

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS CRÍTICOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE UM LEITO CATALÍTICO DO TIPO TRICKLE-BED

Leandro Bezerra Queiroz^{1, 4}, Emerentino Quadro^{1,2}, Lilian Lefol Nani Guarieiro^{1,3}

¹Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec, 41650-010, Salvador, BA, Brasil

²Braskem, Rua Eteno, 1561, Pólo Petroquímico de Camaçari, 42810-000 BA, Brasil

³INCT de Energia e Ambiente, UFBA, 40170-290 Salvador, BA, Brasil,

⁴Bolsista da Especialização em Petróleo e Gás da Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec

E-mails: lilian.guarieiro@fiieb.org.br, emerentino.quadro@braskem.com, leoqueiroz4@hotmail.com

RESUMO

Escoamentos em meios porosos estão presentes em muitos dos problemas com que nos deparamos atualmente. Na modelagem de reatores catalíticos de leito fixo, por exemplo, por onde escoar a mistura reacional em fase líquida, os efeitos de transporte de massa, momento e energia não são adequadamente representados se não forem considerados os efeitos do meio poroso. A faixa de número de Reynolds para a qual se pode aplicar estes modelos é limitada, apesar da existência de correlações para descrever a dinâmica de fluidos em meios porosos (equação de Darcy) e para predição da sua permeabilidade. Além disso, existe a dependência de diversos outros parâmetros (formato da partícula, porosidade, propriedades do fluido etc). Neste contexto, esta investigação teve como objetivo determinar experimentalmente a correlação entre a permeabilidade de um leito catalítico atualmente utilizado num reator trickle-bed para hidrogenação seletiva de Metil Acetileno e Propadieno (MAPD) em uma planta petroquímica e a velocidade superficial do fluido neste meio poroso, além da porosidade deste leito e da sua densidade aparente. O método laboratorial utilizou água desmineralizada percolando por um leito catalítico disposto num tubo de vidro parcialmente imerso em uma cuba com água. A vazão conhecida de água e o gradiente hidráulico (diferença de pressão), associado às características geométricas do leito, permitiram obter as informações necessárias para este estudo. Os resultados sugerem que a permeabilidade não é invariante com o número de Reynolds, evidenciando que o escoamento no meio poroso, na faixa de número de Reynolds investigada, não é darciniano. Para o sistema em análise, foi proposta uma relação quadrática entre a permeabilidade e a velocidade superficial do fluido. Os valores obtidos em laboratório para a porosidade (0,343) e densidade aparente do leito (647,7 kg/m³) estão próximos dos valores esperados pelo fabricante do catalisador.

Palavras-Chaves: Meio poroso; Permeabilidade; Equação de Darcy.

ABSTRACT

Flows in porous media are present in many of the problems we face nowadays. In particular, modeling fixed bed catalytic reactors, mainly when a liquid reactive mixture is fed, it is mandatory to consider the effects of the porous medium in order to account adequately the mass, momentum and energy transport limitation. Despite the existence of correlations to describe the dynamics of fluids in porous media (Darcy's equation) and prediction of its permeability, the Reynolds number range for which you can apply these models is limited, in addition, its application depends on various other parameters (particle shape, porosity, fluid properties etc). In this context, this research aimed to determine experimentally the correlation between the permeability of a catalytic bed currently used in a trickle-bed reactor for selective hydrogenation of Methyl Acetylene and Propadiene (MAPD) and the surface velocity of the fluid in the porous medium, besides the bed porosity and aparente density. The laboratory method used demineralized water flowing by a catalytic bed loaded in a glass tube, partially immersed in a recipient with water. The water flowrate and the hydraulic gradient (pressure drop), associated with the geometric characteristics of the bed, were enough to obtain the necessary information to perform this study. The results suggest that permeability is not invariant with the Reynolds number. It shows the flowing in the porous medium, in the range of Reynolds number investigated, is not darcinian. It was proposed, a quadratic relationship between permeability and surface velocity of the fluid for the system under investigation. The values obtained in the laboratory for porosity (0.343) and aparente density for the bed (647.7 kg/m³) are close to the expected values by the catalyst manufacturer.

