa do duto que envolve o leito poroso, por meio de poços feitos de dutos de cobre, com diâmetro próximo ao do PT-100 (4 mm), ficando o espaço vazio preenchido com pasta térmica. O calor gerado durante o processo adsorptivo provoca o aumento da temperatura ao longo do leito poroso, sendo esse, um indicativo de que o adsorbato está sendo adsorvido pelo adsorvente. Os sensores foram distribuídos conforme apresentado na Figura 2. Os dois sensores dos extremos (sensores 1 e 5) foram colocados a $0,05 \text{ m}$ de distância das extremidades do leito poroso e os sensores internos (sensores 2, 3 e 4) foram distribuídos uniformemente a uma distância de $0,225 \text{ m}$. Os sensores utilizados para medição da temperatura no interior do leito poroso são conectados a um módulo de aquisição de dados da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) modelo Spider8, com 8 canais de entradas paralelas. Os sinais obtidos pelo módulo de aquisição são convertidos e armazenados através do software instalado no computador chamado Catman[®] Professional 4.5.

Figura 2 – Distribuição dos sensores ao longo do reator

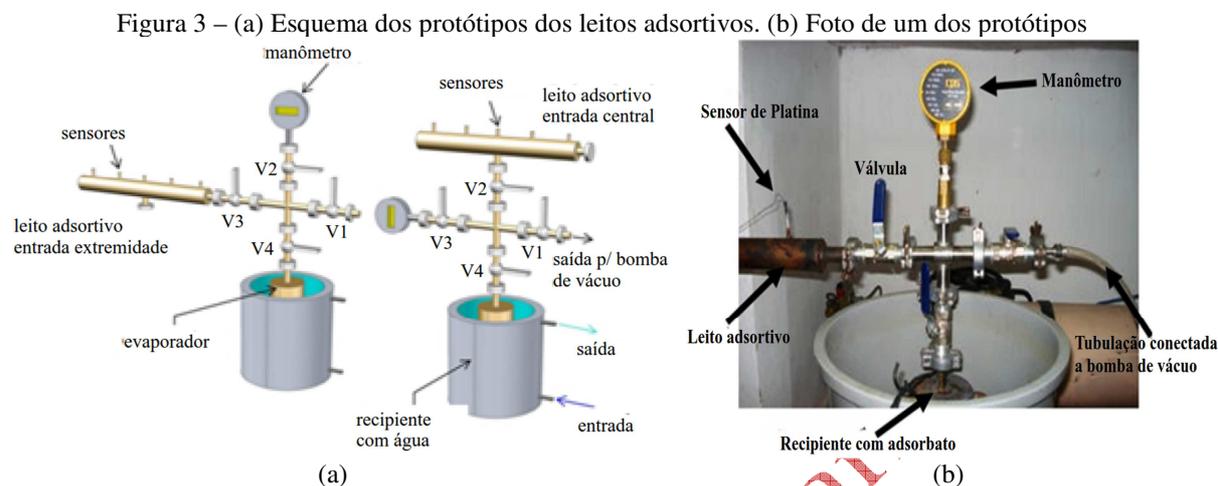


Fonte: elaborado pelos autores

O adsorbato utilizado foi a água pura deionizada e o adsorvente, a sílica gel impregnada com cloreto de cobalto o que lhe confere a cor azul quando seca, e muda para a coloração rosa quando está saturada, indicando que a sílica perdeu seu poder adsorptivo. A sílica gel usada tem granulometria na faixa de 4 a 8 mm , e encontra-se nos leitos porosos citados conforme apresentado na Figura 1. Quando a sílica gel perde a sua capacidade adsorptiva (saturada), a mesma era regenerada em uma estufa elétrica a $120 \text{ } ^\circ\text{C}$ por um período mínimo de 24 horas. Após a regeneração, a sílica gel era recolocada no leito poroso imediatamente e esperava-se resfriar até a temperatura ambiente, momento em que o leito com o material adsorvente era pesado em uma balança digital, modelo Bel Mark k30, com capacidade para 30 kg e uma precisão mínima de 5 g .

