

Transferência de calor em Reator Cilíndrico Elíptico de leito fixo via modelo heterogêneo: efeito da forma das partículas do leito poroso

Heat transfer in a fixed bed Elliptical Cylindrical Reactor via heterogeneous model: effect of the shape of the particles on the porous bed

Transferencia de calor en un Reactor Cilíndrico Elíptico de lecho fijo mediante un modelo heterogéneo: efecto de la forma de las partículas del lecho poroso

Recebido: 21/12/2020 | Revisado:23/12/2020 | Aceito: 23/12/2020 | Publicado: 28/12/2020

Antonildo Santos Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-1695>

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Baiano, Brasil

E-mail: antonildo.pereira@ifbaiano.edu.br

Rodrigo Moura da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5759-3498>

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Paraíba, Brasil

E-mail: rodrigo.silva@ifpb.edu.br

Hortência Luma Fernandes Magalhães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7849-2792>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: hortencia.luma@gmail.com

Ricardo Soares Gomez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-4600>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: ricardosoaresgomez@gmail.com

Túlio Rafael Nascimento Porto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4306>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: trnporto@gmail.com

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-2691>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [wan_magno@hotmail.com](mailto:wam_magno@hotmail.com)

Elisiane Santana de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3004-8841>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: limaelisianelima@hotmail.com

Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7187-419X>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: katherine.b.moura@gmail.com

Antonio Gilson Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-1872>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: antonio.gilson@ufcg.edu.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar a transferência de calor em um reator cilíndrico elíptico de leito recheado de partículas. Foi desenvolvido um modelo matemático heterogêneo (modelo de duas fases), aplicado para as fases sólida e fluida separadamente. Para resolver as equações diferenciais parciais foi utilizado o método de volume finito, a formulação totalmente implícita, e o esquema WUDS para interpolação para os termos convectivos e difusivos. Resultados da distribuição de temperatura nas fases fluida e sólida, ao longo do reator, para partículas com forma esferoidal prolata e esférica são apresentados e analisados. Verificou-se que a forma da partícula que compõe o leito poroso afeta levemente a distribuição de temperatura no interior do reator e que a temperatura adimensional da fase fluida é levemente menor que a da fase sólida.

Palavras-chave: Calor; Reator cilíndrico elíptico; Leito poroso; Modelo heterogêneo; Simulação.

Abstract

The main purpose of this work is to study the heat transfer in an elliptical cylindrical reactor with a bed filled with particles. A heterogeneous mathematical model (two-phase model) was developed, applied to the solid and fluid phases separately. To solve the partial differential equations, the finite volume method, the fully implicit formulation, and the WUDS scheme for convective and diffusive terms were used. Results of temperature distribution in the fluid

and solid phases, along the reactor, for particles with prolate spheroidal and spherical shape are presented and analyzed. It was found that the shape of the particle that fills the porous bed slightly affects the temperature distribution inside the reactor and that the dimensionless temperature of the fluid phase is slightly lower than that of the solid phase.

Keywords: Heat; Elliptical cylindrical reactor; Porous bed; Heterogeneous model; Simulation.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue estudiar la transferencia de calor en un reactor cilíndrico elíptico con un lecho lleno de partículas. Se desarrolló un modelo matemático heterogéneo (modelo de dos fases), aplicado a las fases sólida y fluida por separado. Para resolver las ecuaciones diferenciales parciales se utilizó el método de volumen finito, la formulación totalmente implícita, y el esquema WUDS de interpolación para términos convectivos y difusivos. Se presentan y analizan los resultados de la distribución de temperatura en las fases fluida y sólida, a lo largo del reactor, para partículas con forma esférica y esferoidal prolatada. Se encontró que la forma de la partícula que forma el lecho poroso afecta ligeramente la distribución de la temperatura dentro del reactor y que la temperatura adimensional de la fase fluida es ligeramente menor que la de la fase sólida.

Palabras clave: Calor; Reactor cilíndrico elíptico; Lecho poroso; Modelo heterogéneo; Simulación.

1. Introdução

Para um material ser considerado como um meio poroso deve-se verificar se o mesmo contém espaços vazios relativamente pequenos, geralmente designados por poros, no interior de uma matriz sólida ou semissólida. Os poros contêm normalmente um fluido, como ar, água ou mistura de vários fluidos, além disso, devem ser permeáveis, isto é, estes fluidos poderão penetrar no meio poroso através de uma face e emergir em outra face, ou migrar do seu interior para a superfície devido a ação de algum agente externo, como calor ou pressão.

Os meios porosos podem ser classificados em função de sua estrutura como granulares ou fibrosos. Os granulares são usualmente formados por um conjunto de partículas ou grãos, de forma esférica ou não, dispostas regular ou randomicamente, e representam a grande maioria dos meios porosos. Já os fibrosos são formados por um conjunto de inclusões muito longas, chamadas de fibras, que podem ser naturais ou sintéticas, retas ou curvas, estando

randomicamente dispostas ou em malhas regulares. São exemplos de meios porosos: leitos, rochas porosas, agregados fibrosos como tecidos e filtros, e partículas catalíticas contendo micrósporos extremamente pequenos (Mendes, 1997).

Desde o século passado o estudo da transferência de calor em meios porosos tem despertado o interesse de pesquisadores de vários ramos da ciência e da tecnologia. Esse interesse advém pelo simples fato de os meios porosos estarem presentes tanto na natureza, quanto na maioria das operações unitárias empregadas na Engenharia Química, como: filtração, destilação, absorção e adsorção em colunas recheadas, secagem e reações catalíticas em leitos fixos e fluidizados, de acordo com (Freire, 1979).

