



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de São José do Rio Preto

Érika Fernanda Rezendes Tada

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal:
Modelagem, simulação e experimentação

São José do Rio Preto
2021

Érika Fernanda Rezendes Tada

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal:

Modelagem, simulação e experimentação

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadoras: CAPES – Proc. 33004153070P-2 e 88887.161386/2017-00; FAPESP – Proc. 2014/23453-3

Orientador: Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
Coorientador: Prof. Dr.-Ing. Andreas Bück
Prof^a. Dr^a. Fernanda P. Casciatori

São José do Rio Preto
2021

T121c

Tada, Érika Fernanda Rezendes

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal: :
modelagem, simulação e experimentação / Érika Fernanda Rezendes
Tada. -- São José do Rio Preto, 2021
237 f. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto
de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: João Cláudio Thoméo

Coorientador: Andreas Bück

1. Modelos matemáticos. 2. Tambor. 3. Calor Transmissão. 4.
Massa Transferência. 5. Fermentação em estado sólido. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Érika Fernanda Rezendes Tada

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal:

Modelagem, simulação e experimentação

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadoras: CAPES – Proc. 33004153070P-2 e Proc. 88887.161386/2017-00; FAPESP – Proc. 2014/23453-3

Comissão Examinadora

Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto
Orientador

Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira
UFSCar – São Carlos

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
UFU – Uberlândia

Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto

Prof. Dr. Roger Darros Barbosa
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto

São José do Rio Preto
16 de abril de 2020

Dedicatória

*Ao meu orientador, João Cláudio Thoméo.
À minha querida sobrinha, Helena.*

Dedico.

Érika F. Rezendes Tada

AGRADECIMENTOS

A Deus, Criador de todas as coisas, pela minha saúde, pelas boas oportunidades que apareceram no meu caminho, por preenchê-lo com pessoas de bom coração e por cuidar daqueles que eu amo.

À minha família pelo contínuo apoio e por sonharem sonhos que pareciam tão distantes junto comigo. Em especial, agradeço imensamente ao meu irmão, que me inspira e me impulsiona sempre a ser alguém melhor.

Ao Prof. Dr. João Cláudio Thoméo, orientador desta tese, pela amizade, companheirismo e cuidado mesmo quando longe; por me aceitar em seu grupo de pesquisa há alguns anos, por confiar no meu trabalho e por ser exatamente o que se espera de um orientador. Como há quatro anos, continuo a desejar que desfrute de muita saúde para que mais pessoas possam ter a feliz sorte de te encontrar pelo caminho, assim como eu tive.

Ao Prof. Dr.-Ing. Andreas Bück, coorientador desta tese, por aceitar minha estadia durante um ano junto ao seu grupo de pesquisa na Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, e também pelas conversas, por transmitir tranquilidade e pelos incansáveis esclarecimentos.

À Prof^a. Dr^a. Fernanda Perpétua Casciotori, também coorientadora desta tese, pela amizade e por transmitir tranquilidade em muitos momentos de tensão.

Ao Prof. Dr.-Ing. Evangelos Tsotsas, pela ajuda e cooperação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da Comissão Examinadora do Exame Geral de Qualificação desta Tese, Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro e Prof^a. Dr^a. Cristiane Sanchez Farinas, pelas sugestões e valiosas contribuições para as etapas finais deste trabalho. Em especial, agradeço carinhosamente à Prof^a. Maria Aparecida Mauro pela amável ajuda e pacientes esclarecimentos.

Aos membros desta banca, Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira, Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro, Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo e Prof. Dr. Roger Darros

Agradecimentos

Barbosa, por aceitarem o convite e enriquecerem este trabalho com suas valiosas sugestões.

Àqueles que passaram pelo Laboratório de Engenharia de Processos e Biorreatores durante os últimos quatro anos, agradeço pela ajuda com experimentos e interpretação de dados e também pelos momentos de descontração. Em especial, externo especial gratidão a Carol Perez, Pri, Lucas, Mari, Rê, Gi e Giu pela amizade e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Às amigas que pude conquistar durante o tempo de estágio na Alemanha e cultivo carinhosamente até hoje. Em especial, agradeço a Pepe, Luís, Lucas, Mig, Loreleyn, Inna, Joshua e Dennis pela atenção e cuidado.

Carinhosamente, agradeço ao André pelo carinho, sinceridade, cuidado e amável companhia durante os últimos meses.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo incentivo financeiro ao Laboratório de Engenharia de Processos e Biorreatores (Proc. 2014/23453-3).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, à qual agradeço pelo incentivo financeiro durante os três anos no Brasil (Proc. 33004153070P-2) e durante um ano na Alemanha (Proc. 88887.161386/2017-00).



RESUMO

Esta tese apresenta um estudo sobre modelagem a uma fase de leitos estáticos em tambores horizontais construídos para cultivo sólido. Para tanto, balanços de massa foram propostos para leitos isotérmicos sem reação, seguidos de balanços de calor e massa para três dimensões de tambor: 10, 20 e 31 cm de diâmetro e 20, 40 e 74 cm de comprimento, respectivamente. Vazões de ar seco de 5 e 50 L/min foram assumidas para leitos compostos por sílica gel e por fibras de bagaço de cana. Balanços para a fase gasosa escoante foram também propostos e solucionados simultaneamente aos balanços para o leito. Propriedades efetivas de transporte foram determinadas experimentalmente e/ou calculadas. A convergência entre a difusividade efetiva de água em leito de bagaço de cana sugere sua representação preferencialmente através da dependência da umidade de partículas em ensaios com duração superior a dez horas. Para ensaios relativamente curtos, a dependência do parâmetro em relação à posição radial pode ser suficiente. Uma análise de Número de Biot modificado foi apresentada para transporte de massa adotando-se um fator de correção referente à posição no leito. Em sistemas isotérmicos, o transporte de massa é governado pela resistência interna a 50 L/min principalmente nos primeiros instantes de ensaio, evoluindo para resistências equivalentes ao longo do tempo; a resistência externa ao transporte de massa é predominante a 5 L/min. Balanços de calor e massa requereram as condutividades térmicas efetivas dos leitos de partículas, extraída da literatura para o leito de bagaço de cana e determinada experimentalmente com dependência explícita da temperatura e da umidade das partículas para o leito de sílica gel. Correlações foram utilizadas para estimativa das condutividades térmicas efetivas, obtendo-se bons resultados para o leito de sílica e resultados confiáveis apenas para uma faixa de umidade de partículas em leito de bagaço de cana, correspondente a até 0,43 kg/kg de sólido seco. Balanços de massa e energia para a fase gasosa no sobre espaço foram acoplados à solução dos balanços para o leito de partículas. Dentro dos três tambores, a temperatura do gás no sobre espaço pode ser assumida constante a 45 °C, o gás não deixa os tambores em condição de saturação e perfis axiais de umidade são desenvolvidos. Quanto à transferência de calor em sistemas não isotérmicos, a parede do tambor é a principal fronteira através da qual o calor é transferido e as resistências internas ao transporte de calor são desprezíveis em tambor de 10 cm de diâmetro. O número de Biot de massa modificado foi calculado

também para os sistemas não-isotérmicos e acusou ausência de resistências externas somente em leito de sílica gel para todos os tamanhos de tambores em vazão de 50 L/min. Nos demais leitos, tambores e vazões, resistências equivalentes governaram o transporte de massa. Os balanços de calor e massa foram adicionados de um termo que representa a geração de calor pelo microrganismo e foram validados utilizando-se a cinética de liberação de gases pelo fungo *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em leito de bagaço de cana e farelo de trigo com suprimento de ar a 5 L/min e 96 e 75 % de umidade relativa, cujos picos de temperatura foram observados em 28 e 42 horas, respectivamente. Durante o cultivo, o controle de temperatura foi eficiente apenas em tambor com 10 cm de diâmetro, com elevações de temperatura de aproximadamente 3,5 e 7 °C em tambores com 20 e 31 cm de diâmetro, respectivamente. Em tambor médio, mais intensa atividade metabólica foi observada quando gás foi inserido a 96 % de UR. As atividades enzimáticas de endoglucanase não foram afetadas pelos aumentos de temperatura, mas pelo ressecamento do leito. A temperatura do gás se aproximou da temperatura da superfície em todos os tambores e calor permaneceu acumulado no leito em tambor de 31 cm de diâmetro ainda ao final do cultivo. A boa concordância entre os perfis experimentais e fornecidos pelos modelos afirmam a sua aplicabilidade na predição de variáveis de interesse e podem ser empregados em estudos de aumento de escala de biorreatores para cultivo sólido.

Palavras-chave: Modelagem e simulação. Tambor horizontal. Transferência de calor. Transferência de massa. Bagaço de cana. Cultivo em estado sólido.

ABSTRACT

The current work presents a study about one-phase modelling of static beds within horizontal drums built for solid-state cultivation. For this, mass balances were proposed for no-reactional isothermal beds, followed by mass and heat balances for three dimensions of drums: 10, 20 and 31 cm of diameter and 20, 40 and 74 cm of length, respectively. Dry airflow rates of 5 and 50 L/min were assumed for beds composed by silica gel and by fibers of sugar cane bagasse. Balances for the gas phase in the headspace were also proposed and simultaneously solved to the balances for the bed. Effective transport properties were experimentally determined and/or calculated. The convergence between the effective diffusivity of water in the bed of sugar cane bagasse suggests that its representation preferentially by the dependence on the moisture of the particles for experimental assays with duration higher than ten hours. For relatively short experimental assays, the dependence of the parameter on the radial position can be enough. An analysis of modified Biot number was presented for the mass transport adopting a correcting factor referent to the radial position in the bed. In isothermal systems, the mass transport is managed by the internal resistances at 50 L/min mainly in the initial instants of the test, evolving for equivalent resistances over time; the external resistance to the mass transport is predominant at 5 L/min. Mass and heat balances required the effective thermal conductivities of the beds, extracted from the literature for the bed of sugar cane bagasse and experimentally determined as dependence on the temperature and the moisture content of particles for the bed of silica beads. Correlations were used for estimative of effective thermal conductivities, obtaining satisfactory results for the bed of silica and confinable results only a range of moisture of sugar cane bagasse particles corresponding to up 0,43 kg/kg of dry solid. Mass and energy balances for the gas phase in the headspace were coupled to the solution of the balances for the bed of particles. For all the drums, the temperature of gas in the headspace can be assumed constant at 45 °C, the gas does not leave the drums saturated of vapor of water vapor and axial profiles are developed. About the heat transfer in no-isothermal systems, the drum-wall is the main boundary through the heat is transferred and the internal resistances to the heat transfer are neglected within a drum of 10 cm of diameter. The modified Biot number for mass transfer was also calculated for no-isothermal systems and pointed absence of external resistances only for a bed of silica beads at 50 L/min for all the drums. For the

others drums, beds and airflow rates, equivalent resistances managed the mass transport. Mass and heat balances were added of a term which represents the heat generated by the microorganism and validated using the kinetic of gas released by the thermophilic fungus *Myceliophthora thermophila* I-1D3b on a bed of sugar cane bagasse and wheat bran with air supplying of 5 L/min and 75 to 96 % of relative humidity, whose peaks of temperature were observed at 42 and 28 hours, respectively. During the cultivation, the controlling of temperature was efficient only within the drum of 10 cm of diameter, with increase of temperature of 3,5 and 7 °C within drums with 20 and 31 cm of diameter, respectively. In the intermediary sized drum, more intense metabolic activity was observed when the gas was inserted at 96 % of RH. The enzymatic activities of endoglucanase were not be affected by the increase of temperature but the dryness of the bed was considered a critical condition. The temperature of the gas was close to the temperature of the surface in all the drums and energy kept accumulated in the bed of 31 cm of diameter also in the end of the cultivation process. The great agreement between the experimental profiles and those provided by the models affirm their applicability on the prediction of variables of interest and they can be employed in studies of scaling up of bioreactors for solid-state cultivation.

Keywords: Modeling and simulation. Horizontal drum. Heat transfer. Mass transfer. Sugar cane bagasse. Solid-state cultivation.

LISTA DE NOMENCLATURA

a	Distanciamento médio entre duas partículas, m
A_t	Área disponível para troca na superfície do leito, m^2
A_w	Atividade de água, -
A, B	Constantes do modelo de Giese (1998)
b	Sensibilidade da cinética de crescimento do microrganismo aos aumentos de temperatura, -
$C_{p_{ar}}$	Calor específico do gás, J/kgK
$C_{p_{água}}$	Calor específico da água, J/kgK
$C_{p_{bed}}$	Calor específico do leito, J/Kg°C
d	Diâmetro do tambor, m
d^*	Diâmetro da partícula, m
d_p	Diâmetro da partícula, m
d_s	Diâmetro médio das partículas de sílica gel, m
d_{BC}	Diâmetro médio das partículas de bagaço de cana, m
D_{eff}	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas determinado experimentalmente, m^2/s
D_{esfera}	Coeficiente efetivo de transferência de massa por difusão para leito de partículas esféricas, calculado, m
$D_{cilindro}$	Coeficiente efetivo de transferência de massa por difusão para leito de partículas cilíndricas, calculado, m
E_a	Energia de ativação, J/kg de água
f	Capacidade máxima do ar de transportar água, kg de água/kg de ar seco
F^*	Fator de correção, -
$f_1(Pr)$	Constante de Prandtl para a geometria de placa plana, -
$f_3(Pr)$	Constante de Prandtl para a geometria de cilindro, -
g	Aceleração da gravidade, m/s^2
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do leito e o gás no sobre espaço, W/m^2K
h_{conv}	Contribuição convectiva sobre o coeficiente de transferência de calor entre a superfície do leito e o gás no sobre espaço, W/m^2K

h_{evap}	Contribuição evaporativa sobre o coeficiente de transferência de calor entre a superfície do leito e o gás no sobre espaço, $\text{W/m}^2\text{K}$
h_m	Coeficiente de transferência de massa por convecção entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço, m/s
h_w	Coeficiente de transferência de calor entre a parede do tambor e a primeira camada de partículas nesta região, $\text{J/m}^2\text{K}$
K	Coeficiente de partição
K^*	Condutividade térmica molecular da fase gasosa, W/mK
K_{SOL}	Condutividade térmica efetiva do sólido, W/mK
K_0	Condutividade térmica efetiva do leito de partículas, idêntico a K_{exp} , W/mK
K_I	Contribuição das partículas paralelas à direção de referência sobre o parâmetro $K_{\text{bed,cilindro}}$, m^2/s
K_{II}	Contribuição das partículas ortogonais à direção de referência sobre o parâmetro $K_{\text{bed,cilindro}}$, m^2/s
$K_{1,m}$	Taxa de aumento do parâmetro efetivo com a velocidade de escoamento do ar, -
K_1 e K_2	Constantes do modelo de Peleg
L	Comprimento do tambor, m
l_{BC}	Comprimento médio das fibras de bagaço de cana a 75 % de umidade (b.u.), m
M	Massa molar do gás, g/mol
Nu^*_{esfera}	Número de Nusselt para uma partícula esférica, -
Nu^*_{lam}	Contribuição laminar do número de Nusselt para uma esfera percolada por gás, -
Nu^*_{turb}	Contribuição turbulenta do número de Nusselt para uma esfera percolada por gás, -
Nu_{cilindro}	Número de Nusselt para uma partícula cilíndrica, -
Nu^*_{leito}	Número de Nusselt para um leito de partículas, -
$Nu^*_{\text{partícula}}$	Número de Nusselt para uma partícula, -
P_{atm}	Pressão atmosférica, Pa
P^*_w	Pressão de saturação de vapor d'água, atm
Pe_0	Número de Peclet calculado a partir de uma velocidade superficial U_0 , -

Pe^*	Número de Peclet a partir da velocidade superficial v^* , -
Pr	Número de Prandtl, -
Q	Vazão de ar, L/min
Q_g	Calor de geração, J/m ³
R	Direção radial, m
R	Raio do cilindro empacotado ou raio do tambor, m
R^*	Constante universal dos gases ideais, J/kgK
Ra	Número de Rayleigh, -
Re^*	Número de Reynolds a partir da velocidade superficial v^* , -
R_q	Taxa de liberação de dióxido de carbono, mol/s
Sc	Número de Schmidt, -
Sh	Número de Sherwood, -
Sh_{lam}	Contribuição laminar no número de Sherwood, -
Sh_{turb}	Contribuição turbulenta no número de Sherwood, -
T	tempo, s, h ou dias
T	Temperatura do leite, °C ou K
T_g	Temperatura do gás no sobre espaço, °C
T_w	Temperatura da parede do tambor, °C
T_s	Temperatura da superfície do sólido, K
T_{max}	Temperatura máxima de reação, °C
T_{opt}	Temperatura ótima de reação, °C
T_{∞}	Temperatura do meio gasoso, K
V	Velocidade nominal, m/s
v^*	Velocidade intersticial, m/s
v_z	Velocidade superficial de escoamento na direção axial, m/s
V_r	Velocidade superficial de escoamento de gás em meio do leito de partículas na direção radial, m/s
V_s	Volume médio das partículas de sílica gel, m
V_{BC}	Volume médio das fibras de bagaço de cana a 75 % de umidade (b.u.), m
x	Direção transversal, m
X	Umidade do leite, kg de água/kg de sólido seco
X_{abs}	Umidade absoluta do ar, kg de água/kg de ar seco
X_g	Umidade do gás, kg de vapor d'água/kg de ar seco

X_{eq}	Umidades de equilíbrio determinadas experimentalmente, kg de água/kg de sólido seco
X_g^*	Umidade de saturação da fase gasosa, kg de vapor d'água/kg de sólido seco
X_{eq}^*	Umidades de equilíbrio a partir do ajuste do modelo de Peleg, kg de água/kg de sólido seco
X_t	Umidade das partículas no tempo t, kg de água/kg de sólido seco
y	Direção longitudinal, m
Y	Concentração de biomassa, kg de biomassa/kg de sólido seco, ou Quantidade acumulada de mols liberados, mol
Y_{max}	Concentração máxima de biomassa, kg de biomassa/kg de sólido seco, ou Quantidade acumulada máxima de mols liberados, mol
Z	Direção axial, m
a, b, m, n	Constantes da Eq. (4.30) proposta neste trabalho
f(R-r), n_m e $K_{2,m}$	Constantes do modelo de Winterberg et al. (2000)
β	Coeficiente de expansão térmico, K^{-1}
δ	Coeficiente de difusão molecular de água na fase gasosa, m^2/s
δ_{bed}	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas, calculado, m^2/s
$\delta_{bed,cilindro}$	Contribuição estática no coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas cilíndricas, m^2/s
$\delta_{bed,esfera}$	Contribuição estática no coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas esféricas, m^2/s
δ_s	Difusão efetiva de água no sólido, m^2/s
$\delta_{bed,S}$	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas de sílica gel, calculado e igual à $\delta_{bed,esfera}$, m^2/s
$\delta_{bed,BC}$	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de fibras de bagaço de cana, calculado e igual à $\delta_{bed,cilindro}$, m^2/s
$\delta_{bed,BC(r)}$	Coeficiente efetivo de difusão de água em leito de fibras de bagaço de cana como função da posição radial, m^2/s
$\delta_{bed,BC(X)}$	Coeficiente efetivo de difusão de água em leito de fibras de bagaço de cana como função da umidade de partículas, m^2/s

δ_I	Contribuição das partículas paralelas à direção de referência sobre o parâmetro $\delta_{bed,cilindro}$, m ² /s
δ_{II}	Contribuição das partículas ortogonais à direção de referência sobre o parâmetro $\delta_{bed,cilindro}$, m ² /s
ΔH	Calor de reação, J/kg
ΔH_{vap}	Entalpia de evaporação da água, J/kg de água
ε	Porosidade do leito, -
ε_c	Porosidade do leito no centro do tubo/cilindro empacotado, -
$\varepsilon(r)$	Porosidade local em função da posição radial r, -
$\varepsilon(x)$	Porosidade local em função da umidade das partículas, -
ε_S	Porosidade média do leito de sílica gel, -
ε_{BC}	Porosidade média do leito de fibras de bagaço de cana, -
λ	Calor latente de vaporização da água, J/kg de água
Λ	Volume do leito, m ³
ϕ	Fator de conversão de CO ₂ liberado em energia, J/mol
ρ_{ar}	Massa específica do gás, kg de ar/m ³
ρ_s	Massa específica do sólido, kg de sólido/m ³
ρ_{bed}	Massa específica do leito, kg/m ³
μ	Taxa específica de reação, h ⁻¹
μ_{opt}	Taxa específica de reação na temperatura ótima, h ⁻¹
ν	Viscosidade cinemática, m ² /s
ℓ^*	Comprimento característico na superfície do leito, calculado pela razão entre volume pela área de troca, m

Subíndices

0	Inicial
BC	Bagaço de cana
cilindro	Partículas cilíndricas
esfera	Partículas esféricas
g	Gás
lam	Contribuição laminar
turb	Contribuição turbulenta
S	Sílica gel

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS GERAIS	21
CAPÍTULO 3. REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1. Conceitos em cultivo em estado sólido (CES)	22
3.2. Biorreatores de tambor para CES	24
3.3. Modelagem aplicada a meios porosos	28
3.4. Modelagem e simulação de processos de cultivo sólido em biorreatores.....	38
CAPÍTULO 4. BALANÇOS DE MASSA	51
4.1. Introdução	51
4.2. Objetivos específicos	52
4.3. Materiais e métodos	53
4.3.1. Partículas	53
4.3.2. Ensaios de transferência de massa em tambor horizontal	54
4.3.3. Modelo matemático	56
4.3.4. Determinação experimental do coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas	58
4.3.5. Correlações para cálculo da difusividade efetiva de água em leitos de partículas	60
4.3.6. Determinação experimental das umidades de equilíbrio das partículas..	62
4.4. Resultados e discussão	64
4.4.1. Umidades de equilíbrio (X_{eq}) das partículas de sílica e bagaço de cana.	64
4.4.2. A dependência de D_{eff} em relação à temperatura	67
4.4.3. Cálculo do coeficiente efetivo de difusão em leito de partículas	72
4.4.4. Simulações de transferência de massa em tambor horizontal isotérmico parcialmente preenchido	78
4.4.5. Verificação do modelo	89
4.5. Conclusões parciais	95
CAPÍTULO 5. BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA.....	97
5.1. Introdução	97
5.2. Objetivos específicos	98
5.3. Materiais e métodos	99
5.3.1. Preparo das partículas	99
5.3.2. Experimentos de calor e massa em tambor horizontal	100
5.3.3. Balanços de massa e energia	101

5.3.4. Parâmetros requeridos pelo modelo.....	106
5.3.5. Determinação experimental da condutividade térmica efetiva do leito de sílica gel na estagnação ($K_{0,s}$).....	109
5.3.6. Estimativa de parâmetros efetivos de transporte por meio de correlações	110
5.4. Resultados e discussão	112
5.4.1. Condutividade térmica efetiva do leito de sílica gel ($K_{0,s}$).....	112
5.4.2. Estimativa de parâmetros de transporte de interesse através de correlações.....	114
5.4.3. Simulações	118
a. Introdução de ar inicialmente seco em escoamento paralelo à superfície do leito a 50 L/min	118
b. Introdução de ar inicialmente seco em escoamento paralelo à superfície do leito a 5 L/min	131
c. Introdução do número de Biot de massa.....	143
5.4.4. Validação do modelo	149
5.5. Conclusões parciais	169
CAPÍTULO 6. BALANÇOS PARA CULTIVO SÓLIDO.....	171
6.1. Introdução	171
6.2. Objetivos específicos	173
6.3. Materiais e métodos.....	173
6.3.1. Cultivo em estado sólido em tambor horizontal	173
a. Microrganismo, substrato e solução de esporos	173
b. Tambores horizontais.....	174
c. Inoculação, cultivo e monitoramento das variáveis operacionais de interesse.....	175
d. Extração da solução enzimática bruta.....	178
e. Quantificação de atividade enzimática de endoglucanase (CMCase) ...	178
6.3.2. Balanços de massa e energia	179
6.3.3. Parâmetros cinéticos requeridos pelo modelo.....	181
6.3.4. Simulações e verificação do modelo	181
6.4. Resultados e discussão	182
6.4.1. Ensaios de cultivo sólido de <i>Myceliophthora thermophila</i> I-1D3b em tambores horizontais	182
6.4.2. Simulações.....	191
a. Simulações em biorreatores de diferentes dimensões.....	191
b. Atividades enzimáticas de endoglucanase.....	206
c. Efeito das velocidades superficiais de escoamento sobre a temperatura do leito em tambor grande.....	208

6.4.3. Verificação do modelo	212
6.5. Conclusões parciais	221
CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	223
CAPÍTULO 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	224
REFERÊNCIAS.....	225

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Tambores rotativos são comumente empregados nas indústrias química, siderúrgica e metalúrgica em processos como secagem e calcinação de materiais particulados. Em especial, processos de cultivo em estado sólido (CES) têm utilizado biorreatores de tambor rotativo em decorrência de conveniências operacionais, tais como a oferta de mecanismos de controle das condições de processo e menor demanda de trabalho manual, o que evita a possibilidade de contaminação por agentes externos nas etapas iniciais do processo fermentativo.

