

ESTUDO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DA ZONA DE ADSORÇÃO DE UMA PLANTA PILOTO DE CAPTURA DE CO₂ UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA

George Clarke Bleyer¹

Flavio Michels Bianchi²

Resumo: Com o aumento do aquecimento global novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para a captura dos gases que causam o efeito estufa, em especial o dióxido de carbono (CO₂). Entre essas tecnologias encontra-se o processo que utiliza adsorventes e oscilação de temperatura (*Temperature swing adsorption, TSA*). Um dos fatores que influenciam diretamente na eficiência desse processo é o tempo de residência que os adsorventes ficam na zona de adsorção. Este tempo afeta diretamente o abatimento de CO₂ no processo. O presente trabalho tem como finalidade medir e elevar o tempo de residência da zona de adsorção de uma planta piloto de captura de CO₂ que utiliza o processo de oscilação de temperatura. Para este fim, foram utilizadas três placas perfuradas com diferentes percentuais de abertura, 25 %, 17 % e 14 %, a fim de se aumentar o tempo de residência. Com a redução dos percentuais de abertura das placas perfuradas pôde ser observado um aumento de 30 % no tempo de residência entre as placas. Essa redução do tempo de residência também ocorre pelos diferentes fluxos de sólidos, onde para menores fluxos maior é o tempo de residência.

Palavras-chave: Simulação numérica, captura de CO₂, tempo de residência, adsorção.

1. INTRODUÇÃO

Com a política global de redução das emissões dos gases de efeito estufa que tem como um dos principais agentes o CO₂ e devido à quantidade atualmente emitida, novos processos mais eficientes e baratos para a mitigação das emissões de CO₂ e de gases de exaustão para atmosfera tem sido desenvolvidos. Dentre alguns dos processos para o controle da emissão de CO₂ está o processo ARI[®] de captura de CO₂ por oscilação da temperatura.

No processo de adsorção pós-combustão, uma mistura gasosa entra em contato com pequenas partículas porosas denominadas zeólitas, que podem adsorver seletivamente o CO₂ para sua remoção efetiva da mistura gasosa. O carregamento de equilíbrio da zeólita define a capacidade máxima de adsorção da zeólita e a

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: jocableyer@hotmail.com

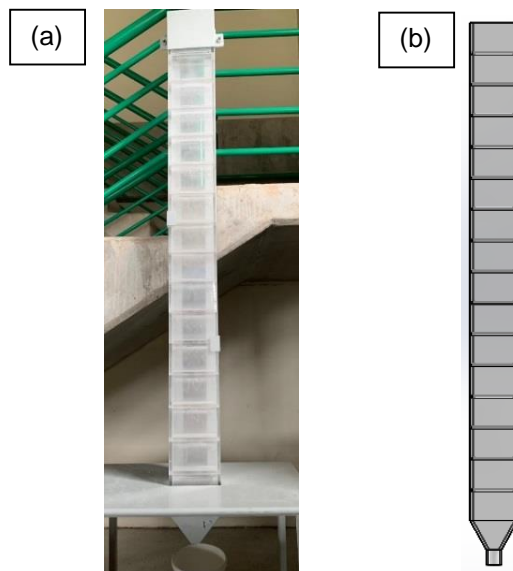
² Prof. Me. Flavio Michels Bianchi. E-mail: flavio.bianchi@satc.edu.br

quantidade necessária de zeólitas para uma determinada remoção, no entanto, faz-se necessário um tempo de contato adequado para garantir um carregamento total ou parcial.

Para se ter uma boa eficiência no processo de captura de CO₂ o tempo de residência é um dos fatores que irá influenciar diretamente neste parâmetro. O tempo estimado das zeólitas na zona de adsorção de um reator de adsorção por oscilação de temperatura é da ordem de segundos, enquanto o tempo de residência necessário para o carregamento de equilíbrio das zeólitas a temperatura ambiente é estimada na ordem de dezenas de segundos. Com isto, é necessário fazer um estudo do tempo de residência médio do contato entre o gás a ser purificado e o sólido adsorvente a fim de maximizar o tempo e estimar o abatimento de CO₂.

O presente trabalho visa estudar a influência do percentual de abertura das placas perfuradas no tempo de residência da zona de adsorção da planta piloto de captura de CO₂.

Figura 1 – Bancada de testes, modelo real (a) e modelo utilizado na simulação (b)



Fonte: do Autor (2019)

Para o mesmo foram realizados ensaios de tempo de residência em três conjuntos de placas perfuradas diferentes, sendo elas com percentual de abertura de 25 %, 17 % e 14 % em uma bancada de adsorção, como mostrado na Fig. 1.

Para os testes de fluidodinâmica computacional foi utilizado o software MFIX (Multiphase Flow with Interphase eXchanges) e para fazer a validação dos resultados obtidos nas simulações foram utilizados os dados obtidos experimentalmente na bancada de adsorção. O trabalho é de suma importância para o processo de captura de CO₂ pois ele mostra o quão eficiente o processo é, e apresenta possíveis melhorias no projeto do equipamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada a revisão dos assuntos necessários para o embasamento do tema, e o embasamento teórico para as análises e discussões dos resultados obtidos neste estudo.

2.1 PROCESSO DE CAPTURA DE CO₂

De acordo com Lima (2012), questões associadas à problemática ambiental ocasionadas pelos elevados índices de emissão de gases de efeito estufa (GEE) passaram a ter maior visibilidade nos últimos anos. E, dentre esses gases, o dióxido de carbono (CO₂) destaca-se tanto por sua abundante emissão quanto pelo seu elevado fator de forçamento radioativo (FR), pois possui uma elevada capacidade de absorver e reemitir a radiação de onda longa e infravermelha emitidas pela superfície da terra.

A emissão de CO₂ está associada, principalmente, à queima de combustíveis fósseis, cujo consumo se inclina mundialmente para o crescimento, visto que a geração de energia atual ainda é muito dependente destes combustíveis. Segundo Kim *et al.* (2016), os combustíveis fósseis atendem significativa porção de energia necessária do mundo, e sua utilização é a maior fonte antropogênica de emissão de CO₂. Sendo assim, a captura pós-combustão de CO₂ de plantas de energia torna-se uma forma efetiva para a mitigação destas emissões (WILCOX, 2012; CHEN, 2011).

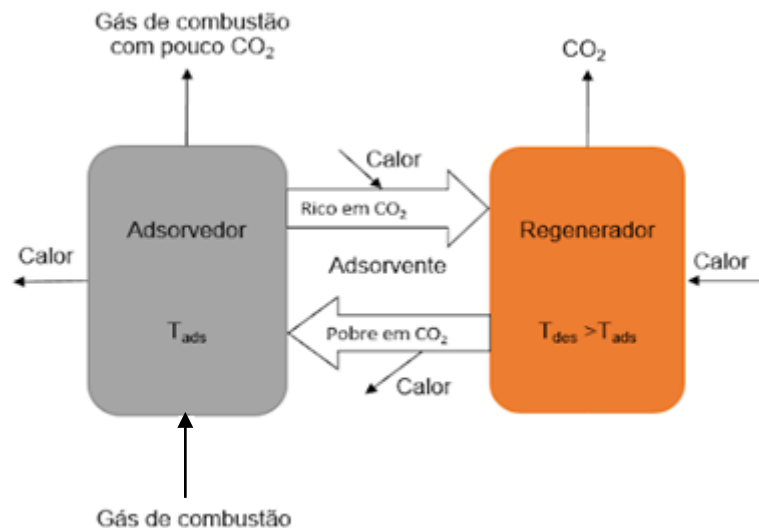
Atualmente os processos industriais de captura de CO₂ mais desenvolvidos ocorrem por meio de absorção, e dentre os solventes utilizados nesse processo, as aminas têm destaque por apresentarem facilidade de reagir com o CO₂ em ligações

rápidas e com equilíbrio no reator de absorção, mesmo atuando sobre baixas pressões parciais. Entretanto, apesar da eficiente remoção de CO₂, melhorias nesta técnica ainda podem ser alcançadas, principalmente em relação aos custos de regeneração (WILCOX, 2012; LIMA, 2012). Além disso, de acordo com Kim *et al.* (2016) sua degradação térmica e oxidativa, perdas durante o processo e problemas de corrosão elevam o custo de capital e operação.

Com isso, vários processos alternativos de captura vêm sendo estudados, e a adsorção é indicada como a tecnologia funcional com vantagens econômicas mais elevadas, devido à menor quantidade de energia requerida por tonelada de CO₂ capturado, alta capacidade de adsorção, alta seletividade de CO₂ dentro de misturas gasosas contendo N₂, O₂, CH₄, H₂; boas propriedades mecânicas, facilidade de regeneração por dessorção e capacidade de atuar em ciclos de adsorção/dessorção (HEFTI *et al.*, 2015; DANTAS, 2009; WILCOX, 2012).

Segundo Pirklbauer *et al.* (2017), o princípio de remoção de CO₂ da fase gasosa utilizando adsorventes e oscilação de temperatura (*Temperature swing adsorption, TSA*) é o de utilizar adsorventes seletivos ao CO₂ e que sejam capazes de liberá-los posteriormente. A liberação posterior pode ocorrer por dois principais métodos: por oscilação de pressão ou por oscilação de temperatura. Ambos se baseiam na diferença de concentração de equilíbrio a diferentes pressões ou temperaturas.