Em se tratando de reações catalíticas, os reatores tubulares de leito fixo recheados de partículas são usados frequentemente na indústria para promover tais reações catalíticas heterogêneas gás-sólido altamente exotérmica ou endotérmica. Porém, para se ter um projeto fidedigno e seguro desses equipamentos exige a adoção de modelos matemáticos confiáveis, baseados em experimentos de fluxo resfriado (ou aquecido).

Os modelos matemáticos no estudo da transferência de calor no meio poroso podem ser divididos em dois grupos: modelo pseudo-homogêneo, no qual não há distinção entre fases e em termos de transferência de calor, a mistura (sólido + fluido) está na mesma temperatura em cada ponto do leito e no modelo de duas fases (sólido + fluido), cada qual tem sua própria dinâmica de transferência de calor, sendo definido um parâmetro para cada fase e outro parâmetro que tem a função de acoplamento a transferência de calor entre eles. Sendo assim, o modelo heterogêneo é fisicamente o mais realista.

Apesar da relevância do estudo de transferência de calor em reatores de leito fixo, existem ainda algumas limitações quanto ao uso de certas geometrias e ao modelo matemático pseudo-homogêneo, porém ambos tem sido frequentemente usados (Oliveira et al., 2008; Silva Filho, 2013; Silva, 2018; Silva et al. 2018, Silva et al., 2019). Portanto, este trabalho teve como objetivo estudar o transporte de calor em um reator de leito fixo com uma geometria cilíndrica elíptica utilizando o modelo heterogêneo (ou modelo de duas fases), considerando o leito formado por partículas com a forma esferoidal prolata.

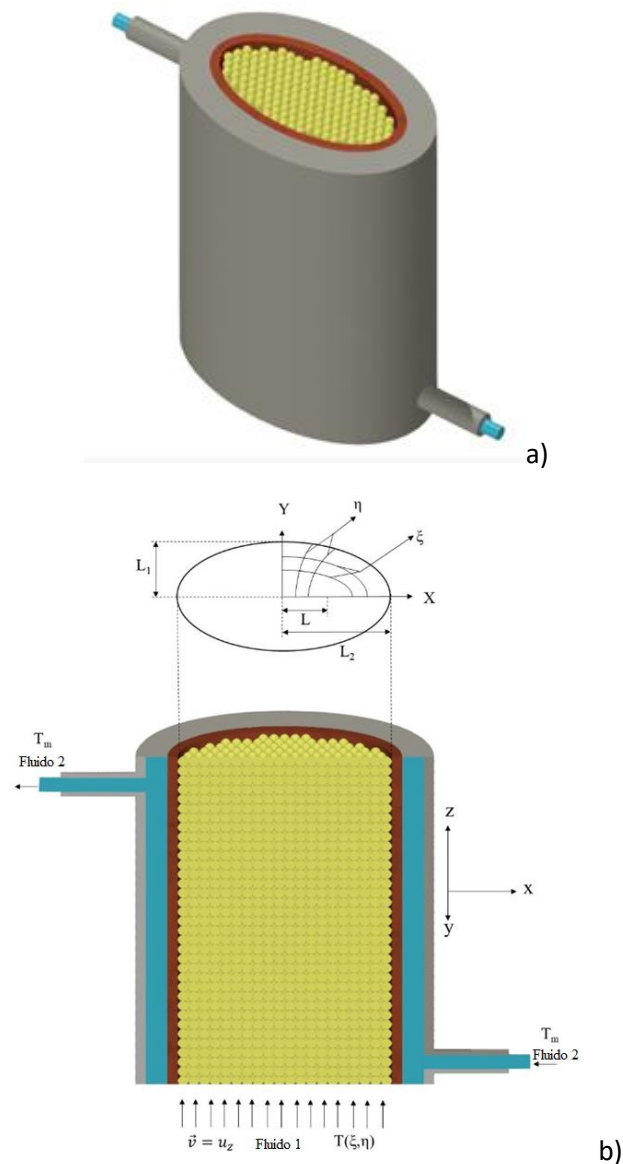
2. Metodologia

Domínio Físico e a Geometria

Na Figura 1 observa-se um escoamento de um fluido através de um reator de leito fixo cilíndrico elíptico recheado de partículas. O fluido 2 que escoar na parte anelar tem a função de

resfriar ou aquecer a parede, porém depende da temperatura do fluido 1 na entrada do reator. Dependendo da temperatura do fluido 1 na entrada, a parede do reator pode estar sendo resfriada ou aquecida por um fluido 2 que escoar na parte anelar. Podem-se ver na figura as variáveis ξ e η do sistema de coordenadas cilíndrico elíptico, o qual é adequado para este tipo de geometria. Nesta pesquisa o fluido 1 é o ar enquanto o fluido 2 é a água. Trata-se de uma pesquisa puramente teórica de caráter predominantemente quantitativo, que se baseia em trabalhos reportados na literatura (Oliveira et al., 2020; Pereira et al., 2018; Pereira et al., 2020; Pereira et al., 2021; Silva Filho, 2013; Silva, 2018; Silva et al. 2018, Silva et al., 2019)

Figura 1. Modelo de um reator cilíndrico elíptico de leito compactado. a) Vista tridimensional e b) vista em corte.



Fonte: Autores (2020).

