

ESTUDO DO EFEITO DO COEFICIENTE DE ESPECULARIDADE NA SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DE UM SECADOR DE LEITO DESLIZANTE COM ESCOAMENTO CONTRACORRENTE

A. A. PFEIFER^{1*}, M. A. S. BARROZO², L. D. SILVA¹

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química

²Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

*e-mail: adriene_br@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho buscou através da técnica da simulação fluidodinâmica estudar o comportamento das partículas (sementes de soja) dentro de um secador de leito deslizante, de forma a compreender melhor o efeito de parede e obter perfis de porosidade e velocidade ao longo do leito deslizante. Para tal, estudou-se o efeito da variação do coeficiente de especularidade em um secador de leito deslizante com escoamento contracorrente, com diâmetro de 0,081 m e comprimento de 0,528 m. Para o estudo do perfil de porosidade e velocidade, foram analisados os resultados das simulações para o tempo de 10 segundos, com velocidade de entrada do ar no secador igual a $1,42 \text{ m.s}^{-1}$, variando o coeficiente de especularidade de 0 a 1. Pode ser observado, para linhas de análise diversas (região superior da entrada de ar do secador, região central do leito e região da saída do ar de secagem) que há uma variação do perfil de porosidade com a aproximação da parede do secador; sendo que, com o aumento do coeficiente de especularidade o perfil se aproxima do perfil de porosidade sem este coeficiente e que o perfil se torna amortecido na região central do leito. Os resultados demonstraram que para a situação em que a célula encontra-se com sólidos em escoamento, as regiões próximas à parede do secador apresentam níveis superiores de velocidade, comprovando que há um perfil de porosidade e de velocidade do ar de secagem em um secador de leito deslizante e que este não é plano.

1 INTRODUÇÃO

A produção de soja tem grande expressão na economia e na cultura agrícola brasileira, visto seu alto teor de óleo e proteína que geram inúmeros produtos e subprodutos, além de que o seu cultivo gera postos de trabalho no campo, diversos benefícios à região produtora e a movimentação do mercado agroindustrial.

A manutenção da qualidade da soja para o replantio (sementes) é fator indispensável; sendo utilizado para isso o método de secagem. O processo de secagem pode ser

realizado de modo natural ou artificial. A secagem artificial é realizada em secadores, nos quais as sementes são submetidas a um fluxo de ar que pode ser aquecido ou não, o que promove a secagem num período de tempo relativamente curto. Entre os secadores industriais, o secador de leito deslizante tem apresentado algumas vantagens em relação aos demais, tais como: menor investimento e baixo consumo de energia, além de provocar menos injúrias mecânicas às sementes (BARROZO, 1995). As três configurações clássicas são definidas de acordo com a direção de escoamento do fluido em relação

ao sólido, podendo ser concorrentes, contracorrentes e cruzados.

Na tentativa de obter informações necessárias ao entendimento dos fenômenos que ocorrem no leito deslizante pode-se realizar a simulação fluidodinâmica deste sistema, que corresponde a uma técnica utilizada para estudar a dinâmica dos fluidos através de programas e metodologias de análise numérica. Os códigos de fluidodinâmica computacional comerciais (CFD, do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) são resolvidores de sistemas de equações que se baseiam nos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Estes códigos propiciam a geração de malhas computacionais, o controle e o acompanhamento da solução no decorrer das iterações.

A utilização desta metodologia, com utilização de simuladores visa fornecer informações para os modelos matemáticos constituídos de equações de balanço de massa e energia, nas quais a resolução destes sistemas baseia-se em hipóteses simplificadoras, como perfil plano de velocidade.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi estudar o efeito do coeficiente de especularidade (*specularity coefficient*) na simulação fluidodinâmica de um secador de leito deslizante com escoamento contracorrente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os tipos de secadores utilizados na secagem de sementes podem ser divididos de acordo com o leito, em secadores de leito fixo, fluidizado e secadores de leito deslizante. Sendo que todas as configurações trabalham com a circulação de ar. Entre os secadores industriais, os secadores do tipo de leito deslizante apresentam menor investimento, baixo consumo energético e

menores danos aos grãos e sementes (BARROZO, 1995).