Os processos de cultivo em estado sólido têm se mostrado atrativos devido à possibilidade de obtenção de compostos de alto valor agregado através de uma tecnologia de baixo custo. No entanto, esta tecnologia não se encontra totalmente disponível em escala industrial devido às dificuldades relacionadas ao sobreaquecimento proveniente da geração metabólica de calor pelo microrganismo. Aliado a isso, os resíduos agroindustriais comumente utilizados como substratos em CES possuem propriedades térmicas relativamente pobres, o que dificulta a dissipação de energia. Como consequência, o calor permanece acumulado e gradientes de temperatura e umidade são desenvolvidos, o que pode ser prejudicial ao rendimento do processo e dificulta a ampliação de escala de biorreatores para CES.

Dentre os tipos de biorreatores, os de tambor rotativo têm apresentado alternativas adicionais para controle de variáveis de processo, tal como a movimentação das partículas. Em processos de CES, é possível se operar em regime intermitente de rotações, pois o cisalhamento excessivo pode causar efeitos deletérios às estruturas de crescimento do microrganismo, de modo que o leito permanece estático durante longos períodos e é eventualmente rotacionado; portanto, é aceitável a análise de cada um dos períodos separadamente. Este trabalho detém-se ao estudo dos fenômenos de transporte em sistemas particulados em tambores rotativos para cultivo sólido durante as fases totalmente estáticas, o que permite a denominação deste tambor rotativo como um tambor horizontal.

Modelos matemáticos têm sido utilizados como ferramenta em estudos de ampliação de escala de biorreatores para prever possíveis tendências nos perfis de temperatura e umidade do leito de partículas em presença do microrganismo. Tais modelos são representados a partir de balanços de massa e energia, porém algumas

Érika F. Rezendes Tada

literaturas fazem uso apenas de balanços de energia e, portanto, negligenciam as possíveis variações no conteúdo de água do substrato. Além disso, existe um escasso número de trabalhos de modelagem de CES voltados para a geometria de um cilindro parcialmente preenchido, de modo que grande parte dos modelos disponíveis são aplicáveis à geometria de biorreatores de coluna empacotada. Neste contexto, o presente trabalho apresenta a proposição de um modelo matemático capaz de prever as variações de temperatura e umidade em um leito de partículas de bagaço de cana e farelo de trigo disposto em um tambor horizontal estático durante processo de cultivo sólido.

Para tanto, o trabalho foi dividido em três seções principais apresentadas após a Revisão da Literatura. Cada uma das seções é apresentada em formato de capítulos independentes deste trabalho, com uma breve introdução, objetivos específicos, metodologia, resultados e conclusões parciais. A primeira seção abordará unicamente o transporte de massa a uma fase em leitos de partículas colocados em tambor horizontal isotérmico, com inclusão da determinação experimental e teórica de parâmetros de transporte de interesse. Na segunda seção serão apresentados e solucionados simultaneamente os balanços de massa e energia sem reação, também com parâmetros de interesse calculados ou determinados experimentalmente e discussão de mecanismos de transferências de calor e massa. Até aqui, os modelos serão validados para dois tipos de leitos de partículas: um de partículas de sílica gel e o outro, de bagaço de cana, que é o componente majoritário em massa em ensaios de cultivo sólido do fungo *Myceliophthora thermophila* I-1D3b. A última seção apresentará um modelo matemático aplicável a cultivo sólido em tambores horizontais estáticos, proposto a partir das observações percebidas nas seções anteriores. Pretende-se que as observações e modelos apresentados nesta tese contribuam substancialmente em estudos de aumento de escala de biorreatores de tambor horizontal para cultivo sólido, de modo a caminhar para a utilização desta promissora tecnologia em escala industrial.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho foi a proposição de balanços de massa e energia capazes de prever as variações de temperatura e umidade em um leito de partículas de bagaço de cana e farelo de trigo disposto em tambor horizontal estático durante um processo de cultivo em estado sólido. Para tanto, três etapas principais foram conduzidas:

- Proposição de um balanço de massa para predição de perfis de umidade do leito em tambor isotérmico a 25 °C;
- Proposição de balanços de massa e energia para predição de perfis de umidade e temperatura do leito em sistema não isotérmico, com inclusão de balanços de massa e energia para a fase gasosa escoante no sobre espaço;
- Proposição de balanços de massa e energia para predição de perfis de umidade e temperatura do leito em tambor horizontal em presença de microrganismo.

CAPÍTULO 3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Conceitos em cultivo em estado sólido (CES)

O cultivo em estado sólido (CES) é definido como o cultivo de microrganismos sobre a superfície de partículas úmidas. Tais partículas constituem uma matriz porosa e devem possuir umidade suficiente para o desenvolvimento do microrganismo e sem que se exceda a capacidade máxima de retenção de água pelas partículas (PANDEY, 2003; SOCOOL et al., 2017). Processos de CES ocorrem, em sua maioria, em presença de oxigênio. Apesar de se saber que os processos fermentativos se caracterizam pela ausência de oxigênio, processos de CES são também referenciados como fermentação em estado sólido.

Algumas vantagens são pontuadas pela literatura clássica acerca da utilização de processos de CES em escala de laboratório, tais como maior produtividade, obtenção de esporos fúngicos mais estáveis, resistentes à secagem e com altas taxas de germinação por períodos de tempos relativamente extensos após liofilização; obtenção de enzimas estáveis em ampla faixa de temperatura e pH, baixa repressão catabólica, condições operacionais próximas às condições naturais de crescimento de fungos filamentosos e condições de esterilidade menos rigorosas, pois a baixa atividade de água nestes processos já atua como barreira à possíveis contaminações, promovendo menor gasto energético relacionado aos requisitos sanitários menos rigorosos (HÖLKER; LENZ, 2005; SINGHANIA et al., 2009; SOCCOL et al., 2017). Em geral, as constatações comparativas são fundamentadas tomando-se como referência aspectos de processos de cultivo (CSb), que ocorrem em presença de água líquida não aderida às partículas sólidas. Ainda, a literatura reporta que alguns metabólitos secundários são produzidos somente a partir do cultivo de alguns microrganismos em processos de CES, embora também seja possível o cultivo destes microrganismos em processos de CSb (HÖLKER; LENZ, 2005). Outras vantagens estão relacionadas ao uso de resíduos agroindustriais como fontes diretas de carbono e à menor produção de efluentes ao final do processo. No entanto, existem controvérsias acerca da menor geração de resíduos pois, para obtenção de extratos concentrados ao final de processos de CES, é necessária a adição de água.

No entanto, desvantagens no uso de processos de CES também são pontuadas. Dentre elas, destacam-se a dificuldade de estimativa de biomassa fúngica e purificação de produtos de interesse ao final da fermentação e as dificuldades relacionadas ao controle das condições ótimas de cultivo quando da tentativa de ampliação de escala de biorreatores para CES (SINGHANIA et al., 2009). O controle das condições ótimas de operação tem sido um problema, especialmente em testes em biorreatores de escala piloto. O principal inconveniente está relacionado aos aumentos indesejáveis de temperatura durante a fermentação e ressecamento do leito de partículas, com consequente diminuição da produção de compostos de interesse.

Em geral, resíduos provenientes da agroindústria são utilizados como substratos em CES como suporte inerte e/ou fonte de carbono para produção de compostos de alto valor agregado, o que reduz ou anula os custos de substratos para CES e direciona e agrega valor à resíduos sem destino aparente. Por outro lado, tais resíduos possuem propriedades térmicas relativamente pobres, o que prejudica a dissipação de calor. Durante a fermentação, o microrganismo tende a gerar calor proveniente de suas atividades metabólicas, promovendo aumentos perceptíveis na temperatura do leito. Se o calor não é dissipado até atingir as fronteiras, que geralmente são regiões de fácil controle de temperatura, essa energia tende a ficar acumulada em meio às partículas, de modo que se instalem gradientes de temperatura que podem também afetar a distribuição de umidade. Daí a importância de se conhecer as propriedades térmicas dos substratos, pois a permanência de gradientes de temperatura e umidade está relacionada direta e simultaneamente ao metabolismo do microrganismo e à capacidade do próprio leito de dissipar calor. Casciadori et al. (2013) apresentaram um estudo sobre a determinação experimental de propriedades de substratos comumente utilizados em CES, tais como bagaço de cana, farelo de trigo e resíduos de laranja, e constataram que a condutividade térmica efetiva na estagnação (K_0) de matrizes porosas constituídas por estes materiais secos é inferior ou igual a 0,2 W/mK, e que K_0 tende à condutividade térmica da água com o aumento do conteúdo de umidade da matriz porosa. Tais valores são relativamente baixos em comparação com diversos materiais com capacidades condutivas encontrados na natureza, remetendo à necessidade de que, para que o aumento de escala de biorreatores para CES seja efetivamente uma realidade, é necessário que estes equipamentos disponham de mecanismos eficazes para remoção de calor e reestabelecimento das condições ótimas de operação em CES.

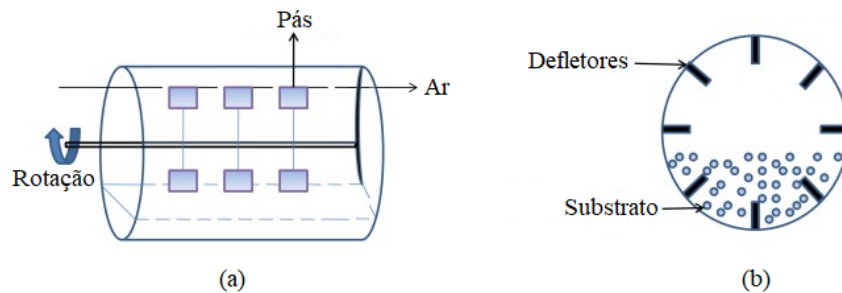
3.2. Biorreatores de tambor para CES

Em geral, os biorreatores atuam como barreira física contra a contaminação externa e como ambientes fornecedores das condições ideais para o crescimento das culturas de interesse. Similaridades entre os designs dos equipamentos permitem a classificação dos biorreatores em duas categorias principais: leitos fixos e leitos móveis. Como as próprias nomenclaturas sugerem, macroscopicamente o leito permanece estático em biorreatores de leito fixo e pode ser movimentado em biorreatores de leito móvel, sendo admitido o escoamento de ar em ambos (DURAND, 2003). Dentre os biorreatores de leito fixo estão os de coluna empacotada e o de bandeja. Brevemente, o primeiro consiste em um cilindro vertical, infinito ou não, preenchido por partículas com introdução de ar saturado através da base. Este fluxo de ar descreve escoamento ascendente, comumente assumido como uniformemente distribuído na direção radial apesar dos caminhos preferenciais existentes devido às variações de porosidade do leito (THOMÉO, 1990; PEREZ, 2017), e é recolhido na base da coluna (ZANELATO et al., 2012; CASCIATORI et al., 2016; PEREZ; CASCIATORI; THOMÉO, 2019). O biorreator de bandeja consiste em um paralelepípedo apenas com abertura para introdução de ar saturado em uma extremidade axial, cujo escoamento é assumido como paralelo à superfície do leito de partículas e uniformemente distribuído na direção normal ao escoamento (DURAND, 2003). A seguir serão apresentadas características gerais de biorreatores de leito móvel do tipo tambor, de interesse no presente trabalho.

Os biorreatores de tambor rotativo consistem em cilindros horizontais dotados de instrumentação auxiliar que possibilita a mistura e movimentação das partículas, tais como defletores acoplados à parede interna do tambor e pás internas giratórias usualmente localizadas no centro radial do tambor, como ilustrado na Figura 3.1 extraída de Arora, Rani e Ghosh (2018). O regime de rotação admitido em processos CES pode ser contínuo ou intermitente a depender da tolerância do microrganismo à agitação mecânica, pois cisalhamentos excessivos podem ser prejudiciais às suas estruturas de crescimento (RAGHAVARAO; RANGANATHAN; KARANTH, 2003), ao mesmo tempo que devem ser suficientes para que se intensifiquem as taxas de transferências de calor e massa e favoreçam o reestabelecimento das condições ótimas durante a fermentação (REU et al., 1993). Quando assumido regime

intermitente de rotações, os períodos estáticos compreendem leitos estáticos em geometria de cilindro parcialmente preenchido.

Figura 3.1 – Tambores rotativos com (a) pás giratórias localizadas no eixo central radial e (b) defletores.



FONTE: Adaptado de Arora, Rani e Ghosh (2018).

A configuração deste tipo de equipamento não permite que todo o seu interior seja preenchido por partículas, por isso a referência à nomenclatura grau de enchimento para o volume interno efetivamente ocupado. O volume não ocupado por partículas encontra-se livre para possibilitar a mistura e a movimentação, bem como para acomodar acessórios que auxiliem na manutenção das condições de operação, como é o caso dos aspersores agrícolas para reposição da umidade perdida utilizados por Grajales (2014). Se o grau de enchimento é igual a 1, correspondente à 100% do volume preenchido, o leito é observado como um leito empacotado, pois a movimentação de partículas nestas condições é impossibilitada. Graus de enchimento de até 60% são comuns para empregos em processos de CES (EDUARDO, 2010; GRAJALES, 2014).

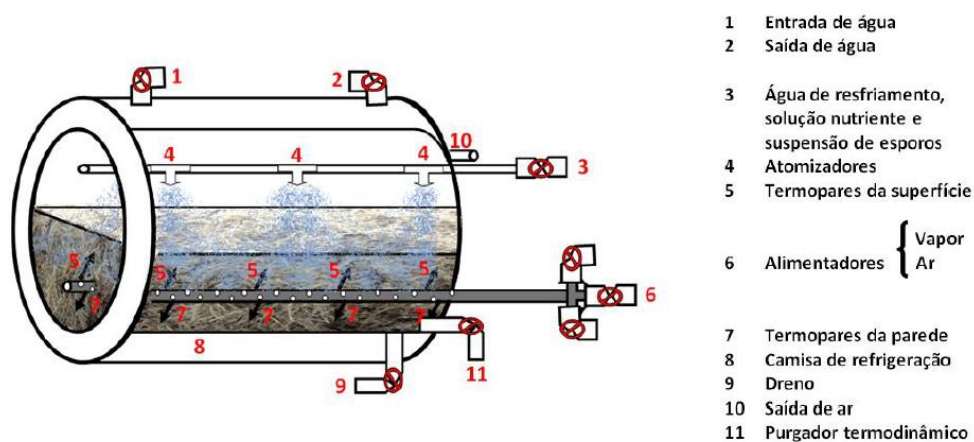
Sobre a movimentação das partículas, há mais de duas décadas, Fung e Mitchell (1995) investigaram os efeitos do uso de defletores juntos à parede do tambor em ângulo de 90° sobre o crescimento do fungo *Rhizopus oligosporus* em farelo de trigo e reportaram resultados mais promissores em presença dos defletores quanto aos perfis de temperatura e de gases metabolizados, apresentando picos mais amenos e curvas características àquelas de crescimento microbiano, respectivamente. Os autores atribuíram os resultados obtidos principalmente à mistura e movimentação de partículas mais eficiente em presença de defletores com menor ocorrência de aglomerados, aumentando as taxas de transferências de calor e de massa. Reu et al. (1993) avaliaram os períodos de rotação durante o cultivo sólido de *Rhizopus oligosporus* em grãos de soja para produção de tempê. Os autores utilizaram de um

biorreator de tambor rotativo instrumentado e constataram que o emprego de rotações intermitentes aliado às condições de introdução do ar possibilitou que a fermentação se desenvolvesse no tempo de 70 horas, enquanto que o processo tradicional tinha duração limitada a aproximadamente 36 horas devido aos aumentos de temperatura provocados por calor metabólico não dissipado, de modo que o crescimento do microrganismo era fatalmente prejudicado e os rendimentos ao final do cultivo eram insuficientes. Grajales et al. (2012) apresentaram um estudo de mistura e movimentação de partículas de arroz pré-gelatinizado em um tambor rotativo, no qual a técnica de traçadores e análise de imagem foram utilizadas para se avaliar a homogeneidade da mistura radial do leito. Os autores relacionaram fortemente o movimento de partículas junto à parede do tambor à presença dos defletores. Grajales (2014) observou a movimentação e mistura de fibras de bagaço de cana com 50 % de umidade (b.u.) em tambor rotativo com defletores a 45° com a parede interna e também em tambor com pás giratórias localizadas no centro radial do tambor. Os resultados obtidos em presença dos defletores mostraram forte tendência à formação de aglomerados independentemente do grau de enchimento do tambor mesmo em ausência de microrganismo, o que induz a acreditar que a formação de aglomerados está relacionada à natureza e à dinâmica de partículas. As regiões de maior movimentação estavam localizadas junto à parede do tambor e na superfície do leito. Na primeira, os defletores atuavam como elevadores de cargas de partículas e as lançava sobre a superfície do leito na forma de blocos de partículas. Grajales (2014) também analisou a mistura de partículas em presença de um tubo interno de aeração localizado em meio ao leito de partículas (identificado como 6 na Figura 1 e apresentado adiante), porém as zonas de estagnação foram observadas tanto em presença como em ausência deste tubo. Os resultados em tambor com pás giratórias foram considerados inconclusivos.

A introdução de ar saturado neste tipo de biorreator pode ser feita por entre ou sobre as partículas. Grajales (2014) apresentou bons resultados para a mistura e movimentação de partículas em presença de um tubo interno localizado entre as partículas e perfurado ao longo do comprimento para introdução de ar, que está ilustrado na Figura 3.2. Do ponto de vista operacional, é razoável se imaginar que esta configuração oferece maior tempo de contato entre as fases fluida e as partículas devido à aeração forçada e também durante as possíveis rotações, em que as partículas são expostas ao sobre espaço. No entanto, é difícil prever possíveis

tendências ao escoamento de fluido neste tipo de configuração, pois isto dependeria fortemente da disposição das partículas, bem como dos caminhos disponíveis para o escoamento por entre as partículas. Quanto a isso, Grajales (2014) reportou resultados promissores em atividades enzimáticas para endoglucanases e também acerca da estabilidade térmica deste sistema em presença de rotações a cada 12 ou 24 horas, o que firmou, superficialmente, que esta configuração pode ser utilizada sem maiores problemas.

Figura 3.2. – Diagrama esquemático do biorreator de tambor rotativo desenvolvido por Grajales (2014) com tubo interno para aeração localizado em meio ao leito de partículas.



FONTE: Grajales (2014).

A introdução de ar sobre a superfície do leito é, em geral, a maneira mais tradicional de se utilizar aeração em tambores rotativos, seja para aplicações restritas à CES ou em secadores convencionais. Para este último, o uso de rotações continuamente se faz necessário para intensificar as taxas de transferências de calor e massa entre as fases gasosa e particulada (TARHAN et al., 2010; GU et al., 2014; MOHSENI; PETERS, 2016; ALONSO et al., 2017; FIROUZI et al., 2017). Para processos de CES, as trocas de calor e massa nesta configuração ocorrem principalmente entre a superfície do leito e o sobre espaço (MITCHELL et al., 2011), de modo que rotações periódicas também são recomendadas. Processos de CES já foram executados com aeração no sobre espaço e sem rotações, porém estima-se que os resultados insatisfatórios tenham sido obtidos devido às limitações de oxigênio disponível para as trocas gasosas em meio ao leito de partículas, bem como às menores taxas de transferências de calor (TADA et al., 2017b; TADA et al., 2017c).

3.3. Modelagem aplicada a meios porosos

Modelos matemáticos podem ser entendidos como equações que representem algum fenômeno e sistema, de modo que os acontecimentos reais possam ser tão fielmente representados quanto possível. Esta é uma técnica amplamente utilizada para se avaliar o desempenho de um processo e propor modificações sem que a construção de um novo equipamento seja requerida (BEQUETTE, 1998; MITCHELL; VON MEIEN; KRIEGER, 2003; VAFAI, 2005; GARCIA, 2005). Uma quantidade apreciável de equacionamentos tem sido proposta para representar meios porosos em geral, cujo interesse é justificado pelo fato de que os leitos particulados constituem parte apreciável de matéria no setor industrial (LAN; KHODADADI, 1993).

Os meios porosos são meios polifásicos que aqui serão retratados como aqueles constituídos por uma fase gasosa contínua com material sólido disperso. A fase líquida também pode estar presente na forma de vapor d'água na fase gasosa e aderida às partículas sólidas por adsorção física ou condensação capilar. A adsorção física foi primeiramente descrita por Langmuir (1918) através da teoria da camada monomolecular, na qual o autor referiu-se à existência de uma única camada de moléculas de água sobre a superfície sólida em que, no equilíbrio, as taxas de evaporação e condensação sobre a superfície sólida seriam iguais. Para casos em que as fases não se encontrassem em equilíbrio, as forças superficiais estariam relacionadas às taxas de evaporação e condensação. Se as forças superficiais fossem relativamente fortes, a evaporação poderia ser negligenciada e uma camada com a espessura de uma molécula de água se instalaria sobre toda a superfície sólida; enquanto que, se as forças superficiais fossem fracas, a água condensada na superfície seria rapidamente evaporada e apenas parte da superfície seria coberta pela camada de água (LANGMUIR, 1918). Mais tarde, Brunauer, Emmett e Teller (1938) apresentaram uma teoria baseada na de Langmuir (1918), porém com a hipótese de que poderiam existir várias camadas de moléculas de líquido sobre a superfície sólida, chamada de teoria multimolecular. Se a espessura da camada de líquido adsorvido sobre a superfície do sólido for suficientemente grande e as forças intermoleculares superarem as forças entre a superfície sólida e o líquido, canais de líquido são instalados entre duas superfícies sólidas opostas, constituindo o que é chamado de capilar.

O transporte de vapor através da fase gasosa ocorre preferencialmente por difusão molecular em presença de gradientes de pressão parcial, em que o vapor se move de regiões com maior pressão parcial para as de menor pressão parcial com movimento relativo às moléculas de gás. Já o transporte da fração condensada se dá por capilaridade, baseada no conceito de escoamento de líquido viscoso e relacionada às forças de adesão e coesão, bem como forças hidrostáticas e tensão superficial, gradientes de pressão e o peso do capilar (RICKEN, 2003). Phillip e De Vries (1957) apresentaram uma teoria de interação entre a água líquida e o vapor d'água em presença de gradientes de temperatura observando-se a curvatura do capilar. Mais tarde, Luikov (1975) apresentou um sistema de equações diferenciais fundamentadas nas leis de Fick e Fourier para relacionar os transportes de calor e massa em um leito poroso, ao qual atribuiu que o transporte de massa ocorria preferencialmente por capilaridade. O autor abordou possíveis resistências à migração de vapor, experimentalmente verificadas, as quais quando superadas, possibilitavam que ambos os mecanismos de transporte de massa atuassem simultaneamente, em acordo com a teoria de Phillip e De Vries (1957).