Modelo Matemático

Para a modelagem matemática apropriada, foram estabelecidas as seguintes considerações físicas:

- (i) O sistema opera no regime permanente;
- (ii) As propriedades termofísicas são constantes;
- (iii) Não foi considerado o termo de reação química, portanto, a geração interna da energia é nula;
- (iv) A velocidade superficial do fluido é constante em qualquer posição dentro do reator ao longo da coordenada z e nula nas direções ξ e η ;
- (v) A velocidade superficial do fluido é menor que a velocidade do som;
- (vi) Gradientes angulares temperatura são insignificantes;
- (vii) A parede do reator tem espessura desprezível;
- (viii) Os efeitos viscosos são insignificantes;
- (ix) Condição de contorno convectiva na superfície do reator;
- (x) Perfil de temperatura plano na entrada do reator (Pereira et al., 2020).

O modelo matemático utilizado foi o modelo de duas fases, composto pelas equações de conservação da energia aplicadas para as fases fluida e sólida, como segue:

a) Fase fluida

$$\varphi(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f \mathbf{v} \cdot \nabla T_f = \frac{DP}{Dt} + \varphi \nabla \cdot (K_f \nabla T_f) + \mu \psi + \varphi q_f + h(T_s - T_f) \quad (1)$$

b) Fase sólida

$$(1 - \varphi)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varphi) \nabla \cdot (K_s \nabla T_s) + (1 - \varphi) q_s + h(T_f - T_s) \quad (2)$$

onde f e s referem-se as fases fluída e sólida, respectivamente, T é a temperatura, t é o tempo, \mathbf{v} é a velocidade média do fluido, φ é a porosidade do meio, ρ é a massa específica, c_p é o calor específico a pressão constante, K é a condutividade térmica, $\mu \psi$ é o termo de dissipação

viscosa, P é a pressão, \dot{q} é a geração de energia interna por unidade de volume, e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre as fases.

A porosidade é definida como sendo a razão entre o volume de vazios (V_v), que são as zonas sem partículas e que não está ocupada pelo material sólido e o volume total do meio (V_T) que é a soma do volume de vazios e do volume ocupado pelas partículas (Dullien, 1992). Assim pode-se escrever:

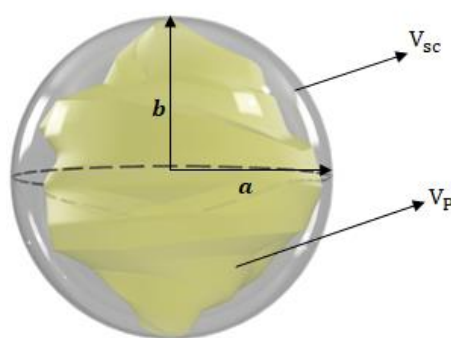
$$\varphi = \frac{V_v}{V_T} \quad (3)$$

Para partículas com geometria regular ou irregular atribui-se um fator de esfericidade β , definido por:

$$\beta = \left(\frac{V_p}{V_{ec}} \right)^{1/3} \quad (4)$$

onde valores deste fator diferenciam-se para partículas de diferentes formas. Na equação (4), V_p e V_{ec} representam os volumes da partícula e da esfera circunscrita, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 2 (Curry & Griffiths, 1955).

Figura 2. Relação entre o volume da partícula e o volume da esfera circunscrita.



Fonte: Autores (2020).

Com relação ao coeficiente de transferência de calor, alguns valores de h podem ser encontrados de maneira indireta (Polyaev et al., 1996). Uma das correlações para um leito poroso de partículas (Dixon & Cresswell, 1979), é dada como segue:

$$h = \alpha_{sf} h_{sf} \quad (5)$$

onde o h_{sf} é o coeficiente de transporte de calor para ambas as fases e α_{fs} é a área da superfície específica, dadas como segue:

$$\alpha_{sf} = 6(1 - \varphi)/d_p \quad (6)$$

A área superficial específica representa uma medida da área de contato entre a fase sólida e a fase fluida, o que é um aspecto muito importante num grande número de processos. O diâmetro equivalente, d_p , é definido como sendo o diâmetro da esfera com o mesmo volume de partícula (McCabe et al., 1985).

O coeficiente de transporte de calor na interface entre as fases é dado pela seguinte expressão matemática:

$$\frac{1}{h_{sf}} = \frac{d_p}{Nu_{sf} K_f} + \frac{d_p}{\beta K_s} \quad (7)$$

onde $Nu_{sf} = (0.225/\varphi) Pr_s^{\frac{1}{3}} Re_p^{\frac{1}{3}}$, representa o número de Nusselt, d_p , o diâmetro da partícula e $\beta = (a^2/b^2)^{1/3}$ é a esfericidade das partículas do leito poroso, em que a e b são os semi-eixos menor e maior de uma elipsoide de revolução, respectivamente. O número de Nusselt é, para o número de Reynolds (baseado em d_p) $Re_p = 2\rho u_z \varphi d_p / 3\mu(1 - \varphi)$, dado por (Happel & Brenner, 2012). Enquanto para baixos valores de Re_p as estimativas de Nu_{sf} variam de 0.1 e 12.4, sendo estes valores baseados em Miyauchi et al. (1981) e Wakao et al. (1979).