Keywords: Media Porous; Permeability; Darcy's equation.

1. INTRODUÇÃO

As bases para o entendimento do escoamento em meios porosos surgiram em 1856, quando o engenheiro francês Henry Darcy (1803-1858), funcionário da companhia de águas e esgotos de Paris, apresentou um trabalho referente ao escoamento de água em leitos fixos e porosos (ele utilizou leitos de areia) [1]. Realizando diversos experimentos com escoamento de água através de leitos de areia de vários diâmetros e comprimentos, ele observou que, para escoamentos laminares, a taxa de fluxo é proporcional à queda de pressão e inversamente proporcional à viscosidade e ao comprimento. Estas relações passaram a se constituir na lei de Darcy, aplicável a uma única fase fluida percolando um meio poroso em escoamento lento (laminar). Esta lei pode ser escrita na forma da Equação 1 [2].

$$Q = \frac{k A \Delta P}{\mu L} \quad (1)$$

Onde **Q** é a vazão do fluido, **A** é a seção reata do leito por onde escoar o fluido, **μ** é a viscosidade do fluido, **L** é o comprimento do trecho de escoamento em que é medido o diferencial de pressão (**ΔP**). O parâmetro **k** é a permeabilidade, característica mais importante

na descrição do meio poroso através do qual escoar um fluido e indica a facilidade com que este fluido escoar através deste meio. A permeabilidade é função da porosidade (fração de vazios do leito), uma vez que no escoamento em um leito fixo apenas parte da área da seção transversal total está disponível para o fluxo do fluido. Este parâmetro é normalmente determinado experimentalmente, como mostrado por Kaur [3].

Além do efeito das forças inerciais, outros parâmetros também influenciam a permeabilidade, tais como, o aumento da temperatura, a elevação da porosidade por consequente o aumento do tamanho das partículas [4], o tipo de organização estrutural entre as partículas e o grau de saturação do fluido no meio poroso [5].

Eventualmente, na impossibilidade de poder ser determinada experimentalmente, a permeabilidade pode ser estimada pela correlação de Kozeny-Cármán (Equação 2), aplicável para baixos valores de Reynolds [6].

$$k = \frac{\varepsilon^3}{\beta (1-\varepsilon)^2 a_p^2} \quad (2)$$

Sendo ε a fração de vazios do leito catalítico e a_p é a superfície da partícula dividida pelo seu volume, que para uma esfera é dada pela Equação 3, onde D_p é o diâmetro da partícula.

$$a_p = \frac{6}{D_p} \quad (3)$$

A constante de Kozeny (β) é determinada experimentalmente e varia com o formato da partícula e porosidade do leito, estando tabelado na Literatura em função destes parâmetros [7]. Em 1956, Ergun definiu o número de Reynolds para leitos porosos conforme a Equação 4 [8], onde ρ é a massa específica do fluido.

$$Re_p = \frac{D_p q \rho}{(1-\varepsilon)\mu} \quad (4)$$

Combinando as equações 1, 2 e 3 e usando os valores determinados experimentalmente para β , temos a equação de Blake-Kozeny (Equação 5) para fluxo laminar, com porosidade menor que 0,5 e número de Reynolds menor que 10 [8,9].

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 q \mu (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} \quad (5)$$

Para escoamentos turbulentos, esta equação apresenta significativos desvios dos valores medidos experimentalmente [9]. Muitos anos após o experimento histórico de Darcy, outros pesquisadores descobriram um desvio na proporcionalidade citada acima, na medida em que a velocidade de escoamento aumentava [10]. Com o advento do experimento realizado pelo físico Osborne Reynolds e seus estudos sobre os efeitos não lineares em fluidos, tornou-se claro então, que o parâmetro relevante no experimento de Darcy não era a velocidade de

infiltração, mas sim o número de Reynolds, pois baseado nele era possível observar uma influência dos efeitos inerciais [11].

Em função das incertezas associadas aos modelos de predição da permeabilidade e à influência do número de Reynolds sobre a assertividade destes modelos, em geral é recomendável determinar o valor da permeabilidade experimentalmente.

