

ESTUDO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ESTADO ESTACIONÁRIO EM UM LEITO CILÍNDRICO COMPACTADO

Laercio Gomes de Oliveira

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil
laercio@deq.ufcg.edu.br

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil
gilson@dem.ufpb.br

Resumo. O objetivo deste trabalho é apresentar medidas pontuais (axiais e radiais) de temperatura num reator de leito fixo de 5,7 cm de diâmetro interno, compactado com partículas cilíndricas de óxido de zinco (catalisador industrial) com 3,0 mm de diâmetro médio. O reator é percolado axialmente (de baixo para cima) por uma corrente de ar quente com velocidades mássicas entre 0,63 e 1,11 kg.m⁻².s⁻¹. A temperatura do ar na entrada do reator é mantida constante e uniforme em 70°C e a parede do leito mantida a 22,5°C por água de refrigeração, que circulava por uma camisa cilíndrica que envolvia o reator. As medidas de temperatura foram realizadas em quatro posições radiais (0,0; 0,855; 1,710; 2,565 cm) ao longo do raio do tubo e em dez posições axiais do leito compactado (1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0 cm). Os dados de temperatura coletados foram tratados estatisticamente. Foi proposto um modelo matemático para descrever a temperatura do sistema fluido-partícula ao longo da posição radial que se ajusta muito bem aos dados experimentais. Verificou-se que ocorreram elevados gradientes de temperatura em ambas as direções axial e radial, até mesmo próximo ao centro do reator, e que estes gradientes de temperatura sofreram forte influência da velocidade mássica do fluido percolante.

Palavras chave: temperatura, leito fixo, termopares, posição radial, dados experimentais.

1. Introdução

Estudos sobre escoamento e transporte de calor em meios porosos vêm sendo realizados desde o século passado, visando caracterizar o comportamento térmico e fluidodinâmico do escoamento. A fluidodinâmica do escoamento, e o comportamento do transporte de calor num leito compactado são influenciados principalmente pela técnica empregada no empacotamento das partículas na coluna de recheio e pela forma de medida dos dados experimentais (Schwartz and Smith, 1953). Esse tipo de estudo tem atraído a atenção da comunidade científica (matemáticos, físicos, engenheiros, etc.) por várias décadas. Esse interesse advém de estarem os meios porosos presentes tanto na natureza (solos e plantas, por exemplo) como na maioria das operações unitárias empregadas na Engenharia Química, como filtração, destilação, adsorção em colunas recheadas, secagem e reações catalíticas em leitos fixos e fluidizados (Freire, 1979).

O estudo da transferência de calor em leito fixo pode ser realizado tanto em regime transiente quanto em regime permanente, porém em cada caso, o requisito considerado de importância capital, que deve sempre ser obedecido, é a obtenção da forma mais fidedigna possível dos perfis de temperatura no interior do leito. Embora, a rigor, as técnicas utilizadas para a obtenção dos perfis de temperatura independam do regime em questão, no caso do regime transiente as coisas se complicam um pouco mais, pois existe a necessidade de uma aquisição freqüente e contínua dos perfis de temperatura ao longo do tempo, que podem ser influenciadas pela inércia térmica do tipo de sensor usado no sistema de aquisição de dados.

A técnica de medida e o tipo de dispositivo de coleta de dados de transferência de calor em leito fixo têm recebido a atenção de muitos pesquisadores. Dentre as técnicas mais largamente utilizadas destacam-se: (1) - fixação de um conjunto de termopares acima leito (Bunnell et al. 1949; Dixon, 1985; Dixon, 1993; Thoméo, 1990; Schouten e Westerterp, 1996; Thoméo e Freire, 2000), sendo o suporte geralmente confeccionado na forma de cruz; (2) - inserção radial de termopares no leito (Chalbi et al. 1987; Wijngaarden e Westerterp, 1992); (3) - uso de termopares anelares dispostos no interior do leito (Gunn e Khalid, 1975; Ziolkowski e Legawiek, 1987) ou ainda posicionado acima do leito (Giudici, 1990).

Diversos pesquisadores (Dixon, 1985; Thoméo, 1990; Wijngaarden e Westerterp, 1992; Dixon, 1993; Schouten e Westerterp, 1996; Winterberg e Tsotsas, 2000) observaram que existem flutuações significativas, mas aparentemente aleatórias, de temperatura em leitos fixos. Tais flutuações são devido às não-uniformidades locais de empacotamento, inerentes ao próprio leito, e parecem ser mais pronunciadas quanto menor for a relação diâmetro do leito por diâmetro da partícula. No entanto, no projeto de reatores catalíticos gás-sólido e trocadores de calor de leito compactado, os modelos normalmente utilizados, assumem que o perfil de temperatura é do tipo pistonado na

entrada do reator e a distribuição de velocidade é uniforme ao longo ao diâmetro do leito (Dixon, 1996; Legawiec e Ziolkowski (1997); Dixon e van Dongeren, 1998). Dessa forma, torna-se absolutamente indispensável filtrar essas flutuações de temperatura, através de um tratamento estatístico dos dados, caso contrário, os parâmetros térmicos (condutividade térmica efetiva e coeficiente de transferência de calor parede-leito) estimados não terão significância estatística nenhuma, uma vez que possuirão elevados intervalos de incerteza.