Figura 2 - Fluxograma do processo de adsorção com oscilação de Temperatura



Fonte: Adaptado de Pirklbauer *et al.* (2017)

O processo consiste em dois reatores separados, adsorvedor e regenerador, entre os quais circula o material adsorvente de CO₂. No primeiro o CO₂ é abatido da corrente de gases proveniente da combustão e no segundo o CO₂ é liberado (dessorvido) para a fase gasosa (PIRKLBAUER *et al.*, 2017). A Fig. 2 mostra o esquema básico de um processo de adsorção com oscilação de temperatura continuamente operado para a captura de CO₂ de gases de combustão. No adsorvedor, o material adsorvente regenerado adsorve o CO₂ que está presente na corrente de gases de combustão. Tipicamente, a eficiência de separação de CO₂ é de cerca de 90 %, a fim de reduzir significativamente a quantidade de CO₂ dos gases. Uma vez que a adsorção é geralmente um processo exotérmico, o calor é liberado no adsorvedor e, portanto, é necessário o arrefecimento ativo do material adsorvente para manter a temperatura operacional desejada no adsorvedor (PIRKLBAUER *et al.*, 2017).

2.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE CAPTURA DE CO₂

De acordo com Bequette (2003) um modelo de processo é definido por um conjunto de equações (incluindo os dados de entrada para resolver essas equações) que permitem prever o comportamento de processos. Esses modelos possuem grande importância no projeto de sistemas de controle de processos, pois possibilitam a simulação do comportamento esperado de um sistema, e assim controlá-lo.

Um processo de simulação é construído a partir de um conjunto de operações unitárias conectadas por correntes de massa e energia. Os primeiros estágios de um projeto servem para dar uma ideia das composições das correntes e entalpias do processo, e se forem vantajosos, uma análise mais detalhada pode ser feita (TOWLER, 2012).

2.2.1 Modelos Lagrangeanos (discreto)

Os modelos de elementos discretos ou DPM (*Discrete Particle Method*), foram usados para uma ampla gama de aplicações envolvendo partículas, desde que foi proposto pela primeira vez por Cundall e Strack (1979). O mecanismo de colisões

de partícula a partícula pode ser descrito por modelos de esfera flexível (*soft-sphere*) ou de esfera rígida (*hard-sphere*) (DEEN *et al.*, 2007; TSUJI, 2007; ZHU *et al.*, 2007).

Nos modelos de esfera rígida, as interações partículas-partículas são tratadas como binárias, instantâneas e inelásticas colisões com fricções. Nas simulações de método de partículas discretas (DPM) as colisões são processadas uma a uma de acordo com a ordem em que os eventos ocorrem. Campbell e Brennen (1985) relataram a primeira simulação de partículas discretas de esfera rígida utilizada para estudar sistemas granulares. Desde então, os modelos de esfera rígida foram aplicados para estudar uma ampla gama de sistemas granulares complexos.

Já para os modelos de esfera flexível em situações mais complexas, as partículas podem interagir através de forças de curto ou longo alcance, e as trajetórias são determinadas integrando as equações newtonianas do movimento. O método de esfera flexível originalmente desenvolvido por Cundall e Strack (1979) foi a primeira técnica de simulação de dinâmica granular publicado na literatura aberta.

2.2.1.1 Equações governantes

O movimento de cada elemento individual i , com massa m_i e volume V_i no sistema é calculado a partir da Segunda lei de Newton, mostrada na Eq. 1.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = -V_i \nabla p + \frac{V_i \beta}{\varepsilon_s} (u_g - v_i) + m_i g + F_{contact} + F_{pp} \quad (1)$$

As forças do lado direito da Eq. 1 são, respectivamente, devido ao gradiente de pressão, ao arrasto, à gravidade, às forças de contato e à interação partícula-partícula, por exemplo forças de Van der Waals.

O momento angular da partícula é calculado com a Eq. 2.

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = T_i \quad (2)$$

Onde T_i é o torque e I_i é o momento de inércia, que para partículas esféricas é calculado de acordo com a Eq. 3.

$$I_i = \frac{2}{5} m_i R_i^2 \quad (3)$$

O coeficiente de transferência de quantidade de movimento entre fases é frequentemente modelado pela combinação da equação de Ergun para regimes densos ($\varepsilon_g < 0,8$), conforme a Eq. 4.

$$F_{Ergun} = \frac{\beta d_i^2}{m_i u_g} = 150 \frac{\varepsilon_s^2}{\varepsilon_g} + 1,75 \varepsilon_s Re \quad (4)$$

E a correlação proposta por Wen e Yu (1966), para regimes mais diluídos ($\varepsilon_g > 0,8$) é descrita de acordo com as Eqs. 5 e 6.

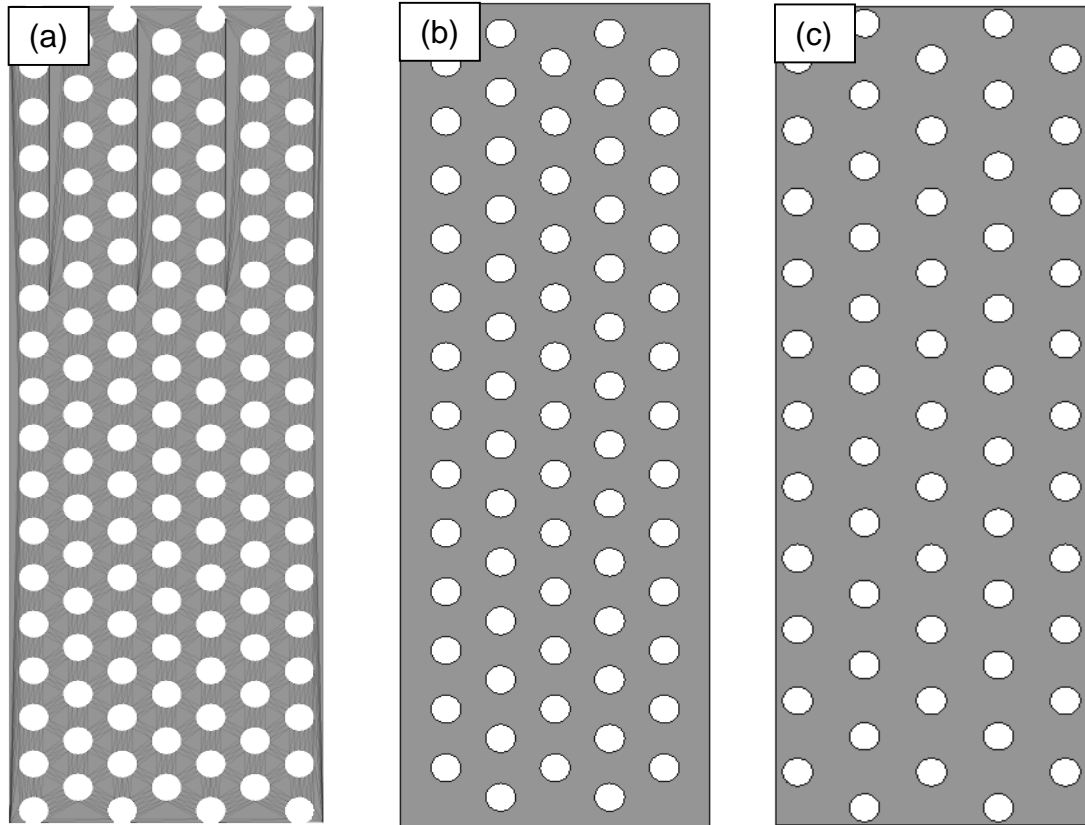
$$F_{Wen e Yu} = \frac{\beta d_p^2}{u} = \frac{3}{4} + C_d Re \varepsilon_s \varepsilon_g^{-2,65} \quad (5)$$

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0,15Re^{0,687})/Re & Re < 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de estudar a influência do percentual de abertura das placas perfuradas no tempo de residência da zona de adsorção da planta piloto de captura de CO₂, foram feitos testes de tempo de residência na bancada de adsorção. A bancada de adsorção representa 1 % da área da planta piloto de captura de CO₂. Essa área é calculada através da placa perfurada que se tem atualmente na planta piloto. Tendo em vista essa área foram projetadas as placas perfuradas com dimensões de 140x10⁻³ m de comprimento por 49x10⁻³ m largura, e espessura de 2x10⁻³ m, mostrado na Fig. 3.

Figura 3 – Placas perfuradas com diferentes percentuais de abertura - (a) 25 % de abertura; (b) 17 % de abertura; (c) 14 % de abertura.



Fonte: do Autor (2019)

Os furos das placas perfuradas têm o mesmo diâmetro de $4,76 \times 10^{-3}$ m, como especificado no catálogo comercial, ou seja, para variar o percentual de abertura das placas é variado a distância entre os centros dos furos, como mostra a Tab. 1.

Tabela 1 – Propriedades das placas perfuradas.

