

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TAMBOR HORIZONTAL PARCIALMENTE PREENCHIDO COM PARTÍCULAS ORGÂNICAS

V. F. BERTUCCI<sup>1</sup>, É. F. R. TADA<sup>1</sup> e J. C. THOMÉO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos  
E-mail para contato: erikartada@gmail.com

**RESUMO** – Um modelo unidimensional a uma fase foi utilizado para simular a transferência de calor em um tambor horizontal parcialmente preenchido por partículas orgânicas. Experimentos de transferência de calor foram realizados neste tambor horizontal empregando-se partículas de bagaço de cana com duas granulometrias distintas e farelo de trigo em grau de enchimento 0,4 para todos os casos. As simulações indicaram que, para um mesmo intervalo de tempo, o leito de bagaço de cana com maior granulometria apresentou maiores taxas de transferências de calor, seguido do outro leito de bagaço de cana com diferente granulometria, e do de farelo de trigo, justificado pelos valores de difusividade térmica. Boa concordância entre os dados experimentais e simulados foi verificada para todos os leitos empregados, evidenciando a adequação do modelo.

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem e a simulação de processos apresentam-se como uma ferramenta interessante em estudos de ampliação de escala. Além de demandar menor trabalho experimental e menores investimentos e tempo para aquisição de respostas, os dados obtidos por simulações podem ser considerados confiáveis se o modelo engloba os mecanismos de interesse envolvidos (Chen, 2013). Entretanto, obter um modelo confiável para representação de fenômenos em leitos orgânicos torna-se difícil pela natureza das partículas e pela tendência desconhecida de transferências a nível microscópico.

Especialmente em processos envolvendo leitos orgânicos, a dificuldade mencionada pode ser contornada pela aplicação de modelos a uma fase, também conhecidos como modelos pseudo-homogêneos. Este tipo de modelo considera a existência de um leito poroso, porém o interpreta como um sólido que detém informações das fases do leito que o constitui através de parâmetros globais; portanto, apenas um equacionamento é suficiente e os parâmetros individuais das fases estão contidos nos parâmetros do leito. Por fornecer uma visão mais simplificada, este tipo de modelo não possibilita a visualização de fenômenos em nível de partículas, como é possível através do emprego de modelos de duas fases. Estes consideram a existência individual das fases do meio poroso e a interação entre elas; portanto, são mais complexos e requerem de um maior número de parâmetros (Thoméo; Freire, 2009). A depender do nível de dificuldade de um processo envolvendo partículas orgânicas, a confirmação da

aplicação de modelos pode ser realizada inicialmente através do emprego de partículas inertes de geometria bem definida (Tada et al., 2017).

Atualmente, muitos processos envolvem a aplicação de partículas de geometrias e tamanhos irregulares. Em especial, processos de fermentação em estado sólido (FES) têm utilizado resíduos agroindustriais para o cultivo de microrganismos e a produção de compostos de alto valor agregado (Pandey et al., 1999). O aumento de escala de biorreatores para FES tem sido dificultado devido aos gradientes de temperatura e umidade verificados no leito ao longo do processo, o que diminui a produtividade e inviabiliza o aumento da escala (Durand, 2003). Modelos matemáticos têm sido utilizados na tentativa de prever as distribuições de umidade e temperatura durante processos FES (Fanaei e Vaziri, 2009; Wang et al., 2010; Casciotori et al., 2016), porém a complexidade das reações bioquímicas prejudica, muitas vezes, a confiabilidade de resultados obtidos através das predições dos modelos.

Neste contexto, o presente tem como objetivo a utilização de um modelo de uma fase disponível na literatura para predição de perfis de temperatura em leitos de partículas orgânicas colocados em tambor horizontal parcialmente preenchido, inicialmente construído para fermentação em estado sólido, e a verificação da aplicação do modelo através de dados experimentais.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Partículas**

Foram empregados bagaço de cana de açúcar e farelo de trigo. As fibras de cana de açúcar foram levadas à secagem em estufa com circulação de ar a 60°C e separadas em fibras com tamanho de partícula entre 0,84 e 45 mm e partículas maiores que 45 mm. O farelo de trigo foi adquirido em comércio local e peneirado, obtendo-se partículas com granulometria inferior a 0,84 mm. No momento da utilização, as fibras de bagaço de cana e o farelo de trigo apresentaram umidade média de 9,4 e 7,2% (b.u), respectivamente.