Os leitos porosos são acoplados a um evaporador que é um recipiente de forma cilíndrica com uma válvula do tipo globo usada para controlar a passagem do adsorbato. A evaporação do adsorbato (água) promove a diminuição da temperatura e pressão no evaporador, o que contribui para a redução

da capacidade adsorviva do leito poroso. Para que a temperatura e pressão do adsorbado no evaporador fiquem constantes ao longo de todo o experimento, o evaporador é mergulhado em um volume de aproximadamente 30 L de água (Figura 3), sendo essa água mantida a 28 °C mediante uma resistência elétrica controlada por um termostato, permitindo que o vapor de água chegue ao leito a uma temperatura e pressão constante de 28 °C e 4,29 kPa respectivamente.



Fonte: elaborado pelos autores

Uma bomba de vácuo modelo DV-142N-250 (motor de 1/2 HP) é utilizada para retirar o ar contido no leito poroso, sendo o leito poroso evacuado por um período de 30 minutos. Ao final desse tempo, o leito é mantido a uma pressão de aproximadamente 0,1 kPa, indicado por um manômetro conectado ao sistema. Antes de o adsorbato ser colocado no evaporador, todo o ar do seu interior é retirado e em seguida, com o auxílio de uma mangueira, são adicionados 1,5 L de adsorbato.

A pressão no evaporador é mantida constante através do procedimento relatado anteriormente, a 4,29 kPa correspondendo a pressão de saturação do adsorbato (água) a 30 °C.

Antes do início dos experimentos com os leitos porosos, análises da capacidade adsorviva da sílica gel utilizada neste trabalho, foram realizadas. A sílica gel tem uma granulometria que varia de 4 a 8 mm, sendo colocada em uma estufa a 120 °C durante um período de 24 horas, para regeneração. Após esse período, a mesma é retirada rapidamente da estufa e colocada em um dessecador, evitando a adsorção de umidade do ambiente.

A sílica gel é resfriada até temperatura ambiente dentro do dessecador. Em seguida é retirada, pesada e colocada no leito adsorvivo. A quantidade de massa de sílica gel utilizada em cada configuração de leito adsorvivo foram: para o leito poroso tipo A, o adsorvente é 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, esta configuração tem uma capacidade de armazenamento de 0,7 kg. Para a configuração de leito adsorvivo tipo B, o material adsorvente preenchia todo o duto, sendo possível armazenar uma massa de 1 kg de sílica gel e para o leito adsorvivo tipo C, o material adsorvente ocupava metade do volume do duto e a outra metade ficava livre para o escoamento do adsorbato (ver Figura 1), sendo armazenada uma massa de 0,470 kg de sílica gel. Os leitos adsorvivos com fluxo radial (tipo A) e axial (tipo B) poderiam ser conectados ao evaporador de duas formas diferentes, permitindo que o adsorbato (vapor de água) pudesse ter acesso ao leito adsorvivo pela extremidade ou parte central, conforme apresentado na Figura 3. No protótipo à direita da Figura 3a é possível observar o sensor, manômetro, o evaporador, onde está condicionado o adsorbato, esses utilizados em todas as configurações de leito adsorvivo avaliada neste trabalho.

O leito adsorvivo é conectado ao evaporador após ser preenchido com o material adsorvente (sílica gel), em seguida, é iniciado o processo de retirada do ar de dentro do leito adsorvivo por meio de uma bomba de vácuo, pois a presença do ar atmosférico interfere no desempenho da capacidade adsorviva do adsorvente. A bomba de vácuo estando conectada a válvula 1 e as válvulas 1, 2 e 3 estando abertas, o ar é removido continuamente, por um período de aproximadamente 30 min, até que

a pressão no leito adsorvente alcance 0,1 kPa, após esta etapa, a válvula 1 (V1) é fechada e a válvula 4 (V4) é aberta, permitindo a passagem do adsorbato (vapor de água) para o leito adsorvente. O processo adsorvente é um processo exotérmico, ou seja, ocorre com liberação de calor e este calor gerado promove a elevação da temperatura do leito, este aumento da temperatura, registrado pelos sensores, são utilizados como indicativo de que o adsorbato (vapor de água), está sendo adsorvido pelo material adsorvente (sílica gel) ao longo de todo o leito adsorvente.