Placas	Distância entre centros [mm]	Total de furos	Área Furada [mm ²]	Percentual de Abertura [%]
1	8	99	2188,81	25
2	10	67	1192,28	17
3	12,2	57	1014,33	14

Fonte: do Autor (2019)

Para a abordagem CFD (*Computational fluid Dynamics*, fluidodinâmica computacional), foi utilizado o software MFiX, onde ele faz o balanço de massa, balanço de energia e quantidade de movimento para cada partícula. O método DEM

(*Discrete Element Method*), modela as partículas da fase sólida individualmente, traçando o movimento e as propriedades (e.g. velocidade, temperatura, concentração), ou seja, esse modelo pode quantificar a quantidade de partículas no sistema, tempo de residência de cada partícula, velocidade e temperatura.

Para cada placa perfurada foram realizadas dez simulações, variando a vazão mássica de entrada dos sólidos, como mostrado na Tab. 2.

Tabela 2 – Vazões mássicas utilizados nas simulações e respectivos fluxos mássicos.

Simulação	Vazão [kg/s]	Fluxo Mássico [kg/m²min]
0	0,0050	43,73
1	0,0079	69,10
2	0,0110	96,21
3	0,0140	122,45
4	0,0170	148,69
5	0,0190	166,18
6	0,0220	192,42
7	0,0250	218,66
8	0,0280	244,90
9	0,0310	271,14

Fonte: do Autor (2019)

O limite inferior de fluxo mássico de sólidos é igual ao valor definido no projeto da planta piloto, ou seja, 44 kg/m²min. Na planta piloto o controle do fluxo mássico de sólidos é feito por uma válvula dosadora, controlada pela movimentação de um eixo sem fim onde a cada grau se tem uma diferente abertura. O limite superior de fluxo de sólidos foi definido a partir da calibração da válvula da planta piloto, utilizando o alimentador aberto 100%, permitindo o fluxo de 244,89 kg/m²min de sólidos.

Para o material adsorvente foi utilizado zeólitas 13X com $2,1 \times 10^{-3}$ m de diâmetro e com uma densidade de 1360 kg/m³. Segundo Sandlin e Abdel-khalik (2018) os valores do coeficiente de restituição partícula-partícula e partícula-parede são respectivamente de 0,65 e 0,7.

Para o cálculo do tempo de residência, calcula-se o número de partículas que entram no sistema por segundo, utilizando a Eq. 7.

$$\text{partículas/s} = \frac{\dot{m}_s}{m_i} \quad (7)$$

onde \dot{m}_s é a vazão mássica dos sólidos, e m_i é a massa de cada partícula de zeólita calculado a partir do diâmetro da zeólita e da densidade da zeólita, considerando ela uma esfera perfeita.

Sabendo-se o número de partículas que entram no sistema por segundo, e a quantidade média de partículas que se tem no sistema, após entrar em regime permanente, pode ser calculado o tempo de residência com a Eq. 8.

$$\text{tempo de residência} = \frac{\text{partículas no sistema}}{\text{partículas/s}} \quad (8)$$

Utilizando o software PARAVIEW® para pós processamento dos dados, foi plotado o número de partículas que estão dentro do sistema ao longo do tempo, imagens do comportamento da zeólita dentro do sistema e colorido cada partícula individualmente com o seu respectivo tempo de residência.

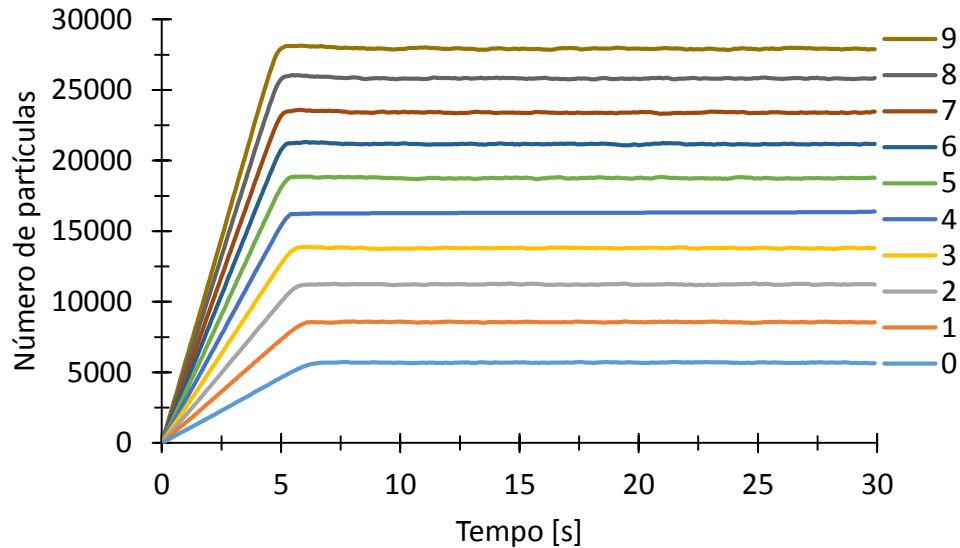
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O seguinte capítulo tem como objetivo discutir os resultados obtidos nas simulações, e fazer a validação dos mesmos com os testes experimentais em bancada.

4.1 PLACA PERFURADA COM 25 % DE ABERTURA

A Fig. 4 mostra que até o tempo de 7,5 s o número de partículas dentro do sistema está crescendo até que se estabilize, chegando assim em um regime permanente. Quando ocorre essa estabilização pode ser calculado o número médio de partículas no sistema e posteriormente o cálculo do tempo de residência.

Figura 4 - Quantidades de partículas que estão no sistema ao longo do tempo, para uma abertura de 25 %



Fonte: do Autor (2019)

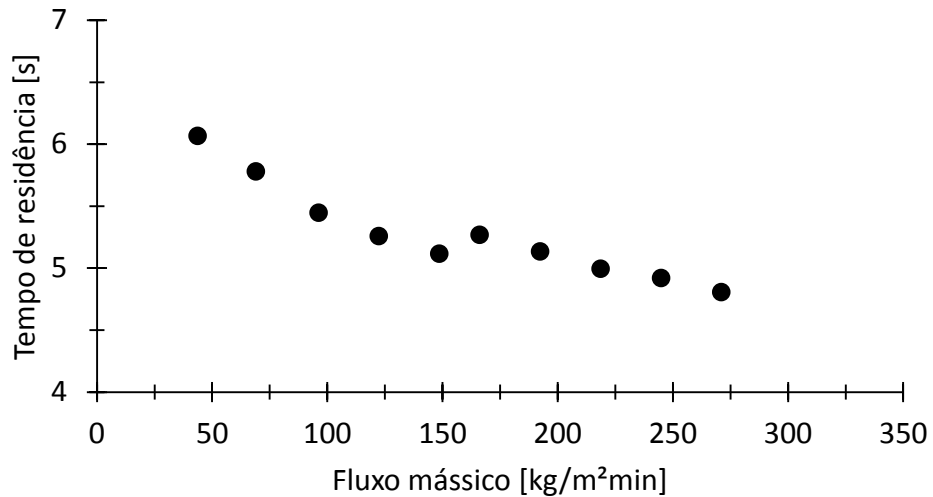
A Tab. 3 mostra o tempo de residência calculado para os diferentes fluxos utilizados. E a Fig. 5 mostra o comportamento do tempo de residência em relação aos diferentes fluxos.

Tabela 3 - Tempo de residência para os diferentes fluxos mássicos utilizadas para a placa perfurada com abertura de 25 %

Fluxo Mássico [kg/m ² min]	Tempo de residência [s]
43,73	6,07
69,10	5,78
96,21	5,45
122,45	5,26
148,69	5,12
166,18	5,27
192,42	5,13
218,66	4,99
244,90	4,92
271,14	4,81

Fonte: do Autor (2019)

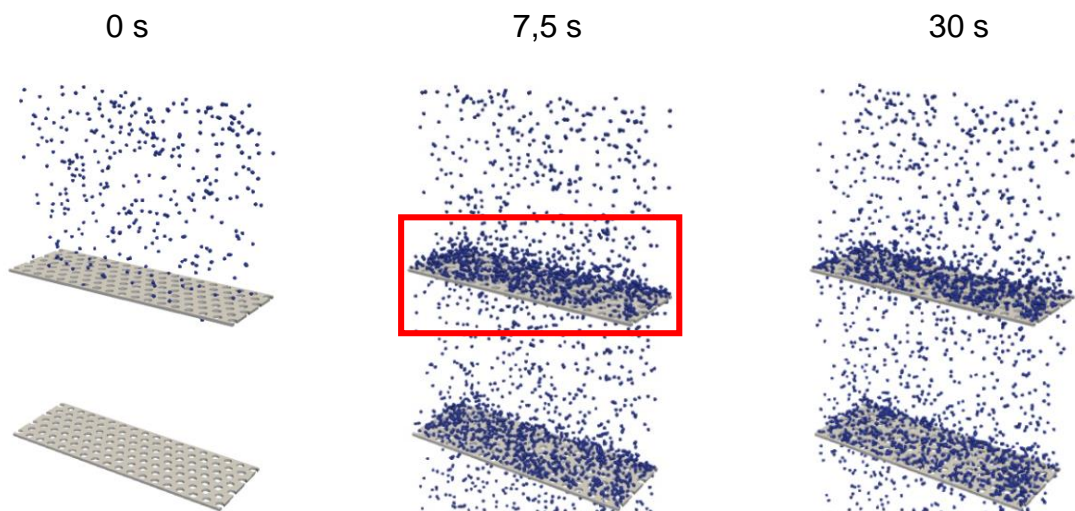
Figura 5 - Comportamento do tempo de residência em relação aos diferentes fluxos da placa perfurada com abertura de 25 %



Fonte: do Autor (2019)

Para menores fluxos mássicos se tem um maior tempo de residência. Essa afirmativa se dá até o ponto onde se chega em um fluxo que para o sistema poderá ser considerado crítico, como 148,69 kg/m²min (simulação 5). Com isso ocorreu um aumento do tempo de residência em relação ao fluxo seguinte, 166,18 kg/m²min (simulação 6), isso pode ter ocorrido pela formação de um pequeno leito em cima da placa perfurada, como pode ser visto na Fig. 6.