Procedimento Numérico

Transformando para o sistema de coordenadas cilíndrico elíptico e discretizando as Equações 1 e 2, usando o método de volume finito com o esquema de interpolação WUDS e formulação totalmente implícito, obteve-se as seguintes equações algébricas linear para cada volume de controle das fases fluida e sólida:

c) Fase fluida

$$A_{P_f} T_{P_f} = A_{E_f} T_{E_f} + A_{W_f} T_{W_f} + A_{N_f} T_{N_f} + A_{S_f} T_{S_f} + A_{F_f} T_{F_f} + A_{T_f} T_{T_f} + A_{P_f}^0 T_{P_f}^0 + B_f \quad (8)$$

d) Fase Sólida

$$A_{P_s} T_{P_s} = A_{E_s} T_{E_s} + A_{W_s} T_{W_s} + A_{N_s} T_{N_s} + A_{S_s} T_{S_s} + A_{F_s} T_{F_s} + A_{T_s} T_{T_s} + A_{P_s}^0 T_{P_s}^0 + B_s \quad (9)$$

Detalhes desta formulação podem ser obtidos em Pereira et al. (2020) e Pereira et al. (2021).

A partir das Equações 8 e 9, aplicadas a todos os volumes de controle do domínio, gera-se um sistema de equações algébricas lineares, o qual foi resolvido usando a técnica de Gauss-Seidel e adotando um critério de convergência 10^{-9} . Para obtenção dos resultados foi desenvolvido um código computacional no software Mathematica[®]. Os resultados foram obtidos usando uma malha com $20 \times 20 \times 20$ volumes-controle, depois de um estudo de malha ter sido desenvolvido.

Casos estudados

Na Tabela 1 listam-se os parâmetros geométricos das partículas e do reator, e termofísicos do reator, das partículas e dos fluidos de aquecimento e resfriamento utilizados nas simulações.

Tabela 1. Parâmetros geométricos e termofísicos do reator.

Parâmetros									
Reator				Fluidos			Partícula		
L_1 (m)	L_2 (m)	H (m)	K_w (W/mK)	k_f (W/mK)	h_{wext} (W/m ² K)	h_{wint} (W/m ² K)	k_s (W/mK)	b (m)	a (m)
0,05	0,1	0,2	401	$2,47 \times 10^{-3}$	2,69	$1,03 \times 10^{-4}$	5,64	$2,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$
				u_z (m/s)	c_{pf} (J/kg.K)	ρ_f (kg/m ³)		$2,5 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$
				0,1	1000	1,09488			
				T_m (°C)	$T_{(z=0)}$ (°C)	μ_f (kg/m.s)	ρ_s (kg/m ³)	c_{ps} (J/kg.K)	φ
				30	70	$2,025 \times 10^{-5}$	487	5500	0.4

K_w - condutividade térmica da parede do reator, h_{wint} - coeficiente de transferência de calor convectivo interno, h_{wext} - coeficiente de transferência de calor convectivo da parede externa, u_z - velocidade do fluido na entrada do reator, T_m - temperatura de resfriamento do reator, $T_{(z=0)}$ - temperatura do fluido na entrada do reator. Fonte: Autores.

3. Resultados e Discussão

O tamanho e a forma das partículas são parâmetros de grande importância no processo de transferência de calor em reatores de leito fixo, já que afetam a área superficial específica das partículas, a esfericidade, a porosidade e permeabilidade do meio poroso, e tamanho e distribuição dos poros. Os estudos de transferência de calor em reator de leito fixo reportados na literatura consideram geralmente as partículas como sendo esféricas, mas na prática dificilmente apresentam essa forma.

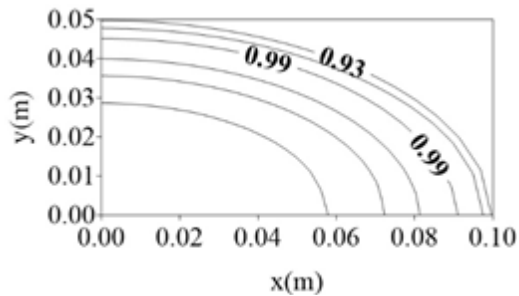
Nesse estudo consideraram-se duas formas geométricas da partícula com o mesmo material e arranjo dentro do reator, conforme pode ser visto na Tabela 1. Além disso, foi considerado um leito compactado com duas fases, ou seja, uma fase sólida e uma fase fluida. As direções dos interstícios e a localização das partículas dentro do leito não foram consideradas (distribuição aleatória). Para analisar o comportamento da distribuição de temperatura no interior do reator de leito compactado, foi simulado dois casos em que a razão de aspecto é $L_2/L_1 = 2,0$.

Considerou-se nesta análise três posições axiais do leito compactado, a saber: nos planos de entrada, metade e saída do reator para as fases fluida e sólida, como ilustrado nas Figuras 3 e 4, como também em dois planos longitudinais que cortam os eixos x e y, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6.

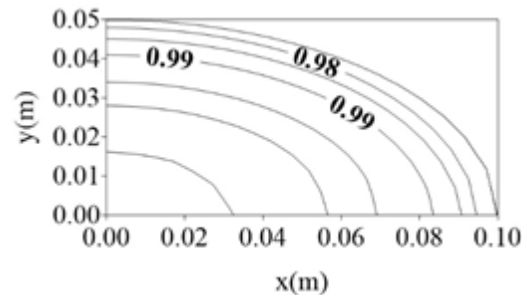
Para partículas com forma esferoidal prolata, a porosidade, a esfericidade e a área superficial específica foram 0,4, 0,86 e $844,87 \text{ m}^{-1}$, respectivamente. Para o caso da partícula com a forma esférica, a porosidade, a esfericidade e a área específica das partículas foram 0,39, 0,999 e $902,00 \text{ m}^{-1}$, respectivamente.