Além dos mecanismos supracitados, a literatura descreve a migração de água provocada por gradientes de temperatura (EASTMAN, 1928), assim como a ocorrência de fluxo de calor devido à distribuição de massa (MORTIMER; EYRING, 1980). Esses fenômenos são conhecidos como Efeitos Soret e Dufour, respectivamente.

O primeiro registro encontrado sobre o Efeito Soret data de 1915, quando G. J. Bouyocus publicou seus resultados experimentais de migração de umidade em um leito devido ao aumento de temperatura. Basicamente, os ensaios foram executados em tubos fechados e completamente recheados por areia com umidade inicial conhecida e homogeneamente distribuída. Metade do tubo era submetido à temperatura de 0 °C enquanto que a outra metade era mantida em temperatura superior, 20 ou 40 °C, e o teor de umidade de amostras das regiões quente e fria do tubo eram verificadas após oito horas de ensaio. O autor reportou a migração de umidade da região quente para a região fria como resposta da sensibilidade de transporte de massa às variações de temperatura, então a migração de umidade não ocorria unicamente devido a gradientes de concentração de água. Fatores como o tipo de areia e a influência da umidade inicial sobre o transporte de massa também foram discutidos (BOUYOCUS, 1915). Registros de Lebedeff (1927) também

reportaram o transporte de massa induzido por diferenças de temperatura em estudos com areia.

Mortimer e Eyring (1980) descreveram a teoria do Efeito Dufour considerando que o fluxo de calor em um sistema ou partícula é proporcional à gradientes de concentração. Os autores partiram do pressuposto de que, quando uma partícula está em equilíbrio e é perturbada, ela tende a atingir uma nova posição de equilíbrio. Nesta nova condição de equilíbrio, a entalpia da partícula seria composta pela entalpia na posição inicial e a entalpia necessária para que houvesse a transição de um estado de equilíbrio para outro. Os autores verificaram a teoria proposta através de dados experimentais obtidos para a mistura de dois líquidos [CBr_4 (1) / CCl_4 (2) e $\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$ (1) / $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ (2)] de Saxton, Dougherty e Drickamer (1954) com base na solução de um coeficiente chamado fator de difusão térmica, que relaciona o potencial químico com a temperatura e envolve as teorias dos efeitos Dufour e Soret simultaneamente.

Para retratar os fenômenos supracitados em modelos aplicados a meios porosos de modo que cada um possa ser avaliado separadamente sobre a variável resposta, recomenda-se a utilização de modelos a duas fases. Os modelos de duas fases, ou modelos heterogêneos, são aqueles que consideram explicitamente a presença das fases contínua e dispersa e as possíveis interações entre elas, de modo que a hipótese inicial é de que as fases não estão em equilíbrio. Por conta disso, equacionamentos distintos para cada uma das fases são requeridos, bem como seus respectivos parâmetros de transporte, o que possibilita a observação de fenômenos com mais clareza e distinção. Ao mesmo tempo, os equacionamentos singulares a cada fase elevam a complexidade deste tipo de modelo, pois as equações são matematicamente mais sofisticadas e requerem uma maior quantidade de parâmetros e estabelecimento dos mecanismos de forma mais detalhada. Quanto à movimentação de água, por exemplo, Casciatori et al. (2013) reportaram a possível presença de um filme de água sobre as partículas de leitos de bagaço de cana e de farelo de trigo em um estudo sobre determinação experimental da condutividade efetiva na estagnação de leitos compostos por essas partículas. Neste sentido, um modelo a duas fases consideraria a presença das fases sólida, gasosa e, ainda, de uma fase líquida fracamente ligada à superfície das partículas que está disponível para interações com a fase gasosa em um sistema em não-equilíbrio e poderia estabelecer transporte por capilaridade, o que explicita a complexidade deste tipo de equacionamento.

Uma aproximação válida para a modelagem seria considerar que as fases presentes encontram-se em equilíbrio e apenas quantidades como água e energia se movem através de um domínio espacial homogêneo. Nesta abordagem, referenciada como modelos a uma fase, o leito de partículas é observado como um corpo sólido pseudo-homogêneo, e os parâmetros de transporte são efetivos, de modo que resguardam propriedades de ambas as fases através da soma ponderada entre os parâmetros moleculares de cada uma delas, por exemplo (THOMÉO; FREIRE, 2009). Este tipo de modelo é usual e tem fornecido bons resultados em termos de aplicação em processos de cultivo sólido; porém, não permitem que alguns fenômenos de ocorrência sejam discutidos detalhadamente, tais como os efeitos de uma fase gasosa em contato com partículas sólidas com possível potencial químico para capturar água. Para este caso, por exemplo, parâmetros de transporte de interesse são calculados através de uma soma ponderada pela fração de cada uma das fases e são referenciadas como propriedades efetivas do leito. Neste sentido, os transportes de calor por condução e massa por difusão são gerenciados por coeficientes efetivos, quais sejam condutividade térmica efetiva do leito e difusividade efetiva de água no leito poroso, respectivamente.

A complexidade da ocorrência simultânea dos transportes de calor e massa é reconhecida e induz, muitas vezes, ao estudo dos transportes separadamente (YAGI; WAKAO, 1959). Muitas das investigações disponíveis na literatura analisaram os efeitos do escoamento de fluido sobre as partículas de leitos porosos, quanto aos transportes de calor e/ou massa (COBERLY; MARSHALL, 1951; ARGO; SMITH, 1953; FEDWIK; NEWMAN, 1982). Em geral, sabe-se que muitos conceitos adotados para o transporte de calor podem ser representados no transporte de massa como boas aproximações, desde que não afronte conceitos básicos. A seguir, serão apresentados equacionamentos para cálculo de parâmetros de transporte pertinentes à leitos empacotados por partículas de geometrias esférica e cilíndrica, de interesse nesta tese e que podem ser empregados para estimativa de parâmetros em modelos a uma e a duas fases.

Martin (1978) analisou os números de Nusselt para obtenção de coeficientes de transportes de calor e massa para diferentes valores de número de Péclet para o escoamento de ar a baixas velocidades em um cilindro empacotado por partículas esféricas. O autor cita uma correlação apresentada por Schlünder (1975) para cálculo do número de Nusselt, conforme Eq. (3.1).

$$Nu_{esfera}^* = 2 + F \times \frac{\sqrt{Pe^*}}{\sqrt[6]{Pr}} \quad \text{para } Pr > 0,6 \quad (3.1)$$

onde Nu_{esfera}^* é o número de Nusselt para escoamento de fluido envolta de uma partícula esférica, Pr é o número de Prandtl e Pe^* é o número de Péclet, calculados utilizando-se a velocidade de escoamento entre os poros (v^*), denominada velocidade intersticial, e o comprimento característico d^* , cujas relações estão apresentadas nas Eqs. (3.2) e (3.3), respectivamente (ACHENBACH, 1995).

$$v^* = \frac{v}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

$$d^* = d \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \quad (3.3)$$

onde v é a velocidade média de escoamento, ε é a porosidade do leito e d é o diâmetro da esfera. A seguir, os adimensionais com asterisco referem-se ao uso de v^* e, eventualmente, d^* . Se a velocidade de escoamento é consideravelmente baixa, Pe^* tende a zero e Nu_{esfera}^* é 2. O fator F^* está definido na Eq. (3.4) para $Pr > 0,6$. Para uma região com escoamento predominantemente laminar, F é aproximado a 0,6 ou a 0,664 para a geometria de uma placa plana (SCHLÜNDER, 1975).

$$F^* = 0,664 \times \left[1 + \frac{0,0557(Re^*)^{0,3} Pr^{\frac{2}{3}}}{1 + 2,44(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)(Re^*)^{-0,1}} \right] \quad (3.4)$$

Separando-se as contribuições laminar e turbulenta, esta mesma equação pode ser escrita da seguinte forma (GNIELINSKI, 1975; KAST; KLAN, 2010):

$$Nu_{esfera}^* = 2 + \sqrt{(Nu_{lam}^*)^2 + (Nu_{turb}^*)^2} \quad (3.5)$$

com

$$Nu_{lam}^* = 0,664 (Re^*)^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.6)$$

$$Nu_{turb}^* = \frac{0,037 (Re^*)^{0,8} Pr}{1 + 2,443 (Re^*)^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3.7)$$

em que Nu_{lam}^* e Nu_{turb}^* correspondem às contribuições laminar e turbulenta relacionadas às baixas velocidades de escoamento do fluido e do escoamento turbulento ocasionado por eventuais microturbulências em decorrência da presença das partículas, respectivamente. Bons resultados foram obtidos por Martin (1978) ao empregar a correlação de Gnielinski (1975) para predição dos coeficientes de transferência de calor em um leito de partículas esféricas com baixos números de Péclet, ou seja, esta correlação oferece bons resultados quando a velocidade de escoamento do fluido é relativamente baixa. Esta correlação foi utilizada com êxito por Tada et al. (2017a) para cálculo do número de Nusselt e estimativa do coeficiente de transferência de calor em um tambor horizontal parcialmente preenchido por esferas de vidro, com ar soprado através de uma extremidade axial e assumido escoar paralelamente à superfície do leito de partículas, e obteve bons resultados em comparação com a sua estimativa experimental.

Kast e Klan (2010) também reportaram correlações para o cálculo do número de Nusselt para escoamento de fluido em convecção natural em leito composto por partículas esféricas. Se o diâmetro da esfera (d) é assumido como o comprimento característico L , a estimativa do $Nu_{esfera,free}$ pode ser aproximada à relação aplicável a placas planas verticais para $Ra > 10^3$, apresentada na Eq. (3.8). Para casos em que $Ra < 10^3$, recomenda-se a utilização da Eq. (3.9). Em relação às correlações de Schlünder (1975) e Gnielinski (1975), as Eqs. (3.8) e (3.9) não podem ser utilizadas para estimativa de Nu_{esfera} a partir de uma faixa de velocidades de escoamento do fluido, pois estas correlações são restritas apenas para meios com fluido estagnado, em que a velocidade é muito próxima de zero (RAITHBY; HOLLANDS, 1975). Da mesma forma como desenvolvido para as correlações anteriores, Nu tende a 2 quando a velocidade tende a zero.

$$Nu_{esfera,free} = \left\{ 0,825 + 0,387 [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6} \right\}^2 \quad Ra > 10^3 \quad (3.8)$$

$$Nu_{\text{esfera,free}} = 0,56 \left[\left(\frac{Pr}{0,846 + Pr} \right) Ra \right]^{1/4} + 2 \quad Ra < 10^3 \quad (3.9)$$

onde Ra é o número de Rayleigh e $f_1(Pr)$ é uma constante que descreve o efeito de Pr no intervalo $0,001 > Pr > \infty$ sobre a relação aplicável à geometria de placa plana e varia de 0 a 1. Nas Eqs. (3.10) e (3.11) estão apresentadas as definições para cálculo de Ra e de $f_1(Pr)$.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (3.10)$$

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (3.11)$$

em que g é a aceleração da gravidade, β é o coeficiente de expansão térmico, L é o comprimento característico que, neste caso, pode ser aproximado ao diâmetro da esfera, ν é a viscosidade cinemática, e T_s e T_∞ são as temperaturas da superfície da partícula e do fluido, respectivamente, em Kelvin.

Para o caso de fluido em convecção natural em torno de uma partícula cilíndrica, a correlação apresentada na Eq. (3.12) pode ser utilizada para expressar o número de Nusselt (KAST; KLAN, 2010). O comprimento característico adotado é igual ao diâmetro do cilindro (D).

$$Nu_{\text{cilindro}} = \left\{ 0,6 + 0,387 \left[Ra \cdot f_3(Pr) \right]^{1/6} \right\}^2 \quad (3.12)$$

em que $f_3(Pr)$ é uma constante que descreve o efeito do Pr no intervalo $0 > Pr > \infty$ sobre a relação aplicável à geometria de cilindro, cuja definição está apresentada na Eq. (3.13). Não foram reportadas restrições quanto ao uso da Eq. (3.12).

$$f_3(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (3.13)$$

Na Tabela 3.1 estão apresentados valores para os fatores $f_1(\text{Pr})$ e $f_3(\text{Pr})$ em função de Pr . Existem ainda os fatores $f_2(\text{Pr})$ e $f_4(\text{Pr})$, empregados para as geometrias de planos inclinados e escoamento em leito composto por partículas cúbicas, respectivamente. Para todas as geometrias, os valores de $f_n(\text{Pr})$ tendem a valores próximos de zero quando Pr tende a zero, e assumem o valor de 1 quando Pr tende ao infinito. Maiores informações acerca das correlações aplicáveis a estas geometrias e fatores podem ser encontradas em Kast e Klan (2010).

Tabela 3.1 – Valores para $f_1(\text{Pr})$ e $f_3(\text{Pr})$ em função do número de Prandtl (Pr) para escoamento de fluido sobre a superfície de uma placa plana vertical e em torno de partículas cilíndricas, respectivamente.

Pr	0,01	0,7	7	100	∞
$f_1(\text{Pr})$	0,0168	0,345	0,698	0,916	1
$f_3(\text{Pr})$	0,015	0,325	0,681	0,911	1

FONTE: Adaptado de Kast e Klan (2010).

Até o momento, as correlações para estimativa dos coeficientes de transferência foram apresentadas para o escoamento de fluido através de um leito empacotado ou para escoamento de fluido paralelo à uma superfície rugosa. Embora tais correlações tenham sido propostas para a transferência de calor pelos autores consultados, sabe-se que muitas delas são utilizadas em analogia para a estimativa de coeficientes de interesse no transporte de massa desde que empregados os números adimensionais correspondentes. Assim, em lugar do número de Nusselt, utilizar-se-á o número de Sherwood (Sh), e em lugar do número de Prandtl, o de Schmidt (Sc). Entretanto, correlações e discussões também estão disponíveis na literatura acerca do transporte de massa, especificamente.

Karabelas et al. (1971) apresentou correlações próprias para a determinação de coeficientes de transferência de massa em leito de partículas esféricas em presença de fluido estagnado segundo o número de Rayleigh [Eqs. (3.14) e (3.15)]. No entanto, quando se suspeita que o fluido possua alguma velocidade mesmo que muito próxima a zero e é necessário se estimar seu valor numérico, correlações que dependem de Re e Pe devem ser utilizadas como, por exemplo, as apresentadas anteriormente em analogia à transferência de calor.

$$Sh = 0,46 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad Ra < 10^9 \quad (3.14)$$

$$Sh = 0,12 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \quad Ra > 10^9 \quad (3.15)$$

As correlações mencionadas são de interesse nesta tese e fornecem o adimensional calculado para uma única partícula com escoamento de fluido. Observe-se que tais correlações são primeiramente interessantes para as aplicações em modelos a duas fases para cálculo dos coeficientes de transferência na interface sólido-fluido e que tal coeficiente depende de características do escoamento e das partículas, de modo que uma correlação é indicada para cada leito de partículas e vazão de ar soprado, quando aplicável. Neste sentido, observa-se também a complexidade do cálculo dos parâmetros de transferência desse tipo de modelo, que podem não ser poucos.

Através das correlações supracitadas, é possível se estimar coeficientes para o leito, como mostrado na Eq. (3.16). Esta correlação pode ser utilizada para leitos compostos por partículas de quaisquer geometrias, pois esta informação está inserida no cálculo de $Nu_{partícula}^*$ (ACHENBACH, 1995). Essa correlação pode ser utilizada, por exemplo, quando há escoamento de fluido em meio às partículas para determinação de um coeficiente de transporte ou para estimativa de uma velocidade de escoamento quando suspeita-se que haja qualquer tipo de movimentação de fluido.

$$Nu_{leito}^* = [1 + 1,5(1-\epsilon)] \times Nu_{partícula}^* \quad (3.16)$$

Os estudos de modelagem envolvendo sistemas particulados em geometrias de cilindros totalmente preenchidos utilizaram leitos de partículas inorgânicas com geometria bem definida e uniforme, tais como vidro, areia e esferas metálicas (ARGO; SMITH, 1953; YAGI; WAKAO, 1959; HERZ et al., 2012a; TADA et al., 2017a; TADA et al., 2020). Tal emprego tem sido justificado principalmente para que os efeitos das irregularidades relacionadas à constituição do leito sejam isolados e apenas o desempenho do equipamento seja avaliado. Especialmente tratando-se de tambores, a literatura reporta uma gama considerável de estudos envolvendo este tipo de equipamento em rotação contínua (WES; DRINKENBURG; STEMERDING, 1976; LYBAERT, 1987; KWAPINSKA; SAAGE; TSOTSAS, 2008; CHAUDHURI; MUZZIO; TOMASSONE, 2010; HERZ et al., 2012a; 2012b). No entanto, devido à aplicação em

regime contínuo de rotação em processos da indústria química, os tambores horizontais estáticos tem sido pouco explorados.

Martini e Churchill (1960) apresentaram um estudo sobre convecção natural em um tambor horizontal estático encamisado, que tinha a camisa mantida em temperatura constante. Para tanto, os autores sopraram partículas de dióxido de titânio no interior do tambor através de um pequeno tubo e capturaram fotografias em um intervalo de tempo de aproximadamente 30 segundos para que as tendências de movimentação do ar fossem avaliadas. Dentre as principais observações, os autores destacaram a rápida circulação de ar próximo à parede, enquanto que permanecia praticamente estagnado no centro do tambor e, de interesse nesse trabalho, os coeficientes de transferência por convecção em pressão atmosférica mantiveram-se praticamente constantes dentro da amplitude de temperatura de parede de 3,5 a 367 °F. Os experimentos foram conduzidos em tambor vazio. Os autores citam os trabalhos de Ostroumov (1950), Zhukhovitskii (1952), Drakhlin (1952) e Shaposhnikov (1952) como investigações pioneiras em tambores estáticos; porém estes trabalhos não foram encontrados para consulta.

Tada et al. (2017a) apresentou um estudo sobre transferência de calor em tambor horizontal estático parcialmente preenchido por leito de esferas de vidro. Este tambor possuía 31 cm de diâmetro interno, 74 cm de comprimento, camisa externa para refrigeração e a introdução de ar era feita através de uma das tampas com escoamento paralelo à superfície do leito de partículas. Os autores propuseram a solução de um modelo a uma fase para predição dos perfis de temperatura do leito, que estava inicialmente a 25 °C enquanto que a parede do tambor e o ar estavam a 45 °C. Na fronteira entre a parede do tambor e a primeira camada de leito em contato com a mesma, os autores verificaram a existência de resistência externa à penetração de calor, já anteriormente introduzido por Coberly e Marshall (1951). Os parâmetros de interesse para a solução do modelo, tais como a condutividade térmica efetiva na estagnação, o coeficiente de transferência de calor na parede do tambor e o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do leito e o ar escoante no sobre espaço foram estimados utilizando-se o método dos mínimos quadrados, desde que tais valores não implicassem na perda de sentido físico aos parâmetros cinéticos. Os autores reportaram boa concordância comparando-se os perfis simulados aos experimentais, o que sugere que a abordagem apresentada foi adequada para representar a evolução da temperatura. Mais tarde, este modelo foi

utilizado por Bertucci, Tada e Thoméo (2017) para predição dos perfis de temperatura de leitos compostos por partículas de bagaço de cana seco com diferentes granulometrias, de farelo de trigo seco e de esferas de vidro com diferentes tamanhos de partícula. Os autores empregaram a solução do modelo de Tada et al. (2017a) em um tambor de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, e verificaram que as resistências à penetração de calor da parede do tambor para o leito era desprezível. Estes trabalhos serão utilizados como referência nesta tese.

3.4. Modelagem e simulação de processos de cultivo sólido em biorreatores

Os modelos a uma fase têm fornecido resultados promissores e satisfatórios quando objetiva-se principalmente a predição dos perfis de temperatura em um leito particulado para cultivo sólido. Para êxito de um processo de CES, faz-se necessário que a temperatura do sólido seja prioritariamente controlada, pois o seu eventual aumento pode provocar o aumento da temperatura da fase gasosa, como mostrado por Von Meien e Mitchell (2002) e Casciatori et al. (2016), o que potencializaria a capacidade da fase gasosa de capturar água das vizinhanças. Assim, o ressecamento da fase sólida tomaria lugar e sua atividade de água poderia atingir valores razoavelmente baixos, limitando o adequado desenvolvimento do microrganismo (GRAJEK; GERVAIS, 1987; ORIOL et al., 1988; PANDEY et al., 1994; LU; LI; WU, 2003; CORONA; SÁEZ; AGOSIN, 2005; VON MEIEN; MITCHELL, 2002; CASCIATORI et al., 2016). O principal objetivo em estudos de modelagem e simulação de processos de CES é predizer seu comportamento térmico em biorreatores e seu impacto sobre as demais variáveis de processo.

Em geral, os modelos a uma fase para cultivo sólido são caracterizados pela adição de um termo que representa a geração de calor proveniente das atividades metabólicas do microrganismo. Além disso, alguns estudos reportam a geração de água proveniente da hidrólise de biomassa vegetal relacionada à cinética de crescimento do microrganismo (NAGEL et al., 2001). Essa água liberada é considerada em balanços de massa para o sistema e é de importância pois a quantidade de água aderida às partículas pode promover variações nas propriedades efetivas de transporte, tal como ocorre com a condutividade térmica efetiva na estagnação de bagaço de cana (CASCIATORI et al., 2013). Além disso, existe a possibilidade de que o tempo de processo seja razoavelmente curto para que a água

liberada durante o cultivo seja totalmente adsorvida pelas partículas, o que é indesejável em processos de cultivo sólido pois regiões com água líquida geralmente não apresentam crescimento fúngico, conforme reportado por Grajales (2014). No entanto, a autora atribuiu a presença de água junto à parede de um tambor rotativo após cultivo sólido de *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo à possível condensação de umidade durante o processo. Perez (2017) não reportou excessos de umidade em biorreator de tambor empacotado utilizado para a mesma combinação de microrganismo e substrato de Grajales, de modo que as umidades ao final do processo foram muito próximas ou iguais à umidade inicial de 75 % (b.u.). Em ausência dos termos de geração de calor e água, o modelo a uma fase poderia representar os transportes em leitos de partículas sem reação. A seguir, serão apresentados e discutidos alguns modelos clássicos disponíveis na literatura para cultivo em estado sólido. Observe-se que a maioria deles foi proposta para a geometria de leitos empacotados.