Os secadores ainda são classificados em relação às direções dos escoamentos de sólidos e de fluido, sendo concorrentes, contracorrente e cruzados. Na secagem com escoamento contracorrente, as fases sólida e fluida, apresentam escoamentos paralelos, porém em sentidos opostos. Nesta configuração, o produto sai do secador com temperatura alta, próxima da temperatura de entrada do fluido. Entretanto, é a configuração em que se verificam as maiores taxas de redução no teor de umidade dos sólidos (VALENÇA e MASSARANI, 1996).

Nos estudos de simulação dos balanços de massa e energia do sistema de secagem de sementes de soja em leito deslizante presentes na literatura, observa-se poucos estudos referentes à análise dos perfis de porosidade e de velocidade dentro de um leito preenchido com o material a ser seco. São encontrados poucos trabalhos que relacionam o efeito de parede ao modelo matemático da secagem (BÉTTEGA, CORRÊA e FREIRE, 2007; LIRA, BARROZO e ASSIS, 2006, 2009; PFEIFER, 2011); porém autores como Vortmeyer e Schuster (1983), Fahien e Stankovich (1979), Souza (2001), Pfeifer (2011) entre outros, observaram que existem diferenças significativas nos valores das velocidades do ar ao longo do diâmetro do leito empacotado, desconsiderando a hipótese de que o perfil de velocidade é plano.

A Fluidodinâmica Computacional consiste na solução da equação geral de transporte empregando métodos numéricos, como o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Elementos Finitos, visando obter campos de velocidades, temperatura etc., possibilitando avaliar o transporte de uma propriedade de interesse. Tal ferramenta apresenta grande interesse do ponto de vista da Engenharia Química, pois a maioria dos processos desta área envolve mais de uma fase, o que acarreta uma dependência da

transferência de massa e reação química com a concentração local e as superfícies de transferência locais, interfaces gás/líquido, gás/partícula (PFEIFER, 2011).

Os códigos CFD comerciais são resolvidores de sistemas de equações que baseiam-se nos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Estes códigos oferecem recurso para a confecção da malha, e permite o acompanhamento e controle das iterações no decorrer da solução.

O coeficiente de especularidade descrito no *software Fluent®* (Fluent, 2006), é uma medida da fração de colisões que transferem movimento à parede e seu valor permanece entre zero e 1. Quando o valor é zero, esta condição equivale ao zero do coeficiente de cisalhamento da parede, mas quando é próximo da unidade, há uma grande quantidade de transferência de movimento (PFEIFER, 2011).

Diante do exposto, busca-se através da técnica de fluidodinâmica computacional estudar a dinâmica dos fluidos através de análises numéricas e observar o comportamento das partículas (sementes de soja) dentro do leito do secador de leito deslizante, de forma a compreender melhor o efeito de parede e obter perfis de porosidade e velocidade ao longo do leito deslizante.

3 METODOLOGIA

Para a simulação numérica, o secador foi dividido em pequenos volumes de controle, nos quais foram aplicadas as equações de transporte. A malha bidimensional, com aproximadamente 36.000 células quadrilaterais, criada para representar esse equipamento foi desenvolvida no *software Gambit®*, recurso que permite a criação de malhas computacionais com compatibilidade para o resolvidor numérico *Fluent® 14*.

As etapas de construção da malha foram elaboradas, conforme as etapas descritas por Duarte (2006):

- Construção da geometria do equipamento;
- Definição das faces e, ou volumes;
- Determinação de efeitos de camada limite ou outro tipo de refinamento desejado;
- Aplicação da malha no corpo geométrico construído e determinação do tipo e tamanho das células (quadrangular, tetraédrica, hexaédrica ou híbrida);
- Definição das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento;
- Determinação das fases que compõem o interior do equipamento - fluido (ar) e/ou sólido (sementes de soja);
- Conversão do arquivo contendo a malha em uma extensão reconhecida pelo *software Fluent® 14*.