Neste contexto, a simulação de escoamento por um meio poroso pode ser necessária por diversos motivos. A extração de petróleo frequentemente se depara com este problema quando há necessidade de se retirar petróleo de bacias onde ele está presente juntamente com areia ou pedregulhos. A modelagem de reatores catalíticos, em especial dos leitos que operam em fase líquida ou trickle-bed, necessita considerar os efeitos relacionados com o escoamento no meio poroso, já que a resistência à transferência de massa pode ter impacto na macro cinética do reator. Além disso, a dispersão de determinados poluentes no solo também requer conhecimento do comportamento dos fluidos em meios porosos [1, 12].

Na indústria petroquímica, é possível observar esse fenômeno em reatores trifásicos de leito catalítico fixo, também conhecidos como *Trickle-Bed Reactors* (TBR). Neste equipamento, injeta-se no topo do reator uma fase líquida e uma fase gasosa que escoam por um leito catalítico que é formado por um conjunto de pequenas esferas (*pellets*) dispersas aleatoriamente no interior do TBR [13]. Por isso, um dos principais problemas apresentados pelo TBR está justamente na má distribuição da mistura reacional ao longo do leito catalítico [14].

A necessidade de prever a má distribuição do líquido com precisão é muito importante, pois pequenas variações na uniformidade do escoamento podem provocar uma perda significativa de atividade do TBR [15], este parâmetro está relacionado com a permeabilidade das fases no meio poroso [16] e a dispersão molecular radial e longitudinal [17].

Diante disso, este trabalho teve como objetivo determinar experimentalmente a correlação entre a permeabilidade de um leito catalítico atualmente utilizado num reator trickle-bed para hidrogenação seletiva de Metil Acetileno e Propadieno (MAPD) em uma planta petroquímica e a velocidade superficial do fluido neste meio poroso, além da porosidade deste leito e da sua densidade aparente.

2. METODOLOGIA

Um contaminante do propeno, que é intrínseco ao processo de pirólise, é o Metil Acetileno e o Propadieno (MAPD), que normalmente são eliminados dentro da própria planta de pirólise através de hidrogenação seletiva destes compostos em reatores catalíticos. Na indústria petroquímica há atualmente dois processos de hidrogenação seletiva de MAPD: uma em fase líquida e outra em fase gasosa. O processo em fase líquida (mais recente) é predominante nas plantas construídas a partir da década de 80, onde a tendência é haver teores maiores de

MAPD na corrente de propano e propeno, já que praticam maiores severidades de craqueamento [18, 19].

A hidrogenação seletiva de MAPD em fase líquida é o processo mais moderno. Reatores trickle-bed podem dispersar melhor o calor gerado, permitem a construção de reatores de menor volume, podem ser operados a menores temperaturas e o propeno em fase líquida ajuda a lavar os oligômeros formados no reator. Reatores trickle-bed podem lidar com concentrações mais elevadas de MAPD, associado a um reciclo do produto do reator para diluir o MAPD na entrada [20].

Inicialmente foram feitas medições dos diâmetros de diversas amostras de partículas do catalisador, usando-se um paquímetro. As partículas do catalisador (Figura 1) não são perfeitamente esféricas e sua forma é normalmente chamada de *pearl shape* (forma de pérola). Contudo, neste estudo elas foram consideradas esféricas. O material da partícula é predominantemente alumina. Porém, como não são conhecidos os efeitos de eventuais poros intrapartícula, nem se pode calcular o efeito do metal ativo (mesmo com concentração de 0,3% em massa), a fração de vazios do leito foi medida experimentalmente. Por se tratar de um catalisador comercial, não serão medidas nem divulgadas suas propriedades texturais nem o tipo alumina que constitui o seu suporte, mas sim determinada experimentalmente a efetiva fração de vazios do leito.



Figura 1. Amostras de partículas do catalisador que forma o meio poroso comparativamente a uma escala graduada em centímetros. (Fonte: elaborada pelo próprio autor).