### **2.2. Tambor horizontal e ensaios experimentais**

Os ensaios de transferência de calor foram conduzidos em um tambor horizontal construído em alumínio com aproximadamente 10 cm de diâmetro interno e 20 cm de comprimento. Este tambor possui camisa externa por onde circula água aquecida em temperatura mantida constante através de um banho termostático e um sistema de engrenagens que possibilita a sua rotação, quando conveniente.

Anterior a cada ensaio, água a 45°C circulou a camisa de refrigeração do tambor até que sua parede interna registrasse temperaturas próximas de 45°C. Neste momento, a carga de partículas em temperatura ambiente foi introduzida no tambor, e este foi rotacionado até que se observasse constante o ângulo de repouso dinâmico, após o que o tambor foi mantido estático e dados de temperatura foram coletados através de termopares tipo T instalados em posições conhecidas do leito. Os sinais provenientes dos termopares foram convertidos em dados de temperatura e coletados por um sistema COMPAQ-DAQ® (National Instruments, Austin, USA)

gerenciado por uma rotina do software *LabView*<sup>®</sup> (National Instruments, Austin, USA). Os experimentos foram realizados em grau de enchimento 0.4.

## 2.2. Modelo matemático

O modelo pseudo-homogêneo unidimensional proposto por Tada et al. (2017) para transferência de calor em tambor horizontal parcialmente preenchido foi utilizado para as simulações. O referido modelo está apresentado na Equação 1.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_0 \left[ \frac{1}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (1)$$

onde  $\rho$ ,  $C_p$  e  $k_0$  são propriedades do leito, referindo-se a densidade, calor específico e condutividade térmica efetiva na estagnação, respectivamente;  $r$  é a posição radial,  $T$  é a temperatura e  $t$  é o tempo. O modelo encontra-se implementado em linguagem *MatLab*<sup>®</sup> (MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA) e foi solucionado empregando-se o método das diferenças finitas.

Para solução, foram utilizadas as condições iniciais e de contorno apresentadas nas Equações 2 a 4:

$$t = 0 \quad T = T_0 \quad (2)$$

$$r = r_0 \quad k_0 \frac{\partial T}{\partial r} = h_s (T_{ar} - T) \quad (3)$$

$$r = R \quad T = T_p \quad (4)$$

onde  $T_0$  é a temperatura inicial do leito,  $r_0$  é a superfície,  $h_s$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar,  $R$  é a posição radial na interface leito-parede e  $T_p$  é a temperatura da parede do tambor.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores utilizados para os parâmetros requeridos pelo modelo e as variáveis de operação, bem como as fontes de onde foram extraídos e/ou método de cálculo.

Tabela 1 – Parâmetros requeridos para solução do modelo e variáveis operacionais.