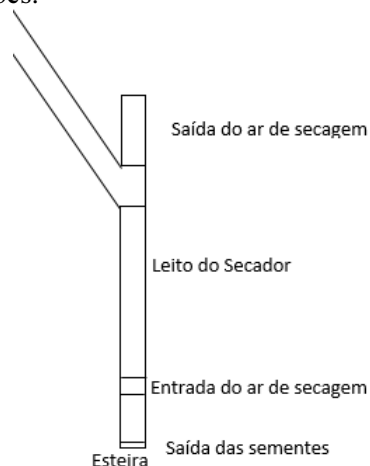
A figura 1 apresenta o esquema do secador de leito deslizante utilizado neste trabalho. A vazão de sólidos na saída das sementes é controlada por uma esteira, distante 0,006 m da saída do secador, com velocidade de $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. O diâmetro do secador é 0,081 m, com comprimento de 0,528 m. A escolha desta configuração foi feita a partir de dados de Souza (2011), que realizou estudos experimentais em uma unidade de secagem. Buscou-se representar o mesmo leito para fins de comparações.

A malha gerada foi, em seguida, caracterizada conforme as condições de operação do equipamento, os modelos, a solução numérica adotada e os critérios de convergência.

Neste trabalho foi utilizado o *software Fluent® 14* para as simulações, considerando regime transiente, aproximação do tipo Euler-Euler e aplicou-se o modelo Euleriano. O tratamento do acoplamento entre a pressão e a velocidade foi feito por meio do algoritmo *SIMPLE*. Para as interpolações da equação do movimento e das frações de volume foi utilizado o esquema *Upwind* de primeira

ordem. Utilizou-se um passo de tempo de $1,0 \cdot 10^{-6}$ s e convergência de $1,0 \cdot 10^{-4}$.

Figura 1 - Esquema do secador de leito deslizante com escoamento contracorrente com descrição das regiões.



As equações e parâmetros utilizados para a fase secundária estão descritos na Tabela 1.

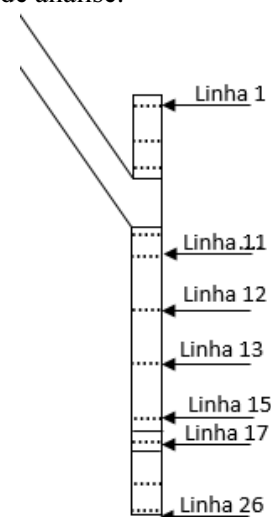
Tabela 1 – Parâmetros da fase secundária – sementes de soja.

Fase Secundária		
Diâmetro (m)	constante	0,006
Viscosidade granular ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Syamlal-obrien	-
Viscosidade granular bulk ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Lun-et-al	-
Viscosidade friccional ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Schaeffer	-
Ângulo de fricção interna ($^{\circ}$)	constante	30,000
Pressão friccional (Pa)	Based-ktgf	-
Módulo friccional (Pa)	Derived	-
Limite de empacotamento friccional	constante	0,61
Temperatura granular (m^2s^{-2})	Algebraic	-
Pressão dos sólidos (Pa)	Lun-et-al	-
Distribuição radial	Lun-et-al	-
Módulo de elasticidade (Pa)	Derived	-
Limite de empacotamento	constante	0,61

Fonte: PFEIFER (2011).

Para a análise dos resultados dos perfis de velocidade e porosidade do leito foram criadas linhas ao longo do comprimento do secador, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema do secador de leito deslizante com escoamento contracorrente com descrição das linhas de análise.



Para o estudo do perfil de porosidade e velocidade, foram analisados os resultados das simulações para o tempo de 10 segundos, com velocidade de entrada do ar no secador igual a $1,42 \text{ m.s}^{-1}$, variando o coeficiente de especularidade de 0 a 1.

Foi realizada a comparação entre os resultados de simulação neste trabalho e os dados experimentais obtidos por Souza (2011), no qual a autora coletou dados na saída do ar de secagem, para duas situações: célula de secagem vazia e preenchida por sólidos em escoamento; na qual a última situação foi objeto de comparação neste estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da simulação do teste para o perfil de porosidade e de velocidade, variando o coeficiente de especularidade, são apresentados nas Figuras 3 a 6 para algumas

posições de análise ao longo do comprimento do secador.