O seguinte procedimento foi adotado para determinação da massa em cada configuração avaliada: com o fechamento das válvulas 3 (V3) e 4 (V4), para o leito adsorvente com entrada do adsorbato pela extremidade e o fechamento das válvulas 4 (V4) e 3 (V3), para o leito com entrada pela parte central, era possível evitar a infiltração do ar atmosférico no leito poroso e no evaporador, à medida da massa do leito poroso (adsorvente) mais adsorbato (vapor de água) era realizada neste momento com o desacoplamento do mesmo, em seguida o leito adsorvente é novamente conectado ao evaporador e a válvula 1 (V1) é aberta permitindo que seja retirado o ar atmosférico das conexões de ligação entre o evaporador e o leito poroso, permitindo que o sistema continuará com a mínima quantidade de ar atmosférico. Após essa etapa, a válvula 1 (V1) é novamente fechada e as válvulas 3 (V3), 4 (V4) e 2 (V2) a depender do ponto de entrada do adsorbato no leito, são reabertas. Dessa forma, foi possível determinar a massa de água adsorvida e continuar o processo adsorvente do leito até saturação, este procedimento foi adotado para todas as configurações de leitos adsorventes. A massa do leito poroso era medida a cada hora e através da diferença entre a massa do leito adsorvente ao final (M_{Afinal}) de cada hora de adsorção, e a massa anterior do leito adsorvente ($M_{Aanterior}$), obtém-se a massa de água adsorvida. Dividindo a massa de água adsorvida, pela massa de adsorvente (sílica gel) utilizado no leito adsorvente ($M_{Adsorvente}$), calcula-se a concentração de adsorbato ($X_{adsorbato}$) utilizando a Equação 1.

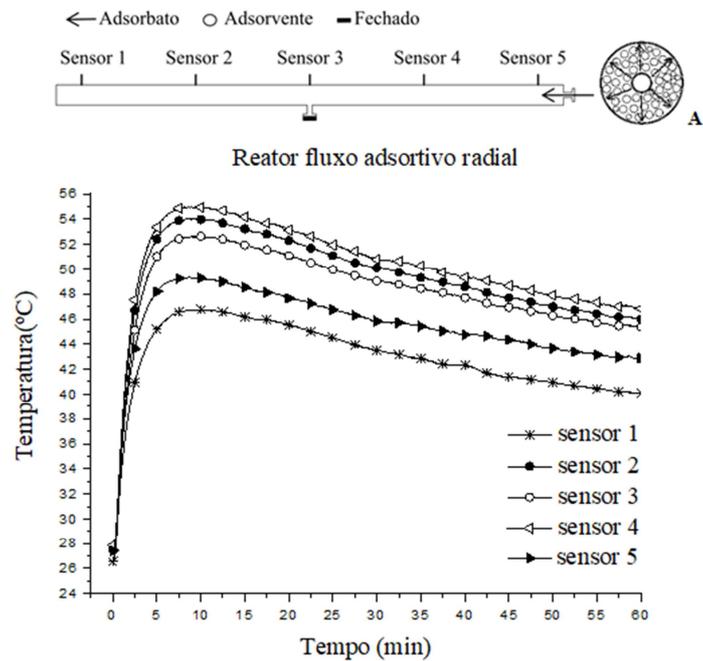
$$X_{adsorbato} = \frac{M_{Afinal} - M_{Aanterior}}{M_{Adsorvente}} \quad (1)$$

3 Resultados e discussões

O estudo experimental das taxas adsorventes com os leitos porosos teve a finalidade de verificar entre as diferentes configurações de leitos adsorventes, qual apresentaria maiores concentrações de adsorbato em um determinado intervalo de tempo. A entrada do adsorbato nos leitos porosos com fluxo axial e radial poderia ser pela extremidade ou pela parte central do leito, sendo avaliada cada possibilidade. Para o leito poroso que teve metade do seu volume preenchido com o adsorvente, o adsorbato entrava pela parte central do leito e se difundia pelo volume vazio que se encontrava embaixo do leito poroso.