De acordo com Schouten e Westerterp (1996), Fedoseev e Shanin, (1986); Wijngaarden e Westerterp, (1992^a), Borkink et al. (1992), Legawiec e Ziolkowski (1997) e Prasad e Das (2002), o caráter estatístico de um leito compactado deve ser incorporado na modelagem do reator, uma vez que realizar uma aproximação do comportamento do leito inteiro usando parâmetros efetivos fixos não parece ser uma forma correta para descrever o sistema adequadamente. Wijngaarden e Westerterp (1992), atribuem parte da divergência nas medidas de temperatura em leitos compactados ao fato de que o leito compactado é heterogêneo na escala do “pellet”, isto é, se um perfil radial de temperatura é acompanhado numa única posição axial, a porosidade local é uma variável Booleana. A outra parte, surge do fato que a corrente de gás dentro dos espaços vazios são dirigidas no espaço de uma maneira estatística. Como resultado, os perfis de temperatura medidos também exibem uma certa quantidade de espalhamento.

Neste sentido, devido à elevada complexidade do fenômeno e sua importância industrial, este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente o comportamento da temperatura do sistema fluido-partícula no interior de um leito cilíndrico recheado de partículas.

2. Equipamento e metodologia experimental

O equipamento utilizado neste trabalho para a coleta de dados experimentais, conforme mostra a Fig. 1, foi projetado e montado por Thoméo (1990). Nesta figura, o ar, o fluido percolante, fornecido ao sistema por um compressor, passa por um filtro regulador de pressão (1), no qual são retidas as gotículas de óleo e de água; passa em seguida por um medidor de vazão de duplo orifício (2) acoplado a um sistema de manômetros diferenciais de água e mercúrio (3), sendo seco em um desumidificador; atravessa uma coluna de sílica gel, visando eliminar a umidade. O rendimento desta unidade é fornecido por um psicrômetro. Em seguida, o ar é aquecido num aquecedor termelétrico (4), cuja diferença de potencial é acompanhada e controlada por um sistema de controle digital (5), que mantém a temperatura do ar na entrada da célula de medidas térmicas (6) no valor desejado de 70°C. A célula de medidas é resfriada na parede por água a 22,5°C, proveniente do conjunto de refrigeração. As distribuições de temperaturas na saída do leito são lidas por termopares estrategicamente instalados na célula de medidas e ligados a uma chave seletora (7), a qual está acoplado um milivoltímetro digital (8).

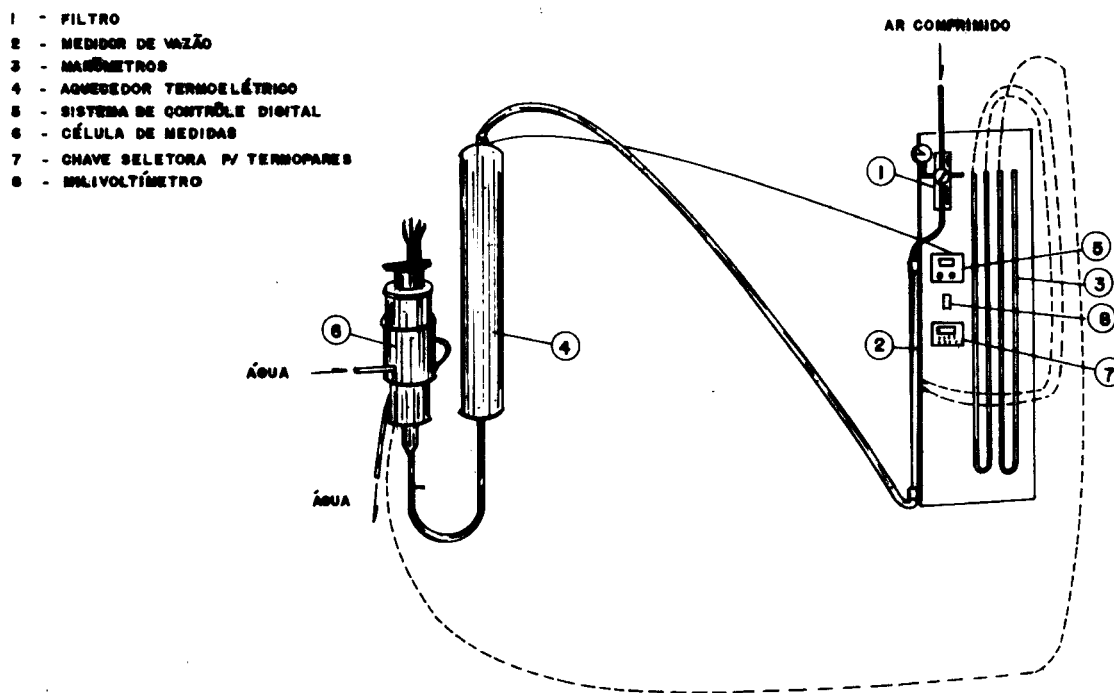


Figura 1. Diagrama esquemático do equipamento e periféricos

A célula de medidas, Fig. 2, é composta por uma seção de entrada, uma seção térmica e um conjunto de sustentação de termopares dispostos axialmente. A seção de entrada é constituída de um tubo de latão com comprimento 246 mm e 57 mm de diâmetro interno. A seção térmica é composta por dois tubos de latão, concêntricos, sendo que no espaço anular entre os mesmos, circula água de refrigeração, tendo os cilindros 57 e 95 mm de diâmetro interno, ambos com 100 de comprimento. Ambas as seções são empacotadas com partículas de forma geométrica semelhante com diâmetro médio de 3,0 mm, sendo a técnica de empacotamento análoga para as duas seções.