Figura 6 – Zona de adsorção da placa com 25 % de abertura para o fluxo de 148,69 kg/m²min

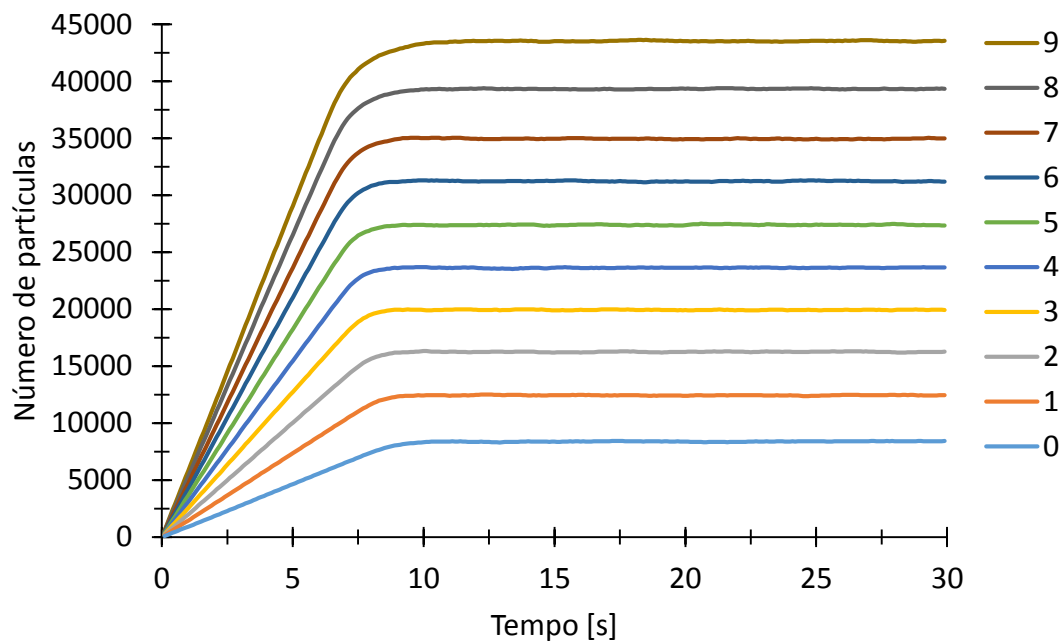


Fonte: do Autor (2019)

4.2 PLACA PERFURADA COM 17 % DE ABERTURA

Como pode ser visto na Fig. 7 para se chegar no regime permanente em todas os fluxos mássicos e necessário um tempo de aproximadamente 10 s. Diferente da placa de 25% onde com menores fluxos maior o tempo para se chegar em um regime permanente, essa placa mostra um tempo relativamente parecido entre os fluxos para se estabelecer um regime permanente. Mostrando assim ser uma placa com uma boa distribuição de sua área furada.

Figura 7 - Quantidades de partículas que estão no sistema ao longo do tempo, para uma abertura de 17 %



Fonte: do Autor ,2019

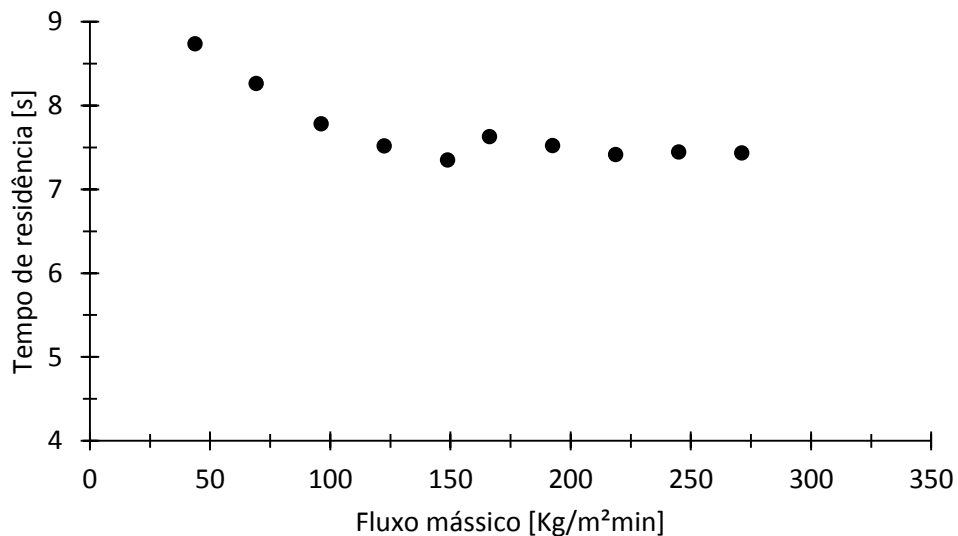
A Tab. 4, mostra o tempo de residência calculado para os diferentes fluxos mássicos utilizados. E a Fig. 8, mostra o comportamento do tempo de residência em relação aos diferentes fluxos. Como já visto para a placa de 25 % para menores fluxos se tem um maior tempo de residência.

Tabela 4 - Tempo de residência para os diferentes fluxos mássicos utilizadas para a placa perfurada com abertura de 17 %

Fluxo Mássico [kg/m ² min]	Tempo de residência [s]
43,73	8,74
69,10	8,26
96,21	7,78
122,45	7,52
148,69	7,35
166,18	7,63
192,42	7,52
218,66	7,41
244,90	7,44
271,14	7,43

Fonte: Autor ,2019

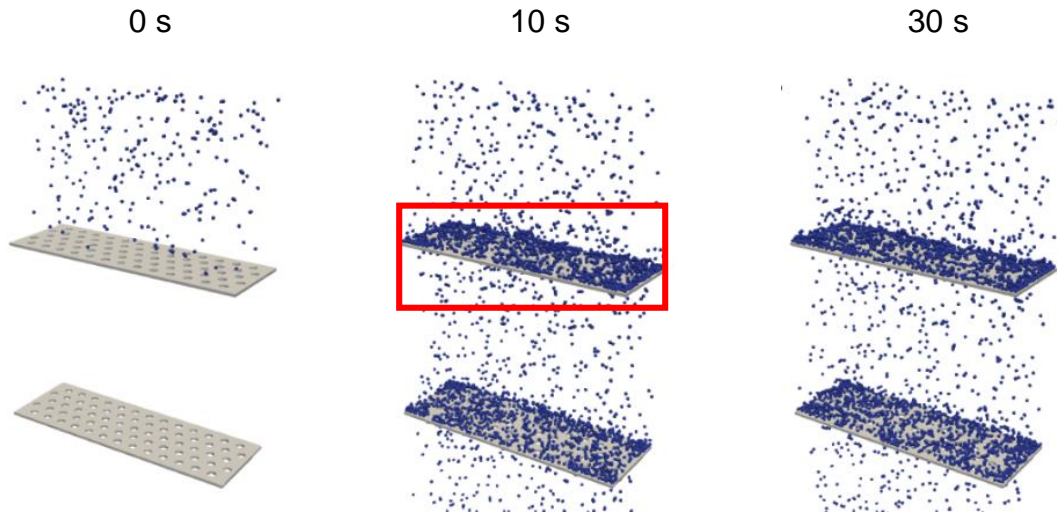
Figura 8 - Comportamento do tempo de residência em relação os diferentes fluxos da placa perfurada com abertura de 17 %



Fonte: do Autor ,2019

Essa afirmativa se dá até o ponto onde se chega em um fluxo que para o sistema poderá ser considerado crítico, como 148,69 kg/m²min (simulação 5), isso ocorrido pela formação de um pequeno leito em cima da placa perfurada, como pode ser visto na Fig. 9.