Saucedo-Castañeda et al. (1990) apresentaram o primeiro balanço de energia para descrever os perfis de temperatura durante cultivo sólido de *Aspergillus niger* sobre partículas de cassava em biorreator de leito empacotado com 12 cm de diâmetro, 35 cm de comprimento e introdução de ar saturado através da base da coluna. Os autores consideraram que a difusão de biomassa e açúcares aconteceria de forma muito lenta, justificando-se assim a ausência de um balanço de massa. No balanço de energia, a variação total de entalpia se deu pela somatória dos termos que representam a variação de temperatura na direção radial devido à condução efetiva de calor, o transporte de energia na direção axial devido à advecção de massa e ao calor gerado pelo microrganismo, como mostrado na Eq. (3.17). Considerou-se que a dispersão axial de energia era desprezível, uma vez que o comprimento do biorreator era muito maior que o diâmetro da partícula ($L/d_p \approx 80$).

$$\rho_{bed}C_{pbed}\frac{\partial T}{\partial t} + v_z\rho C_p\frac{\partial T}{\partial z} = K\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \rho\Delta HR_g \quad (3.17)$$

O primeiro termo do lado esquerdo representa a variação total de entalpia ao longo do tempo t , em que ρ e C_p são a densidade e o calor específico do meio sólido, respectivamente, e T é a temperatura. O segundo termo do lado esquerdo representa a variação de energia associada ao escoamento de ar através dos poros do leito na

direção axial (z) a uma velocidade v_z . Neste sistema e em muitos dos biorreatores de coluna empacotada para CES, o ar é introduzido através da base e é recolhido no topo da coluna (DURAND, 2003; MITCHELL et al., 2011; ZANELATO et al., 2012; MELIKOGLU; LIN; WEBB, 2015; BIZ et al., 2016; PEREZ; CASCIATORI; THOMÉO 2019), salvo algumas exceções (PEREZ, 2017). O primeiro termo do lado direito representa a variação de temperatura na direção radial (r), gerida pela condutividade térmica efetiva do leito, K . O último termo refere-se à geração de calor associada às atividades metabólicas do microrganismo, em que ΔH é o calor de reação e R_g é a taxa de liberação de dióxido de carbono, que pode ser encontrada também com a notação dCO_2/dt . Em sistemas nos quais não há aeração, v_z é zero e o segundo termo do lado esquerdo é nulo. Em geometrias mais complexas, a dispersão térmica é considerada nas direções de interesse adicionando-se os mesmos termos de dispersão baseados na Equação Geral da Condução de Calor.

Para solução, um contorno de simetria foi assumido no centro radial ($r = 0$) e a resistência externa à penetração de calor foi considerada na interface parede-leito ($r = R$), além da condição inicial em $t = 0$, $T = T_0$. Se a dispersão de energia por condução for considerada em mais direções, necessita-se de contornos que especifiquem os fenômenos nas respectivas fronteiras.

O modelo de Saucedo-Castañeda et al. (1990) tem sido utilizado como referência para a proposição de novas equações que representem o cultivo sólido em leitos de partículas estacionárias, tais como as referências em modelagem a uma fase apresentadas no Quadro 3.1 para cultivo sólido.

Quadro 3.1 – Lista de modelos a uma fase propostos para cultivo sólido disponíveis na literatura e as suas principais observações.

Fungo	Substrato	Tipo de biorreator	Referência	Observações
<i>Aspergillus niger</i>	Cassava	Leito empacotado	Saucedo-Castañeda et al. (1990)	Sugerem que os números de Peclet e Biot sejam utilizados como critérios na ampliação de escala de biorreatores, e propõem a utilização de seu modelo como modelo base para estudos posteriores
<i>Aspergillus niger</i>	Farelo de trigo	Bandeja	Rajagopalan e Modak (1994) e (1995)	A restrição de oxigênio tem efeito sobre a base do leito e os efeitos da temperatura são sentidos nas porções centrais
<i>Rhizopus oligosporus</i>	Partículas amiláceas úmidas	Leito empacotado	Sangsurasak e Mitchell (1995a)	O sobreaquecimento pode ser contornado modificando-se as condições de operação
<i>Rhizopus oligosporus</i>	Partículas amiláceas úmidas	Leito empacotado	Sangsurasak e Mitchell (1995b)	O aumento da temperatura causa a morte de células; a diminuição da temperatura do ar de entrada ao longo do cultivo seria uma estratégia promissora no controle da temperatura do leito, porém o modelo não prevê a consequente perda de umidade
<i>Aspergillus niger</i>	Partículas amiláceas úmidas	Leito empacotado	Sangsurasak e Mitchell (1998)	O sobreaquecimento é fortemente influenciado pelos parâmetros cinéticos de crescimento e pelas propriedades físicas do leito
<i>Rhizopus oligosporus</i>	Partículas amiláceas úmidas	Leito empacotado	Mitchell et al. (1999)	Temperatura máxima é esperada no topo da coluna por ineficiência do mecanismo de remoção de calor por evaporação; a altura máxima do leito foi discutida com base no

Quadro 3.1: continuação

<i>Rhizopus oligosporus</i>	Partículas amiláceas úmidas	Leito empacotado	Mitchell et al. (1999)	número de Damkhöler em função da temperatura do ar de entrada e de sua velocidade superficial.
<i>Aspergillus niger</i>	Partículas amiláceas úmidas	Leito empacotado	Ashley, Mitchell e Howes (1999)	Aeração periódica reversa não é eficaz no controle da temperatura
<i>Aspergillus niger</i>	Farelo de trigo	Leito empacotado	Fanaei e Vaziri (2009)	Modelo não validado, apresenta o desempenho do biorreator sobre diferentes condições operacionais Modelos de parâmetros distribuídos são mais eficazes do que os de parâmetros agrupados
<i>Metarhizium anisopliae</i>	Arroz pré-gelatinizado	Bandeja	Cunha et al. (2019)	Recomenda-se a altura máxima de 8 cm de leito para que os aumentos de temperatura não comprometam o rendimento em esporos

FONTE: Elaborado pela autora.

A geração de calor pelo microrganismo é expressa através de sua cinética de crescimento, comumente representada por uma equação logística, que é um modelo empírico matematicamente simples baseado em observações experimentais (VICCINI et al., 2001) e apresentado na Eq. (3.18). Este modelo tem sido utilizado amplamente para representar a cinética de crescimento de microrganismos com clareza, de modo a fornecer os períodos exponencial e estacionária de crescimento de maneira bem definida, além de representar os estágios finais de cultivo, nos quais as taxas de produção de biomassa são baixas. A partir desta equação, os parâmetros μ e Y_m são obtidos através do ajuste deste modelo a dados experimentais de concentração de biomassa ou cinética de respiração coletados durante o cultivo.

$$\frac{dY}{dt} = \mu Y \left(1 - \frac{Y}{Y_m} \right) \quad (3.18)$$

em que Y é o parâmetro que indica crescimento, podendo ser representado pela concentração de biomassa ou pela cinética de respiração microbiana, Y_m é o valor máximo para o referido parâmetro e μ é a taxa específica de crescimento, dada em 1/h. Como uma equação diferencial ordinária dependente apenas do tempo, uma condição inicial em $t = 0$ é requerida para a solução. Sendo assim, em $t = 0$, $Y = Y_0$.

Em termos da atividade respiratória, Y pode ser expresso pela quantidade de mols liberados de CO_2 (SAUCEDO-CASTAÑEDA et al., 1990; CUNHA et al., 2019), enquanto que a concentração de biomassa fúngica comumente refere-se à quantidade, em massa, de biomassa fúngica em uma porção de substrato seco (SANGSURASAK; MITCHELL, 1995; 1995b; 1998; MITCHELL et al., 1999; MITCHELL et al., 2002; FANAEI; VAZIRI, 2009; CASCIATORI et al., 2016). Quanto a esta última abordagem, apesar de ser aparentemente mais popular, existem discussões acerca da quantificação de biomassa fúngica em cultivo sólido, pois a separação das biomassas vegetal e fúngica não é tão simples. Alguns métodos indiretos, tais como a determinação de proteínas totais, ergosterol e glicosamina são reportados pela literatura, mas existem controvérsias e divergências acerca da confiabilidade de cada método tratado, uma vez que há necessidade de amostragem e o crescimento em cultivo sólido não ocorre de forma homogênea em todo o domínio do leito (GOMES, 2015; CASCIATORI, 2016). Neste contexto, a cinética de respiração do microrganismo apresenta-se como uma alternativa desde que o sistema apresente

condições adequadas para que os gases liberados sejam adequadamente transportados por difusão e arrastados pela corrente gasosa em movimento (KOUTINAS; WANG; WEBB, 2003). As vantagens da utilização de medidas de concentração de gases baseiam-se no fato de serem independentes de análises químicas do material fermentado, como a amostragem supracitada e pré-tratamentos. Ademais, esta é uma medida que pode ser considerada confiável e livre de incertezas, de modo que a evolução respiratória pode ser intimamente relacionada à fração de biomassa fúngica presente (WEIGNANT, 1992; WEIGNANT et al., 1992). Assim, o sistema deve assegurar ausência de compactação do leito e a distribuição uniforme de poros tanto quanto possível, pois sabe-se que caminhos preferenciais de escoamento podem estar presentes e, em caso de compactação, os transportes efetivos de quantidades através dos poros podem ser duramente afetados, o que comprometeria a análise (DURAND, 2003; PEREZ, 2017).

Na equação logística, a taxa específica de crescimento μ pode representar os efeitos das condições operacionais de cultivo sobre a cinética de crescimento do microrganismo, uma vez que condições não ideais de cultivo podem promover efeitos deletérios sobre o seu desenvolvimento (DURAND, 2003). Assim, μ pode ser escrita como função direta da temperatura e/ou da atividade de água. Como exemplo, nas simulações de Sansgurasak e Mitchell (1995) μ foi escrita como função da temperatura através de um polinômio de segundo grau com coeficientes empíricos. Com esta relação, os autores mostraram diminuição expressiva na concentração de biomassa quando gradientes de temperatura superiores a 10 °C foram observados. Além disso, os autores reportaram queda de aproximadamente 25 % na concentração de biomassa em um ensaio em que a temperatura de entrada do ar era menor que a temperatura ótima de cultivo, o que provocava diminuição da temperatura do leito, indicando que as temperaturas inferiores à temperatura ótima também não são favoráveis ao desenvolvimento do microrganismo. A verificação do modelo não foi apresentada.

Alguns modelos disponíveis na literatura incluem a fração de biomassa fúngica morta, uma vez que nem todas as células presentes são ainda viáveis para esporulação ou secreção de compostos de interesse. Esta é uma abordagem interessante para processos de CES que sofrem com o sobreaquecimento, uma vez que o rendimento em compostos de interesse depende diretamente da concentração de biomassa fúngica ativa/viável, tais como os cultivos de *Rhizopus oligosporus* e de

M. anisopliae (FUNG; MITCHELL, 1995; CUNHA et al., 2019). Sangsurasak e Mitchell (1995), constataram que a biomassa fúngica morta compreendia cerca de 20 % da biomassa total em estágios finais de fermentação. No entanto, estas equações dependem de parâmetros cinéticos que não são triviais, tais como as taxas específicas de morte ou coeficientes de desativação, necessitando de análises mais aprofundadas sobre a dinâmica de crescimento fúngico e dificultando o seu emprego em um primeiro momento (SZEWCZYK; MYSZKA, 1994; SMITS et al., 1998).

Uma equação relativamente mais simples foi apresentada por Sangsurasak e Mitchell (1998) para representar a sensibilidade da taxa específica de crescimento do fungo como função da temperatura [Eq. (3.19)]. Para tanto, considerou-se que μ assumia valor ótimo (μ_{opt}) quando a temperatura fosse igual ou inferior à temperatura ótima de crescimento do microrganismo e que era nulo quando o processo atingisse temperaturas iguais ou superiores à uma temperatura máxima (T_{max}) estabelecida com base em experimentos preliminares. Para temperaturas entre a ótima e a máxima, μ foi expresso como segue

$$\mu = \left[\frac{b + (T_{max} - T_{opt})}{(T_{max} - T_{opt})} \right] \left[\frac{\mu_{opt}(T_{max} - T)}{b + (T_{max} - T)} \right] \quad (3.19)$$

em que b é a sensibilidade da cinética de crescimento do microrganismo aos aumentos de temperatura, T_{opt} é a temperatura ótima de cultivo e μ_{opt} é a taxa específica de crescimento na temperatura ótima. O modelo foi validado utilizando-se dados experimentais de Saucedo-Castañeda et al. (1990) e Ghildyal et al. (1994) em cultivo sólido de *Aspergillus niger* em farelo de trigo. Os autores ressaltaram que os efeitos da temperatura sobre o crescimento do microrganismo ainda não eram bem estabelecidos na literatura. Assim, as simulações foram obtidas variando-se o valor de b de 0,6275 a 62,75, que proporcionaram diferentes perfis de temperatura apesar de as temperaturas máximas em ambos os casos diferirem em apenas 1 °C. Sob essas circunstâncias, optou-se por considerar $b = 6,275$ e boa concordância entre as simulações e os perfis de temperatura experimentais foram obtidos. Esta correlação é relativamente simples de ser implementada e fornece resultados satisfatórios e independentes da ação da temperatura sobre células viáveis (MITCHELL et al., 1999; FANAEI; VAZIRI; 2009; CUNHA et al., 2019).

Mitchell et al. (2002) apresentaram o primeiro modelo a uma fase para CES em biorreator de tambor rotativo com rotação contínua. Neste estudo de caso, o ar saturado de vapor d'água era introduzido em uma extremidade axial e recolhido na outra. Algumas considerações sustentam o desenvolvimento dos balanços, tais como a introdução de água para manter o substrato adequadamente úmido durante toda a fermentação, o que dispensa um balanço de massa para o leito, e a consideração de que o leito era bem misturado, o que assegurava taxas constantes de transferência de calor, e que a mistura contínua não promovera efeitos deletérios sobre o crescimento do microrganismo, sendo este afetado unicamente pelos aumentos de temperatura, porém sem efeitos fatais. Um balanço de massa foi proposto para o ar no sobre espaço, cujo ganho de umidade estaria relacionado às taxas de transferência de calor por evaporação. O balanço de energia para o leito incluía a variação de entalpia total e o transporte de energia associada ao escoamento de ar na direção axial, a convecção entre o ar e as proximidades da parede do tambor e o ar, transferência do substrato para o ar, remoção de calor por evaporação e geração de calor metabólico. O modelo não foi validado.

Stuart e Mitchell (2003) apresentaram um modelo a uma fase para CES em biorreator de tambor rotativo, utilizando-se parâmetros cinéticos do fungo *Aspergillus oryzae* cultivado em farelo de trigo. Assim como Mitchell e colaboradores (2002), os autores consideraram que o leito era bem agitado, de modo que as trocas mássica e energética entre cada elemento de volume representativo e a fase gasosa ocorriam a taxas constantes. Os balanços são similares àqueles apresentados por Mitchell et al. (2002), considerando-se equacionamentos específicos para a fase gasosa no sobre espaço que quantificam a água removida por evaporação da fase sólida. Os balanços da fase sólida envolvem as transferências mantidas com a parede do tambor, o gás no sobre espaço (convecção e evaporação) e geração de calor.

Wang et al. (2010) apresentaram um modelo a uma fase pra predição dos perfis de temperatura, consumo de açúcar e produção de etanol para fermentação sólida de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae* TSH-SC-1 em tambor rotativo. Sob agitação contínua, balanços de massa e energia foram propostos para a fase sólida (leito em movimento), bem como balanços de energia para o headspace e a parede do tambor. Apenas a difusão térmica foi levada em consideração, pois a difusão mássica ocorreria muito lentamente em comparação com o mecanismo convectivo. Os experimentos foram conduzidos em graus de enchimento superiores ou iguais a 60%, o que é um

diferencial para o processo pois alguns autores aconselham operação de tambores rotativos em graus de enchimento mais baixos para que a carga de material não comprometa a dinâmica de partículas (BOATENG; BARR, 1996; KARALI et al., 2016; NAFSUN; HERZ, 2016; WU et al., 2019). Contudo, é importante ressaltar que a produção de etanol a partir de CES é um processo anaeróbio, portanto as preocupações acerca do transporte de gases e disponibilidade de oxigênio como fator limitante ao processo são inexistentes. A concentração de biomassa foi descrita conforme a equação logística clássica considerando-se a taxa específica de crescimento máxima. Amostras de material particulado foram coletadas ao longo do tempo e os perfis de conteúdo de biomassa, concentração de açúcares e etanol apresentaram boa concordância com os dados fornecidos pela simulação, bem como os perfis de temperatura do leito.

Diante do exposto, nota-se que as principais referências em termos de modelos a uma fase para CES são aplicados a leitos empacotados e a substratos que possuem distribuição relativamente uniforme de tamanho de partículas, como é o caso do milho e do farelo de trigo, sendo as principais investigações datadas da década de 90 e da primeira década dos anos 2000. Modelos envolvendo substratos similares do bagaço de cana, com distribuições de forma e tamanho notavelmente heterogêneas, não foram encontrados. Além disso, modelos a uma fase que considerem biorreatores com geometrias cilindros parcialmente preenchidos em que o leito de partículas é mantido estático em processos de CES também não foram encontrados.

Os modelos a duas fases para CES começaram a ser explorados no início dos anos 2000, mais precisamente em 2002, quando Von Meien e Mitchell (2002) apresentaram o primeiro modelo a duas fases aplicável a leitos empacotados para CES. Este leito, em particular, possibilitava eventos de agitação, de modo que os autores constataram o ressecamento do leito através das simulações até valores de atividade de água considerados limitantes para o crescimento de *Aspergillus niger* sobre partículas de milho, e então a reposição de água foi sugerida em dois momentos, seguida de agitação do leito para homogeneizar a distribuição de umidade. Para as simulações, foi estabelecido o leito empacotado com comprimento máximo de 2,5 m e aeração forçada ascendente.

Tratando-se de um modelo a duas fases, Von Meien e Mitchell assumiram o ar como um gás ideal para cálculo das propriedades termodinâmicas de interesse, tais como a pressão de vapor e a umidade de saturação. Balanços de massa e energia

foram propostos para as fases gasosa e sólida e contemplaram os seguintes fenômenos de transferência listados no Quadro 3.2. Nota-se que os fenômenos relacionados às difusões térmica e mássica não foram incorporados ao modelo, pois considerou-se que os fenômenos de interface relacionados ao escoamento do ar e resultantes da presença do microrganismo eram predominantes.

Quadro 3.2 – Fenômenos considerados para elaboração de modelo a duas fases por Von Meien e Mitchell (2002).

Balanços de massa	Balanços de energia
Transporte de água através da fase gasosa por advecção	Transporte de calor associado à advecção de massa
Transporte de água através da interface sólido-gás	Transporte de calor por convecção entre as fases gasosa e sólida
Liberação de água devido às atividades metabólicas do microrganismo	Liberação de energia relacionada à evaporação de água da fase sólida para a fase gasosa, interface sólido-gás
	Geração de energia relacionada às atividades metabólicas do microrganismo

FONTE: Elaborado pela autora.

Schutyser et al. (2003) apresentaram um modelo a duas fases para representar os transportes de calor e massa em um leito de grãos de trigo colocado em tambor rotativo com aspersão de água. Como diferencial, os autores solucionaram o modelo empregando-se o método dos elementos discretos, visto que, até então, o método das diferenças finitas era suficiente para as simulações de leitos totalmente estáticos. Isto porque o modelo foi baseado em um modelo discreto previamente utilizado para simular a mistura e movimentação dos grãos de trigo (SCHUTYSER et al., 2001), e previa os perfis de temperatura e umidade das partículas em processo não necessariamente bem misturado. Dada a complexidade do problema, o modelo foi proposto em ausência de microrganismo.

Para o modelo dinâmico de Schutyser e co-autores, parâmetros de transporte de interesse foram experimentalmente determinados e importantes aspectos da operação de biorreatores de tambor rotativo para CES foram apresentados, ainda que sem a presença do microrganismo. Além dos modelos propostos, que representaram

avanço para a área na época da publicação e que hoje são utilizados como referência para posteriores trabalhos, os autores traçaram estratégias de operação de tambores rotativos considerando também a aspersão de água. Para o modelo, os autores consideraram que toda a fração de água junto ao sólido supostamente perdida devido às interações com a fase gasosa seria restituída na aspersão de água. Experimentos de aspersão de água mostraram que gradientes de umidade existiriam entre o topo e o interior do leito, mesmo que sob rotação a 1 rpm, motivo pelo qual foi sugerida que eventos de rotação fossem efetuados ainda depois de finalizada a aspersão de água. Ainda, o emprego de aspersão de água por curtos intervalos de tempo seguida por rotação diminuiriam o surgimento de gradientes de umidade no leito. Considerando-se os possíveis efeitos deletérios das rotações sobre a estrutura do fungo, foi descartada a possibilidade de agitação contínua e aspersão de água a baixas vazões.

No ano seguinte, Schutyser e colaboradores apresentaram um modelo a duas fases para um biorreator de tambor, no qual a presença do microrganismo foi considerada (SCHUTYSER et al., 2004). Este modelo foi baseado naquele proposto por Von Meien e Mitchell (2002), com o diferencial de ser capaz de prever os efeitos da mistura sobre os perfis de temperatura e umidade do leito. Além, Schutyser e co-autores consideraram um balanço de quantidade de movimento baseado na Lei de Darcy para o ar que era inserido no tambor através de um tubo interno localizado em meio ao leito de partículas. A produção de biomassa foi escrita seguindo-se a equação logística clássica [Eq. (3.25)], na qual o μ foi escrito como função da temperatura. Os autores relacionaram a fração de biomassa gerada com a quantidade de oxigênio consumida, sendo a quantidade de calor gerada proporcional ao consumo de oxigênio. A quantidade de água produzida também foi descrita como função do consumo de oxigênio. O modelo foi validado utilizando-se dados experimentais da taxa de consumo de oxigênio e da temperatura média do leito. Neste último, observou-se que a temperatura média do leito estava a aproximadamente 8 °C acima da temperatura inicial do processo em $t = 30$ h. Como medida de controle, a vazão de ar foi intensificada de 6 para 15 L/min, observando-se queda momentânea da temperatura média em 6 °C. Em $t = 50$ h, os dados experimentais indicaram temperatura média superior a 40 °C, o que só foi previsto pelo modelo em $t = 60$ h. Os autores explicaram essa diferença com base nas mudanças estruturais ao longo do tempo, tais como a diminuição da porosidade, presença de hifas fúngicas e

encolhimento das partículas. Ótima concordância entre os perfis de temperatura experimental e simulado foram observados até $t = 40$ h.

O modelo a duas fases mais recente encontrado na literatura para CES é o de Casciadori et al. (2016). Este modelo é capaz de prever os perfis de temperatura e umidade das fases sólida e gasosa, bem como as concentrações de biomassa e de sólido seco ao longo do cultivo, e foi validado com dados experimentais de temperatura e umidade do sólido durante o cultivo de *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo na proporção 7:3 em peso em um biorreator de leito empacotado com aeração ascendente, admitida como uniformemente distribuída ao longo da direção radial. O equacionamento de Casciadori foi baseado naquele pioneiro proposto por Von Meien e Mitchell (2002), com o diferencial de inclusão das difusões térmica e mássica nas direções radial e axial, e solucionado utilizando-se o método das diferenças finitas. Em Casciadori (2016), uma comparação entre os perfis espaciais fornecidos por simulação 1-D (dispersão axial) e 2-D (dispersões axial e radial) são apresentados. Em ambos os casos, os perfis de temperatura das fases sólida e gasosa apresentaram grande proximidade, o que indica que um modelo a uma fase com suposto equilíbrio térmico entre as fases seria suficiente e maiores temperaturas foram observadas no topo da coluna, como já havia sido reportado por Von Meien e Mitchell (2002) para aquele estudo de caso. No entanto, o modelo 2-D permitiu observar a remoção de calor através da camisa da coluna, o que não foi possível através do 1-D. Os resultados em simulação mostraram que as reduções no conteúdo de umidade da fase sólida foram mais preocupantes do que os aumentos de temperatura, uma vez que a concentração de biomassa foi notadamente menor na base da coluna (entrada de ar), indicando que a atividade de água é um fator limitante ao crescimento do microrganismo neste estudo de caso. A validação do modelo com dados experimentais de temperatura em vazão de ar de 60 L/h e 240 L/h foi considerada satisfatória, embora os autores reconheçam que os balanços de água poderiam ter sido aprimorados pois o modelo praticamente não previu as variações no conteúdo de água do sólido ao final do cultivo ao longo do comprimento da coluna para ambas as vazões de ar.