Após uma análise das Figuras 5 e 6, percebe-se um deslocamento das isolinhas de maiores temperaturas para as posições cada vez mais próximas do centro do reator de leito fixo. Os gradientes radiais de temperatura são pequenos na entrada do reator devido aos efeitos térmicos de entrada. A medida que se aumenta a posição axial, ao longo do reator, esses gradientes radiais aumentam. Observa-se ainda que, em qualquer altura do leito, a temperatura adimensional para a fase fluida e levemente menor que a da fase sólida em ambos os casos. Há claramente um efeito de borda, devido a forma da seção transversal do reator.

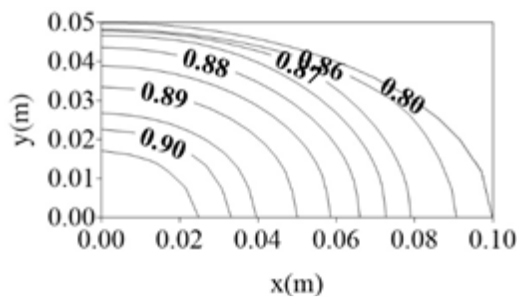
Figura 3. Distribuição de temperatura adimensional em diferentes posições axiais dentro do reator cilíndrico elíptico de leito fixo preenchido com partículas com forma esferoidal prolatado ($a = 2,0 \times 10^{-3}$ m e $b = 2,5 \times 10^{-3}$ m).



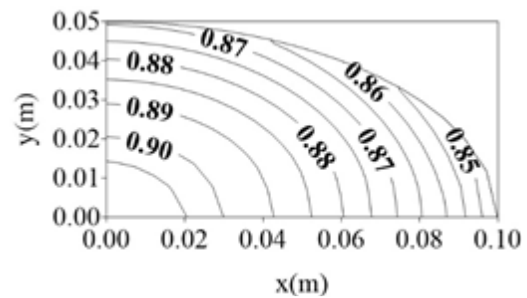
(a) Fase fluida, $z/H = 0.0833$.



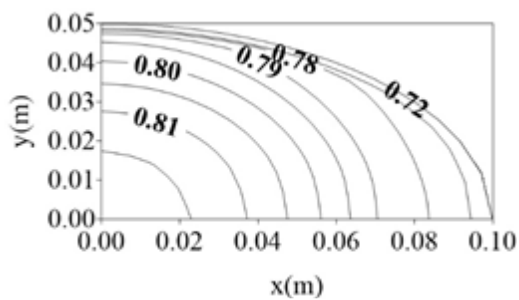
(b) Fase sólida $z/H = 0.0833$.



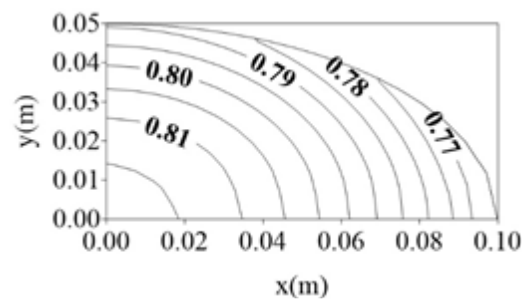
(c) Fase fluida, $z/H = 0.5277$.



(d) Fase sólida, $z/H = 0.5277$.



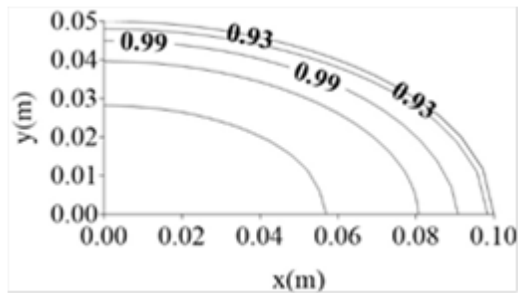
(e) Fase fluida, $z/H = 0.9722$.



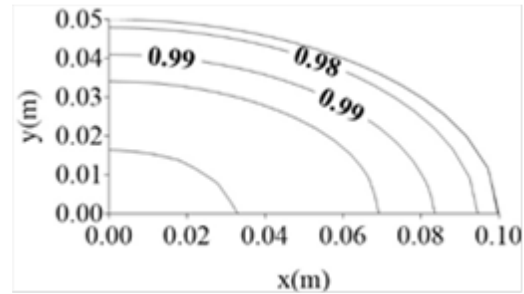
(f) Fase sólida $z/H = 0.9722$.

Fonte: Autores (2020).

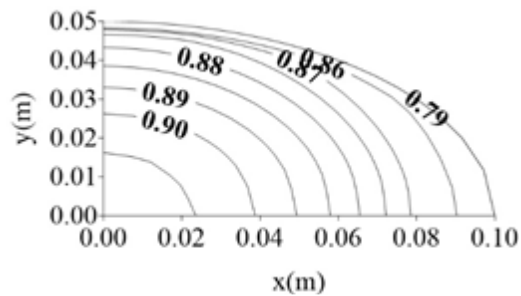
Figura 4. Distribuição de temperatura adimensional em diferentes posições axiais dentro do reator cilíndrico elíptico de leito fixo preenchido com partículas com forma esferoidal esférica ($a = 2,0 \times 10^{-3}$ m e $b = 2,0 \times 10^{-3}$ m).



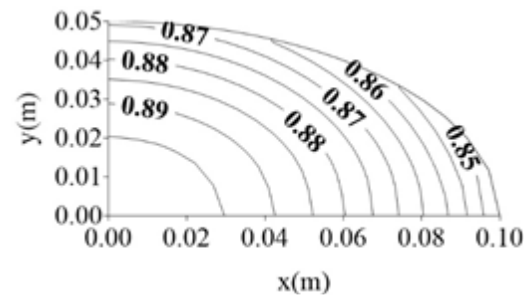
(a) Fase fluida, $z/H = 0.0833$.