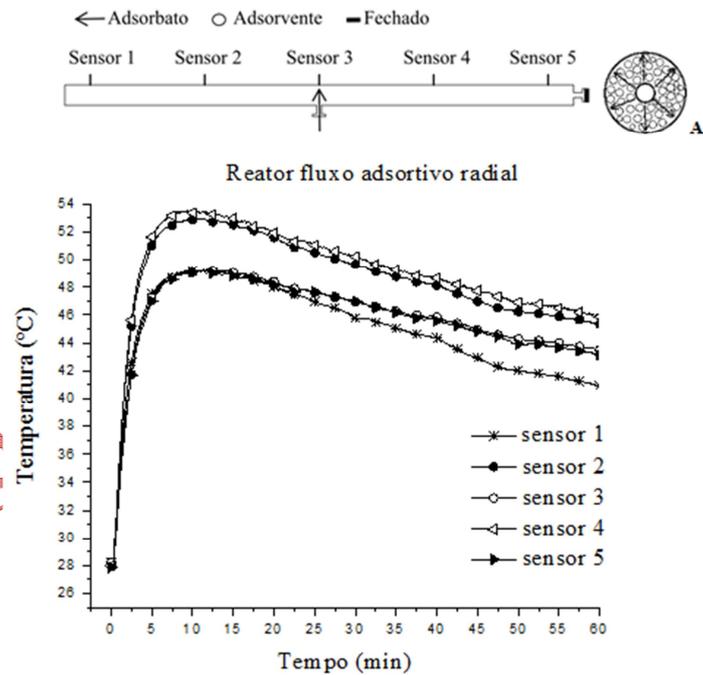
Os termogramas obtidos pelo calor gerado (exotérmico) durante o processo adsorvente do leito poroso com fluxo radial do adsorbato, com entrada pela extremidade (Figura 4) e parte central do leito (Figura 5), indicaram que o vapor de água (adsorbato) percorreu todo o leito poroso, pois os cinco sensores registraram elevação na temperatura no momento em que a válvula do evaporador (V4) era aberta (Figura 3) (válvula 4). De acordo com Rady (2009), as partículas de sílica-gel, que estão na entrada do leito adsorvente saturam-se mais rapidamente promovendo uma rápida diminuição da temperatura, devido à diminuição do calor de sorção liberado. No caso deste trabalho observou-se também que os sensores 5 e 1 (ver Figura 2), tiveram menores picos de temperatura em todas as configurações estudadas. No sensor 5 pode ser atribuído ao contato direto com o vapor de água fria vinda do evaporador e ao sensor 1 devido a pouca quantidade de adsorbato que chega ao extremo do leito poroso durante o processo de saturação do mesmo, 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 entrada pela parte central