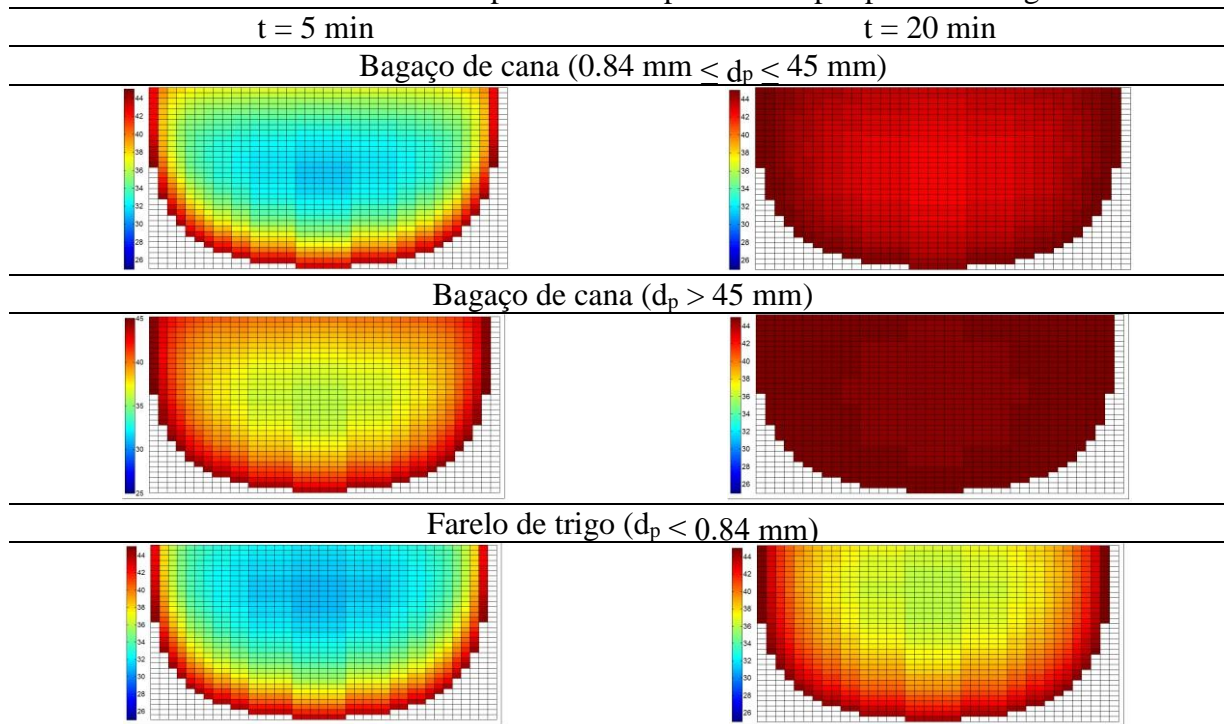
Parâmetro	Descrição	Valor	Fonte
$\rho_{BC}$	Densidade do leito de bagaço de cana	595 kg m <sup>-3</sup>	Casciadori et al. (2014)
$\rho_{FT}$	Densidade do leito de farelo de trigo	1018 kg m <sup>-3</sup>	
$C_{pBC}$	Calor específico do leito de bagaço de cana	1760 J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	Calculado segundo relação proposta por Goekeden et al. (1998)
$C_{pFT}$	Calor específico do leito de farelo de trigo	1700 J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	

$k_{0,BC}$	Condutividade térmica efetiva na estagnação de leito de bagaço de cana	$0.065 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Casciadori et al. (2013)
$k_{0,FT}$	Condutividade térmica efetiva na estagnação de leito de farelo de trigo	$0.213 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	
$h_s$	Coefficiente convectivo entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço	$2.2 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Calculado segundo relação disponível em Kast; Klan (2010)
$T_{ar}$	Temperatura do ar	$45^{\circ}\text{C}$	-
$T_P$	Temperatura da parede	$45^{\circ}\text{C}$	-
R	Raio do tambor	0.10 m	-

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 estão apresentados os resultados para simulação de transferência de calor em leito composto por fibras de bagaço de cana de diferentes tamanhos e por farelo de trigo para os tempos 5 e 20 minutos de simulação. Nesta figura, a sigla  $d_p$  refere-se à dimensão de referência das partículas.

Figuras 1 – Perfis espaciais de temperatura obtidos através de simulação de transferência de calor em tambor horizontal parcialmente preenchido por partículas orgânicas.



As simulações indicam que maiores taxas de transferência de calor foram verificadas no sistema com leito de partículas de bagaço de cana com  $d_p > 45 \text{ mm}$ . Isto porque, apesar da condutividade térmica efetiva do leito apresentar-se maior para o leito de farelo de trigo, o modelo considera a difusividade térmica efetiva ( $\alpha_T$ ), obtida pela razão  $k_0/(\rho C_p)$ , que representa a facilidade com que o calor atravessa um determinado espaço em um período de tempo. Uma vez que os leitos analisados são porosos, a  $\alpha_T$  do ar também deve ser considerada na análise, e

este valor é 100 vezes maior que o mesmo para as partículas orgânicas. Portanto, neste caso, a  $\alpha_T$  efetiva será maior em leitos mais porosos. Na Tabela 2 estão apresentados os valores para  $\alpha_T$  das partículas orgânicas e do ar, que justificam os perfis espaciais de temperatura obtidos nas simulações apresentadas na Figura 1. As propriedades das partículas foram extraídas de Casciatori et al. (2013), Casciatori et al. (2014) e Casciatori et al. (2016).