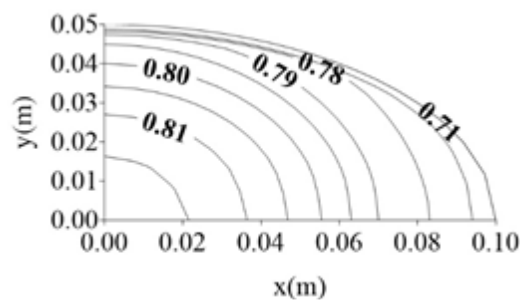
(b) Fase sólida $z/H = 0.0833$.



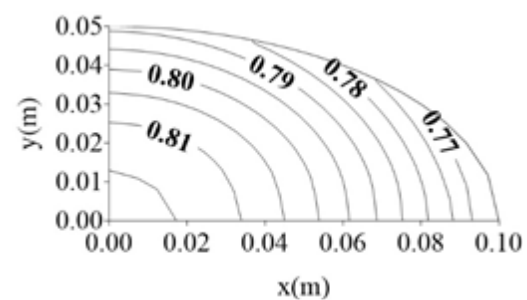
(c) Fase fluida, $z/H = 0.5277$.



(d) Fase sólida, $z/H = 0.5277$.



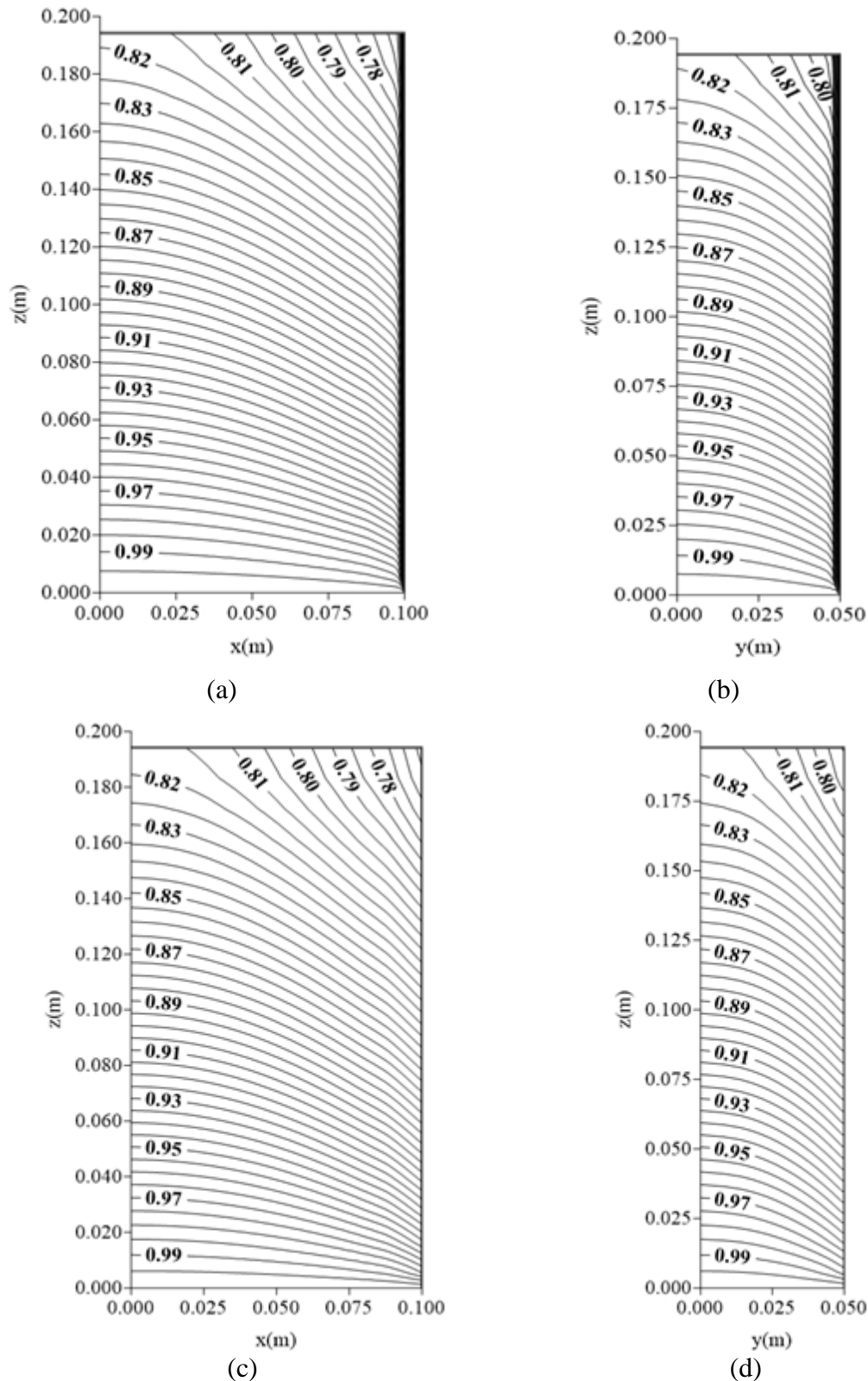
(e) Fase fluida, $z/H = 0.9722$.



(g) Fase sólida, $z/H = 0.9722$.