Um conjunto suporte de termopares, confeccionado em PVC, visando diminuir o problema da condução tipo aleta ao longo dos termopares, possui mobilidade angular e axial. Nele, estão afixados os termopares localizados radialmente em posições estratégicas, com a finalidade de obter medidas radiais de temperaturas na saída do leito. As distribuições radiais de temperaturas foram obtidas em várias profundidades de leito. A célula de medidas está isolada termicamente do ambiente com isolante de lã mineral com espessura de aproximadamente 40 mm.

Depois de estabelecidas as condições operacionais (altura do recheio, vazão mássica superficial, temperatura da parede e temperatura do fluido na entrada, etc.) o fluido é fornecido à célula de medidas. Após um período de aproximadamente 2 horas, o regime estacionário é estabelecido e o conjunto suporte é então deslocado angularmente de 30° em 30°, até perfazer todas as posições angulares desejadas. Dessas medidas, uma média foi obtida, para cada posição radial, visando filtrar as flutuações angulares.

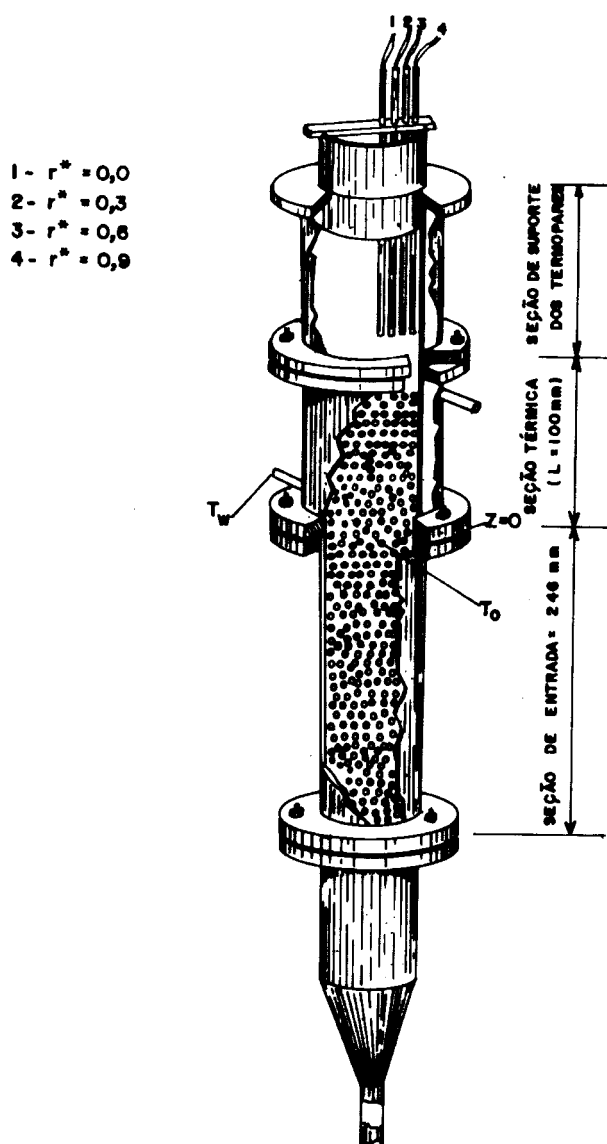


Figura 2. Célula de medidas térmicas.

Os resultados experimentais coletados na célula de medidas térmicas (Fig. .2) são campos de temperatura em função das três direções coordenadas, axial, angular e radial. Optou-se então por obter um perfil radial $T(r)$, em cada altura do leito, minimizando desta forma a influência da posição angular. Vale salientar que neste trabalho

experimentos replicados foram executados visando-se comprovar que a reprodutibilidade do empacotamento foi alcançada. Neste caso, o procedimento usado para filtrar as flutuações angulares de temperatura foi obter o valor médio das medidas de temperatura realizadas nas doze posições angulares defasadas entre si de 30°.

Como os dados experimentais dos perfis radiais de temperatura $T(r)$ foram lidos em apenas quatro posições, a partir dos valores médios obtidos conforme o procedimento mencionado acima, optou-se por obter uma equação de T em função da posição radial através do ajuste não-linear de uma função parabólica a três termos e a três parâmetros, que é uma metodologia estatisticamente mais adequada do que utilizar um número reduzido de dados. A forma da equação proposta no ajuste é da forma:

$$T(r) = b_5 + b_6 r + b_7 r^2 \quad (1)$$

A estimativa não-linear dos parâmetros da Eq. (1) foi realizada usando-se o Software Statistica®. O método numérico de ajuste escolhido foi o Rosembroock e Quasi-Newton, para todos os testes, com um critério de convergência adotado de 0,001. A forma da curva proposta é baseada nos trabalhos de Thoméo (1990), Borkink e Westerterp (1992) e Oliveira e Lima (2003) que afirmam ser o perfil de temperatura num reator de leito fixo, parabólico em relação ao raio.

A temperatura média radial numa dada seção transversal do reator é dada através da integração das equações obtidas no ajuste não-linear (Eq. 1), pela seguinte expressão:

$$\bar{T}_r(r) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R rT(r) dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta} \quad (2)$$

A integração expressa pela Eq. (2) foi realizada para todas as curvas usando o Software Mathematica®. Obteve-se assim os valores das médias radiais para todas as alturas de leito e números de Reynolds utilizados. Procedimento semelhante ao utilizado na Eq. (1) foi adotado nestes pontos, visando obter equações representativas da temperatura em função da altura do leito. Neste caso, baseando-se nos trabalhos de Lima (1999) e Nascimento (2002), propõe-se uma equação exponencial a três termos e a seis parâmetros. A equação usada tem a seguinte forma:

$$T(z) = b_8 \exp(b_9 z) + b_{10} \exp(b_{11} z) + b_{12} \exp(b_{13} z) \quad (3)$$

Novamente, o ajuste não-linear foi realizado usando o Software Statistica® com o método numérico de Rosembroock e Quasi-Newton, com um critério de convergência de 0,001 para todos os casos.