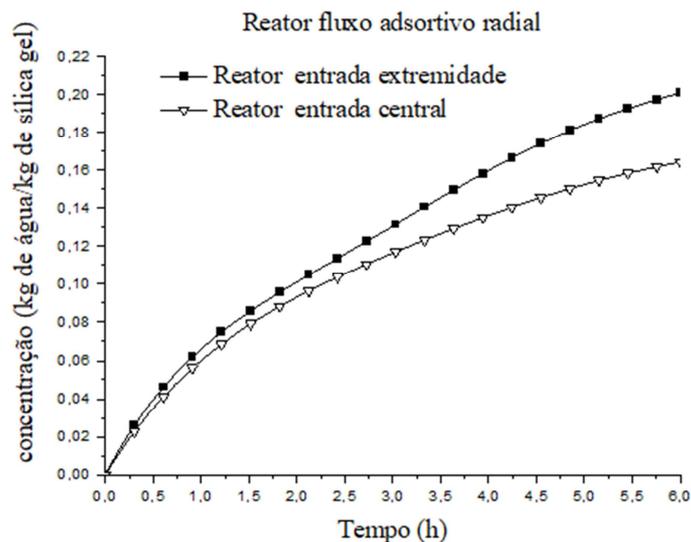
Fonte: dados da pesquisa

De acordo com Oliveira (2011), a porosidade do leito poroso tem influência direta no comportamento térmico do leito, devido as maiores irregularidades na direção radial. Essa direção tem maiores gradiente de temperaturas, também devido às irregularidades no empacotamento do leito, que apresentaram uma porosidade média de 0,41 ml do leito vazio/ml de partículas do leito. A transferência de calor no sentido axial pode ocorrer, por condução molecular e desigualdade no fluxo do fluido.

As taxas adsortivas para os leitos adsortivo com fluxo radial foram avaliadas através das medidas das concentrações de adsorbato no leito, obtido a cada hora.

Os resultados indicam que durante o período adsorptivo, o leito poroso com entrada pela extremidade teve a concentração de adsorbato sempre superior em comparação com o leito com entrada pela parte central, conforme apresentado na Figura 6. O adsorbato ao entrar pela extremidade do leito adsorptivo, tem uma perda de carga menor percorrendo livremente através da tela concêntrica ao longo de todo o leito adsorptivo. Ao entrar pela parte central, o adsorbato é rapidamente adsorvido e tem que efetuar uma curva de 90° para ser adsorvido pelas extremidades do leito adsorptivo, o que proporcionou uma redução na taxa adsorptiva para esta configuração.

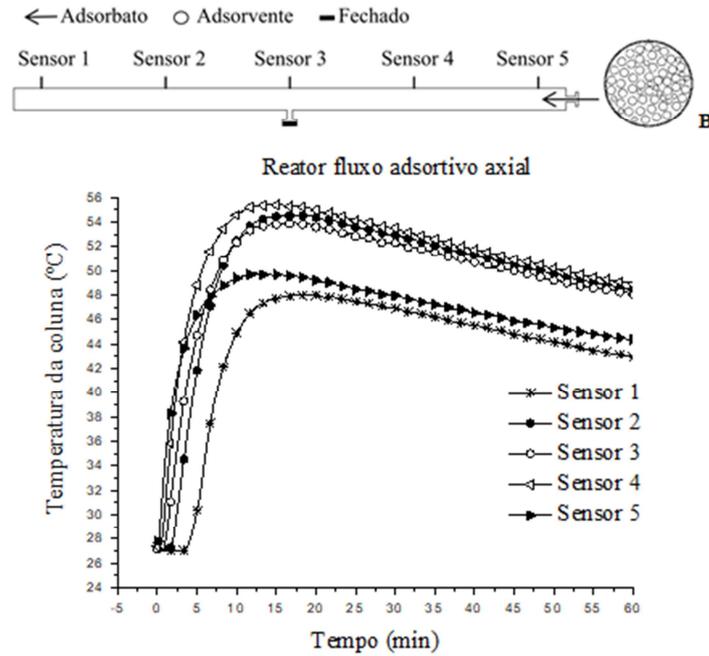
Figura 6 – Concentração no leito poroso com fluxo radial entrada extremidade e parte central