CAPÍTULO 4. BALANÇOS DE MASSA

4.1. Introdução

Tambores rotativos são equipamentos muito versáteis amplamente empregados em diversas operações unitárias, tais como calcinação, secagem, extração e moagem (HENEIN; BRIMACOMBE; WATKINSON, 1983; CAMERON et al., 2005; PIETSCH, 2008). Especialmente em processos de cultivo sólido, alguns estudos recomendam cautela quanto ao uso de biorreatores de tambor rotativo, pois resultados mostraram que o cisalhamento excessivo pode provocar efeitos deletérios sobre a estrutura de crescimento do microrganismo (RAGHAVARAO; RANGANATHAN; KARANTH, 2003). Neste caso, recomenda-se o uso de regime intermitente de rotações, no qual o tambor permanece estático durante longos períodos e é eventualmente rotacionado. Durante os períodos estáticos, o leito de partículas pode ser observado como um leito fixo.

A modelagem de cultivo sólido em biorreatores avançou na década de 90 com a proposição de modelos matemáticos para leitos fixos de colunas empacotadas. Em sua maioria, estes trabalhos negligenciam o transporte de massa durante o processo (SANGSURASAK; MITCHELL, 1995; 1998; FANAEI; VAZIRI, 2009). Estudos mostram que a umidade das partículas e a atividade de água são fatores limitantes para o crescimento fúngico e secreção de enzimas de interesse (ORIOLE et al., 1988; ACUÑA-ARGÜELLES et al., 1994; PANDEY et al., 1994; LU; LI; WU, 2003; CASCIATORI et al., 2015) e que perfis de concentração de água são desenvolvidos durante o cultivo sólido (CASCIATORI et al., 2016).

Esta seção aborda o uso de tambores na secagem de leitos particulados de uma forma pouco convencional, na qual será abordado um estudo teórico de transporte de massa em um tambor horizontal parcialmente preenchido por leito de partículas inorgânicas e, posteriormente, orgânicas, a partir da secagem do leito a partir de sua superfície livre em um sistema isotérmico, motivada pelo escoamento de ar seco em vazões conhecidas sobre o leito de partículas. Este estudo de caso assemelha-se a situações comumente noticiadas durante as primeiras horas de cultivo sólido de microrganismos, em que o meio sólido apresenta temperatura constante e os efeitos da geração de calor metabólico pelo microrganismo ainda não são observados na

Érika F. Rezendes Tada

temperatura do leito. O estudo será baseado na proposição e solução de balanços de massa a partir do conceito de modelos a uma fase capazes de predizer os perfis de umidade em um leito de partículas, que serão verificados através da coleta de dados experimentais de umidade em posições de interesse em leitos de partículas inorgânicas e orgânicas ao longo do tempo. Atenção especial é dada ao coeficiente de difusão efetivo de água no leito de partículas, para o qual uma discussão sobre a estimativa teórica deste parâmetro tomando-se como referência um valor obtido experimentalmente é apresentada. Pretende-se que modelos mais sofisticados, capazes de predizer perfis de temperatura e umidade simultaneamente, sejam embasados no modelo proposto na presente seção, bem como possíveis modelos capazes de predizer situações reais de cultivo sólido em biorreatores de tambor horizontal.

Esta seção foi publicada na forma de um artigo científico no volume 214 do periódico *Chemical Engineering Science*, com o título '*Mass transport in a partially filled horizontal drum: Modelling and experiments*', com contribuições dos Prof. Dr.-Ing. Andreas Bück, Prof. Dr.-Ing. Evangelos Tsotsas e do orientador desta tese, Prof. Dr. João Cláudio Thoméo.

4.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão apresentados a seguir:

- Apresentar um balanço massa capaz de predizer os perfis espaciais e temporais de umidade em um leito de partículas colocado em um tambor horizontal com escoamento de ar seco paralelo à superfície do leito a 50 e 5 L/min;
- Determinar experimentalmente os coeficientes efetivos de difusão de água em leitos porosos (D_{eff}) de partículas sílica gel e de bagaço de cana e apresentar relações deste parâmetro como função da temperatura;
- Comparar os D_{eff} com valores fornecidos por correlações disponíveis na literatura para a geometria de partícula de interesse;
- Estimar os demais parâmetros requeridos pelo modelo, teórica ou experimentalmente;

- Coletar perfis experimentais de umidade no tambor horizontal e compará-los com os perfis fornecidos por simulação.

4.3. Materiais e métodos

4.3.1. Partículas

Partículas de sílica (4 – 6 mm de diâmetro médio) foram empregadas para constituir um leito poroso, inorgânico e úmido. Posteriormente, foram empregadas fibras de bagaço de cana (BC), cedidas pela Usina Virgolino de Oliveira, de José Bonifácio - SP, com aproximadamente 50% de umidade (b.u.). Fibras visivelmente maiores e demais sujidades foram retiradas manualmente. Para fins de conservação, o bagaço de cana foi levado à estufa com convecção forçada para secagem a 60°C até peso constante e, em seguida, armazenado à temperatura ambiente em embalagens plásticas de polipropileno.

Para utilização, as esferas de sílica foram umidificadas ao serem colocadas em um recipiente com injeção de ar saturado em temperatura ambiente até que a umidade final das partículas fosse de aproximadamente 20% (b.u.). O bagaço de cana foi empregado apenas a 75% de umidade (b.u.), correspondente à umidade ótima de crescimento do fungo termofílico *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo na proporção 7:3 (m/m) (ZANELATO et al., 2012; PEREZ; CASCIATORI; THOMÉO, 2019). O bagaço de cana foi umidificado com água destilada até que atingisse a umidade desejada, acondicionado em embalagens plásticas de polipropileno e levado à câmara de refrigeração ($4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante 15 dias. As partículas foram revolvidas manualmente a cada 12 horas para favorecer a homogeneização do seu conteúdo de água.

Na Tabela 4.1 é apresentada a caracterização dimensional de partículas e dos leitos de partículas utilizados neste capítulo e nos capítulos seguintes.

Tabela 4.1 – Caracterização dimensional das partículas e dos leitos de partículas de sílica gel e de bagaço de cana.

Parâmetro	Descrição	Valor	Fonte e comentários
d_s	Diâmetro médio das partículas de sílica	5,6 mm $\pm$ 0,075 mm	
d_{BC}	Diâmetro médio de fibras de bagaço de cana a 75 % (b.u.)	1,45 mm $\pm$ 0,01 mm	Medida direta da dimensão de cem partículas com um paquímetro
l_{BC}	Comprimento médio de fibras de bagaço de cana a 75 % (b.u.)	14,38 mm $\pm$ 2,36 mm	
V_s	Volume médio das partículas de sílica	91,95 mm ³	Partículas assumidas como esferas
V_{BC}	Volume médio das fibras de bagaço de cana a 75 % (b.u.)	23,77 mm ³	Partículas assumidas como cilindros
ε_s	Porosidade do leito de sílica gel	0,38	Medida por deslocamento de fluido
ε_{BC}	Porosidade do leito de bagaço de cana a 75 % (b.u.)	0,733	
			Casciatori et al. (2014)

FONTE: Elaborado pela autora.

4.3.2. Ensaios de transferência de massa em tambor horizontal

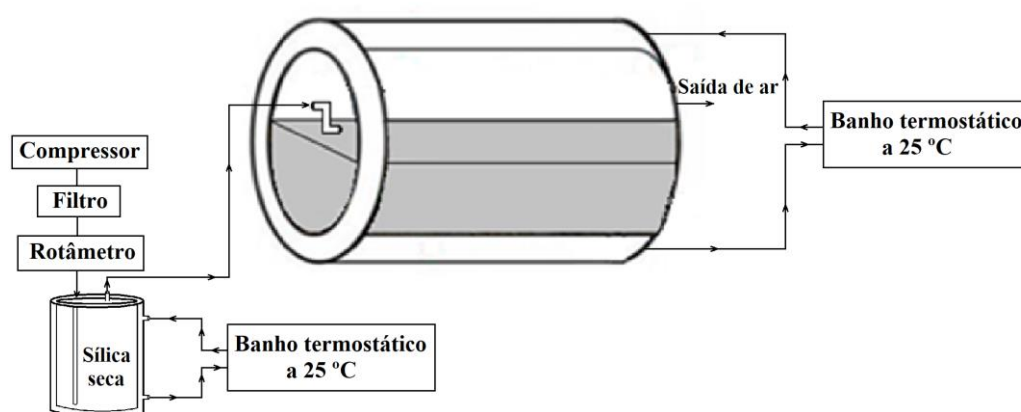
Os ensaios experimentais foram conduzidos em um tambor horizontal com 31 cm de diâmetro interno e 74 cm de comprimento, mostrado na Figura 4.1. Este tambor possui camisa externa para refrigeração, por onde circulou água a 25°C proveniente de um banho termostático. Em uma das tampas foi fixado um dispositivo em formato de Z para que o ar entrasse em paralelo à superfície do leito, sempre a uma distância de 2 cm acima da superfície, independentemente do grau de enchimento do tambor.

O ar foi fornecido por um compressor, passou por um rotâmetro para controle da vazão e percolou uma coluna encamisada de 10 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro recheada com esferas de sílica secas e mantida a 25°C pela passagem de água pela camisa. A umidade relativa do ar ao deixar esta coluna era menor que 15%

e foi aferida por um termo higrômetro Minipa MTH-1362. Ao deixar a coluna de secagem, o ar adentrou o tambor pelo tubo fixado em uma das tampas. A partir daqui, o ar a 15 % de UR será eventualmente referenciado como ar seco.

Foram empregadas vazões de ar a 15 % de UR de 5 e 50 L/min. A primeira corresponde à vazão de ar utilizada por este grupo de pesquisa no cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em leito de bagaço de cana e farelo de trigo em biorreator de tambor (GRAJALES, 2014), enquanto que a segunda corresponde a uma vazão arbitrária e foi escolhida para verificar as possíveis alterações no transporte de massa em presença de uma vazão de ar infinitamente maior que a usual.

Figura 4.1 – Diagrama esquemático do tambor horizontal e acessórios para os ensaios de transferência de massa.



FONTE: Elaborado pela autora.

Para preparar o tambor para receber as partículas, a vazão de ar seco de 80 L/min foi inserida no tambor durante 30 minutos. Após isso, todos os orifícios das tampas foram lacrados, a vazão foi regulada para as vazões usuais e as partículas foram inseridas no tambor. Foram empregadas as quantidades de 25 kg de sílica umidificada até a saturação e, posteriormente, 3,3 kg de fibras de bagaço de cana a 75% de umidade (b.u.) para preencher o tambor em grau de enchimento 0,5. Depois de inseridas as partículas, os orifícios para entrada e saída de ar foram reabertos e o tambor foi mantido estático durante todo o ensaio. Dada a configuração do tambor, assumiu-se escoamento de ar seco paralelo à superfície do leito ao longo do comprimento do tambor.

Amostras da superfície do leito em diferentes posições longitudinais foram coletadas a cada 30 minutos para determinação do conteúdo de umidade. As

amostras da região central do leito foram coletadas através de um tubo de tela metálica, preenchido por partículas, com 72 cm de comprimento e 3 cm de diâmetro. Este tubo foi inserido em posições previamente conhecidas em meio ao leito de partículas. Ao final de cada ensaio, o tubo era retirado e as amostras eram coletadas em diferentes posições longitudinais. Para a coleta de amostras nas posições centrais, a duração dos ensaios variou entre 1 e 7 horas, sendo que o ensaio era finalizado a cada coleta de amostra pois a retirada do tubo de tela metálica promovia distúrbios na estrutura original do leito de partículas. Assim, o tubo de tela metálica era retirado e as amostras eram coletadas de seu interior, após o que eram cuidadosamente envolvidas por folha de alumínio e alocadas em recipiente de poli tereftalato de etila (PET), que eram identificados com a posição nas quais as amostras foram coletadas do leito de partículas. Em todos os casos, a determinação do conteúdo de umidade das amostras era feita em analisador halógeno de umidade Ohaus® modelo MB 35 (Ohaus Corporation, Parsippany, USA), nas temperaturas de 105 e 60 °C para as partículas de sílica e bagaço de cana, respectivamente. Estes ensaios foram realizados somente para leitos de partículas de sílica.

4.3.3. Modelo matemático

Um balanço de massa bidimensional foi proposto para descrever a variação de conteúdo de água em um cilindro horizontal parcialmente preenchido por um leito poroso. O transporte de massa no interior do leito foi considerado puramente difusivo [Eq. (4.1)], e assumiu-se que as fases sólida e fluida constituintes do meio poroso estavam constantemente em equilíbrio mássico para um dado elemento de volume representativo do sistema. A adaptação à geometria de um cilindro parcialmente preenchido foi feita conforme Tada et al. (2017a) para o transporte de calor, em que as considerações acerca da geometria do problema estão apresentadas em detalhes.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right] \quad (4.1)$$

onde X é a fração mássica de água, D_{eff} é a difusividade efetiva da água no leito poroso, r é a posição radial, z é a posição axial e t é o tempo. Em vazões de ar

suficientemente altas, as variações axiais de conteúdo de água podem ser desprezadas, de modo que a Eq. (4.1) torna-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \quad (4.2)$$

As condições inicial e de contorno estão apresentadas nas Eqs. (4.3) a (4.7). Em vazões relativamente baixas, as variações axiais de conteúdo de água devem ser consideradas. Quando desprezadas as variações axiais de conteúdo de água, apenas os contornos espaciais no raio foram considerados [Eqs. (4.4) e (4.5)].

$$t = 0, \quad X = X_0 \quad (4.3)$$

$$r = r_{i(\theta)}, \quad D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial r} = h_m K (X - X_{\text{eq}}) \quad (4.4)$$

$$r = R, \quad D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \quad (4.5)$$

$$z = 0, \quad D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad (4.6)$$

$$z = L, \quad D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad (4.7)$$

em que X_0 é a umidade inicial, h_m é o coeficiente de transferência de massa por convecção entre a superfície do leito e o ar escoando no sobre-espaco, X_{eq} é a umidade de equilíbrio do sólido nas condições termodinâmicas do ar e K é o coeficiente de partição requerido pelo emprego da diferença de umidade da partícula, e é dado por:

$$K = \frac{M}{R^* T} \cdot \frac{P_w^*}{A_w} \quad (4.8)$$

com

$$p_{\text{sat}} = 133,322 \exp \left(16,3036 - \frac{3816,44}{T - 46,13} \right) \quad (4.9)$$

em que M é a massa molar do ar, R^* é a constante universal do gás ideal, T é a temperatura em Kelvin, P_w^* é a pressão de saturação de vapor de água e A_w é a

atividade de água. As isothermas de sorção das partículas de sílica gel e das fibras de bagaço de cana foram extraídas de Inagaki et al. (1996) e Casciotori et al. (2015), respectivamente.

O coeficiente de transferência de massa por convecção entre a superfície do leito e o ar escoante foi calculado através de analogia às relações disponíveis na literatura clássica para transferência de calor por convecção com escoamento forçado de fluido sobre a superfície de uma placa plana, cujas relações estão apresentadas nas Equações (4.10) a (4.12). Estas equações foram utilizadas por Tada et al. (2017a) para cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície de um leito de esferas de vidro e o ar do sobre espaço neste mesmo tambor horizontal.

$$Sh = \frac{h \times L}{D_{eff}} = \sqrt{Sh_{lam}^2 + Sh_{turb}^2} \quad (4.10)$$

em que o número de Sherwood (Sh) é calculado a partir das contribuições laminar e turbulento, admitindo-se que existam micro turbulências ao longo do escoamento do fluido por uma superfície altamente rugosa. As contribuições laminar e turbulenta ao número de Sherwood estão apresentadas a seguir.

$$Sh_{lam} = 0,664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (4.11)$$

$$Sh_{turb} = \frac{0,037 Re^{0,8} Sc}{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Sc^{2/3} - 1)} \quad (4.12)$$

em que Re e Sc são os números de Reynolds e Schmidt, respectivamente.

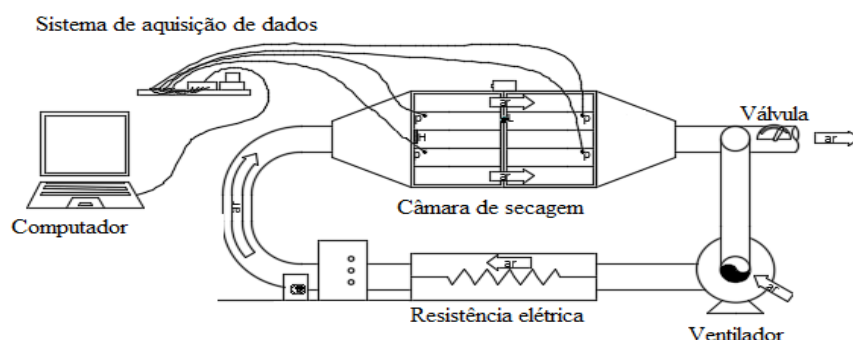
As equações foram escritas em linguagem MATLAB® versão 7.12.0 R2011a (MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA), adaptadas à geometria de um cilindro parcialmente preenchido e solucionadas conforme em Tada et al. (2017a).

4.3.4. Determinação experimental do coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas

O coeficiente efetivo de difusão da água no leito poroso, D_{eff} , foi determinado experimentalmente em secador de bandejas com convecção forçada. O ar de secagem era fornecido por um ventilador centrífugo e aquecido através do contato

direto com resistências elétricas. A velocidade e a temperatura do ar eram controladas por um inversor de frequência e um controlador tipo PI, respectivamente. A câmara de secagem possui a área seccional de $13,86 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ e o escoamento de ar se deu paralelamente à superfície das bandejas. Parte do ar era lançada para o ambiente, enquanto que a outra parte era reciclada para fins de economia de energia. Na Figura 4.2 é apresentado um esquema do secador.

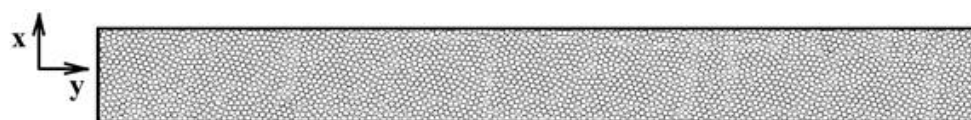
Figura 4.2 – Esquema do secador de bandejas com convecção forçada utilizado para determinação experimental de D_{eff} .



Fonte: Extraído de FILLIPIN et al., 2017.

As partículas úmidas foram acomodadas em um paralelepípedo com as laterais construídas em acrílico com telas metálicas nas faces superior e inferior para conter as partículas. Este paralelepípedo abrigou um volume de 1.2 L, com 20 cm de comprimento, 20 cm de largura e 3 cm de espessura. Assumiu-se que o fluxo de massa ocorreu preferencialmente ao longo do eixo x, como mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Vista frontal da geometria do leito poroso admitida para determinação experimental de D_{eff} .



FONTE: Elaborado pela autora.

O paralelepípedo contendo as partículas foi acomodado sobre uma das bandejas do secador e retirado para pesagem até peso constante. Para ensaios com sílica, as pesagens foram efetuadas a cada 10 minutos durante a primeira hora de ensaio e a cada 20 minutos no tempo restante. Para ensaios com bagaço de cana, pesagens

sucessivas foram efetuadas a cada 5 minutos. As partículas de sílica e de BC iniciaram os ensaios com conteúdo de umidade de 0,25 e 3 kg/kg de sólido seco, respectivamente. Os ensaios foram conduzidos em duplicata com ar de secagem a 60, 70 e 80 °C. O sistema foi assumido como isotérmico.

O D_{eff} foi calculado através de ajuste da cinética de secagem predita pela solução de um balanço de massa unidimensional à cinética experimental de secagem, admitindo-se a geometria de uma placa plana. Para solução, considerou-se inexistência de resistências externas, em que a umidade de equilíbrio do sólido na respectiva temperatura foi admitida como aquela obtida ao final da secagem, e contorno simétrico na posição central de interesse. Para cada temperatura, o valor de D_{eff} foi considerado adequado quando obtidos bons ajustes entre as cinéticas experimental e predita. A dependência de D_{eff} em relação à temperatura foi estimada através de uma equação do tipo Arrhenius.

As sensibilidades estatísticas dos parâmetros de transporte efetivos em leitos de sílica e bagaço de cana, $D_{eff,s}$ e $D_{eff,BC}$, respectivamente, às variações de temperatura foram verificadas através de uma análise de variância ANOVA a nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Quando esta hipótese foi verdadeira, procedeu-se com teste de comparação de médias ao mesmo nível de significância. Para as análises estatísticas, os valores de D_{eff} foram empregados em cm^2/min .

4.3.5. Correlações para cálculo da difusividade efetiva de água em leitos de partículas

Winterberg et al. (2000) apresentaram uma correlação para cálculo de coeficientes efetivos de dispersão radial para transferências de massa aplicáveis à leitos empacotados por partículas esféricas, apresentada na Eq. (4.13). O coeficiente efetivo de transferência de massa por difusão, D_{esfera} , é composto pela soma das contribuições estática, $\delta_{bed,esfera}$, que representa o coeficiente efetivo em ausência de percolação de ar, e dinâmica, representada pelo segundo termo do lado direito. Para casos em que não há percolação por ar, $D_{esfera} = \delta_{bed,esfera}$.

$$D_{esfera} = \delta_{bed,esfera} + K_{1,m} Pe_0 \frac{u_c}{u_0} f(R - r) \delta \quad (4.13)$$

em que $K_{1,m}$ é uma constante que determina a taxa de aumento do parâmetro efetivo com a velocidade de escoamento do ar, Pe_0 é o número de Peclet calculado a partir

de uma velocidade superficial u_0 , u_c é a velocidade superficial no centro do tubo e δ é o coeficiente de difusão molecular da fase gasosa. $f(R-r)$ é uma constante, definida como:

$$f(R-r) = \begin{cases} \left(\frac{R-r}{K_{2,m}d_p} \right)^{n_m} & \text{para } 0 < R-r \leq K_{2,m}d_p \\ 1 & \text{para } K_{2,m}d_p < R-r \leq R \end{cases} \quad (4.14)$$

$$(4.15)$$

em que d_p é o diâmetro da partícula, e n_m e $K_{2,m}$ são constantes obtidas através do ajuste do modelo a dados experimentais disponíveis na literatura.

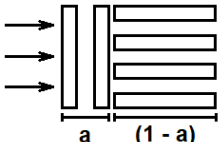
Uma equação similar foi apresentada por Winterberg e Tsotsas (2000) para cálculo da condutividade térmica efetiva de um leito empacotado por partículas cilíndricas. Fazendo-se analogia entre os transportes de calor e massa e desprezando-se o termo dinâmico, esta equação pode ser escrita na mesma forma que a Eq. (4.13) e, portanto:

$$D_{cilindro} = \delta_{bed,cilindro} \quad (4.16)$$

onde $D_{cilindro}$ representa o coeficiente efetivo de difusão de massa no leito de partículas cilíndricas e $\delta_{bed,cilindro}$ é o coeficiente efetivo de transporte de massa por difusão em leito de partículas cilíndricas em ausência de percolação por ar.

Zehner e Schlünder (1970) listaram correlações para cálculo da condutividade térmica efetiva de leito de partículas esféricas e cilíndricas em ausência de percolação de ar. No presente trabalho, as partículas de sílica e as fibras de bagaço de cana foram assumidas como esferas e cilindros, respectivamente. Tais correlações podem apresentar forma análoga para cálculo de $\delta_{bed,esfera}$ e $\delta_{bed,cilindro}$, apresentadas no Quadro 4.1. Nestas equações, δ_s é o coeficiente efetivo de difusão de massa no sólido, cujos valores foram extraídos de Miranda (2007) e Mendes, Chaux e Thoméo (2014) para sílica gel e bagaço de cana, respectivamente, e ε é a porosidade do leito.

Quadro 4.1 – Correlações para cálculo de coeficiente efetivo de difusão em leitos empacotados por partículas esféricas e cilíndricas em ausência de percolação por ar.