No sistema aqui estudado, o número de Reynolds de partículas é dado matematicamente por:

$$Re = \frac{Gd_p}{\mu} \quad (4)$$

onde G é a vazão mássica específica, d_p é o diâmetro da partícula e μ é a viscosidade do fluido percolante.

3. Resultados e discussão

3.1. Característica dos dados e reprodutibilidade do empacotamento

Os dados de temperatura coletados no leito fixo exibem flutuações tanto na direção radial quanto na angular que são percebidas quando se executam experimentos replicados. Porém, esta variabilidade é geralmente desconsiderada pelos modelos de transporte de calor em leito fixo. Uma análise de variância dos dados é mostrada na Tab. 1, onde são apresentados as medidas de temperatura e seus respectivos desvios em diferentes posições radiais do leito para $z = 1,0$ cm e $Re = 145$. Esta análise foi realizada visando a estimativa da variância experimental das medidas de temperatura e análise do grau de reprodutibilidade do empacotamento do leito. Na Tab. 1, a temperatura em cada réplica numa dada posição radial, representa a média aritmética das medidas de temperatura realizadas em 12 posições angulares defasadas entre si de 300, sendo este procedimento adotado, visando minimizar os efeitos das flutuações angulares de porosidade sobre o valor da medida. As variações de porosidade, decorrentes de eventuais diferenças no processo de empacotamento, constituem as principais fontes de dispersão dos dados (Ziolkowski e Legawiek, 1987).

Observa-se na Tab. 1, que o desvio em relação à temperatura de cada réplica vai aumentando com a posição radial em direção à parede, comportamento este atribuído às possíveis oscilações da porosidade nesta mesma direção, podendo provocar uma distribuição desigual de fluido e conseqüentemente uma dispersão mais acentuada nos dados de temperatura (Zotin, 1985; Mc Greavy et al. 1986; Lerou e Froment, 1977), visto que nesta região do leito os caminhos preferenciais de fluido são predominantes, em razão da baixa resistência ao escoamento. Portanto, essa maior variabilidade nas medidas de temperatura na região próxima à parede se traduz em graves conseqüências aos valores estimados dos parâmetros (Freiwald e Paterson, 1992).

Verifica-se ainda na Tab. 1, que os desvios em relação à média de temperatura numa dada posição radial, se mantêm num mesmo patamar para todas as réplicas, evidenciando claramente que o experimento pode ser considerado reprodutível, visto que a variabilidade dos dados verificada angularmente é sempre mantida num mesmo nível de magnitude. Os desvios em relação à média de temperatura entre as réplicas, conforme última linha da tabela, se mantêm praticamente invariável, mostrando que este tipo de análise filtra completamente a dispersão angular dos dados em direção à parede do leito. Thoméo (1990), realizou um estudo semelhante em seus dados, trabalhando sob diferentes condições operacionais, e chegou a conclusões semelhantes, todavia alertava que experimentos futuros evitassem o uso de baixas alturas de leitos e alturas progressivas próximas para que os gradientes de temperaturas produzidos fossem elevados, apesar de neste caso, se perder a informação sobre os efeitos de entrada.

Tabela 1 Distribuições de temperatura em experimentos réplicas, valores médios em cada réplica e entre elas, assim como os desvios em cada réplica e entre elas para $z = 1,0$ cm e $Re = 145$.

Número da réplica	T (°C)			
	r/R = 0.0	r/R = 0.3	r/R = 0.6	r/R = 0.9
1	68,5 ± 0,8	65,4 ± 1,7	59,2 ± 3,1	44,8 ± 4,5
2	67,0 ± 1,0	65,0 ± 1,2	58,2 ± 3,1	43,4 ± 2,7
3	68,5 ± 0,6	66,9 ± 1,3	60,2 ± 3,5	44,6 ± 3,7
4	70,4 ± 1,0	67,0 ± 0,8	60,2 ± 2,3	45,6 ± 1,8
5	71,5 ± 0,4	67,6 ± 1,5	61,0 ± 2,3	47,9 ± 2,0
6	68,9 ± 0,6	68,5 ± 1,0	60,2 ± 3,1	43,8 ± 3,7
7	70,8 ± 0,4	68,0 ± 1,5	60,8 ± 3,9	45,6 ± 4,3
8	68,9 ± 0,6	68,1 ± 1,3	60,9 ± 3,1	45,8 ± 3,0
Média entre réplicas e seu desvio	69,3 ± 1,5	67,1 ± 1,3	60,1 ± 1,0	45,2 ± 1,4

Uma análise de resíduos (Fig. 3) da média de temperatura entre as réplicas e a posição radial adimensional, para $Re=145$ e $z=1,0$ cm, mostra uma distribuição de resíduos aleatória, independente e identicamente distribuída; que justificam a aplicação do método dos mínimos quadrados ordinários na estimativa de parâmetros de qualquer modelo matemático. A realização de réplicas representa um esforço a mais na parte experimental, porém torna possível uma análise detalhada da variância dos dados, que é uma estimativa do erro associado às medidas. Sua importância está no teste da adequabilidade estatística do modelo, assim como espelhar o comportamento dos resultados nas demais condições experimentais.