Figura 9 - Zona de adsorção da placa com 17 % de abertura para a fluxo de 148,6880 kg/m²min

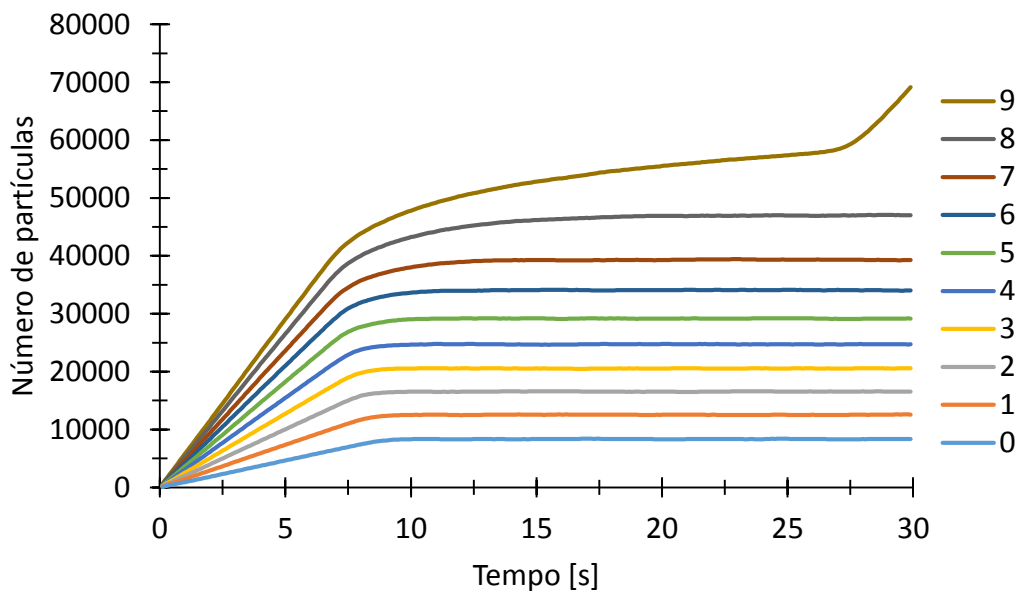


Fonte: do Autor ,2019

4.3 PLACA PERFURADA COM 14 % DE ABERTURA

A Fig. 10 mostra o gráfico do número de partículas que estão no sistema em relação ao tempo.

Figura 10 - Quantidades de partículas que estão no sistema ao longo do tempo, para uma abertura de 14 %



Fonte: do Autor ,2019

Para essa abertura de placa o tempo para estabilizar o número de partículas no sistema variou bastante, comparado com a placa de 25 % de abertura. Para o maior fluxo, 271,14 kg/m²min (simulação 9), o número de partículas não estabilizou. O número de partículas no sistema teve crescimento contínuo até o tempo de simulação de 27 s, onde o número de partículas aumentou drasticamente. Isso ocorreu pelo fato da formação de um leito em cima da placa perfurada grande o suficiente para provocar o entupimento dos furos e conseqüentemente a parada completa do escoamento de partículas.

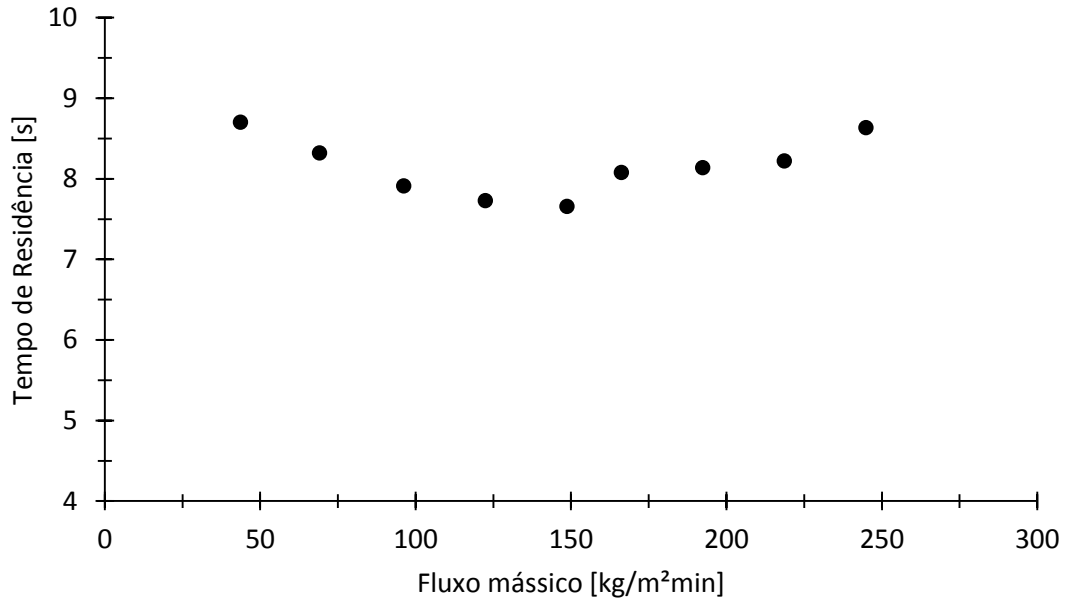
Utilizando o número médio de partículas no sistema pode ser calculado o tempo de residência para esta placa perfurada, como mostrado na Tab. 5, e seu comportamento na Fig. 11.

Tabela 5 - Tempo de residência para os diferentes fluxos mássicos utilizadas para a placa perfurada com abertura de 14 %

Fluxo Mássico [kg/m²min]	Tempo de residência [s]
43,73	8,70
69,10	8,32
96,21	7,91
122,45	7,73
148,69	7,66
166,18	8,08
192,42	8,14
218,66	8,22
244,90	8,63
271,14	-

Fonte: do Autor ,2019

Figura 11 – Comportamento do tempo de residência em relação os diferentes fluxos da placa perfurada com abertura de 14 %



Fonte: do Autor ,2019

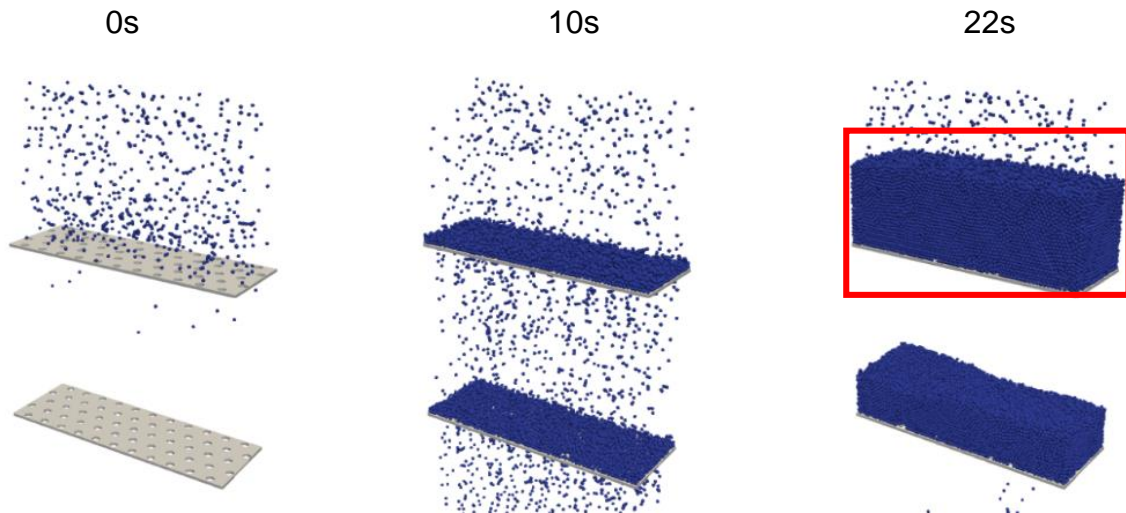
O começo da Fig. 11 mostra o que seria esperado para o tempo de residência, para fluxos menores o tempo de residência foi maior e para fluxos maiores o tempo de residência foi menor. Só que, como para placa de 25 % de abertura, o fluxo de 166,18 kg/m²min foi considerado como um fluxo crítico, no qual ocorreu o aumento do tempo de residência em relação ao fluxo anterior, 148,69 kg/m²min.

A partir desse fluxo ocorreu o contrário do ocorrido na placa de 25 % de abertura, ao invés de o tempo de residência diminuir com o aumento do fluxo, ele aumentou. Isso ocorreu pelo fato de que para este fluxo começou a se formar um pequeno leito em cima da placa, onde os furos das placas perfuradas começaram a entupir. Como os fluxos de sólidos ainda estavam baixas, os furos conseguiam se desentupir com o auxílio das zeólitas que caíam em cima das primeiras que estavam presas nos furos.

Para o fluxo de 271,14 kg/m²min muitos furos começaram a entupir, e com um fluxo muito alto o leito de zeólitas começou a ficar mais alto em relação aos outros leitos, com isso dificultando o desentupimento dos furos, como mostra na Fig. 12. Dessa forma, muitas zeólitas ficaram acumuladas entre as placas perfuradas, causando, assim, um grande aumento no número de partículas total do sistema. Desta

maneira o tempo de residência foi superior comparado ao tempo de residência com menores fluxos. Pode-se dizer que para essa placa perfurada esse é o fluxo limite, ou seja, o maior fluxo que pode ser suportada pelo sistema.