Na Figura 2 estão apresentadas as verificações do modelo empregado para transferência de calor em tambor horizontal parcialmente preenchido com partículas orgânicas em diferentes posições do leito. A boa concordância entre os dados experimentais evidencia a adequação do modelo e das condições de solução propostos.

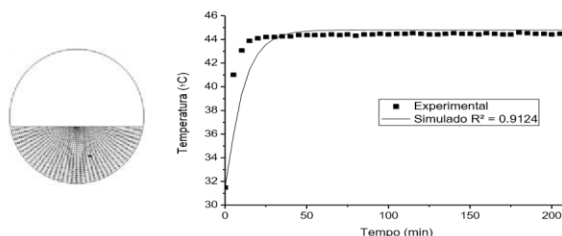
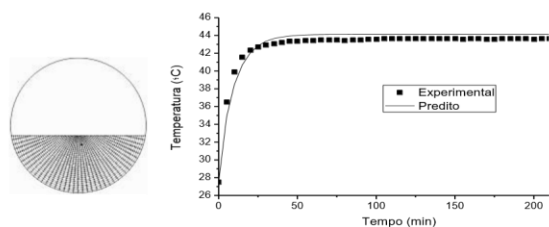
Tabela 2 – Difusividade térmica efetiva dos leitos sólidos e do ar.

Partículas	Difusividade térmica efetiva, $\alpha_T$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
Bagaço de cana ( $0.84 \text{ mm} \leq d_p \leq 45 \text{ mm}$ )	$7.1 \times 10^{-7}$
Bagaço de cana ( $d_p > 45 \text{ mm}$ )	
Farelo de trigo ( $d_p \leq 0.84 \text{ mm}$ )	
Fluido	Difusividade térmica efetiva, $\alpha_T$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
Ar	$2.04 \times 10^{-5}$

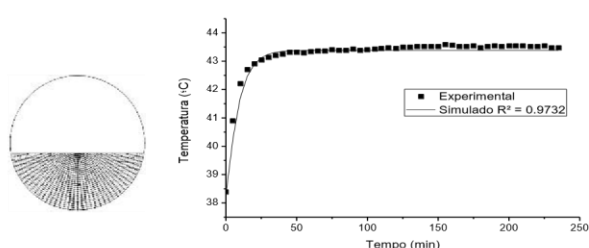
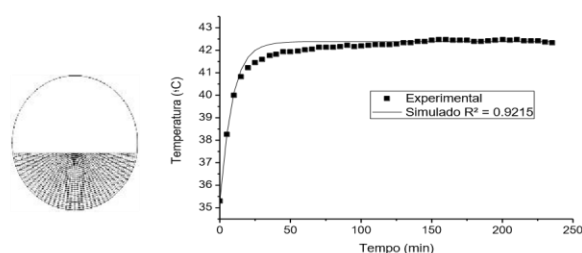
Figura 2 – Perfis de temperatura temporais simulados e experimentais para os diferentes leitos de partículas orgânicas.