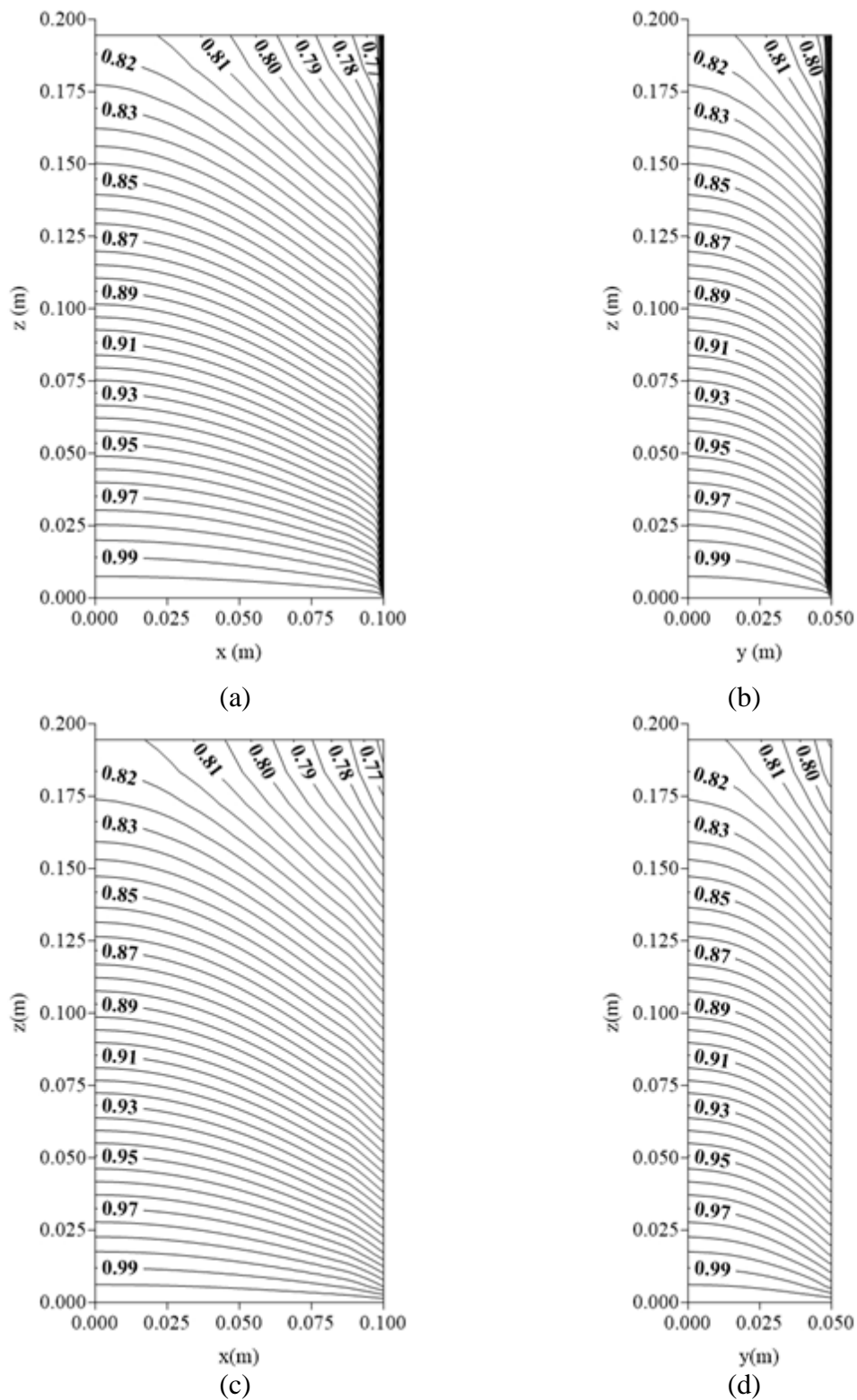
Fonte: Autores (2020).

Figura 5. Distribuição de temperatura adimensional em diferentes posições transversais dentro do reator cilíndrico elíptico de leito fixo preenchido com partículas com forma esferoidal prolato. Fase fluida (a) $y = 0$ m e (b) $x = 0$ m, e fase sólida (c) $y = 0$ m e (d) $x = 0$ m ($a = 2,0 \times 10^{-3}$ m e $b = 2,5 \times 10^{-3}$ m).



Fonte: Autores (2020).

Figura 6. Distribuição de temperatura adimensional em diferentes posições transversais dentro do reator cilíndrico elíptico de leito fixo preenchido com partículas com forma esférica. Fase fluida (a) $y = 0$ m e (b) $x = 0$ m, e fase sólida (c) $y = 0$ m e (d) $x = 0$ m ($a = 2,0 \times 10^{-3}$ m e $b = 2,0 \times 10^{-3}$ m).



Fonte: Autores (2020).

Analisando as Figuras 5 e 6 verifica-se que a temperatura adimensional do fluido e partículas no interior do reator decresce axialmente, na direção do escoamento. Além disso, pode-se perceber que os gradientes de temperatura radial são levemente maiores do que os gradientes de temperatura axial. Os gradientes radiais de temperatura são mais significativos, sendo maiores na parede do reator, com valores muito próximos em ambos os casos. Novamente, as temperaturas adimensionais da fase fluida são menores do que da fase sólida. Evidenciando claramente, que a hipótese de equilíbrio local não é uma boa consideração, o que ratifica o uso do modelo heterogêneo como a abordagem mais apropriada sob o ponto de vista físico.