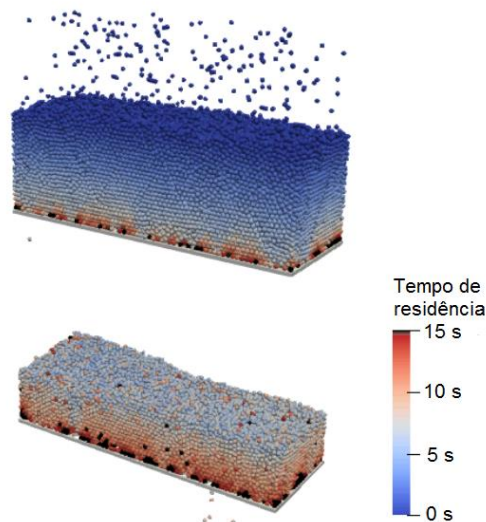
Figura 12 - Zona de adsorção da placa com 14 % de abertura para o fluxo de 271,14 kg/m²min



Fonte: do Autor ,2019

A Fig. 13 mostra como fica o tempo de residência no acúmulo de partículas que aconteceu com o maior fluxo na placa de 14 %. A figura mostra que o tempo de residência vai aumentando ao decorrer do aumento do leito. Por mais que o tempo de residência nesse caso seja considerado alto, não se pode afirmar que a adsorção do CO₂ seja eficaz. Pois com esse entupimento dos furos o próprio CO₂ que estaria em corrente ascendente estará preso nas placas inferiores, sendo assim, carregando as zeólitas que estão abaixo deixando as zeólitas que estão entupidas sem CO₂ para adsorver.

Figura 13 – Zeólitas na placa perfurada de 14 % com um fluxo de 271,14 kg/m²min no tempo de 30 s coloridas pelo tempo de residência

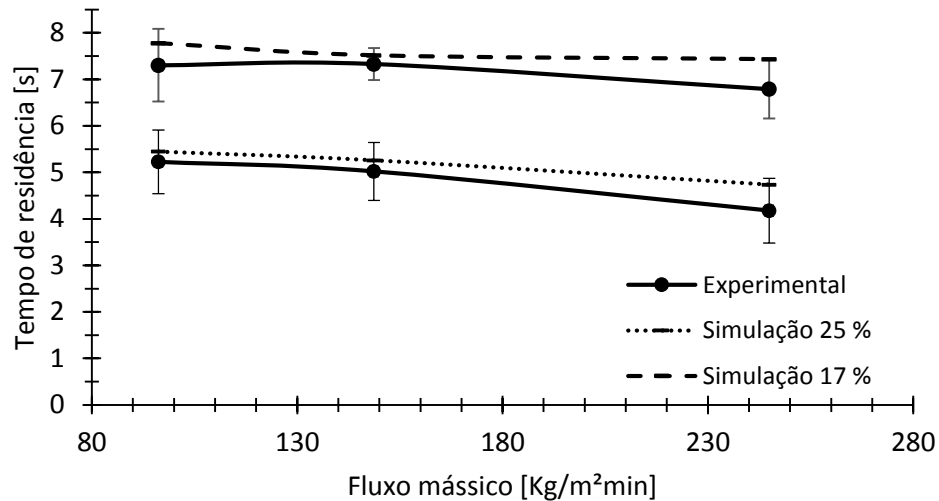


Fonte: do Autor ,2019

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM OS TESTES EXPERIMENTAIS REALIZADOS EM BANCADA EXPERIMENTAL

A fim de realizar a validação dos resultados obtidos nas simulações foram compilados os resultados obtidos na bancada experimental de adsorção e comparados com os resultados obtidos na simulação. Para fazer essa comparação foram rodados cinco testes para cada placa perfurada, a fim de se obter um desvio padrão no tempo de residência para cada placa. A Fig. 14, mostra a comparação do tempo de residência entre o experimental e a simulação, nas placas com 25 % e 17 % de abertura. Onde as barras em vertical representam o desvio padrão dos testes experimentais. Como visto para ambas as placas o tempo de residência encontrado nas simulações estão dentro do desvio padrão dos resultados experimentais, podendo assim afirmar que o modelo feito na simulação para a zona de adsorção representa o modelo da bancada experimental de adsorção.

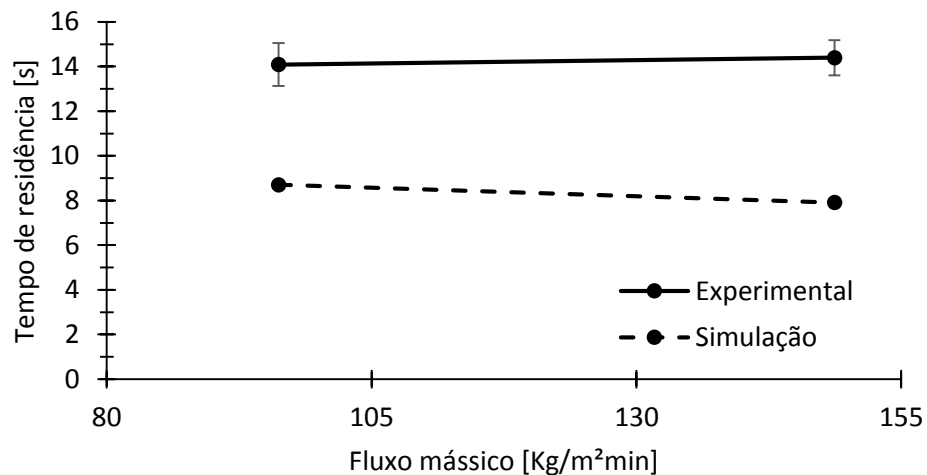
Figura 14 - Comparação do tempo de residência entre o experimental e a simulação, nas placas com 25 % e 17 % de abertura



Fonte: do Autor ,2019

Já para a placa perfurada com 14 % de abertura os resultados obtidos não foram satisfatórios, como visto na Fig. 15. Isso ocorreu pelo fato de que nos testes experimentais os furos que ficam nos extremos da placa ficaram bloqueados pelo suporte que sustenta a mesma, fazendo com que a área da placa perfurada diminuísse. Ao invés de se ter 57 furos e 14% de área de abertura, se tem efetivamente 35 furos e 9% de abertura.

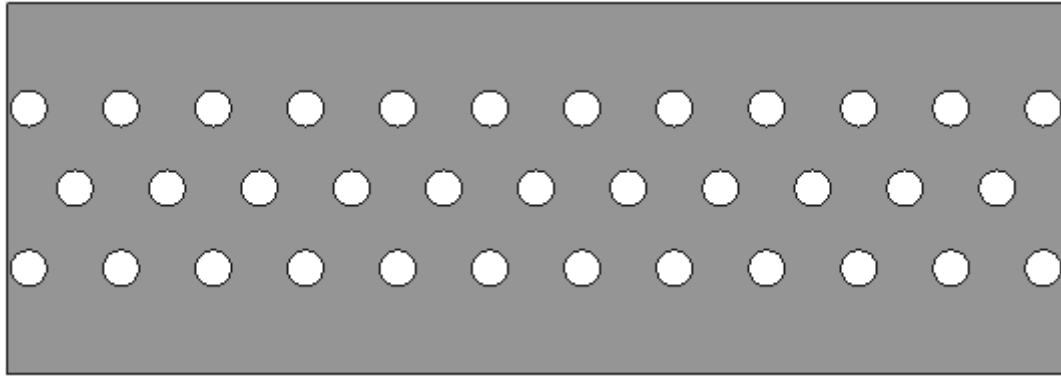
Figura 15 - Comparação do tempo de residência entre o experimental e a simulação, nas placas com 14 % de abertura



Fonte: do Autor ,2019

Sendo assim foi feito uma nova geometria para se obter os 09 % de abertura, mostrada na Fig. 16, e feito novas simulações.

Figura 16 - Placa perfurada com 09 % de abertura

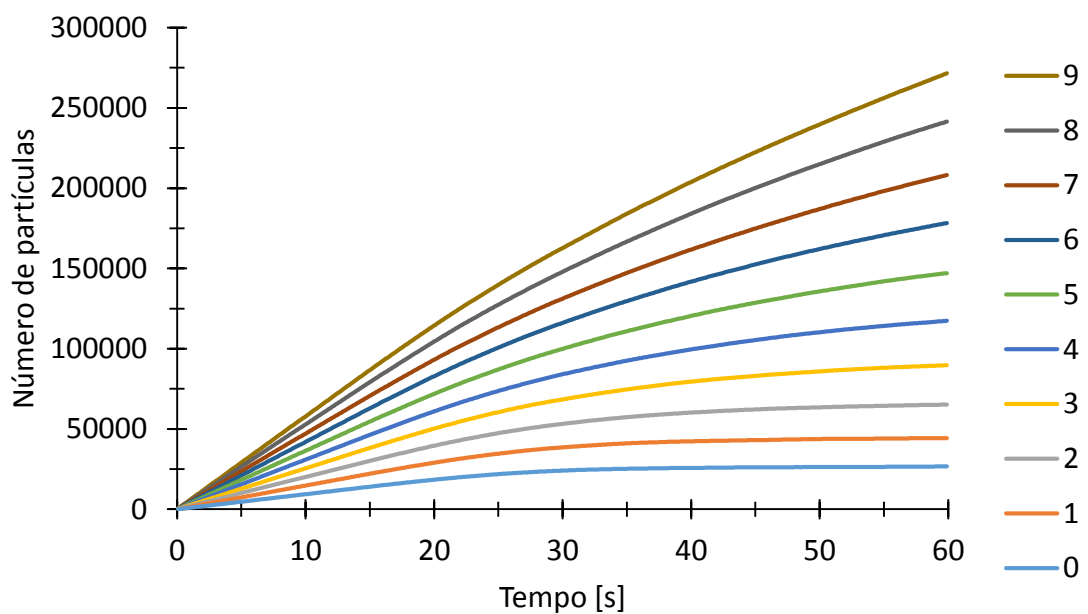


Fonte: do Autor ,2019

4.5 PLACA PERFURADA COM 09 % DE ABERTURA

A Fig. 17 mostra o gráfico do número de partículas que estão no sistema em relação ao tempo.