As Figuras 3 e 4 apresentam os perfis de porosidade das linhas 13 e 11, respectivamente, para o teste com velocidade do ar igual a $1,42 \text{ m.s}^{-1}$. Pode ser observado, que para a linha de análise 13, que se encontra na região superior da entrada de ar do secador, há uma variação do perfil de porosidade com a aproximação da parede do secador.

Verifica-se também, um efeito relacionado ao coeficiente de especularidade;

para a simulação sem o coeficiente ($=0$), há um efeito mais acentuado no perfil de porosidade, apesar da variação ser da ordem de 0,01 (1,67%); e, que, com o aumento do coeficiente de especularidade o perfil se aproxima do perfil de porosidade sem este coeficiente; o perfil se torna amortecido na região central do leito.

Para a linha 11, que se encontra próxima a entrada de soja no secador observa-se efeito similar aos da linha 13, porém com menor variação de acordo com o coeficiente de especularidade.

Figura 3 - Perfis de porosidade da linha 13 (Coeficiente de especularidade: \diamond 0,0; \square 0,1; Δ 0,2; \blacksquare 0,4; * 0,6; \bullet 0,8; \blacktriangle 1,0).

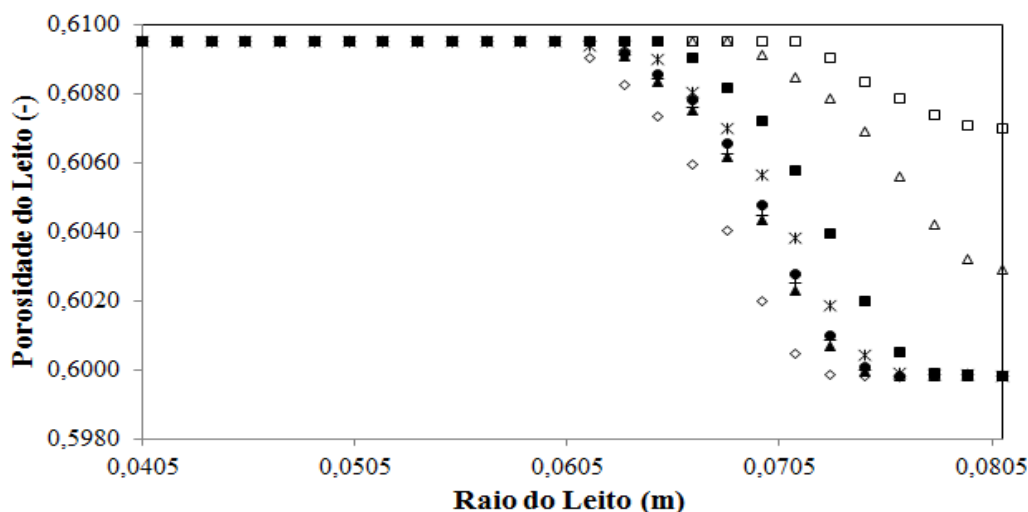
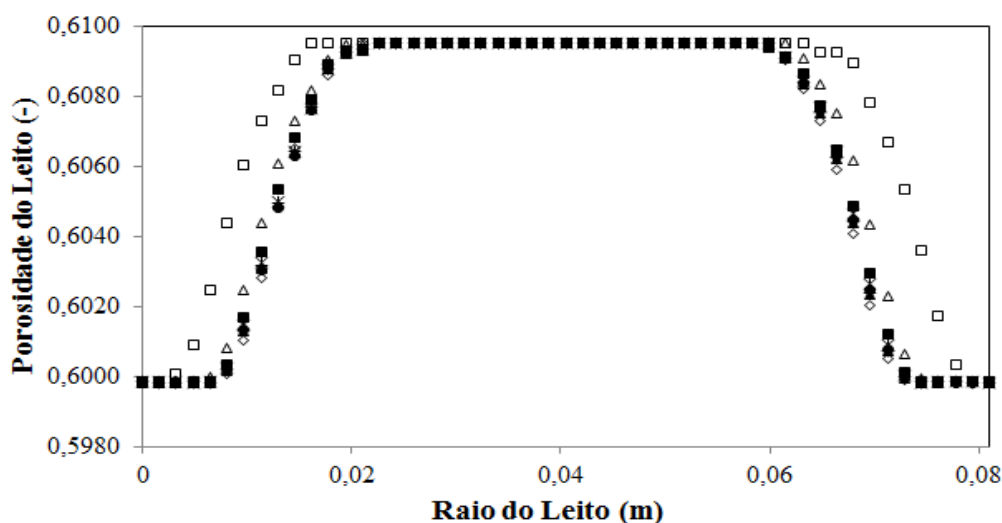