Para a obtenção do valor da permeabilidade do meio poroso, foi medida a vazão do fluido, que no estado estacionário proporcione uma altura estável h_1 de coluna de fluido, que é uma medida do diferencial de pressão no leito para uma dada vazão de fluido percolando por ele. Estes ensaios foram repetidos para diversos valores de h_1 . A viscosidade e massa específica utilizadas nos cálculos foram correspondentes à temperatura do fluido durante a realização do experimento. Este aparato experimental está representado de forma simplificada na Figura 2, onde h_2 é a altura do meio poroso e D é o diâmetro deste leito (que neste experimento foi cilíndrico). De posse destes dados, foi calculada a permeabilidade do fluido no leito, utilizando equação de Darcy. Para cada valor de vazão de água, foram feitos ensaios em duplicata, sendo considerados válidos os resultados que apresentaram diferença entre si menor que 3%.

Um dos cuidados que se deve ter é garantir que a razão entre o diâmetro do leito e o diâmetro das partículas seja grande o suficiente para prevenir a ocorrência de efeito de parede no escoamento do fluido, o que poderia comprometer a medida da permeabilidade por escoamento preferencial na região próxima às paredes. Neste experimento, esta razão foi

maior que 30. Para prevenir a ocorrência deste fenômeno, em geral considera-se adequado que esta razão seja maior ou igual a 20. Com relação ao fluido empregado no experimento, foi utilizada água desmineralizada, cujas propriedades foram obtidas da literatura [21].

Além disso, é necessário fazer o pré-molhamento do leito através da passagem de um fluido pelo meio poroso por tempo suficiente para garantir que todos os poros e espaços vazios estejam saturados com o fluido. Por esta razão, estabelecida uma vazão de fluido, a altura h_1 , para ser considerada uma informação válida para o cálculo da permeabilidade, foi mantida estável pelo período mínimo de 15 minutos.

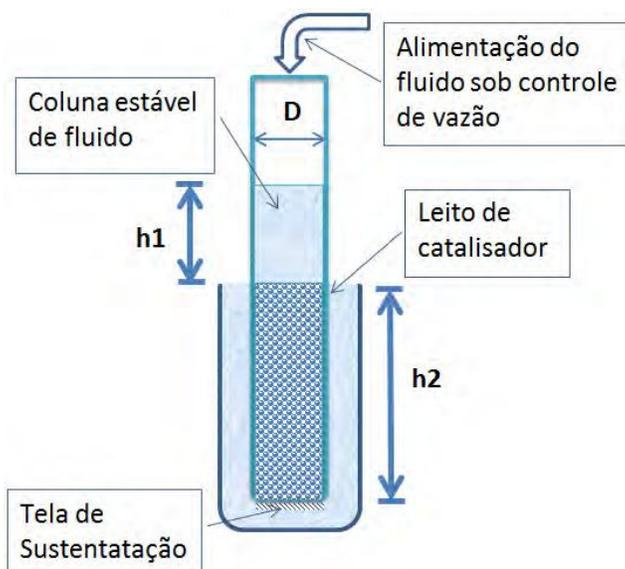


Figura 2. Aparato experimental utilizado para a determinação da permeabilidade do leito poroso. (Fonte: elaborada pelo próprio autor).

A densidade aparente do leito também foi medida em laboratório, em triplicata, através da divisão da massa do leito catalítico (massa de um recipiente contendo um volume conhecido de leito catalítico subtraída da massa do mesmo recipiente sem o leito catalítico) pelo volume do material contido no recipiente.

Uma vez conhecida a densidade do material constituinte da partícula, teoricamente poder-se-ia determinar a fração de vazios do leito catalítico através da divisão da densidade aparente do leito pela densidade do material constituinte das partículas. Porém, dificuldades em se determinar a densidade do material da partícula poderiam levar a erros na determinação da porosidade. Por esta razão, a medida da porosidade do leito foi realizada, em triplicata, através da medição da massa de fluido necessário para saturar completamente um béquer com um volume conhecido de leito catalítico. Conhecendo-se a densidade do fluido na temperatura do experimento, foi possível calcular a fração de vazios deste leito, através da divisão do volume de água necessário para saturar completamente o leito catalítico pelo volume deste leito. Este ensaio foi repetido para três quantidades de material catalítico para garantir que não havia influência de escala.