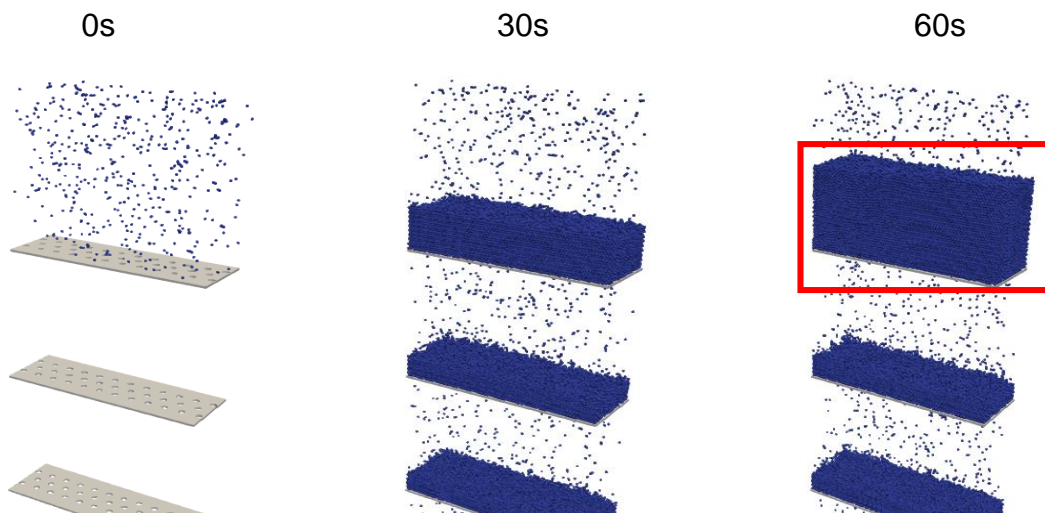
Figura 17 - Quantidades de partículas que estão no sistema ao longo do tempo, para uma abertura de 09 %



Fonte: do Autor ,2019

Para a abertura de 09 % o tempo para estabilizar o número de partículas no sistema foi muito mais alto do que para as outras placas, com isso precisou aumentar o tempo de simulação de 30 s para 60 s. Mesmo com esse aumento do tempo da simulação alguns casos não atingiram um regime permanente. Isso ocorreu por causa do acúmulo de partículas na placa, principalmente nos cantos onde não há furos, como pode ser visto na Fig. 18.

Figura 18 - Zona de adsorção da placa com 09 % de abertura para o fluxo de 166,18 kg/m²min



Fonte: do Autor ,2019

Utilizando o número médio de partículas no sistema pode ser calculado o tempo de residência para esta placa perfurada, como mostrado na Tab. 6, e seu comportamento na Fig. 19. Como nem todos os casos chegaram a um regime permanente, não foi possível retirar o tempo de residência de alguns casos.

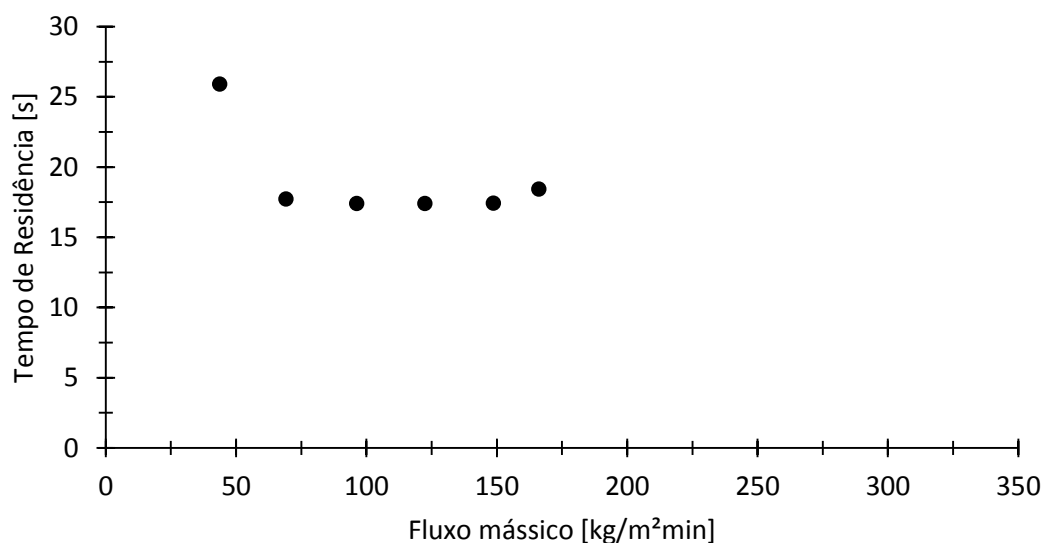
Tabela 6 - Tempo de residência para os diferentes fluxos mássicos utilizados para a placa perfurada com abertura de 09 %

Fluxo Mássico [kg/m ² min]	Tempo de residência [s]
43,73	29,92
69,10	17,73
96,21	17,41
122,45	17,42
148,69	17,45
166,18	18,44
192,42	-
218,66	-
244,90	-
271,14	-

Fonte: do Autor ,2019

O começo da Fig. 19 mostra um tempo de residência muito discrepante dos demais resultados. Isso ocorreu pelo fato de que com menores fluxos existe um maior acúmulo de partículas nos cantos, onde não há furos, fazendo com que o tempo de residência aumente drasticamente.

Figura 19 – Comportamento do tempo de residência em relação aos diferentes fluxos da placa perfurada com abertura de 14 %

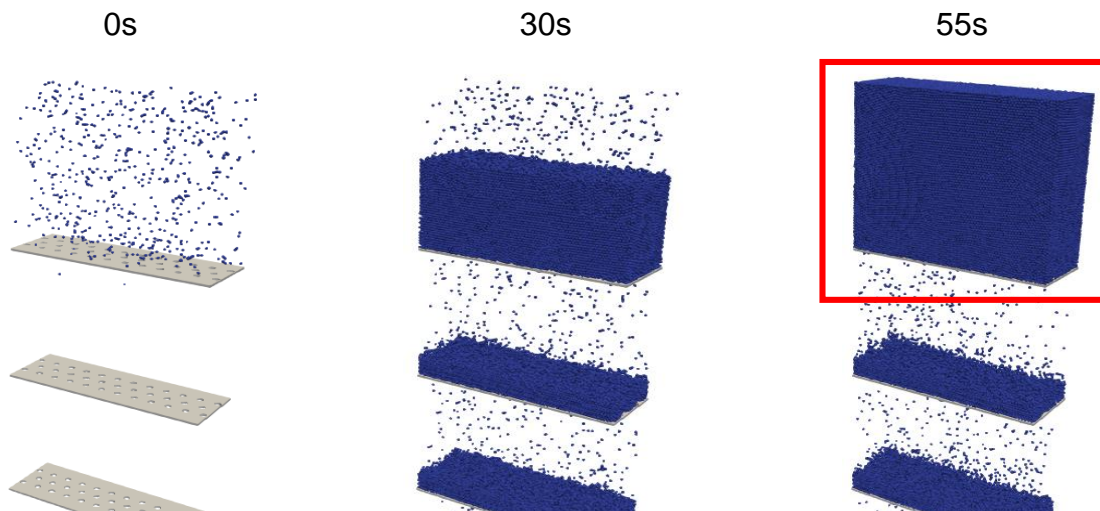


Fonte: do Autor ,2019

Para o fluxo de $166,18 \text{ kg/m}^2\text{min}$ muitos furos começaram a entupir, dessa forma, muitas zeólitas ficaram acumuladas entre as placas perfuradas, causando, assim, um grande aumento no número de partículas total do sistema, dessa maneira o tempo de residência foi superior comparado ao tempo de residência com fluxos menores. Pode-se dizer que para essa placa perfurada essa é o fluxo limite, ou seja, o maior fluxo que o sistema suporta.

Para o fluxo de $192,42 \text{ kg/m}^2\text{min}$ ocorreu um grande acúmulo de partículas em cima da primeira placa, mostrado na Fig. 20. Esse acúmulo fez com que houvesse um entupimento dela, onde com isso o leito chegou até o limite superior da geometria fazendo com que a alimentação de zeólitas fosse cessada. Para os outros fluxos maiores ocorreu o mesmo fenômeno só que em tempos menores.