Figura 4 – Perfis de porosidade da linha 11 (Coeficiente de especularidade: \diamond 0,0; \square 0,1; Δ 0,2; \blacksquare 0,4; * 0,6; \bullet 0,8; \blacktriangle 1,0).



As Figuras 5 e 6 apresentam, os perfis de velocidade do ar para as linhas 13 e 2, respectivamente, com velocidade do ar de entrada igual a $1,42 \text{ m.s}^{-1}$. Na Figura 5, observa-se a mesma variação em relação ao coeficiente de especularidade, conforme discutido anteriormente. Na figura 6, de

acordo com a linha de análise 2, próxima à saída do secador, o perfil de velocidade com coeficiente de especularidade igual a 0,6 apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. Esta linha de análise se assemelha à condição de coleta dos dados experimentais feitos por Souza (2001).

Figura 5 – Perfis de velocidade do ar da linha 13 (Coeficiente de especularidade: \diamond 0,0; \square 0,1; Δ 0,2; \blacksquare 0,4; \ast 0,6; \bullet 0,8; \blacktriangle 1,0).

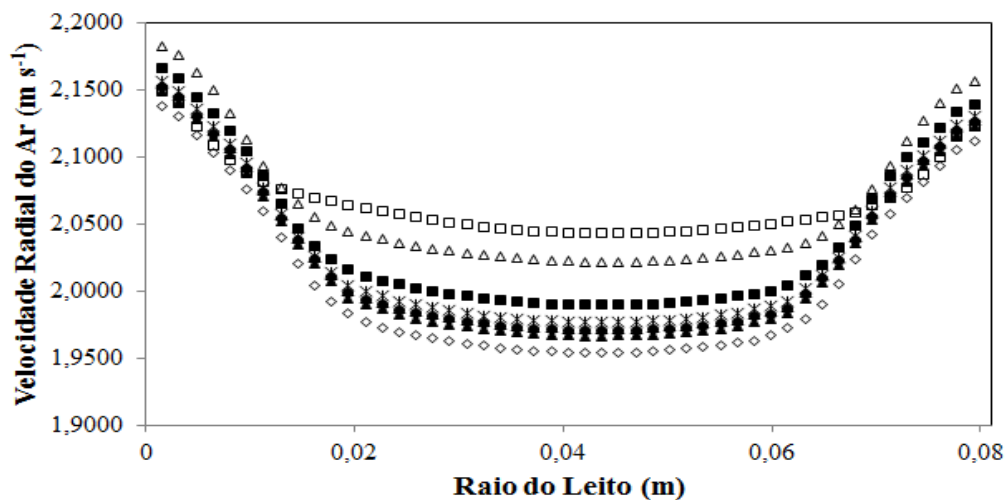
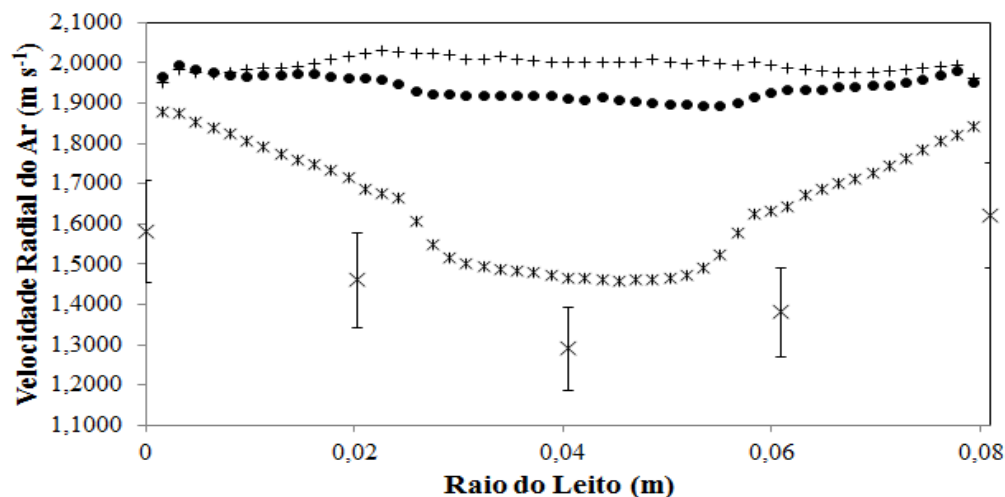