Partícula	Correlação		Eq.	Referência
Esférica	$\frac{\delta_{\text{bed,esfera}}}{\delta} = \frac{2}{1 - \delta/\delta_s} \left[\frac{\ln(\delta_s/\delta)}{1 - \delta/\delta_s} - 1 \right]$		(4.17)	Schlünder (1966)
Cilíndrica	Posicionamento paralelo à direção de referência	$\frac{\delta_{\text{I}}}{\delta} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{\delta_s}{\delta}$	(4.18)	Krischer e Esdorn (1956)
	Posicionamento perpendicular à posição de referência	$\frac{\delta_{\text{II}}}{\delta} = \frac{1}{\varepsilon + \frac{1 - \varepsilon}{\delta_s/\delta}}$	(4.19)	
	Parâmetro médio, com 	$\frac{\delta_{\text{bed,cilindro}}}{\delta} = \frac{1}{\frac{1 - a}{\delta_{\text{I}}/\delta} + \frac{a}{\delta_{\text{II}}/\delta}}$	(4.20)	

FONTE: Adaptado de Zehner e Schlünder (1970).

Os coeficientes de difusão foram calculados para os leitos de sílica gel e de fibras de bagaço de cana assumindo-se que as partículas eram bem representadas pelas geometrias de esferas e cilindros, respectivamente. Portanto, a partir daqui, $\delta_{\text{bed,esfera}} = \delta_{\text{bed,S}}$ e $\delta_{\text{bed,cilindro}} = \delta_{\text{bed,BC}}$.

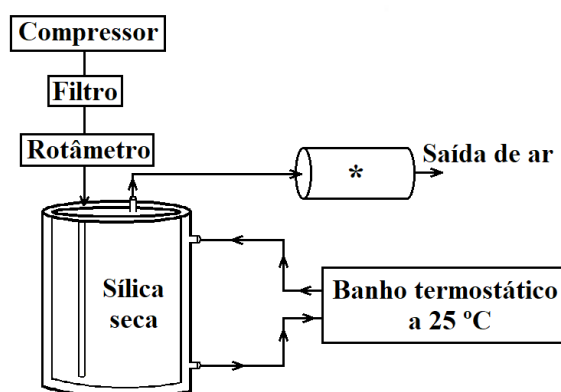
4.3.6. Determinação experimental das umidades de equilíbrio das partículas

Estes ensaios foram conduzidos para se obter a umidade de equilíbrio das partículas a 25 °C para posterior utilização como valores de referência nas condições de contorno propostas para solução do Balanço de Massa [Eqs. (4.1) e (4.2)]. As umidades de equilíbrio de leitos porosos de sílica gel e de bagaço de cana foram determinadas submetendo-se uma quantidade conhecida de partículas à secagem em ar seco em temperatura ambiente. Um cilindro curto com 2,54 cm de diâmetro interno e 4 cm de comprimento, construído em policloreto de vinila (PVC), foi totalmente preenchido por partículas. Este cilindro possuía dois orifícios, cada um localizado em uma extremidade axial, por onde entrava e saía o ar. No orifício de saída do ar, uma tela metálica foi colocada para conter as partículas. O ar ambiente, proveniente de um

compressor, passava por um filtro para retirada de impurezas e, em seguida, por um rotâmetro. Nestes ensaios, foi empregada vazão de 50 L/min. Em seguida, o ar era feito passar por uma coluna encamisada com 10 cm de diâmetro interno e 25 cm de comprimento mantida a 25 °C e recheada por esferas de sílica secas. A umidade relativa do ar era monitorada utilizando-se um termo higrômetro digital Minipa MTH-1362 imediatamente após a saída da coluna de preparo, a cada dez horas. A sílica da coluna era trocada por sílica recém seca e resfriada a cada 12 horas, aproximadamente. O ar era considerado seco e propício para utilização neste ensaio quando sua umidade relativa era inferior a 15%. Uma mangueira levava o ar da coluna de condicionamento até a coluna de secagem. O aparato experimental utilizado nestes ensaios está apresentado na Figura 4.4.

Nestes experimentos, as esferas de sílica para secagem foram empregadas totalmente saturadas e o bagaço de cana, a 75 % (b.u.) e, após 36 horas de secagem, uma amostra de partículas era coletada e levada para determinação de umidade. Após 12 horas desta primeira determinação, uma nova amostra era coletada e, se verificada não variação no conteúdo de umidade, o ensaio era interrompido e essa era a umidade de equilíbrio. Se verificadas variações, prosseguia-se com a secagem por mais 12 horas até que variações na umidade da amostra não fossem percebidas. Os ensaios foram feitos em triplicata para cada tipo de partícula. Estatísticas básicas entre as repetições foram obtidas utilizando-se o software Minitab v.16.2.0 (Minitab Inc., State College, USA) em nível de significância de 5%.

Figura 4.4 – Aparato experimental utilizado para determinação da umidade de equilíbrio de leitos porosos inicialmente úmidos sujeitos à secagem empregando-se ar de secagem (UR < 15%).



FONTE: Elaborado pela autora.

Ensaio experimentais de transferência de massa em tambor horizontal em vazão de ar de 5 L/min indicaram que a umidade das partículas na superfície do leito variava ao longo do comprimento do tambor, como será mostrado adiante. Por conta disso, assumiu-se que a capacidade do ar de remover água da superfície do leito mudava ao longo do comprimento do tambor devido às mudanças em sua umidade absoluta. Para estimativa da umidade de equilíbrio em cada posição axial, o modelo de Peleg (PELEG, 1988), mostrado na Eq. (4.21), foi ajustado às cinéticas de perda de água das partículas na superfície do leito ao longo do comprimento do tambor, coletadas em ensaios de transferência de massa conduzidos com introdução de ar a 5 L/min e umidade relativa de 15 %. As posições axiais consideradas foram $z/L = 0.1$; 0.2; 0.3; 0.5 e 0.9. A umidade de equilíbrio para este caso, X_{eq}^* , pode ser estimada considerando-se tempos suficientemente longos ($t \rightarrow \infty$), quando a Eq. (4.21) tende à Eq. (4.22).

$$X_t = X_0 - \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad (4.21)$$

$$X_{eq}^* = X_0 - \frac{1}{K_2} \quad (4.22)$$

em que X_t é a umidade para cada tempo t e K_1 e K_2 são as constantes do modelo.

4.4. Resultados e discussão

4.4.1. Umidades de equilíbrio (X_{eq}) das partículas de sílica e bagaço de cana

As umidades de equilíbrio dos leitos de sílica gel e de fibras de bagaço de cana estão apresentadas na Tabela 4.2 para diferentes umidades iniciais. Os desvios padrões para todas as amostras são relativamente baixos, o que supõe reprodutibilidade da técnica. Um teste de comparação de médias indicou que não houve diferença significativa entre as X_{eq} partindo-se de diferentes umidades iniciais para um mesmo grupo de partículas em nível de significância de 95%. A umidade inicial também não afetou a máxima capacidade de retenção de água de partículas de bagaço de cana, como apresentado por Tada et al. (2019).

Tabela 4.2 – Umidades de equilíbrio das partículas de sílica gel e bagaço de cana a 25 °C e 15 % de umidade relativa.

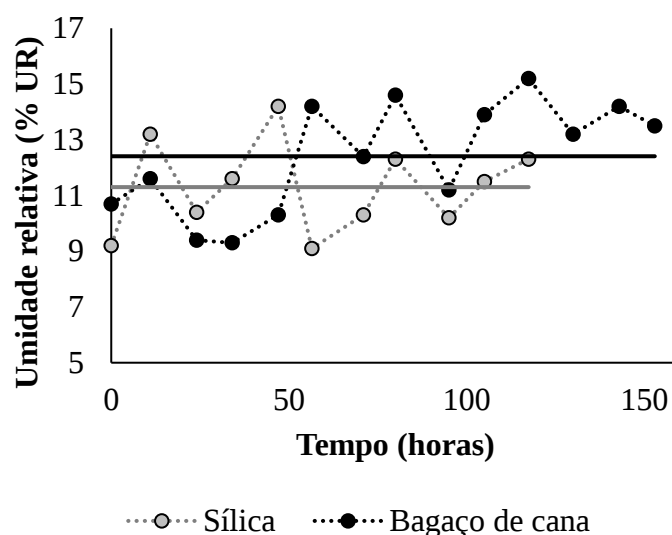
Partículas	X ₀ (kg/kg-ss)	X _{eq} (kg/kg-ss)	CV (%)	IC (kg/kg-ss)
Sílica	0.15 ± 0.008	0.024 ^a ± 0.0015	6.27	0.0192; 0.0289
	0.20 ± 0.003	0.024 ^a ± 0.0014	5.63	0.0192; 0.0294
	0.25 ± 0.006	0,026 ^a ± 0,0011	4.19	0.0223; 0.0298
Bagaço de cana	0.48 ± 0.03	0.09 ^A ± 0.008	8.61	0.0692; 0.1225
	1.11 ± 0.12	0.08 ^A ± 0.01	12.21	0.0502; 0.1215
	3.1 ± 0.08	0.08 ^A ± 0.006	7.73	0.0602; 0.1054

CV: coeficiente de variação (CV = média/desvio padrão); **IC:** intervalo de confiança em nível de significância de 95%. Letras iguais indicam que não houve diferença significativa ao nível de significância de 95 %. FONTE: Elaborado pela autora.

O tempo médio de secagem das partículas de sílica foi de 132 horas, enquanto que as fibras de bagaço de cana requereram 168 horas. Estes tempos não correspondem aos tempos finais da secagem, mas àqueles em que não foram mais observadas variações na umidade das amostras, seguindo-se a metodologia adotada. Nota-se que a umidade de equilíbrio do bagaço de cana foi quase três vezes maior que a umidade da sílica e isso está relacionado com a natureza das partículas e às possíveis ligações da água com suas estruturas, bem como o maior desvio padrão observado para os dois tipos de partículas. O desvio padrão noticiado para partículas de sílica foi três vezes menor do que para o bagaço de cana, o que é considerado aceitável, uma vez que partículas inorgânicas e com geometria definida tendem a apresentar comportamento previsível e reprodutibilidade nos ensaios. Além das questões relacionadas às interações em microescala, existem também aquelas que dizem respeito às possíveis mudanças na estrutura do leito de partículas ao longo da secagem. Casciatori et al. (2014) reportou que a porosidade de um leito de bagaço de cana diminui com o aumento da umidade. Desse modo, se a porosidade do leito empacotado aumenta ao longo do tempo, ampliam-se os caminhos disponíveis para o escoamento do ar por entre as partículas, facilitando o contato de cada partícula úmida com o ar seco, o que justifica os tempos requeridos de secagem relativamente próximos para os leitos com umidades iniciais tão distantes. As umidades de equilíbrio obtidas nestes ensaios serão utilizadas como valores reais de umidade de equilíbrio requeridos para solução do balanço de massa proposto nessa seção e serão empregadas como valores de referência no capítulo 5 (*Balanços de massa e energia*).

Para registro, na Figura 4.5 estão apresentadas as umidades relativas médias do ar utilizado para secagem dos leitos de sílica e bagaço de cana em temperatura ambiente. A umidade relativa ao longo do tempo não foi efetivamente controlada seguindo-se a metodologia proposta, mas foi monitorada e permaneceu inferior a 15%, como sugerido. Não foi percebida tendência da umidade relativa ao longo do tempo, uma vez que a umidade relativa do ar após percolar a coluna de sílica gel seca a 25 °C foi diretamente dependente das condições do ar ambiente. Por esse motivo, erro e desvio padrão médios não foram considerados.

Figura 4.5 – Umidades relativas do ar verificadas ao longo da secagem de leitos empacotados de sílica e bagaço de cana em temperatura ambiente.

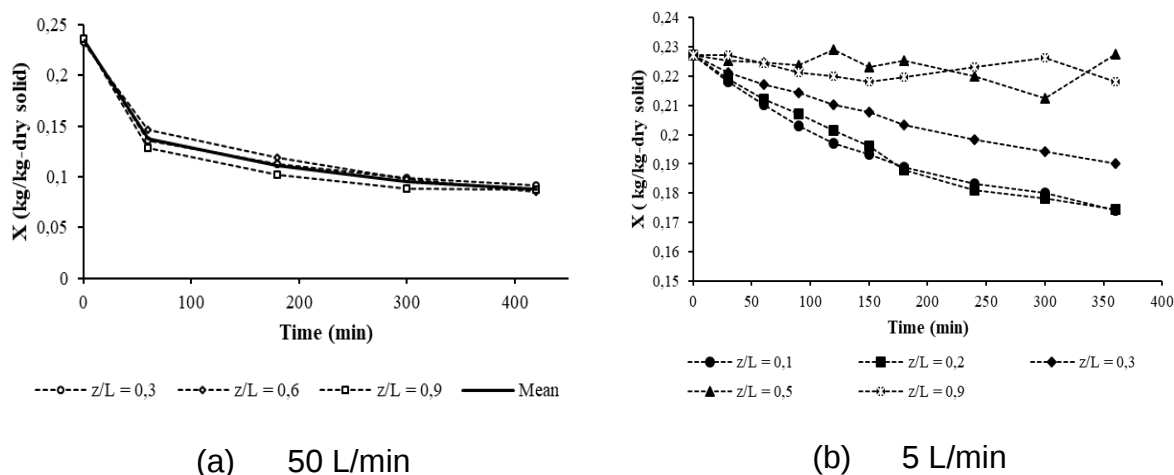


FONTE: Elaborado pela autora.

Na Figura 4.6 estão apresentadas as cinéticas de perda de água na superfície do leito de partículas de sílica ao longo do comprimento do tambor para 50 e 5 L/min.

Note que os perfis axiais obtidos a 50 L/min mostram que existiu pouca variação no conteúdo de umidade das amostras da superfície do leito ao longo do comprimento do tambor (L), ou seja, as condições do ar de escoamento sofreram pouca ou quase imperceptível variação ao longo de L. Já a 5 L/min, nota-se que as perdas de água são mais intensas nas posições axiais próximas à entrada de ar ($z/L = 0,1$ e $0,2$), e diminuem ao longo de L, apresentando comportamento desordenado de $L/2$ a L.

Figura 4.6 – Perfis axiais de perda de água na superfície do leito de partículas de sílica ao longo do comprimento do tambor com introdução de ar a 50 e 5 L/min ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $UR = 15\%$).



FONTE: Elaborado pela autora.

4.4.2. A dependência de D_{eff} em relação à temperatura

Nas Figuras 4.7 e 4.8 estão apresentadas as cinéticas de secagem sob diferentes temperaturas do ar de secagem dos leitos de partículas de sílica e bagaço de cana, respectivamente, com o ajuste da solução da Segunda Lei de Fick para difusão de massa em regime transiente, que forneceu os coeficientes D_{eff} para cada um dos leitos de partículas com $R^2 = 0,99$.

A dependência de D_{eff} de leitos porosos de partículas inorgânicas e orgânicas em relação à temperatura foi bem descrita através de relações do tipo Arrhenius ($R^2 \geq 0,97$) como apresentado nas Equações (4.23) e (4.24). Este tipo de equação representa a variação do parâmetro D_{eff} em relação à temperatura e tem sido amplamente reportada pela literatura (BANGA; SINGH, 1994; SIMAL et al., 1997; IGUAZ et al., 2003).

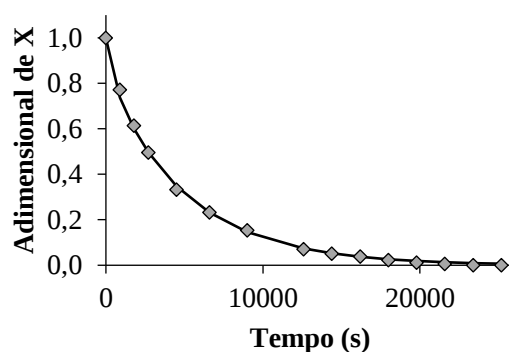
$$D_{eff,S} = 2,62 \times 10^{-5} \exp^{-23713,19/R^*T} \quad R^2 = 0,99 \quad (4.23)$$

$$D_{eff,BC} = 1,25 \times 10^{-5} \exp^{-15125,66/R^*T} \quad R^2 = 0,97 \quad (4.24)$$

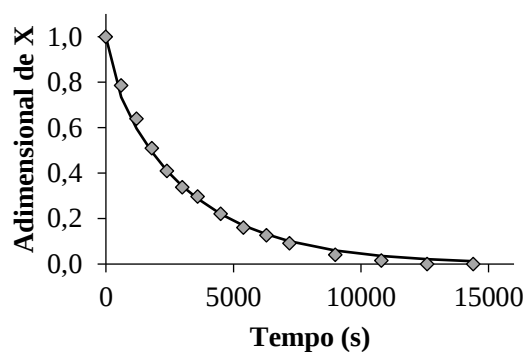
A energia de ativação mínima (E_a) necessária para promover migração de umidade no leito poroso foi 1.5 vezes maior em ensaios com esferas de sílica em relação às fibras de BC. Estes valores relacionam-se com os tempos de secagem requeridos para cada tipo de partícula empregado. Enquanto que os ensaios

conduzidos com esferas de sílica a 20% de umidade (b.u.) tiveram duração de 7 horas a 60 °C, por exemplo, os ensaios com fibras de BC a 75 % de umidade (b.u.) requeriam aproximadamente 1 hora nesta temperatura. Além disso, a variação de 20 °C na temperatura do ensaio promoveu variação de 3,5 horas no tempo de secagem para esferas de sílica, enquanto que apenas 15 minutos diferiram os tempos de secagem de ensaios a 60 e a 80 °C. Estes dados experimentais evidenciaram a notável variação de $D_{\text{eff},S}$ às alterações na temperatura, enquanto que o mesmo foi percebido com sutilezas para $D_{\text{eff},BC}$.

Figura 4.7 – Cinéticas de secagem dos **leitos de partículas de sílica** obtidas em secagem em secador de bandejas com convecção forçada, para determinação do coeficiente efetivo de difusão de água no leito poroso, $D_{\text{eff},S}$, para as temperaturas de (a) 60 °C, (b) 70 °C e (c) 80 °C.

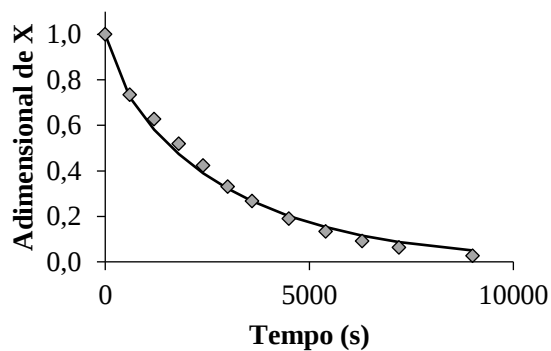


(a) $D_{\text{eff},S,60} = 4,96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$



(b) $D_{\text{eff},S,70} = 7,56 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

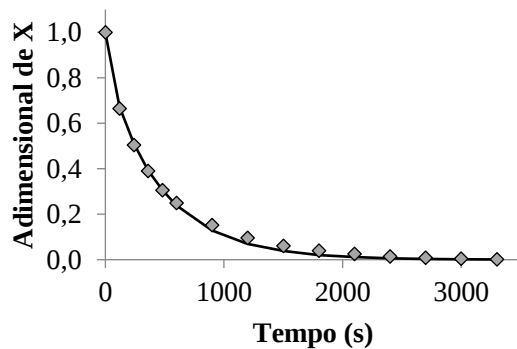
Figura 4.7: continuação.



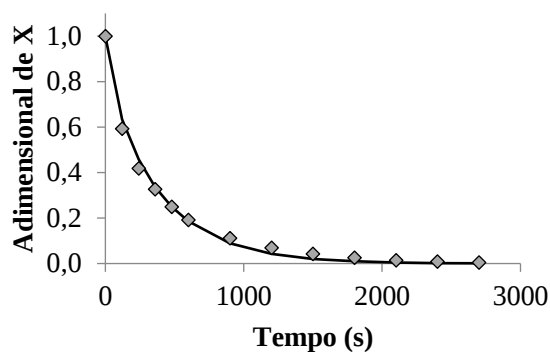
$$D_{\text{eff},S,80} = 8,05 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 4.8 – Cinéticas de secagem dos **leitos de fibras de bagaço de cana** obtidas em secagem em secador de bandejas com convecção forçada, para determinação do coeficiente efetivo de difusão de água no leito poroso, D_{eff} , para as temperaturas de (a) 60 °C, (b) 70 °C e (c) 80 °C.

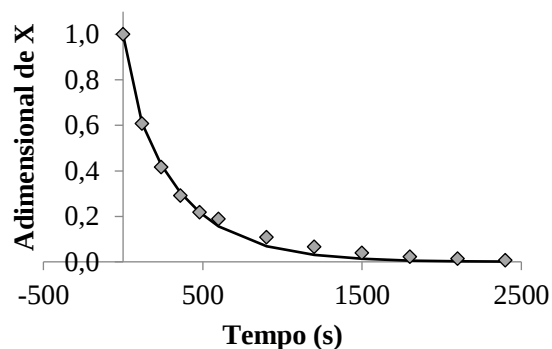


$$(a) D_{\text{eff},BC,60} = 5,25 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$



$$(b) D_{\text{eff},BC,70} = 6,45 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

Figura 4.8: continuação.

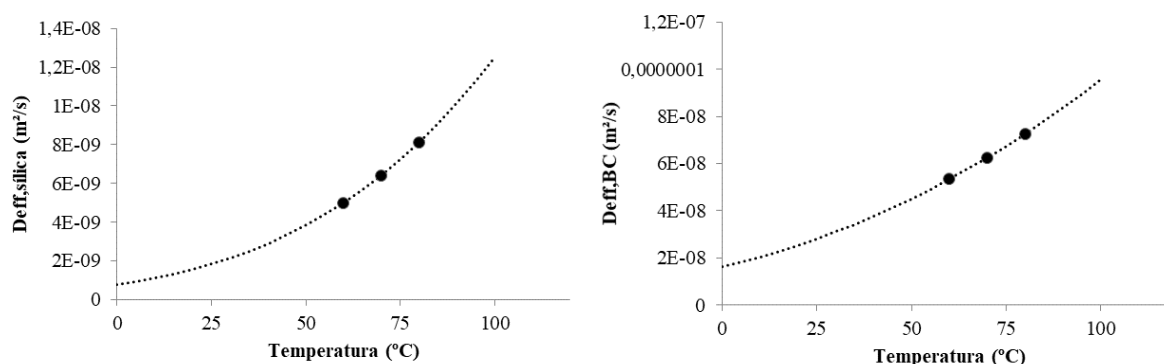


(c) $D_{\text{eff},\text{BC},80} = 7,17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

FONTE: Elaborado pela autora.

As extrapolações de D_{eff} a uma faixa de temperatura de 100 °C através das Equações (4.23) e (4.24) estão apresentadas na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Comportamento de D_{eff} em leitos de esferas de sílica e fibras de bagaço de cana em relação às variações de temperatura.



FONTE: Elaborado pela autora.

Pesaran e Mills (1986) determinaram experimentalmente a fração mássica de água em um leito empacotado com partículas de sílica com escoamento de ar por entre as partículas a diferentes velocidades ($Re \leq 218$), e ajustaram os dados da cinética aos modelos SSR e PGC para estimativa do coeficiente efetivo de difusão de água no leito. O modelo SSR (*solid-side resistance*) inclui resistências à transferência de massa presentes no gás e no sólido, enquanto que o modelo PGC (*pseudo-gas-site controlled*), a resistência ao transporte de massa no sólido é embutida em um coeficiente que representa a transferência de massa entre o ar e o sólido. Os autores reportaram valores da ordem de grandeza de 10^{-5} e 10^{-6} para $D_{0,\text{eff}}$, próximo ao valor reportado na Eq. (4.11) do presente trabalho para o leito de esferas de sílica.