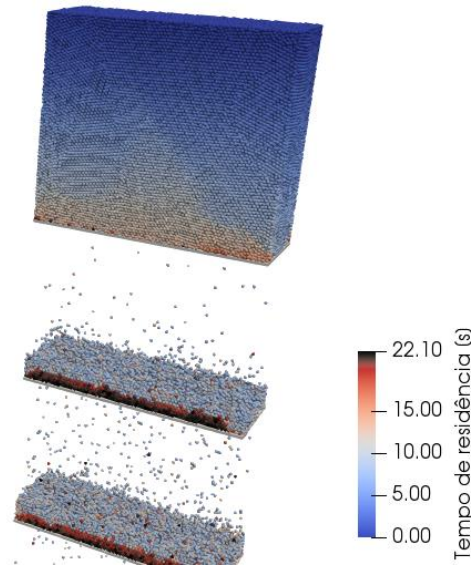
Figura 20 - Zona de adsorção da placa com 09 % de abertura para o fluxo de $192,42 \text{ kg/m}^2\text{min}$



Fonte: do Autor ,2019

A Fig. 21 mostra como fica o tempo de residência quando ocorre o entupimento da placa perfurada de 09 % no maior fluxo. Da mesma maneira que a placa de 14 % esse alto tempo de residência não significa uma boa adsorção do CO_2 .

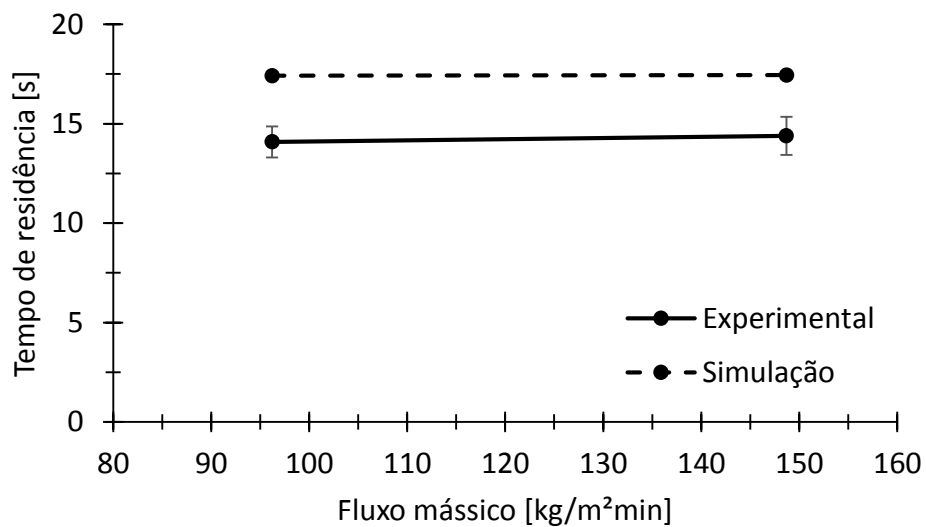
Figura 21 – Zeólitas na placa perfurada de 09 % com um fluxo de 271,14 kg/m²min no tempo de 30 s coloridas pelo tempo de residência



Fonte: do Autor ,2019

Os testes na placa de 09 % ficaram mais adequados do que no da placa de 14 %, podendo assim representar melhor os testes experimentais. Mesmo assim os tempos de residência obtidos na simulação ficaram fora do desvio padrão do experimental, como visto na Fig. 22.

Figura 22 - Comparação do tempo de residência entre o experimental e a simulação, na placa com 09 % de abertura



Fonte: do Autor ,2019

Essa diferença no tempo de residência ocorreu pelo fato de que na simulação os furos entupiram muito mais rápido que no experimental, causando assim um aumento no tempo de residência. Outro fator que também influenciou foi a distribuição de entrada de sólidos. Na simulação ela é uniforme, ou seja, toda a placa perfurada é preenchida, diferente da alimentação da bancada que é feita por um tubo central e a distribuição fica em forma de cone. Com isso as zeólitas na simulação tendem a se acumular mais nos cantos, causando assim um aumento no tempo de residência comparado com o experimental.

5. CONCLUSÃO

- Para ambas as placas perfuradas de 25 % e 17 % menores fluxos mássicos se tem um maior tempo de residência;
- Para a placa com abertura de 25 % o tempo médio para atingir um regime permanente foi de 7,5 s;
- Para a placa com abertura de 17 % o tempo médio para atingir um regime permanente foi de 10 s;
- Para ambas as placas com 25 % e 17 % de abertura, no fluxo de 166,18 kg/m²min começou a formar um pequeno leito em cima da placa, por isso o aumento do tempo de residência em relação ao fluxo anterior, 148,69 kg/m²min;
- Para a placa com abertura de 14 % o tempo médio para atingir um regime permanente, para fluxo até 244,90 kg/m²min, foi de 15 s;
- O fluxo de 271,1370 kg/m²min para a placa com 14 % de abertura é o fluxo limite;
- A placa de 09 % é um ajuste da placa de 14 % levando em conta a bancada experimental de adsorção;
- Precisou de um tempo maior de simulação para se obter um regime permanente na placa de 09 %;
- O fluxo de 166,18 kg/m²min é o fluxo limite para a placa de 09% de abertura.

Agradecimentos

Ao Prof. Me. Flavio Michels Bianchi, pela orientação e apoio para a realização do presente trabalho. Ao Me. Daniel Augusto Kesting, pela ajuda na realização das simulações e por prévias orientações. A minha mãe Nara de Fatima Bleyer e a meus amigos, por todo o incentivo e de que alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

fti

BEQUETTE, B. Wayne. **Process Control: Modeling, Design and Simulation**. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2003. 769 p.

CAMPBELL, C. S.; BRENNEN, C. E.. Computer simulations of granular shear flows. **Journal Of Fluid Mechanics**. p. 167-188. 1985.

CHEN, X. **Carbon Dioxide Thermodynamics, Kinetics and Mass Transfer**. Austin: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Géotechnique**, v. 29, n. 1, p.47-65, mar. 1979.

DANTAS, Tirzhá Lins Porto. **Separação de dióxido de carbono por adsorção a partir de misturas sintéticas do tipo gás de exaustão**. 2009. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - UFSC, UFSC, Florianópolis, 2009.

DEEN, N. G. et al. Review of discrete particle modeling of fluidized beds. **Chemical Engineering Science**. p. 28-44. 2007.

HEFTI, Max *et al.* Adsorption equilibrium of binary mixtures of carbon dioxide and nitrogen on zeolites ZSM-5 and 13X. **Elsevier**, Zurique, n. 2015, p.215-228, jun. 2015.

KIM, Hosoo; MILLER, David C.; BHATTACHARYYA, Debangsu; ZITNEY, Stephen E. Mathematical Modeling of a Moving Bed Reactor for Post-Combustion CO₂ Capture. **AIChE Journal**, Process Systems Engineering, n.2016, p. 3899-3913, 2016.

LIMA, Adriano Erique de Oliveira. **Estudo da Captura de CO₂ Utilizando Adsorventes Modificados Via Simulação Molecular**. 2012. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

PIRKLBAUER, J. et al. Optimization of Stage Numbers in a Multistage Fluidized Bed Temperature Swing Adsorption System for CO₂ Capture. **Energy Procedia**, v. 114, p.2173-2181, 2017

SANDLIN, Matthew; ABDEL-KHALIK, S.i.. An experimental and numerical study of granular flows through a perforated square lattice for central solar receiver applications. **Solar Energy**, [s.l.], v. 174, p.463-473, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.029>.

TOWLER, Gavin; SINOOT, Ray. **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**. 3. ed. São Paulo: Bluncher, 2000. 563 p.

TSUJI, Y. Multi-scale modeling of dense phase gas–particle flow. **Chemical Engineering Science**. p. 3410-3418. 2007.

WILCOX, Jennifer. **Carbon Capture**. New York: Springer Science, 2012. 323 p.

WEN, C. Y.; YU, Y. H.. A Generalized Method For Predict Minimum Fluidization Velocity. **A.I.ch.e Journal**. p. 610-612. 1966.

ZHU, H. P. et al. **Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments**. *Chemical Engineering Science*. p. 3378-3396. 2007.

LISTA DE SÍMBOLOS

d_i	[m]	Diâmetro da partícula i
$F_{contact}$	[N]	Forças de contato
F_{pp}	[N]	Força partícula-partícula
g	[m/s ²]	Aceleração da gravidade
I_i	[kg.m ²]	Momento de inércia da partícula i
m_i	[kg]	Massa da partícula i
∇p	[Pa]	Gradiente de pressão
Re	[---]	Reynolds
R_i	[m]	Raio da partícula i
t	[s]	Tempo
T_i	[N.m]	Torque na partícula i
u_g	[m/s]	Velocidade do gás
V_i	[m ³]	Volume da partícula i
v_i	[m/s]	Velocidade da partícula i

LETRAS GREGAS

β	[---]	Coeficiente de atrito do fluido / Transferência de momento interfase
ε_g	[---]	Fração volumétrica do fluido
ε_s	[---]	Fração volumétrica do sólido
ω_i	[m/s]	Velocidade relativa