Como mencionado, o tema de transferência de calor em reatores é bem conhecido da comunidade científica, quando se trata de reator cilíndrico circular. No entanto, para outras geometrias, este estudo é escasso e, mesmo assim, limitado à geometria cilíndrica elíptica e usando o modelo pseudo-homogêneo. Assim sendo, em continuidade as pesquisas sugerem-se alguns temas importantes, relacionados ao uso do modelo heterogêneo, e que necessitam de maiores esclarecimento e entendimentos por parte da academia e indústria, como por exemplo, avaliação dos efeitos da velocidade e tipo de fluido de resfriamento, e do material que constitui a parede do reator, considerando propriedades constantes ou variáveis.

4. Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos com as simulações, pode-se concluir que a distribuição de temperatura das fases indica que o fluxo de calor ocorre sempre do centro em direção à parede do reator (direções angular e radial) e na direção axial, da região de entrada para a saída do mesmo.

Além disto, a temperatura adimensional apresentou maiores resultados para as posições cada vez mais próximas do centro do reator de leito fixo. Os gradientes de temperatura axial foram mais relevantes nas regiões próximas à entrada do reator. A temperatura adimensional da fase sólida foi maior do que na fase fluida em qualquer posição dentro do reator. A forma da partícula afetou levemente a distribuição de temperatura adimensional no interior do reator.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a FINEP pelo apoio financeiro, e aos pesquisadores referenciados no manuscrito que, com suas pesquisas, contribuíram com a melhoria deste trabalho.

Referências

Curry, J. R., & Griffiths, J. C. (1955). Sphericity and roundness of quartz grains in sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 66(9), 1075-1096. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1955\)66\[1075:SAROQG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1955)66[1075:SAROQG]2.0.CO;2).

Dixon, A. G., & Cresswell, D. L. (1979). Theoretical prediction of effective heat transfer parameters in packed beds. *AIChE Journal*, 25(4), 663-676. <https://doi.org/10.1002/aic.690250413>.

Dullien, F. A. L. (1992). *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*. (2a ed.), San Diego, USA: Academic Press.

Freire, J. T. (1979). Transferência de calor em meios porosos. *Tese de Doutorado*. COPPE/UFRJ.

Happel, J., & Brenner, H. (2012). *Low Reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate media* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (1985). *Unit Operations of Chemical Engineering*. 2 ed, McGraw - Hill International Editions, 1985.

Mendes, N. (1997) Modelos para previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Campina Grande. Obtido em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/77246>.

Miyauchi, T., Furusaki, S., Morooka, S., & Ikeda, Y. (1981). Transport phenomena and reaction in fluidized catalyst beds. In *Advances in Chemical Engineering*, 11, 275-448. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2377\(08\)60028-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2377(08)60028-9).

Oliveira, L. G., Swarnakar, R., & de Lima, A. G. (2008). Steady state model for heat transfer in a packed bed reactor of elliptic cylindrical shape. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1771>.

Pereira A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Editora UAB/NTE/UFSM, Santa Maria/RS. Recuperado de https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_MetodologiaPesquisaCientifica.pdf?sequence=1.

Pereira, A. S., Moura da Silva, R., Machado, M. C. N., Azerêdo, L. P. M., Vilela, A. F., Andrade, R. O., & Barbosa de Lima, A. G. (2020). Heat Transfer in Fixed Bed Elliptic Cylindrical Reactor via Two-Phase Model. *Defect and Diffusion Forum*, 400, 45–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.400.45>.

Pereira, A. S., Silva, R. M., Santos, R. S., Lima, A. G. B., Andrade, R. O., Lima, W. M. P. B., & de Lima, G. S. (2021). Heat Transfer in a Packed-Bed Elliptic Cylindrical Reactor: Theory, Heterogeneous Transient Modeling, and Applications. In *Transport Processes and Separation Technologies* (pp. 185-214). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47856-8_7

Polyaev, V. M., Mozhaev, A. P., Galitseysky, B. M., & Lozhkin, A. L. (1996). A study of internal heat transfer in nonuniform porous structures. *Experimental thermal and fluid science*, 12(4), 426-432. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(95\)00132-8](https://doi.org/10.1016/0894-1777(95)00132-8).

Silva Filho, A. A. (2013). Transporte de calor em reator cilíndrico elíptico de leito fixo recheado de partículas: modelagem, simulação e otimização. *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Campina Grande, 2013, 170. Recuperado de: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2088>.

Silva, R. M. (2018). Reator cilíndrico - elíptico de leito fixo. Avaliações fenomenológica e geométrica transientes. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Campina Grande Recuperado de: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/7127>.

Silva, R. M., Lima, A. G. B., Pereira, A. S., Machado, M. C. N., & Santos, R. S. (2018). Unsteady state heat transfer in packed-bed elliptic cylindrical reactor: theory, advanced modeling and applications. In *Transport Phenomena in Multiphase Systems* (pp. 139-179). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91062-8_5.

Silva, R. M., Pereira, A. S., de Lima, A. G. B., Araújo, M. V., & Santos, R. S. (2019). Heat Transfer in Packed Bed Elliptic-Cylindrical Reactor: The Geometry Effect. *Defect and Diffusion Forum*, 391, 54–59. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.391.54>.

Wakao, N., Kaguei, S., & Funazkri, T. (1979). Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds: correlation of Nusselt numbers. *Chemical engineering science*, 34(3), 325-336. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(79\)85064-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(79)85064-2).

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Antonildo Santos Pereira – 40%

Rodrigo Moura da Silva – 10%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 5%

Ricardo Soares Gomez – 5%

Túlio Rafael Nascimento Porto – 5%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 5%

Elisiane Santana de Lima – 5%

Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva – 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 20%