Bedane et al. (2015) reportaram resultados experimentais de D_{eff} de água em diferentes materiais celulósicos, tais como celulose nanofibrilada e filmes de celulose regenerados obtidos de diferentes fontes, em função da umidade relativa do ar a 25 °C. Para todos os materiais, a dependência de D_{eff} foi descrita como um polinômio de segundo grau com concavidade para baixo, sendo que menores valores foram obtidos para a menor umidade relativa (10% UR) e maiores valores foram obtidos para UR em torno de 50%, com decréscimo de D_{eff} para UR superiores. A ordem de grandeza observada para o coeficiente D_{eff} foi de 10^{-13} a 10^{-14} m²/s. Rocha et al. (2011) apresentou a composição química do bagaço de cana *in natura* com a fração de 45% de celulose na fração seca. Dado que o bagaço de cana é composto ainda por frações de hemicelulose, lignina e minerais, estima-se que os demais componentes, bem como a estrutura das fibras e do leito tenham contribuído para que os valores de $D_{\text{eff,BC}}$ fossem tão distantes dos valores para os coeficientes de materiais celulósicos de Badane et al. (2015).

Wolf et al. (2015) apresentaram coeficientes efetivos de difusão de água em fibras de palha de trigo em função da atividade de água do material, determinados experimentalmente utilizando-se medidas de cinética de sorção a 20 °C (GUILLARD et al., 2003) e obtiveram resultados próximos a 2×10^{-11} m²/s, sendo que maiores atividades de água resultaram coeficientes D_{eff} menores. Estima-se que os valores para este coeficiente sejam diminuídos quando determinado o parâmetro para um leito constituído por fibras de palha de trigo. O valor deste parâmetro é importante, pois fornece informações sobre parâmetros de interesse relacionados à produtos e subprodutos de trigo, visto que o Grupo de Pesquisa em Bioenergia do IBILCE/UNESP utiliza de uma mistura entre bagaço de cana e farelo de trigo para produção de celuloses for FES.

A análise de variância apontou influência estatisticamente significativa da temperatura sobre os valores de D_{eff} para ambos os tipos de partículas analisados, como apresentado na Tabela 4.3. Mesmo que a significância da temperatura sobre os valores de D_{eff} tenham sido evidenciados tanto para leito de sílica como para o leito de fibras de BC, a intensidade da significância pode ser observada pelo valor da estatística F. Dado que F é um valor tabelado e depende diretamente dos graus de liberdade do fator e do nível de significância da análise, quanto mais distante do valor tabelado, maior seria a influência do fator sobre a resposta. Este fato corrobora com a discussão apresentada acima sobre as variações nos tempos de secagem de leitos

de esferas de sílica e de fibras de BC: a estatística F da análise para o leito das esferas de sílica é aproximadamente 12 vezes maior que o mesmo para o leito de BC, o que mostra que a variação do parâmetro D_{eff} em relação à temperatura neste leito é muito mais intensa do que em leitos compostos por fibras de BC.

Tabela 4.3 – Análise de variância (ANOVA) para a dependência de D_{eff} com a temperatura para os leitos de esferas de vidro e de fibras de BC.

Source	DF	SS	MS	F	P
D _{eff,S}					
Temperature	2	0,0344977	0,0172489	4422,78	0,000
Error	3	0,0000117	0,0000039		
Total	5	0,0345094			
R-Sq = 99,97%		R-Sq(adj) = 99,94%			
D _{eff,BC}					
Temperature	2	1,32635	0,66317	358,64	0,000
Error	3	0,00555	0,00185		
Total	5	1,33189			
R-Sq = 99,58%		R-Sq(adj) = 99,31%			

FONTE: Elaborado pela autora.

4.4.3. Cálculo do coeficiente efetivo de difusão em leito de partículas

Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores para coeficientes de difusão em leitos de sílica gel, $\delta_{\text{bed,S}}$, [Eq. (4.17)] e de bagaço de cana, $\delta_{\text{bed,BC}}$, [Eqs. (4.18) a (4.20)], calculados a partir das correlações listadas em Zehner e Schlünder (1970). Como citado na seção materiais e métodos, as partículas de sílica foram assumidas como esferas e as fibras de bagaço de cana foram aproximadas à geometria de cilindros. Para o leito de bagaço de cana, $\delta_{\text{bed,BC}}$ é uma função da porosidade do leito e então assumiu-se inicialmente o valor constante de 0,73, porosidade média reportada por Casciatori et al. (2014) para uma coluna empacotada por bagaço de cana a 3 kg/kg de sólido seco. Os valores obtidos a partir das correlações em função da temperatura, D_{eff} , divulgadas neste trabalho a partir de dados experimentais, também estão apresentadas para a temperatura de 25°C e serão utilizadas como valores de referência.

Tabela 4.4 – Valores para coeficientes efetivos de difusão em leitos de partículas de sílica gel ($\delta_{bed,S}$) e de bagaço de cana ($\delta_{bed,BC}$) obtidos a partir de correlações.

Partículas	$\delta_{bed} \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$	$D_{eff} \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$
Sílica (S)	1,79	1,83
Bagaço de cana (BC)	20,4	27,9

FONTE: Elaborado pela autora.

Os valores teórico e experimental para leito de sílica são próximos, o que indica que a correlação seria suficiente para estimativa do parâmetro. Se fornecidos os coeficientes de difusão através das fases sólida e gasosa, $\delta_{bed,S}$ poderia ser estimado para uma amplitude de temperatura sem maiores implicações, pois a estrutura do leito não é influenciada pelas variações de temperatura.

Já para o leito de bagaço de cana, nota-se um distanciamento considerável entre os resultados teórico e experimental, justificado pela natureza das estimativas. Enquanto que D_{eff} representa um valor médio ao longo da secagem do leito de partículas e, portanto, inclui as variações da porosidade do leito com a umidade que já foram apontadas por Casciadori et al. (2015), $\delta_{bed,BC}$ foi calculado a partir de uma porosidade média do leito para um conteúdo de umidade de partículas fixo. Além disso, sabe-se que a geometria do espaço no qual o leito de partículas está confinado pode influenciar a estimativa do parâmetro. Isso foi observado especialmente para o leito de bagaço de cana, em que a distribuição dimensional de partículas é mais ampla do que o leito de bagaço de cana e, portanto, espera-se que as partículas se acomodem de modos distintos em diferentes espaços geométricos. Enquanto que os dados experimentais foram obtidos em geometria cartesiana de um paralelepípedo preenchido por partículas, o cálculo do parâmetro através de correlações considerou a geometria do tambor parcialmente preenchido em coordenadas cilíndricas. Além disso, os contornos utilizados para solucionar os modelos para as geometrias de paralelepípedo e tambor foram diferentes na superfície do leito, sendo que o primeiro considerou contorno de Dirichlet em ambas as superfícies livres enquanto que no segundo o contorno de Robin foi adotado na superfície livre e a parede impermeável foi representada por um contorno de Neumann com fluxo nulo. Além disso, é possível que turbulências sejam desenvolvidas devido ao fluxo de gás escoante relativamente alto no experimento em paralelepípedo em secador com convecção forçada, o que difere do sistema experimental proposto em tambor horizontal. Sob tais condições, é aceitável que exista algum distanciamento entre os parâmetros e assume-se que os

coeficientes efetivos de difusão de água nos leitos de partículas seriam idealmente representados pela determinação experimental dentro do próprio tambor horizontal sob introdução de ar seco paralelo à superfície do leito a vazões suficientemente altas até que todo o leito de partículas apresentasse umidade constante; neste ensaio, todas as particularidades desta geometria não convencional seriam consideradas. No entanto, é importante destacar que a execução desse tipo de experimento demandaria de tempos infinitamente longos e estaria sujeito à erros experimentais não desprezíveis levando-se em consideração as dificuldades relacionadas à determinação experimental da umidade das partículas nas posições mais profundas do leito, o que poderia comprometer a determinação experimental de D_{eff} em termos de reprodutibilidade e confiabilidade do parâmetro. Neste sentido e apesar das considerações pontuadas, a determinação experimental de D_{eff} apresentada neste trabalho é mantida como valor de referência do parâmetro e algumas adaptações são propostas para que o valor calculado se aproxime do valor experimental unicamente para o leito de bagaço de cana, para o qual as diferenças foram mais expressivas.

Sabe-se que a porosidade local de uma coluna empacotada varia ao longo da posição radial (ROBLEE et al., 1958; BEAVERS et al. 1973; GOODLING et al, 1983; MUELLER, 2010). Para representar tal variação, adota-se a equação de Giese (1998), dada por:

$$\varepsilon_{(r)} = \varepsilon_c \left[1 + A \exp \left(-B \frac{R-r}{d_p} \right) \right] \quad (4.25)$$

em que ε_c é a porosidade no centro do tubo ($r = 0$), onde espera-se que não haja influência da presença da parede rígida da coluna, d_p é o diâmetro da partícula calculado utilizando-se a Eq. (4.26) e A e B são constantes, que para um leito empacotado por partículas cilíndricas foram assumidas como apresentado nas Eqs. (4.27) e (4.28):

$$d_p = d \sqrt[3]{\frac{3}{2d/x}} \quad (4.26)$$

$$A = 1 - \frac{0,55}{\varepsilon_c} \quad (4.27)$$

$$B = 0,06 \quad (4.28)$$

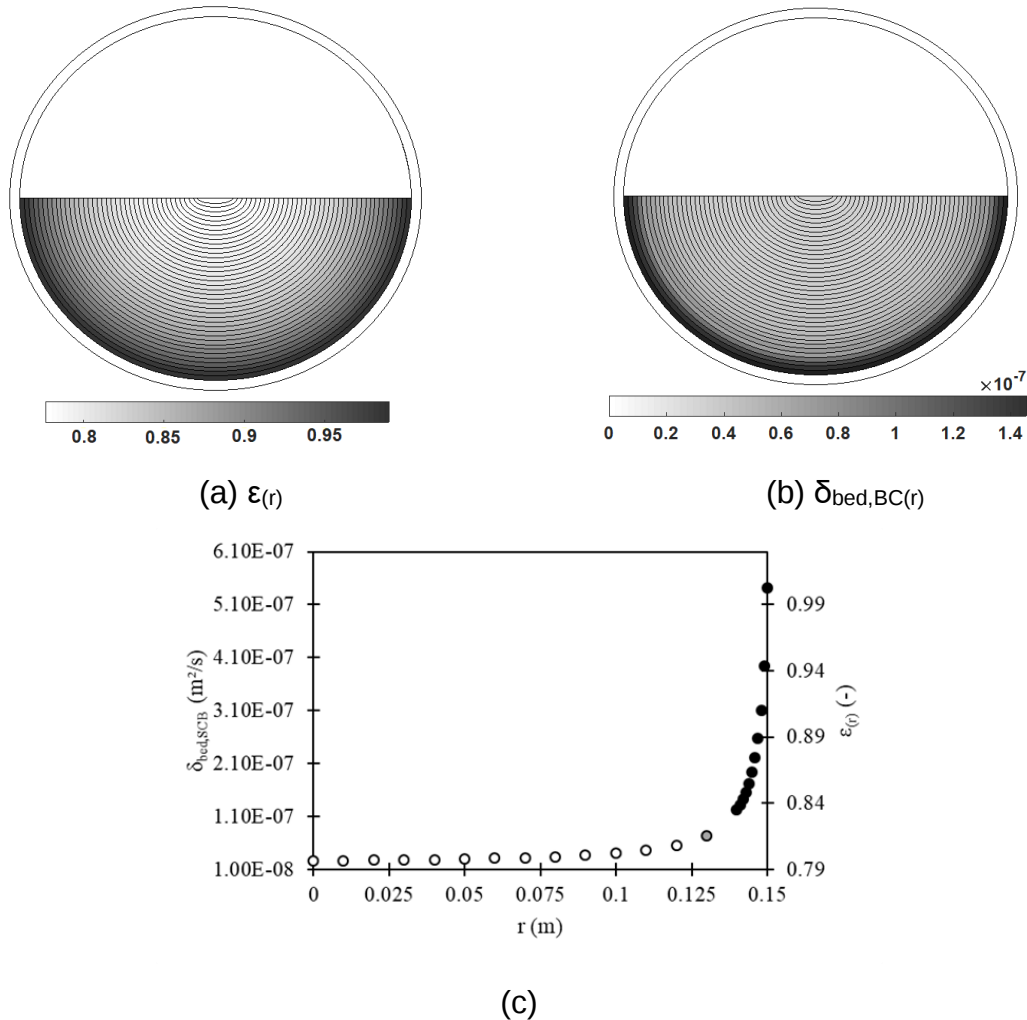
em que d e x correspondem ao diâmetro e ao comprimento médios das partículas.

Na Figura 4.10 estão apresentadas as distribuições radiais de porosidade $\varepsilon(r)$ e de coeficiente efetivo de difusão em função da porosidade local, denominado $\delta_{bed,BC(r)}$, assumindo-se raio máximo de 0,15 m. A possível variação da porosidade local na superfície do leito foi negligenciada.

Na Figura 4.10a, tem-se que a porosidade assume valores máximos nas proximidades da parede, como amplamente discutido na literatura sobre leitos empacotados (BEAVERS et al., 1973; MUELLER, 2010), e tende ao valor de referência ε_c . O coeficiente $\delta_{bed,BC(r)}$ é proporcional à porosidade do leito (Figura 4.10b), e então maiores valores são esperados em regiões de maiores porosidades pois a difusividade molecular da água na fase gasosa é maior do que aquela através do sólido. Assim, $\delta_{bed,BC(r)}$ assumiu o valor de $5,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ quando $\varepsilon(r) = 1$. Nos centros radial e angular do leito, onde a porosidade é menor, $\delta_{bed,BC(r)}$ foi de $2,04 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Os valores médios para $\varepsilon(r)$ e $\delta_{bed,BC(r)}$ foram de 0,81 e $3,42 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, indicando superestimativa em 22% sobre o valor de $D_{eff,BC}$ utilizado como referência.

Na Figura 4.10c observa-se as distribuições do parâmetro de transporte e da porosidade ao longo do raio do tambor. Note que duas zonas foram identificadas nesta figura. Estas duas regiões foram identificadas através de simulações realizadas tomando-se cada um dos valores de $\delta_{bed,BC(r)}$. Neste procedimento, $\delta_{bed,BC(r)}$ foi fixado no valor correspondente ao raio inicial ($r = 0$) e então um perfil temporal de umidade foi coletado em regiões estratégicas do leito. Após isso, procedeu-se com uma nova simulação, em que $\delta_{bed,BC(r)}$ assumia um novo valor fixo, agora de $r = 0,01$. Os perfis de umidade foram coletados para toda a amplitude de r . A partir daí, as regiões foram identificadas calculando-se o erro médio relativo $P(\%)$ e o erro quadrado médio (RMSE) entre dois perfis de umidade consecutivos $r = r_n$ e $r = r_{n+1}$, com $n = 0, 1, 2, 3 \dots N$. Como critério, as estatísticas $P(\%)$ e RMSE foram fixadas como menores que 10% e 0,1, respectivamente. Então, se dois pontos consecutivos foram identificados como membros de uma mesma região na Figura 4.10c, isso indica que as estatísticas $P(\%)$ e RMSE foram menores que os critérios estipulados. De $r = 0$ a $r = 0,1$, o incremento em r foi de 0,001 m e, a partir daí, utilizou-se incrementos de 0,01 m sobre r . Esta análise foi feita para duas posições radiais de interesse, localizadas a 3,5 e 5,5 cm da superfície do leito.

Figura 4.10 – Distribuições espaciais de (a) porosidade e (b) coeficiente efetivo de difusão em função da posição radial em tambor horizontal parcialmente preenchido por fibras de bagaço de cana em grau de enchimento 0.5.



FONTE: Elaborado pela autora.

A primeira está identificada com círculos pretos e refere-se às proximidades da parede do tambor, onde uma pequena variação no raio promove um aumento considerável na porosidade local e, conseqüentemente, em $\delta_{bed,BC}(r)$, portanto o parâmetro efetivo de transporte é fortemente afetado por r e, conseqüentemente, pela $\epsilon(r)$. A outra região, identificada com círculos abertos, refere-se à parte majoritária do leito de partículas. Embora se tenha uma amplitude considerável em r , não foram observadas grandes alterações na porosidade e nem em $\delta_{bed,BC}(r)$ em comparação com a primeira região identificada, o que indica que a influência de r sobre $\delta_{bed,BC}(r)$ poderia ser negligenciada. Note que há, ainda, um círculo preenchido com a cor cinza, aqui denominado região intermediária ou crítica ($r_c = 0,13$ m). Esta posição do leito

não apresentou similaridade com nenhuma das regiões supracitadas segundo os indicadores estatísticos utilizados neste procedimento.

Casciadori et al. (2014) apresentou relações de dependência entre a porosidade média de leitos de partículas orgânicas com a umidade das partículas, dentre os quais, o leito de bagaço de cana, cuja relação está apresentada a seguir [Eq. (4.29)]. Os autores mostraram dados experimentais que evidenciaram que a porosidade média de um leito empacotado é inversamente proporcional à umidade das partículas (X) que o constitui, então partículas secas constituem leitos mais porosos.

$$\varepsilon_{(X)} = 0.8886 \exp^{-0.067X} \quad (4.29)$$

Levando-se em consideração o processo de remoção de água que é proposto na seção da presente tese, e pela identificação da zona branca (Figura 4.10c) fracamente influenciada pela posição radial, a dependência da porosidade com a umidade das partículas, $\varepsilon_{(X)}$, poderia representar a variação do parâmetro de transporte efetivo de forma mais realista. Para auxiliar no entendimento, apresenta-se na Tabela 4.5 um resumo das considerações feitas acerca da dependência do parâmetro de transporte efetivo $\delta_{bed,BC}$ em função do raio do tambor.

Tabela 4.5 – Considerações sobre o parâmetro efetivo de transporte $\delta_{bed,BC}$ em relação à posição radial no leito.

Posição radial	Comentários e considerações	
$0 \leq r < 0,13 \text{ m}$	Região em que a porosidade é fracamente influenciada pela variação na posição radial. Portanto, introduz-se a variação da porosidade como função da umidade das partículas nesta região.	$\varepsilon = f(X)$, Então $\varepsilon_{(X)}$ e $\delta_{bed,BC} = \delta_{bed,BC(X)}$
$r = 0,13 \text{ m}$	Região intermediária, em que as contribuições da posição radial e da umidade das partículas poderia ser considerada.	$\varepsilon = f(r, X)$, Então $\varepsilon_{(r, X)}$ e $\delta_{bed,BC} = \delta_{bed,BC(r, X)}$
$0,13 < r \leq 0,15 \text{ m}$	Região em que a porosidade é fortemente influenciada pela variação na posição radial. Então, $\delta_{bed,BC}$ varia consideravelmente nesta amplitude de r	$\varepsilon = f(r)$, Então $\varepsilon_{(r)}$ e $\delta_{bed,BC} = \delta_{bed,BC(r)}$

FONTE: Elaborado pela autora.

Na Eq. (4.30) é proposta uma relação aplicável a todo o leito de partículas, seguindo-se as considerações apresentadas na Tabela 4.5.

$$\varepsilon = \sqrt{a\varepsilon_{(r)}^n \cdot b\varepsilon_{(x)}^m} \quad (4.30)$$

em que a, b, n e m são constantes, cujos valores estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Constantes da Eq. (4.30).

Constante	$0 \leq r < 0.13$	$r = 0.13 \text{ m}$	$0.13 < r \leq 0.15$
a	1	0,6	1
b	1	0,4	1
n	0	1	2
m	2	1	0

FONTE: Elaborado pela autora.

4.4.4. Simulações de transferência de massa em tambor horizontal isotérmico parcialmente preenchido

Na Tabela 4.7 estão apresentados os parâmetros requeridos pelo modelo para simulação deste estudo de caso. Note que três possibilidades foram admitidas para o parâmetro calculado para bagaço de cana, $\delta_{bed,BC}$, quais sejam: dependente do raio do tambor, da umidade das partículas ou de ambos.

Tabela 4.7 – Parâmetros requeridos pelo modelo para simulação de transporte de massa em tambor horizontal parcialmente preenchido.

Símbolo	Descrição	Valor
<i>Variáveis independentes</i>		
GE	Grau de enchimento	0.5
R	Raio do tambor	0.15 m
L	Comprimento do tambor	0.74 m
<i>Parâmetros operacionais</i>		
Q	Vazão de ar	5 L/min 50 L/min
T	Temperatura do leito	25 °C

Tabela 4.7: continuação

T_g	Temperatura do ar de entrada	25 °C
T_w	Temperatura da parede do tambor	25 °C
X_{abs}	Umidade absoluta do ar na temperatura correspondente	0,003 kg de água/kg de ar seco
<i>Parâmetros iniciais e de equilíbrio</i>		
$X_{0,S}$	Umidade inicial da sílica gel	0,25 kg/kg de sólido seco
$X_{0,BC}$	Umidade inicial do bagaço de cana	3 kg/kg de sólido seco
$X_{eq,S}$	Umidade de equilíbrio da sílica gel	0,02 kg/kg de sólido seco
$X_{eq,BC}$	Umidade de equilíbrio do bagaço de cana	0,08 kg/kg de sólido seco
<i>Parâmetros de transporte</i>		
$D_{eff,S}$	Coeficiente efetivo de difusão da água no leito de sílica, experimental	$1,67 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
$\delta_{bed,S}$	Coeficiente efetivo de difusão da água no leito de sílica, calculado	$1,79 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
$D_{eff,BC}$	Coeficiente efetivo de difusão da água no leito de bagaço de cana, experimental	$29,1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
$\delta_{bed,BC}$	Coeficiente efetivo de difusão da água no leito de bagaço de cana, calculado	$\delta_{bed,BC(r)} = f(\epsilon(r))$ $\delta_{bed,BC(X)} = f(\epsilon(X))$ $\delta_{bed,BC(r,X)} = f(\epsilon(r,X))$
h_m	Coeficiente de transferência de massa por convecção entre a superfície do leito e o ar no espaço	$8,24 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ $2,61 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

FONTE: Elaborado pela autora.

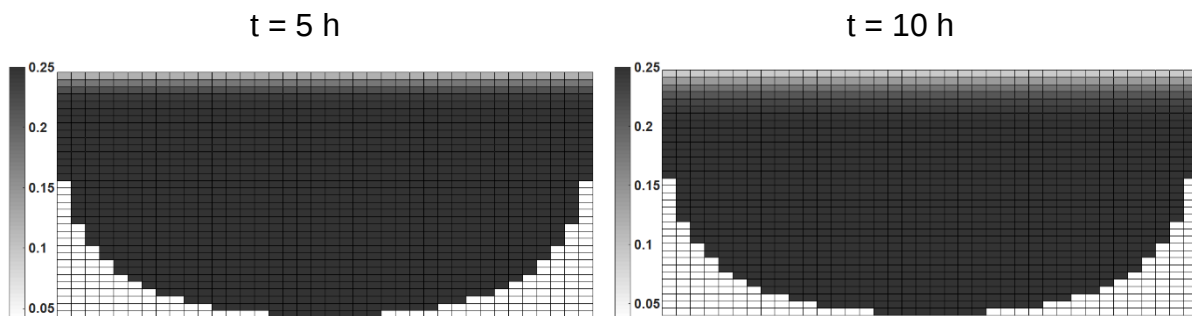
a. Simulações com $Q = 50 \text{ L/min}$

Na Figura 4.11 estão apresentados perfis espaciais de umidade para um leito de sílica gel que preenche 50% do volume interno de um tambor horizontal para os tempos de 5 e 10 h, com $D_{eff,S} = 1.83 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Simulações poderiam ser feitas considerando-se o parâmetro $\delta_{bed,S}$, porém, a proximidade entre os dois parâmetros dispensa tal comparação.