3.2. Perfis radial e axial de temperatura

A Figura 4 mostra os perfis radiais de temperatura medidos em várias posições axiais, para $Re=105$. As linhas tracejadas correspondem ao comportamento da temperatura predito pela Eq. (1), quando ajustada aos dados experimentais. Pode-se observar a partir da figura que em todas as alturas de leito, os perfis de temperatura apresentam um comportamento parabólico (Borkink e Westerterp, 1992). Para posições axiais próximas da entrada (baixas alturas de leito), nota-se a ocorrência dos maiores gradientes radiais de temperatura, que vão sendo gradualmente diminuídos à medida que se usa leito mais profundo, fator atribuído provavelmente ao amortecimento do perfil axial de porosidade, com o aumento da altura do leito (Zotin, 1985).

Outra característica extremamente perceptível, de acordo com a Fig. 4 é que o ajuste aos dados de um modelo parabólico, só não é considerado de excelente qualidade na região próxima à entrada do leito, visto que o coeficiente de correlação para essa altura de leito foi de 0,96469. Para as demais alturas, o ajuste pode ser considerado ótimo uma vez que todos os respectivos coeficientes de correlação estão situados no intervalo entre 0,998 e 1,000, conforme mostra a Tab. 2.

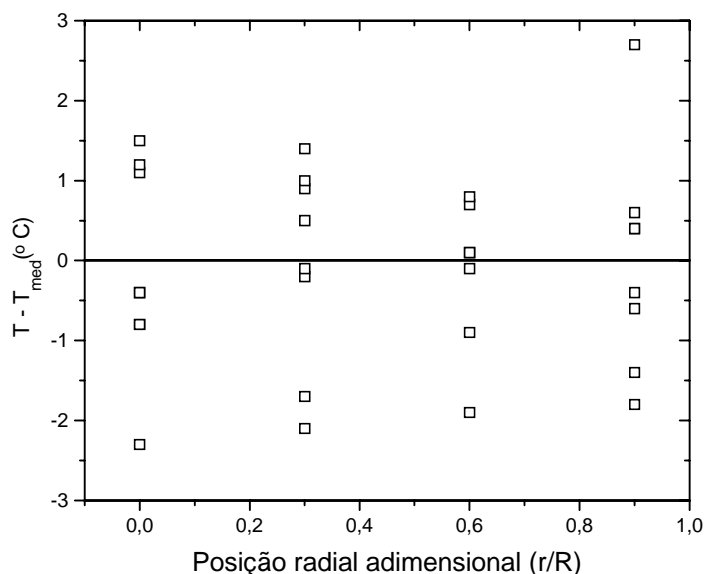


Figura 3 – Distribuição de resíduos da média em cada réplica e o valor médio entre elas.

Tabela 2 – Parâmetros da Equação (1) ajustada aos dados de temperatura para a condição de $Re = 105$.

Altura (cm)	b_5	b_6	b_7	R^*
1,0	59,75730	7,371026	-5,89752	0,96469
2,0	59,42379	2,923773	-4,52841	1,0000
3,0	57,53622	0,385246	-3,51154	0,99998
4,0	58,17334	-2,87953	-2,75164	0,99975
5,0	54,55386	-1,88865	-2,60842	0,99932
6,0	52,09551	1,573824	-3,51251	0,99883
7,0	51,25258	-0,24202	-2,73963	0,99821
8,0	52,40818	-4,67423	-1,45535	0,99989
9,0	50,35234	-2,93472	-1,80484	0,99970
10,0	47,45396	0,114225	-2,55807	0,99918

R^* - coeficiente de correlação.

A Figura 5 apresenta os perfis radiais de temperatura no leito, para uma altura de leito $z = 5,0$ cm, quando se variou o número de Reynolds de partícula, para se verificar a influência da vazão mássica superficial sobre os perfis radiais de temperatura. Observa-se que o ajuste parabólico (curva tracejada) está de acordo com os dados experimentais (símbolos) para todas os números de Reynolds empregados. Percebe-se que o aumento da vazão mássica superficial provoca uma maior taxa de transporte de calor, visto que na mesma posição axial, os gradientes de temperatura em duas posições radiais são sempre maiores para números de Reynolds consecutivos. Este fenômeno provavelmente está relacionado ao fato de que, quando fixa-se as demais condições experimentais e aumenta-se a vazão mássica superficial, a taxa de transporte de calor por convecção se torna mais importante que o transporte de calor por condução (Silveira, 1991; Oliveira et al., 2003).

A Tabela 3 apresenta os valores médios da temperatura radial obtidas a partir da Eq. (2), para cada posição axial z e número de Reynolds $Re = 105$.

Tabela 3 – Valores médios da temperatura radial ao longo do leito para $Re = 105$.

$\bar{T}_r(r)$ (°C)	49,81	46,59	44,01	41,53	40,37	40,82	39,67	37,63	37,45	37,28
z (cm)	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0

A Figura 6 apresenta o resultado do ajuste do modelo exponencial de temperatura radial média em função da posição z , proposto pela Eq. (3) aos dados contidos na Tab. 3.