Utilizando o software Minitab 14, foram tratados os dados obtidos com a medição dos diâmetros de partículas de catalisador de um determinado conjunto, formado por 25 partículas escolhidas aleatoriamente.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os dados obtidos com as medições de diâmetros das amostras de partículas apresentaram uma distribuição normal (p-value: 0,216). O valor médio foi 3,13 mm e o desvio padrão obtido foi 0,44 mm. Nesta amostra, os diâmetros variaram de 2,48 mm a 3,83 mm. Na Figura 3 está representada a distribuição de probabilidades e o intervalo de confiança de 95%. O fato de a distribuição ser normal sugere que os diâmetros das partículas variam aleatoriamente em torno de uma média e que há uma probabilidade de 95% de uma determinada medida de diâmetro de partícula ser maior que o valor da média menos duas vezes o valor do desvio padrão e menor que o valor da média mais duas vezes o valor do desvio padrão.

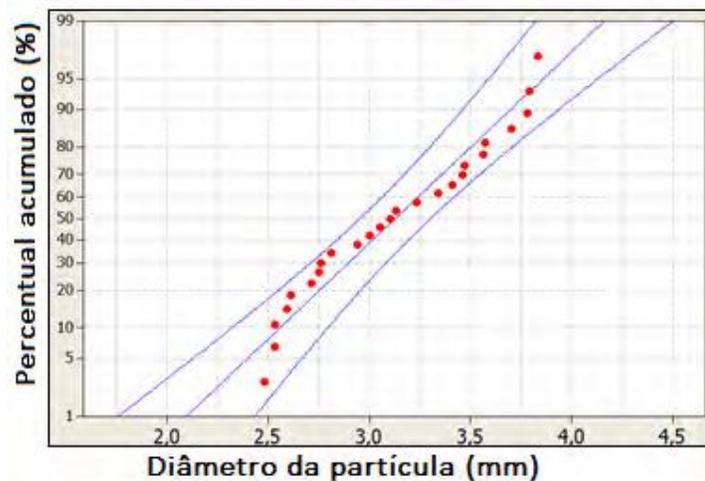


Figura 3. Distribuição de probabilidades do diâmetro das partículas da amostra analisada.

Na Tabela 1 estão registradas as informações referentes às propriedades do fluido empregado no experimento (água desmineralizada) e geometria básica do leito catalítico.

Tabela 1. Valores das variáveis comuns aos ensaios de permeabilidade. (Fonte: Autor).

Variável	Valor
Temperatura da água (°C)	26,0
Massa específica da água (kg/m ³)	999,60
Viscosidade da água (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0,00095
Área da secção reta do leito (m ²)	0,00694
Altura do leito poroso, h ₂ (m)	0,228
Diâmetro do leito poroso, D (m)	0,094

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais de permeabilidade estão apresentados na Tabela 2. A velocidade do fluido presente nesta tabela é a velocidade na seção sem catalisador, ou seja, a vazão volumétrica total de fluido dividida pela área da seção transversal do cilindro onde está contido o leito catalítico, também conhecida como velocidade superficial. Outra abordagem seria usar a velocidade intersticial, ou seja, a velocidade pelos interstícios do meio poroso. A velocidade intersticial é obtida dividindo-se a velocidade superficial pela porosidade do meio.

A relação entre os valores da permeabilidade e a velocidade superficial praticada está representada na Figura 4. Observa-se que para as faixas de velocidades e Reynolds praticadas o valor da permeabilidade não permanece constante, que é uma premissa para a validade da equação de Darcy.

Considerando que a velocidade superficial, nos reatores industriais de hidrogenação em fase líquida que utilizam este leito catalítico, varia tipicamente entre 0,015 e 0,025 m/s, percebemos que a equação de Darcy e as correlações de predição para a permeabilidade nestes leitos catalíticos devem ser analisadas criticamente, preferindo-se a avaliação experimental. Outros autores chegaram a conclusões semelhantes, para diferentes tipos de meios porosos e faixas de velocidade superficial [9], reforçando a necessidade de avaliação empírica da permeabilidade do meio poroso nas condições de processo de interesse, sempre que isto for possível.

Tabela 2. Dados experimentais dos ensaios de permeabilidade.