Fonte: dados da pesquisa

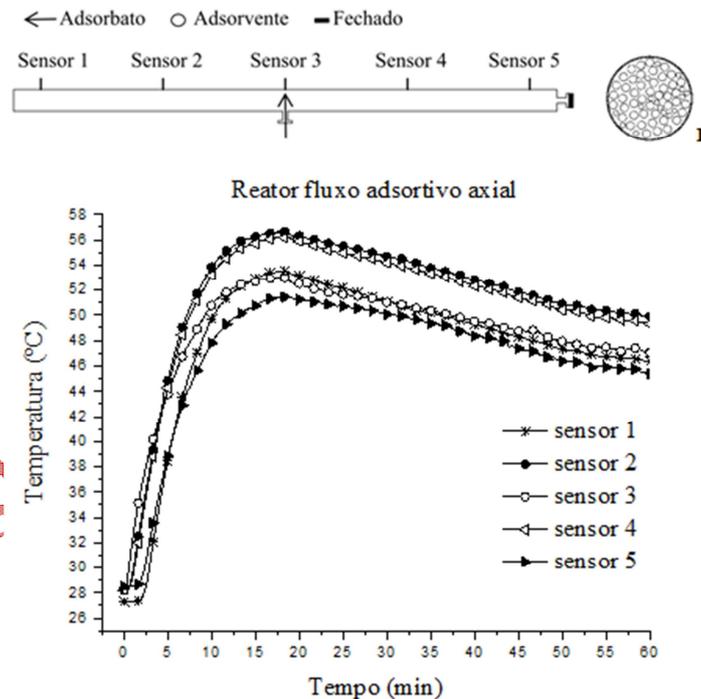
Para o leito adsorptivo com fluxo axial, todo o volume do leito é ocupado pelo adsorvente. Nessa configuração também foi avaliado a entrada do adsorbato pela extremidade ou parte central. Os termogramas gerados mostraram que o adsorbato escoava ao longo de ambas as categorias de leitos adsorptivos, pois foram registradas aumento das temperaturas no interior do leito pelos cinco sensores, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 – Leito poroso tipo B com fluxo axial de adsorbato entrada pela extremidade



Fonte: dados da pesquisa

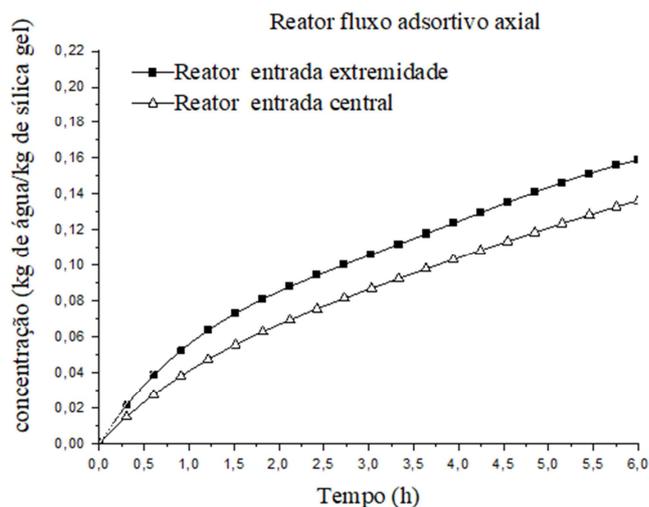
Figura 8 – Leito poroso tipo B com fluxo axial de adsorbato entrada pela parte central



Fonte: dados da pesquisa

Na Figura 9 são apresentadas as medidas obtidas da concentração de adsorbato adsorvido pelos leitos porosos, com entrada pela extremidade e parte central do leito com fluxo axial. Pode-se verificar que o leito que tinha o adsorbato entrando pela extremidade apresentou maiores taxas adsorptivas em comparação ao leito com entrada pela parte central, é possível atribuir os mesmos fatores ocorridos para o leito com fluxo radial, pois os leitos com entrada pela parte central apresentaram maiores dificuldades para o escoamento do adsorbato, implicando em uma menor taxa adsorptiva.