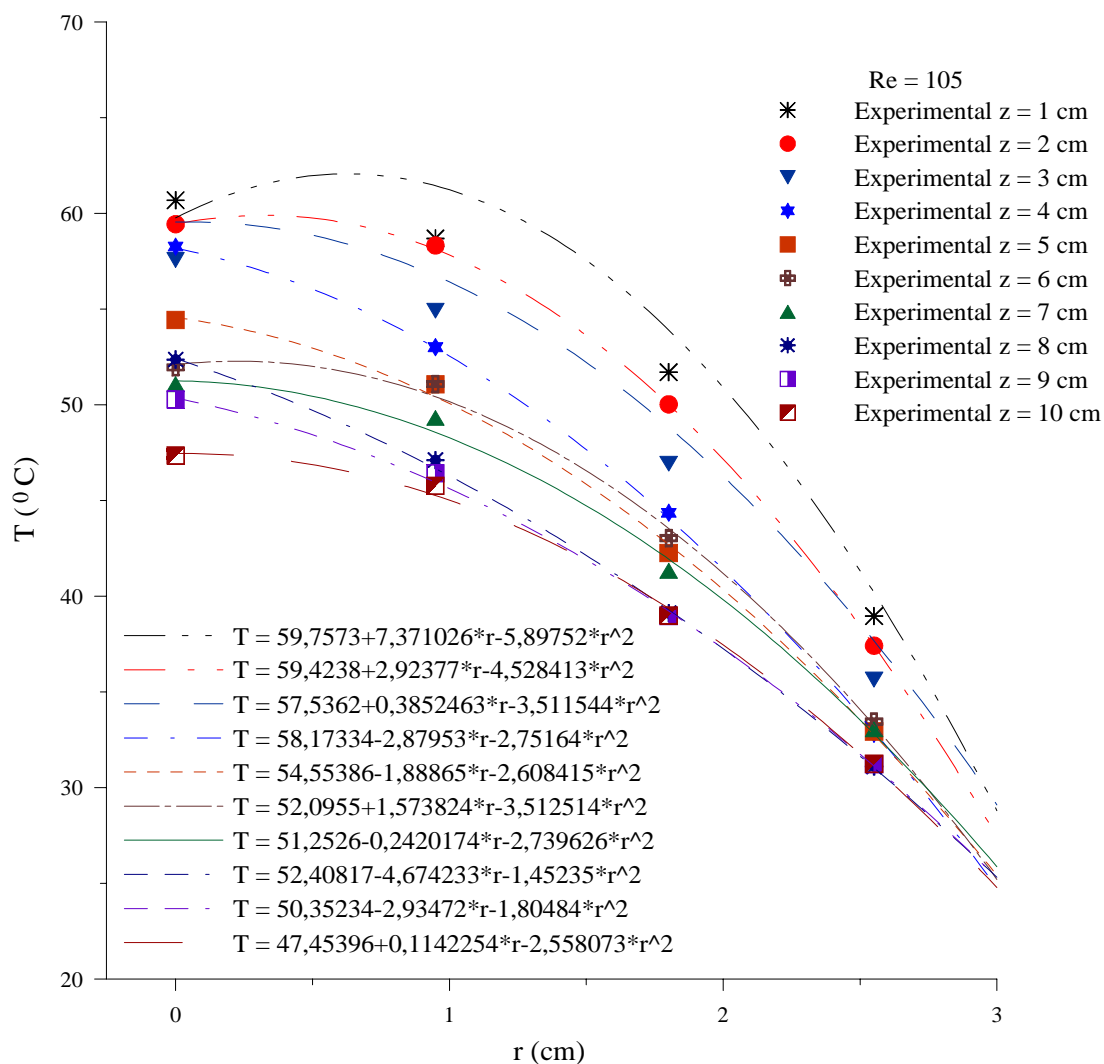


Figura 4 – Perfis radiais de temperatura no leito em varias alturas para Re = 105.

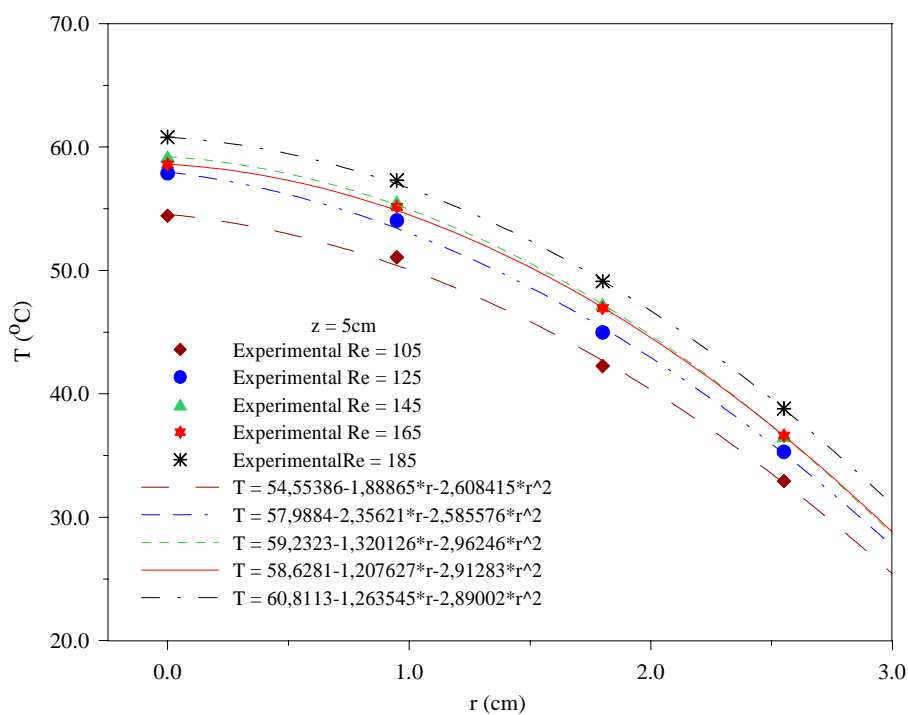


Figura 5 – Perfis radiais de temperatura no leito em vários Reynolds, para z = 5 cm.