Figura 6 – Perfis de velocidade do ar da linha 2 (Coeficiente de especularidade: \ast 0,6; \bullet 0,8; $+$ 0,9; \times Experimental).



A variação do coeficiente de especularidade, que é uma medida da fração de colisões que transferem movimento à parede, influenciou nos perfis de porosidade e de velocidade, contribuindo para uma melhor adequação aos dados experimentais nos testes realizados. Os resultados demonstraram que

para a situação em que a célula encontra-se com sólidos em escoamento, as regiões próximas à parede do secador apresentam níveis superiores de velocidade.

Os perfis apresentados para o tempo de simulação de 10 s condizem com a observação de que os valores atingiram o

estado estacionário, sendo portanto, correto comparar os dados experimentais com os dados aqui simulados. Desta forma, foi observado o fato de que há uma variação no perfil de porosidade e velocidade do ar na secagem em leito deslizante.

5 CONCLUSÃO

A fluidodinâmica computacional mostrou-se de grande ajuda para a verificação do efeito de parede nos perfis de porosidade e velocidade do fluido, confirmando que a suposição de perfil plano de velocidade da fase fluida, no modelo a duas fases, não é válida na velocidade do ar analisada.

REFERÊNCIAS

- BARROZO, M. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamento**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995. P. 163.
- BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. Velocity profile in fixed beds: a study on the representativeness of the experimental measurement of downstream flow characteristics. **Drying Technology Journal**, v. 25, n. 7, p. 1175–1183, 2007.
- DUARTE, C. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- FAHIEN, R.; STANKOVICH, I. An equation for the velocity profile in packed columns. **Chemical Engineering Science**, v. 34, p. 1350–1354, 1979.
- FLUENT. **User's guide**. 2006.
- LIRA, T.; BARROZO, M.; ASSIS, A. Concurrent moving bed dryer modelling: Sensitivity of physicochemical parameters and influence of air velocity profiles. **Applied Thermal Eng.**, v. 29, p. 892–897, 2009.
- LIRA, T.; BARROZO, M.; ASSIS, A. Drying of soybean seeds in a countercurrent moving bed: The effect of the radial air profile. **15th International Drying Symposium – IDS**, 2006.
- PFEIFER, A. A. **Análise da Modelagem, Simulação e Otimização da Secagem em Leito Deslizante com Escoamentos Paralelos**. Tese (Doutorado) — UFU, Universidade Federal de Uberlândia, 2011. Uberlândia - MG.
- SOUZA, A. **Estudo fluidodinâmico e de transferência de calor e massa em leito deslizante contracorrente**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- VALENÇA, G.; MASSARANI, G. Avaliação de secadores em fluxo concorrentes e contracorrentes. **Anais do XXIV ENEMP**, v. 1, p. 225–230, 1996. Uberlândia, MG.
- VORTMEYER, D.; SCHUSTER, J. Evaluation of steady flow profiles in rectangular and circular packed beds by a variational method. **Chemical Engineering Science**, v. 38, p. 1691–1699, 1983.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pela bolsa de Iniciação Científica.