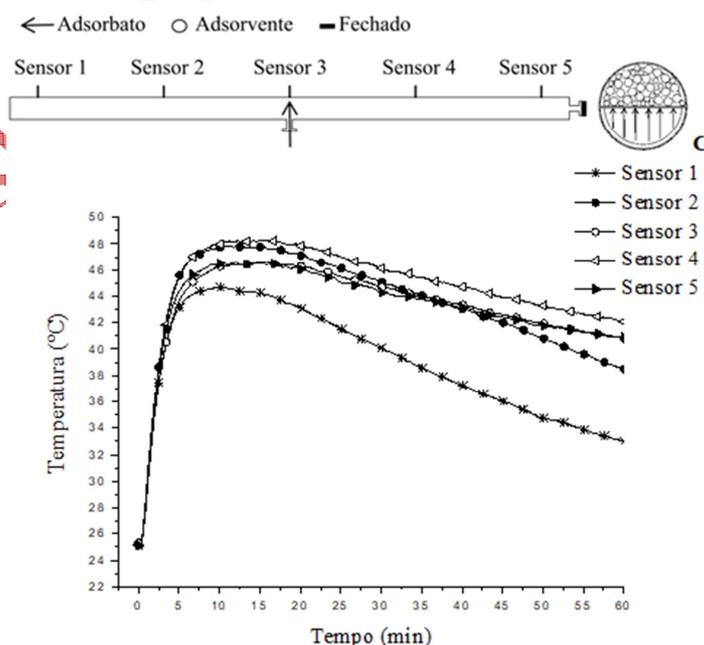
Figura 9 – Concentração no leito poroso com fluxo axial entrada extremidade e parte central



Fonte: dados da pesquisa

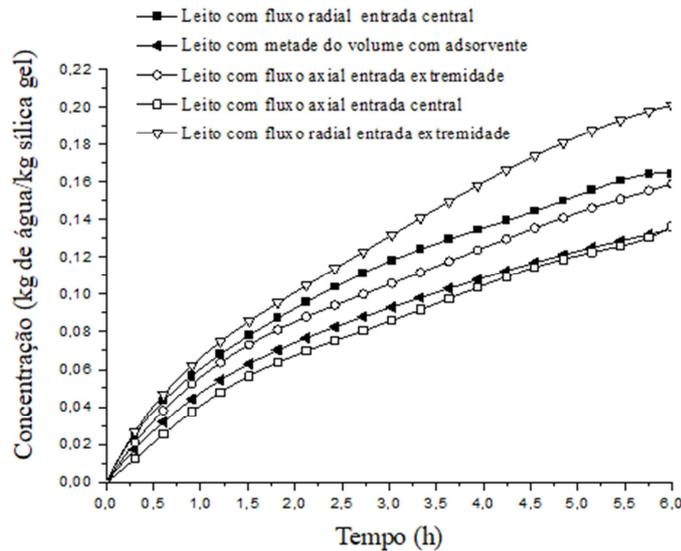
Para o leito poroso tipo C que tinha metade do seu volume ocupado com o adsorvente, e a outra metade livre para o escoamento do adsorbato, que entrava pela parte central inferior do leito poroso, apresentou o mesmo perfil de curvas das configurações anteriores estudadas, onde foi verificado que em todos os sensores houve registro de elevação de temperatura ao longo de todo o leito poroso. Assim como para o leito poroso com fluxo do adsorbato radial o tempo necessário para que os sensores registrassem o pico de temperatura foi cerca de 8 minutos indicando que o adsorbato escoava com facilidade em todo o leito, onde é apresentado na Figura 10 o termograma. Comparando a taxa adsorativa do leito poroso tipo C com os outros leitos estudados, foi verificado que o mesmo apresentou as menores taxas adsorativas com valores um pouco acima da indicada pelo leito poroso com fluxo axial com entrada central, como pode ser observado na Figura 11 indicando todas as taxas adsorativas dos leitos porosos avaliados.