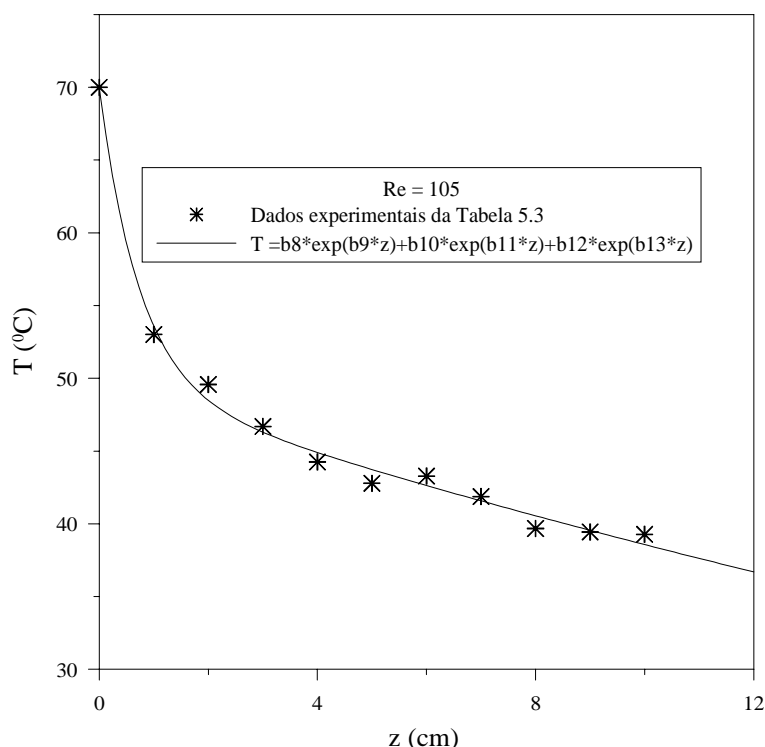


Figura 6 – Perfil de temperatura radial média ao longo de z, para Re = 105.

Observa-se na Figura 6 que a temperatura radial média diminui à medida que a altura do leito aumenta. Outra característica facilmente perceptível nesta figura e na Tab. 4, é que o modelo exponencial proposto neste trabalho, se ajusta bem aos dados da Tab. 3, uma vez que a dispersão entre o modelo e os dados é mínima o que pode ser constatado pelo valor do coeficiente de determinação obtido no ajuste.

Tabela 4 – Coeficientes da Eq. (3), ajustada aos dados da Tab. 3.

Parâmetros						
b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	R
63,85948	-1,34757	-43,4493	-1,34751	49,51471	-0,024984	0,99702

4. Conclusões

A partir da metodologia utilizada e dos resultados obtidos, pode-se concluir que: a) os resultados revelaram a importância da medida exata dos dados e da realização de experimentos replicados, para se filtrar as possíveis flutuações angulares e radiais de temperatura, mesmo em leitos composto de uma seção para o desenvolvimento do perfil de velocidades. Os experimentos replicados serviram para mostrar a reprodutibilidade do empacotamento do leito; b) ocorrem elevados gradientes radiais de temperatura numa mesma posição axial, mostrando que a mistura completa do gás no leito compactado não é alcançada. Isto sugere que os fluxos de gás através dos espaços vazios no leito ocorrem na forma de canais ou de feixes e que um dado feixe não interage com os adjacentes; c) a elevada variação radial de temperatura com a velocidade mássica superficial evidencia que, para leito compactado gás-sólido, a condutividade térmica efetiva desempenha mais o papel de um coeficiente de transferência de calor fluido-partícula do que uma verdadeira condutividade térmica de cada gás ou sólido.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido, e aos pesquisadores referenciados que com suas pesquisas, ajudaram no melhoramento deste trabalho.

6. Referências

Borkink, J.G.H. and Westerterp, K.R. ,1992, "Determination of Effective Heat Transport Coefficients for Wall-Cooled Packed Beds". Chemical Engineering Science, Vol.47: p. 2337.