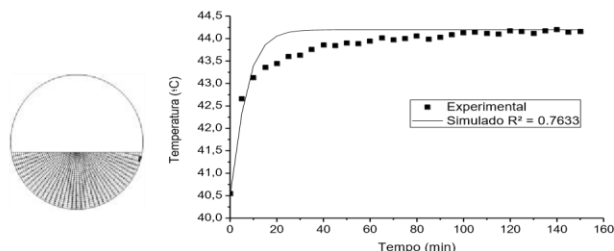
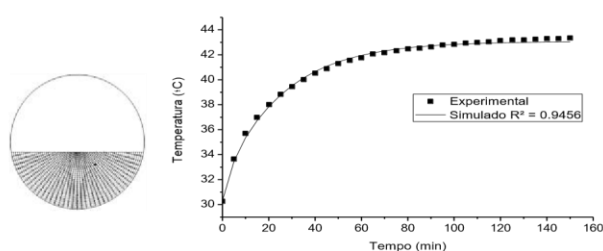
**Bagaço de cana ( $0.84 \text{ mm} \leq d_p \leq 45 \text{ mm}$ )**



**Bagaço de cana ( $d_p > 45 \text{ mm}$ )**



**Farelo de trigo ( $d_p \leq 0.84 \text{ mm}$ )**



## 4. CONCLUSÕES

As simulações evidenciaram que as taxas de transferência de calor são maiores para leitos de bagaço de cana com dimensão de referência de partículas maior que 45 mm, seguidos de leitos de bagaço de cana com partículas entre 0.84 e 45 mm e leitos de farelo de trigo ( $< 0.84 \text{ mm}$ ). Apesar de estes resultados contestarem a grandeza das condutividades térmicas efetivas destes leitos, os resultados obedeceram à grandeza da difusividade térmica efetiva. Obteve-se boa concordância entre os dados experimentais e os dados simulados, o que demonstra a adequação do modelo e das condições de contorno empregadas.

## 5. REFERÊNCIAS

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; LOPES, K. C. M.; SOUZA, A. G. de; THOMÉO, J. C. Stagnant effective thermal conductivity of agro-industrial residues for solid-state fermentation. *Intern. J. of Food Properties*, v. 16, p. 1578-1593, 2013.

- CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; TABOGA, S. R.; CASCIATORI, P. A.; THOMÉO, J. C. Structural properties of beds packed with agro-industrial solid byproducts applicable for solid-state fermentation: Experimental data and effects on process performance. *Chem. Eng. J.*, v. 255, p.214-224, 2014.
- CASCIATORI, F. P.; BÜCK, A.; THOMÉO, J. C.; TSOTSAS, E. Two-phase and two-dimensional model describing heat and water transfer during solid-state fermentation within a packed bed bioreactor. *Chem. Eng. J.*, v. 287, p. 103-116, 2016.
- CHEN, H. Principles and Regulations of Modern Solid-State Fermentation. In: Modern solid state fermentation: theory and practice. Springer, 323 p. 2013.
- DURAND, A. Bioreactor designs for solid state fermentation. *Biochem. Eng. J.*, v. 13, p. 113-125, 2003.
- FANAEI, M. A.; VAZIRI, B. M. Modeling of temperature gradients in packed-bed solidstate bioreactors. *Chem. Eng. Processing: Process Intensification*, v. 48, p. 446-451, 2009.
- GOEDEKEN, D. L.; SHAH, K. K.; TONG, C. H. True thermal conductivity determination of moist porous food materials at elevated temperatures. *J. Food Scienc.*, v. 63, p. 1062-1063, 1998.
- KAST, W.; KLAN, H. Heat transfer by free convection: external flows, *VDI Heat Atlas*, Springer Verlag, Berlin (2010).
- PANDEY, A.; SELVAKUMAR, P.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P. Solid state fermentation for the production of industrial enzymes. *Current Scienc.*, v. 77, p. 149-162, 1999.
- TADA, É. F. R.; BÜCK, A.; CASCIATORI, F. P.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Investigation of heat transfer in partially filled horizontal drums. *Chem. Eng. Journal*, v. 316, p. 988-1003, 2017.
- THOMÉO, J. C.; FREIRE, J. T. Transferência de calor em leitos fixos: avanços a partir da década de 90. In: Fenômenos de transporte em sistemas particulados. J. T. Freire, Ed. Suprema, 2009.
- WANG, E. Q.; LI, S. Z.; TAO, L.; GENG, X.; LI, T. C. Modeling of rotating drum bioreactor for anaerobic solid-state fermentation. *Appl. Energy*, v. 87, p. 2839-2845, 2010.