Figura 10 – Leito poroso tipo C metade do volume preenchido e adsorbato entrando pela parte central



Fonte: dados da pesquisa

Figura 11 – Comparação da taxa adsorptiva entre os leitos poroso estudados



Fonte: dados da pesquisa

O tempo que a temperatura leva para atingir o pico, apresentado nos termogramas, é um indicativo do grau de dificuldade do escoamento que o adsorbato (água) tem ao longo do leito adsorptivo. Verificou-se que a configuração de leito com fluxo axial (tipo B) levou mais tempo para chegar à máxima temperatura, que foi em média 12 minutos (Figura 7 e 8), para as outras configurações avaliadas, este tempo foi reduzido, onde, para a configuração do leito poroso com fluxo radial (tipo A) foi em média de 7 minutos (Figura 4 e 5) e para configuração de leito poroso com metade do leito ocupado com sílica (tipo C) foi em média 8 minutos (Figura 10), indicando que o escoamento do adsorbato ocorre de forma mais rápida para estas configurações tipo A e C.

4 Conclusões

Os leitos porosos avaliados têm características diferentes em relação ao sentido do fluxo adsorptivo e ao ponto de entrada do adsorbato no leito, por onde eram adsorvidos, que poderia ser pela extremidade ou pela parte central do leito poroso. A finalidade deste estudo consiste em propor uma configuração, que promova o escoamento do adsorbato, com maior facilidade e rapidez através do leito, para que, posteriormente, a configuração que apresentar maior concentração de adsorbato em menor tempo, seja aplicada a um sistema de refrigeração por adsorção. Os termogramas obtidos, durante os experimentos, indicam que o adsorbato (vapor de água) se difundiu ao longo de todo o leito, no entanto, para o leito poroso com fluxo axial, onde era todo preenchido com o adsorbato, notou-se através dos termogramas, que os sensores de temperaturas que estavam nas extremidades, levaram mais tempo para começarem indicar elevação de temperatura, devido aos efeitos adsorptivos. Para os modelos de leitos A e C, os termogramas indicaram que ocorre uma rápida difusão do adsorbato ao longo do leito poroso em comparação ao leito tipo B, pois o tempo para que os sensores iniciassem a indicar a temperatura máxima foi menor.

Para cada caso estudado, também foi avaliado a concentração de adsorbato, para os leitos porosos que apresentam fluxo radial, os mesmos, tiveram maiores concentrações de adsorbato durante o período de seis horas de adsorção, em relação às outras configurações propostas. No entanto, comparando os dois leitos com fluxo radial, o que tinha entrada de adsorbato pela extremidade, apresentou maior concentração de adsorbato para um mesmo período de tempo. Com os resultados obtidos neste trabalho foi possível verificar que o leito adsorptivo que tinha a entrada de adsorbato pela extremidade com fluxo radial, teve as maiores concentrações de adsorbato, em relação a todas as outras configurações estudadas. Dessa forma foi possível concluir que a tela concêntrica é de grande importância, pois, com os leitos porosos que tinham a presença desta tela, tiveram maior

concentrações no leito poroso e um tempo de saturação do adsorvente (sílica gel) menor, em comparação as outras configurações avaliadas.

Os resultados apresentados neste trabalho, serviram de base para construção de um leito adsorativo, para ser aplicado em um sistema de refrigeração por adsorção para climatização de ambiente, no entanto, estes resultados preliminares, abre a possibilidade de realizações de novos estudos com diferentes configurações e pares de adsorbato/adsorvente. Para que as medidas de temperaturas sejam mais uniformes ao longo do leito, mais sensores de temperaturas deveram ser adicionados, assim como, mais sensores de pressões, desenvolver um sistema que permita a medição da massa adsorvida pelo leito, sem a necessidade do desacoplamento, permitindo uma medição contínuo da massa 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

Referências

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).

ALBRIGHT, L. F. **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. 2, p. 515-525, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v16.i6.30>.

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 transfer performance of a silica gel-coated bed for air-conditioning adsorption systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 141-15, 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, 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.; KOBAYAFHI, 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**. Canada: 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.

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

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.

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>.

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

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, p. 1-14, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s40430-021-03018-0>.

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>.

Revista Principia / Early View