Variável	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
Altura da coluna d'água (m)	0,027	0,046	0,077	0,115	0,137	0,198
Diferencial de pressão (N/m ²)	264,67	450,93	754,81	1127,31	1342,97	1940,94
Vazão de água (m ³ /s)	3,23E-05	5,43E-05	8,62E-05	1,15E-04	1,28E-04	1,55E-04
Permeabilidade (m ²)	3,80E-09	3,76E-09	3,56E-09	3,19E-09	2,98E-09	2,50E-09
Permeabilidade (Darcy)	3754,2	3712,5	3518,0	3147,9	2940,5	2464,3
Reynolds	18,6	31,4	49,8	66,5	74,0	89,6
Velocidade superficial (m/s)	4,65E-03	7,83E-03	1,24E-02	1,66E-02	1,85E-02	2,24E-02

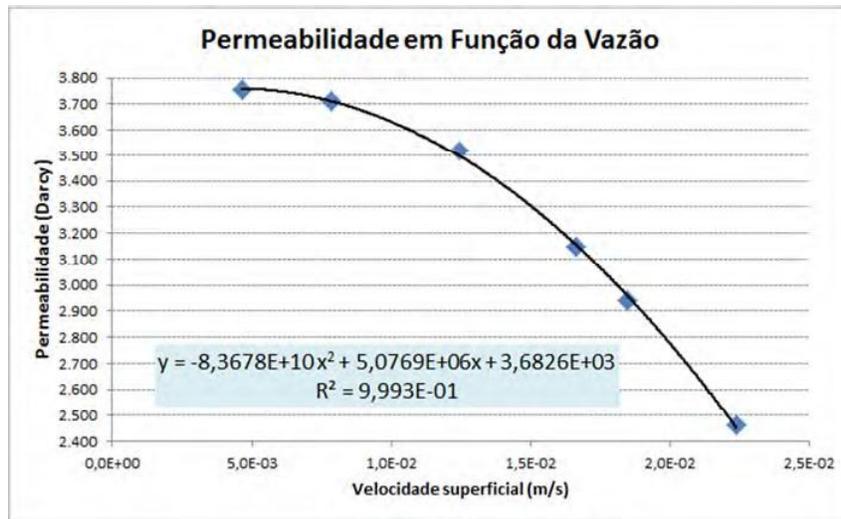


Figura 4. Valores de permeabilidade do leito catalítico obtidos em laboratório em função da velocidade de escoamento.

Baseado nos dados obtidos, este estudo propõe uma relação quadrática entre a permeabilidade e a velocidade superficial do fluido (Equação 6, onde k é a permeabilidade, em Darcy, e v é a velocidade superficial, em m/s), cujo coeficiente de correlação (R^2) foi 0,9993, denotando um bom ajuste do modelo sugerido aos dados experimentais. Deve-se observar que esta correlação é válida para o meio poroso analisado e para a faixa de variação do número de Reynolds praticada nos experimentos.

$$k = -8,3678E+10 v^2 + 5,0769E+6 v + 3682,6 \quad (6)$$

Esta correlação entre a permeabilidade e a velocidade superficial sugerida pelos dados experimentais deverá ser utilizada na simulação do reator industrial de hidrogenação seletiva de MAPD.

Os valores obtidos em laboratório para a porosidade (0,343) e densidade aparente do leito ($647,7 \text{ kg/m}^3$) estão próximos dos valores padrões esperados pelo fabricante do catalisador, considerando leitos onde as partículas são dispostas randomicamente, apresentando uma diferença inferior a 5%.

6. CONCLUSÃO

Esta investigação caracterizou um leito poroso, constituído por partículas de catalisador usado para a hidrogenação seletiva de MAPD em fase líquida, quanto à permeabilidade, porosidade e densidade aparente. Os resultados mostraram que, para a faixa de velocidades superficiais exploradas, a permeabilidade varia com a velocidade superficial, evidenciando que este não é um escoamento darciniano, no qual a permeabilidade não depende da velocidade. Baseado nos dados obtidos, este estudo propõe uma relação quadrática entre a permeabilidade e a velocidade superficial do fluido, cujo coeficiente de correlação (R^2) foi de 0,9993. Os valores

obtidos em laboratório para a porosidade (0,343) e densidade aparente do leito ($647,7 \text{ kg/m}^3$) apresentam uma variação em relação aos valores padrões informados pelo fabricante do catalisador inferior a 5%.