- Borkink, J.G.H., Watering, C. G. and Westerterp, K.R., 1992, "The Statistical Character of Bed-scale Effective Heat Transport Coefficients for Packed Beds". *Transactions Industrial Chemical Engineering*, Vol.70A, p. 610.
- Bunnell, D.G. Irvin, H.B. Olson, R.W. and Smith, J.M., 1949, "Effective Thermal Conductivities in Gas-Solid Systems". *Industrial Engineering Chemical*, Vol. 41, p. 1977.
- Chalbi, M., Castro, J. A. Rodrigues, A. E. and Zoulaian, A. , 1987, "Heat Transfer in Fixed Bed Exchangers". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 34, p. 89.
- Dixon, A.G., 1985, "The length effect on packed bed effective heat transfer parameters", *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 31, P.163.
- Dixon, A.G., 1993, "Angular temperature variations in fixed beds of spheres". *Proceedings of the Nat. Heat Transfer Conf.*, Atlanta, p. 55.
- Dixon, A., 1996, "An improved equation for the overall heat transfer coefficient in packed beds", *Chemical Engineering and Processing*, Vol.35, pp.323-331.
- Dixon, A. G. and van Dongeren, H., 1998, "The influence of the tube and particle diameters at constant ratio on heat transfer in packed beds", *Chemical Engineering and Processing*. Vol.37, pp.23-32.
- Fedoseev, V. N., Shanin, O. I., 1986, "Statistical characteristics of convective exchange in a stationary granular bed", *Inz-Fiz, Zh.*, Vol. 51, 194.
- Freire, J.T., 1979, "Transferência de calor em meios porosos", Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 223p. (Tese Doutorado).
- Freiwald, M.G. and Paterson, W.R., 1992, "Accuracy of model predictions and reliability of experimental data for heat transfer in packed beds", *Chemical Engineering Science*, Vol.47, pp.1545-1560.
- Giudici, R., 1990, "Modelagem de reator de oxidação de etileno: estudo de parâmetros térmicos e estratégia de diluição de catalisador", São Paulo, Poli/USP, 183p. (Tese).
- Gunn, D.J. and Khalid, M., 1975, "Thermal dispersion and wall heat transfer in packed beds", *Chemical Engineering Science*, Vol. 30, p. 261.
- Legawiec, B. and Ziolkowski, D., 1997, "Axial thermal effective conductivity in packed-bed catalytic tubular reactors", *Chemical Engineering Science*, Vol.52, No.12, pp.1875-1882.
- Lerou, J.J. and Froment, G.F., 1977, "Velocity, temperature and conversion profiles in fixed bed catalytic reactors", *Chemical Engineering Science*, Vol.32, p. 853.
- Lima, A. G. B., 1999, "Fenômeno da difusão em sólidos esferoidais prolatos. Caso estudado: secagem de banana", Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 240p. (Tese Doutorado)
- Mc Greavy, C., Foumeny, E.A. and Javed, K.H., 1986, "Characterization of transport properties for fixed bed in terms of local bed structure and flow distribution", *Chemical Engineering Science*, Vol.41, pp.787-797.
- Nascimento, J.J.S., 2002, "Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de material cerâmico", Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 181p. (Tese Doutorado)
- Oliveira, L. G., Teruel, B. J. e Lima, A. G. B., 2003, "Transmisión de calor em um reator cilíndrico: Nueva solución analítica del modelo com três parâmetros", *Información Tecnológica*, Vol. 14, No. 1, pp. 145-151.
- Prasad, V. S. And Das, S. K., 2002, "An experimental and theoretical investigation into the hyperbolic nature of axial dispersion in packed beds", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp.3681-3688.
- Schouten, E. P. S. and Westerterp, K.R., 1996, "Angular temperature variations in a wall-cooled packed-bed reactor", *AICHE Journal*, Vol. 42, No. 9, p. 2635.
- Schwartz, C. E. and Smith, J.M., 1953, "Flow distribution in packed beds", *Industrial Chemical Engineering*, Vol.45, pp.1209-1218.
- Silveira, A.M., 1991, "Transferência de calor em meios porosos: análise do modelo a uma fase em leito fixo", Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 201p. (Tese Doutorado).
- Thoméo, J.C., 1990, "Análise experimental dos efeitos de entrada térmicos sobre os coeficientes de transferência de calor em leito fixo", São Carlos, PPG-EQ/UFSCar, 117p. (Dissertação Mestrado).
- Thoméo, J.C. e Freire, J.T., 2000, "Heat transfer in fixed bed: a model non-linearity approach", *Chemical Engineering Science*, Vol.55, pp.2329-2338.
- Wijngaarden, R. J. and Westerterp, K.R., 1992a., "Incorporation of statistical distributions of particle properties in chemical reactor design and operation: The cooled tubular reactor", *Chemical Engineering Science*, Vol. 47, p.3125.
- Wijngaarden, R. J. and Westerterp, K.R., 1992b, "The statistical character of packed beds heat transport properties", *Chemical Engineering Science*, Vol. 47, p. 3125.
- Winterberg, M. and Tsotsas, E., 2000, "Modelling of heat transport in beds packed with spherical particles for various bed geometries and/or thermal boundary conditions", *International Journal of Thermal Science*, Vol.39, pp.556-570.
- Ziolkowski, D. and Legawiec, B., 1987, "Remarks upon thermokinetic parameters of the one and two-dimensional mathematical models of heat transfer in tubular flow apparatus with a packed bed", *Chemical Engineering Process*, Vol.21, pp.65-76.
- Zotin, F.M.Z., 1985, "O efeito de parede em colunas de recheio". São Carlos, PPG-EQ/UFSCar, 85p. (Dissertação Mestrado).

EXPERIMENTAL STUDY OF STEADY-STATE HEAT TRANSFER IN CYLINDRICAL BED PACKED

Laercio Gomes de Oliveira

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil
laercio@deq.ufcg.edu.br

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil
gilson@dem.ufpb.br

Abstract. *The objective of this work is to present punctual measures (axial and radial) of temperature in a fixed bed reactor of 5,7 cm of internal diameter, compacted with cylindrical particles of zinc oxide (industrial catalyst) with 3,0 mm of average diameter. By the reactor (down to up) flows hot air with mass velocity between 0,63 and 1,11 kg.m⁻².s⁻¹. The air temperature in the entrance of the reactor is maintained constant and uniform in 70°C and the wall of the bed maintained to 22,5°C by water of refrigeration, that circulated for a cylindrical concentric tube that involved the reactor. The temperature measures were accomplished in four radial positions (0,0; 0,855; 1,710; 2,565 cm) along the ray of the tube and in ten axial positions of the compacted bed (1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0 cm). The temperature data collected were treated with statistic method. A mathematical model was proposed to describe the temperature of the fluid-particle system along the radial and axial position that agrees very well to the experimental data. It was verified that happened high temperature gradients in both axial and radial directions, even close to the center of the reactor, and that these temperature gradients suffered strong influence of the mass velocity of the fluid.*

Keywords: *temperature, fixed bed, thermocouples, radial position, experimental data.*