REFERÊNCIAS

¹NETO, Á. B. *Simulação de fluxo e fluidos em meios porosos desordenados. Uma análise de efeito de escala na estimativa da permeabilidade e do coeficiente de arraste*. UFRN, Natal, **2012**.

²CARDENAS, S, M. *Avaliação fluidodinâmica do HDT em regime contracorrente com o uso da fluidodinâmica computacional - CFD*. 2012. UNICAMP, Campinas, **2012**.

³KAUR, N.; SINGH, R.; WANCHOO, R. K. Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids Through Packed Beds: An Experimental Study. *Transport in Porous Media*, **2011**, v. 90, n. 2, p. 655–671.

⁴NIJEMEISLAND, M. *Influences of catalyst particle geometry on fixed bed reactor near-wall heat transfer using CFD*. Worcester Polytechnic Institute, **2003**.

⁵MUNAGAVALASA, Murthy S.; PILLAI, Krishna M. A Deviation from Darcy's Law due to unsaturated Flow in Dual-Scale Porous Media. *Journal of Porous Media*, **2009**, v. 12, p. 327–344.

⁶MARTÍNEZ, M. *et al*. Numerical simulation of the liquid distribution in a trickle-bed reactor. *Chemical Engineering Science*, **2012**, v. 76, p. 49–57.

⁷BRENNEN, C. E. *Fundamentals of Multiphase Flows*. Cambridge, **2005**.

⁸BAKER, M. J. *CFD simulation of flow through packed beds using the finite volume technique*. 2011. University of Exeter, **2011**.

⁹WANG, Y.; CHEN, J.; LARACHI, F. Modelling and simulation of trickle-bed reactors using computational fluid dynamics: A state-of-the-art review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **2013**, v. 91, n. 1, p. 136–180.

¹⁰CIVAN, Faruk; PRADA, Alvaro. Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **1999**, v. 22, 237–240.

¹¹FIRDAOUSS, M.; GUERMOND, J.; QUÉRÉ, P. Nonlinear corrections to Darcy's law at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, **1997**, 343, pp 331-350.

¹²FRANKFURT, R. *Simulação de transporte de massa de um soluto em meio poroso com auxílio do cfd (computer fluid dynamics)*. 2008. USP, São Paulo, **2008**.

¹³WU, W. *et al.* Kinetic Studies and Operating Strategies for an Industrial Selective Hydrogenation Process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2011**, v. 50, n. 3, p. 1264–1271.

¹⁴BAZMI, M. *et al.* CFD simulation and experimental study of liquid flow mal-distribution through the randomly trickle bed reactors. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **2012**, v. 39, p. 736–743.

¹⁵ATTA, Arnab; NIGAM, K.D.P.; ROY, Shatanu. Investigation of liquid maldistribution in trickle-bed reactors using porous media concept in CFD, *Chemical Engineering Science*, **2007**, v. 62, p. 7033 – 7044.

¹⁶NEMEC, D.; LEVEC, J. Flow through packed bed reactors: Two-phase concurrent downflow. *Chemical Engineering Research and Design*, **2005** v.60, p. 6958–6970.

¹⁷DELGADO, J. M. P. Q. Longitudinal and transverse dispersion in porous media. *Chemical Engineering Research and Design*, **2007**, v. 85, p. 1245–1252.

¹⁸WANG, B.; FROMENT, G. F. Kinetic Modeling and Simulation of the Selective Hydrogenation of the C 3 -Cut of a Thermal Cracking Unit. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2005**, v. 44, p. 9860–9867.

¹⁹PERRONE, O. V.; FILHO, A. P. DA S. *Processos Petroquímicos*. 1. ed. Rio de Janeiro: IBP, **2013**.

²⁰SAMIMI, F. *et al.* Application of response surface methodology for optimization of an industrial methylacetylene and propadiene hydrogenation reactor. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **2015**, v. 46, p. 51–64.

²¹PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. *Chemical Engineer Handbook*. 7th Edition, ed. McGraw-Hill, New York, **1997**.