O fluxo de massa se dá do interior para a superfície do leito e é provocado pelo gradiente de umidade instalado devido ao contato de sua superfície com o ar seco escoante. No interior do leito, o transporte é puramente difusivo e visualmente lento, gerenciado pelo baixo coeficiente de difusão efetivo. Após 5 horas, a umidade na superfície do leito é de 0.11 kg/kg de sólido seco e cai para 0.085 kg/kg de sólido seco

passadas mais 5 horas de processo. Segundo as simulações, a camada de leito em contato com o ar escoante atingiria a umidade de equilíbrio após aproximadamente 8 dias de processo, quando a umidade média do leito de partículas é de 0,18 kg/kg de sólido seco. As primeiras variações no centro angular e proximidades da parede, onde se tem a maior profundidade de leito, são noticiadas a partir de 6,2 dias. Ao final de 9 dias de processo, a umidade das partículas nesta posição seria de 0,2497 kg/kg de sólido seco.

Figura 4.11 – Perfis espaciais de umidade para um leito de sílica gel com introdução de ar no sobre espaço a 50 L/min e $UR \leq 15\%$ ($X_{0,S} = 0,25$ kg/kg de sólido seco; $X_{eq,S} = 0,024$ kg/kg de sólido seco; $D_{eff,S} = 1.83 \times 10^{-9}$ m²/s).



FONTE: Elaborado pela autora.

O fluxo de massa observado nas simulações com leito de bagaço de cana é o mesmo que o apresentado para o leito de sílica. No entanto, as diferentes concepções do parâmetro $\delta_{bed,BC}$ fornecem resultados em simulações diferentes. A comparação com o parâmetro calculado com $D_{eff,BC}$ é direta quando $\delta_{bed,BC}$ depende de r , mesmo que se admita variação em função do raio. Porém, a comparação é indireta quando $\delta_{bed,BC}$ depende de X , pois o parâmetro está sujeito a mudança a cada instante t , sendo essa uma relação interativa. Por conta disso, optou-se por comparar os perfis de umidade gerado a partir das diferentes concepções do parâmetro calculado $\delta_{bed,BC}$ em comparação com $D_{eff,BC}$. Na Tabela 4.8 estão apresentados os resultados de simulação para três posições radiais no centro angular do leito. O erro relativo foi calculado com relação à simulação de referência $D_{eff,BC}$.

Tabela 4.8 – Umidade local em três diferentes posições radiais no centro angular do leito com $D_{\text{eff,BC}}$, $\delta_{\text{bed,BC}(r)}$, $\delta_{\text{bed,BC}(X)}$ e $\delta_{\text{bed,BC}(r,X)}$.

Tempo (h)	A 5 cm da superfície do leito				A 10 cm da superfície do leito				A 13,5 cm da superfície do leito			
	D _{eff}	δ _{bed,BC(r)}	δ _{bed,BC(X)}	δ _{bed,BC(r,X)}	D _{eff}	δ _{bed,BC(r)}	δ _{bed,BC(X)}	δ _{bed,BC(r,X)}	D _{eff}	δ _{bed,BC(r)}	δ _{bed,BC(X)}	δ _{bed,BC(r,X)}
5	2,27	2,27	2,40	2,40	2,68	2,68	2,78	2,78	3	2,99	3	3
10	1,71	1,70	1,84	1,84	2,18	2,16	2,31	2,31	2,98	2,96	2,99	2,99
15	1,39	1,36	1,50	1,50	1,82	1,78	1,95	1,95	2,91	2,88	2,95	2,95
24	1,04	1,01	1,13	1,13	1,40	1,35	1,50	1,50	2,78	2,71	2,83	2,82
48	0,66	0,62	0,69	0,69	0,90	0,86	0,94	0,93	2,52	2,36	2,56	2,46
72	0,53	0,49	0,56	0,54	0,74	0,67	0,76	0,73	2,36	2,08	2,41	2,17
96	0,48	0,43	0,51	0,47	0,67	0,58	0,70	0,63	2,23	1,86	2,30	2,01
Erro relativo em relação a D _{eff,BC} , $\bar{e}$ (%)												
Tempo (h)	A 5 cm da superfície do leito			A 10 cm da superfície do leito			A 13,5 cm da superfície do leito					
	δ _{bed,BC(r)}	δ _{bed,BC(X)}	δ _{bed,BC(r,X)}	δ _{bed,BC(r)}	δ _{bed,BC(X)}	δ _{bed,BC(r,X)}	δ _{bed,BC(r)}	δ _{bed,BC(X)}	δ _{bed,BC(r,X)}			
5	0	5,29	5,73	0	3,73	3,73	1,33	0	0			
10	0,58	7,60	7,60	0,92	5,96	5,96	3,35	0,33	0,33			
15	2,16	7,91	7,91	2,20	7,14	7,14	6,87	1,37	1,37			
24	2,88	8,65	8,65	3,57	7,14	7,14	15,11	1,80	1,44			
48	6,06	4,54	4,54	4,44	4,44	3,33	17,46	1,59	2,38			
72	7,55	5,66	1,89	9,46	2,70	1,35	21,19	2,12	8,05			
96	10,42	6,25	2,08	13,43	4,48	5,97	16,59	3,14	9,87			
$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^i \bar{e}$	4,24	6,56	5,49	4,86	5,09	4,95	11,70	1,48	3,35			

FONTE: Elaborado pela autora.

De modo geral, erros relativos médios inferiores a 10 % foram reportados para qualquer concepção do parâmetro de transporte calculado em comparação com aquele relativo aos dados experimentais, exceto para um caso em específico, e então, essas as simulações poderiam gerar resultados satisfatórios em termos de concentração média de água no leito para um dado tempo.

Ao se observar o erro médio relativo, $\delta_{bed,BC(r)}$ forneceu simulações mais próximas às de referência para posições de superfície e centro do leito. No entanto, este também forneceu o maior erro relativo para tempos longos, superior a 10 %, em todas as posições do leito, além de erro médio relativo superior a 10 % na posição próxima à parede do tambor. É interessante destacar que este parâmetro imprimiu erro crescente ao longo do tempo, superando 20 % para a posição mais profunda em $t = 72$ h. Isso indica que a estimativa teórica com dependência direta de r seria suficiente para se obter bons ajustes entre os dados experimentais e simulados em ensaios de curta duração. No entanto, outras alternativas poderiam ser consideradas em ensaios mais longos, como é o caso de ensaios de cultivo sólido.

Os resultados em simulação fornecidos por $\delta_{bed,BC(X)}$ e $\delta_{bed,BC(r,X)}$ apresentaram perfis de umidade similares na posição de superfície pois, nesta região, $\delta_{bed,BC(r,X)}$ está apenas sob influência de X . Com o aumento da profundidade do leito, os perfis de $\delta_{bed,BC(r,X)}$ diferem-se de $\delta_{bed,BC(X)}$, e as taxas de transporte de massa em simulações com $\delta_{bed,BC(r,X)}$ ultrapassam as com $\delta_{bed,BC(X)}$. Note que os perfis não apresentaram tendência na distribuição de erros ao longo do tempo, exceto para a posição próxima à parede, em que o aumento dos erros foi reportado. Ainda assim, todos mantiveram-se menores que 10 %. Isso indica que a dependência do parâmetro em função de X ou r e X deve ser considerada em ensaios relativamente longos nos quais o intenso transporte de massa é esperado.

Alguns aspectos são interessantes do ponto de vista operacional do cultivo sólido neste tambor. Primeiramente, o cultivo sólido em biorreatores utiliza-se de vazões de ar mais amenas, de modo que a vazão é baseada, na maioria das vezes, na quantidade de oxigênio necessária para suprir as necessidades respiratórias do microrganismo e não especificamente para resfriar o leito. Outro aspecto é a umidade relativa do ar de entrada em cultivo sólido, que diz respeito à utilização de ar saturado na temperatura de processo, de modo que a secagem não é esperada. Isso porque geralmente se utiliza de biorreatores de leito fixo para cultivo sólido, pois possuem configuração mais simples e menores custos. No entanto, variações nas condições

de entrada do ar poderiam ser utilizadas sem maiores problemas em biorreatores de tambor rotativo que apresentam dispositivos próprios para reposição de umidade eventualmente perdida e sistema de rotação para homogeneização térmica. Desse modo, a depender das condições operacionais empregadas, quaisquer dos resultados apresentados neste estudo de caso poderiam ser levados em consideração em ensaios de cultivo sólido. Se utilizado ar não saturado e se o intervalo de tempo em que se espera perda de água do leito para as vizinhanças for relativamente curto (operação com possibilidade de reposição de água, por exemplo), quaisquer uma das três opções seriam satisfatórias para prever o transporte de massa. Para ensaios sob tempos longos sem possibilidade de reposição da umidade perdida, recomenda-se a predição utilizando-se $\delta_{bed,BC}(X)$ ou $\delta_{bed,BC}(r,X)$.

Na Figura 4.12 a 4.14 estão apresentados perfis espaciais de porosidade, coeficiente efetivo de difusão e umidade, respectivamente, considerando-se os três parâmetros efetivos calculados para $t = 5$ h e 72 h e grau de enchimento 0.5. Observe que as escalas de cores são individuais e foram ajustadas para favorecer a visualização de cada perfil. Os perfis de ϵ e $\delta_{bed,BC}$ dependentes da posição radial são apresentados novamente para facilitar a comparação.

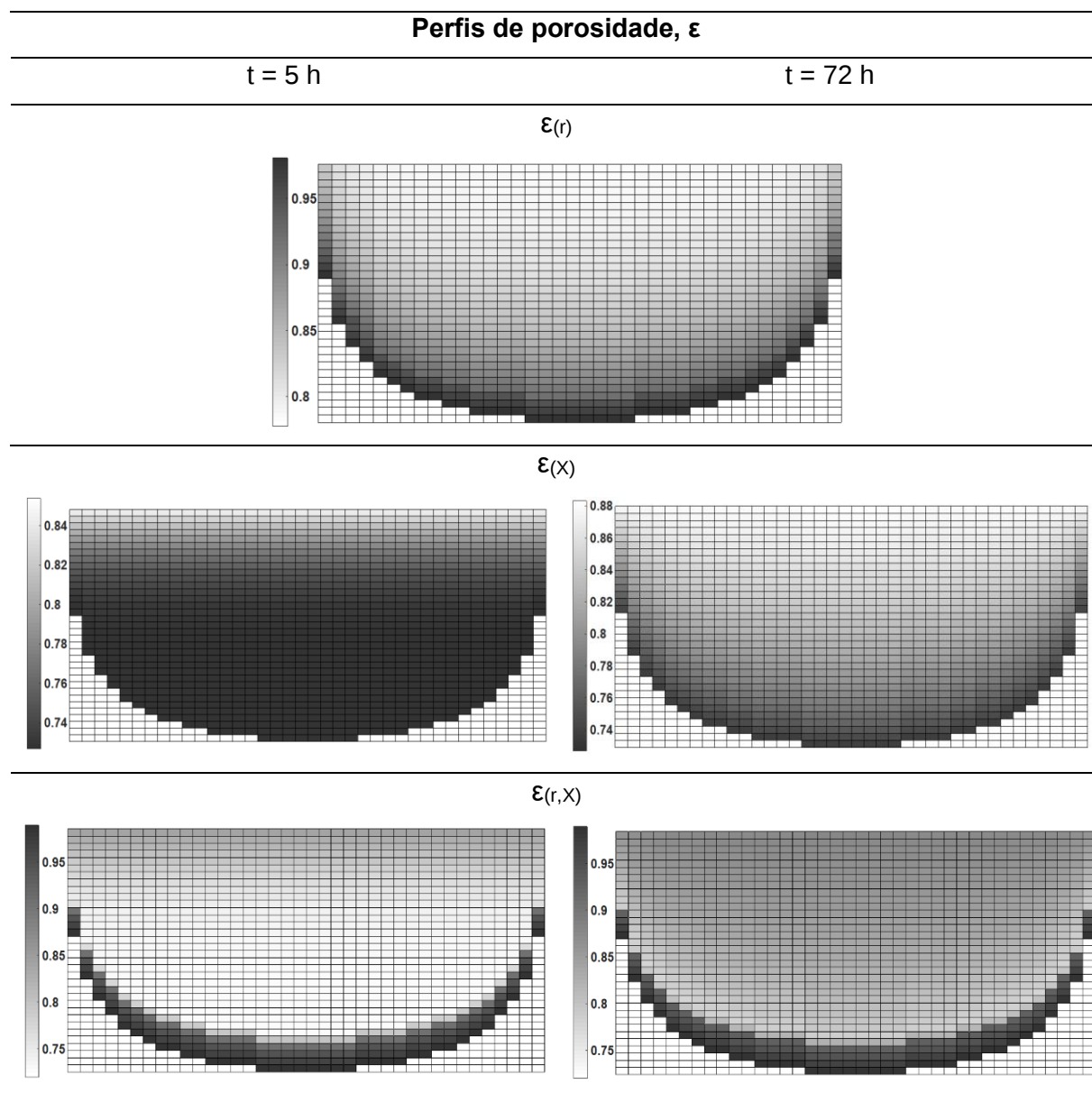
Na Figura 4.12, tem-se que a amplitude de $\epsilon(r)$ é quase duas vezes maior que a de $\epsilon(X)$ pois a maior porosidade reportada por Casciadori et al. (2014) foi de 0.88 em baixas umidades. Este valor é impresso na superfície do leito em $t = 72$ h. Quando a porosidade depende unicamente da posição radial, varia-se de um valor mínimo de referência até 1, que é encontrado nas proximidades da parede do tambor e promove aumento brusco em $\delta_{bed,BC}$. Em $\epsilon(r,X)$, esta zona de alta porosidade tendendo a 1 é constante durante todo o tempo, enquanto que no restante do leito, este parâmetro aumenta com a queda na umidade do leito ao longo do tempo.

Na Figura 4.13, nota-se uma distribuição quase homogênea no leito quando com $\epsilon(r)$, apenas com uma região de alto $\delta_{bed,BC}$ nas proximidades da parede do tambor. Como mencionado na subseção anterior, esta distinção motivou a proposição da dependência simultânea à posição radial e à umidade das partículas. Como consequência da perda de água, $\epsilon(X)$ aumenta ao longo do tempo e da profundidade do leito, e maiores valores de $\delta_{bed,BC}$ são também observados. Nota-se que, diferente de quando assumida dependência de ϵ com r , a parede detém os menores valores de $\delta_{bed,BC}$, pois, possivelmente, a perda de água nesta região não foi suficiente para promover mudanças em $\epsilon(X)$ que pudessem alterar o valor inicial de $\delta_{bed,BC}(X)$. Em $\epsilon(r,X)$,

valores moderados de $\delta_{bed,BC}$ são observados onde há efetivo transporte de massa, enquanto que os maiores valores ainda são reportados nas proximidades da parede do tambor.

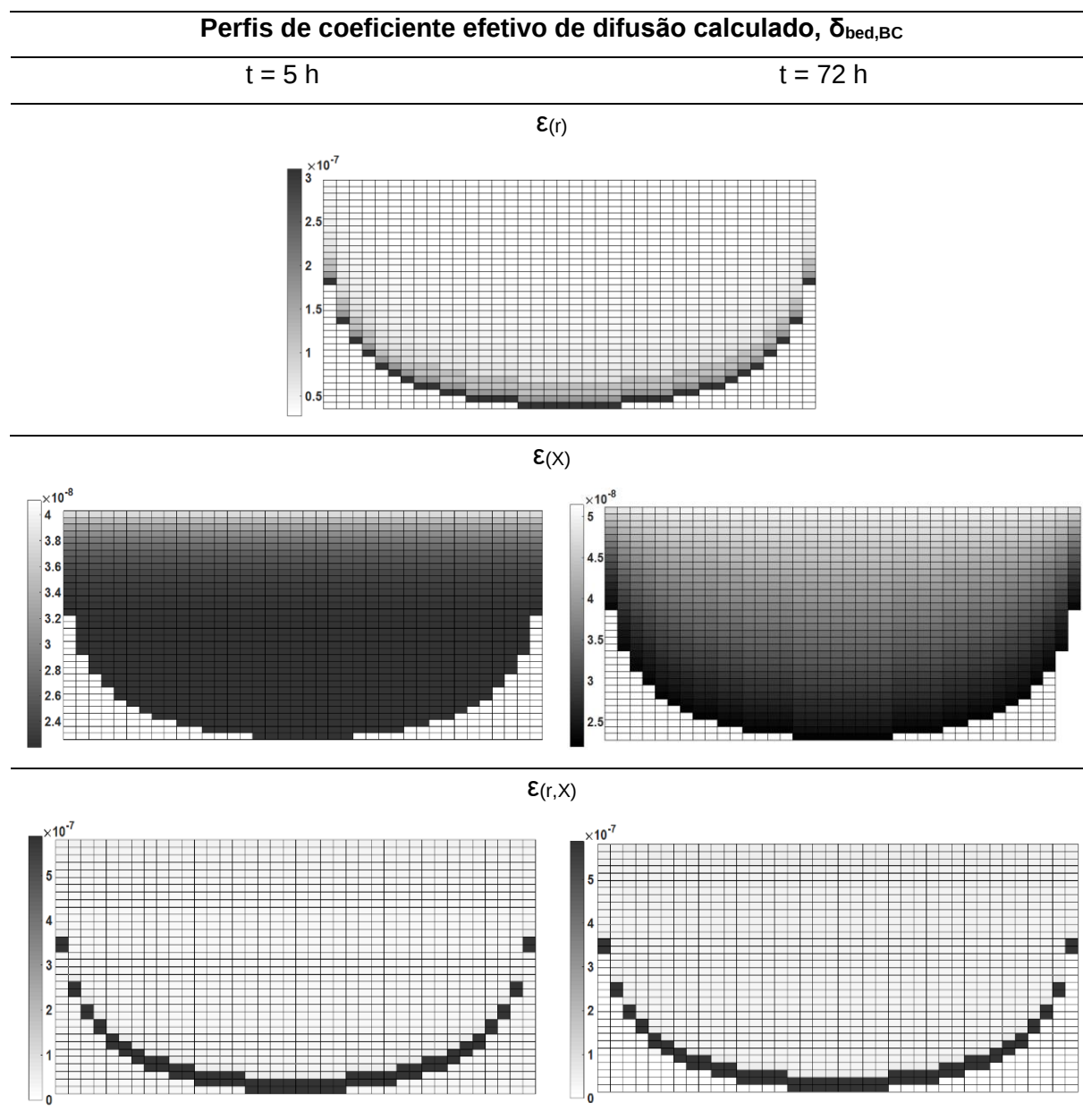
Quanto aos perfis de umidade, o transporte parece ser mais lento no início do processo quando com $\varepsilon_{(r)}$. Este era um resultado já esperado pois perda de massa já era esperada em $t = 5$ h, e então a porosidade local é maior do que aquela em $\varepsilon_{(r)}$ para posições próximas ao centro, o que promove variação também em $\delta_{bed,BC}$. Portanto, em $t = 5$ h, provavelmente $\delta_{bed,BC}(x)$ e $\delta_{bed,BC}(r,x)$ assumem valores maiores que $\delta_{bed,BC}(r)$. Os perfis de umidade se assemelham para $t = 72$ h para os três casos.

Figura 4.12 – Perfis espaciais de ε em um leito de bagaço de cana que preenche um tambor horizontal em grau de enchimento 0.5 para $t = 5$ e 72 h, considerando-se a dependência da porosidade em relação à posição radial (r) e/ou umidade das partículas (X).



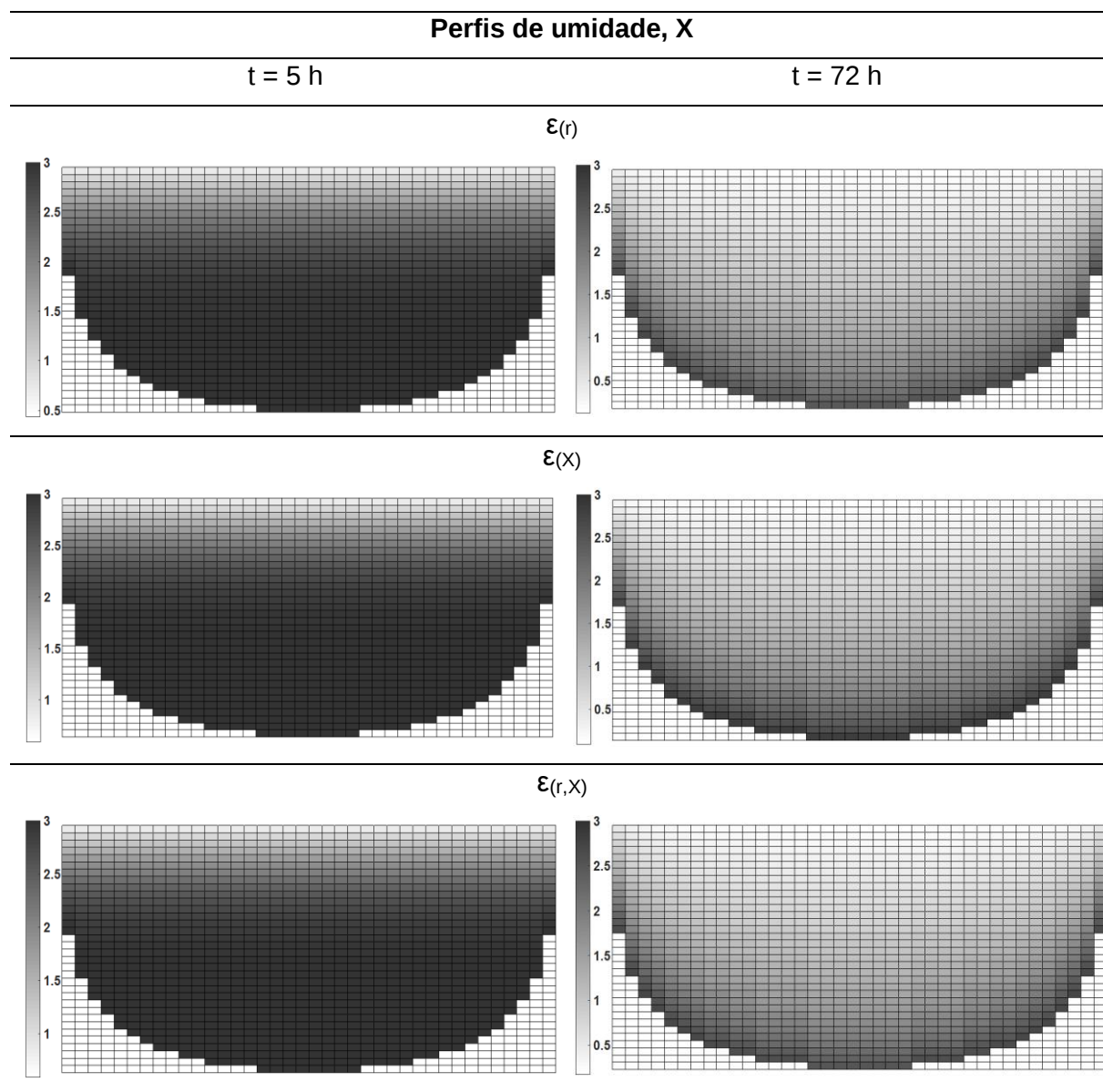
FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 4.13 – Perfis espaciais de $\delta_{\text{bed,BC}}$ em um leito de bagaço de cana que preenche um tambor horizontal em grau de enchimento 0.5 para $t = 5$ e 72 h, considerando-se a dependência da porosidade em relação à posição radial (r) e/ou umidade das partículas (X).



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 4.14 – Perfis espaciais de X em um leito de bagaço de cana que preenche um tambor horizontal em grau de enchimento 0.5 para $t = 5$ e 72 h, considerando-se a dependência da porosidade em relação à posição radial (r) e/ou umidade das partículas (X).

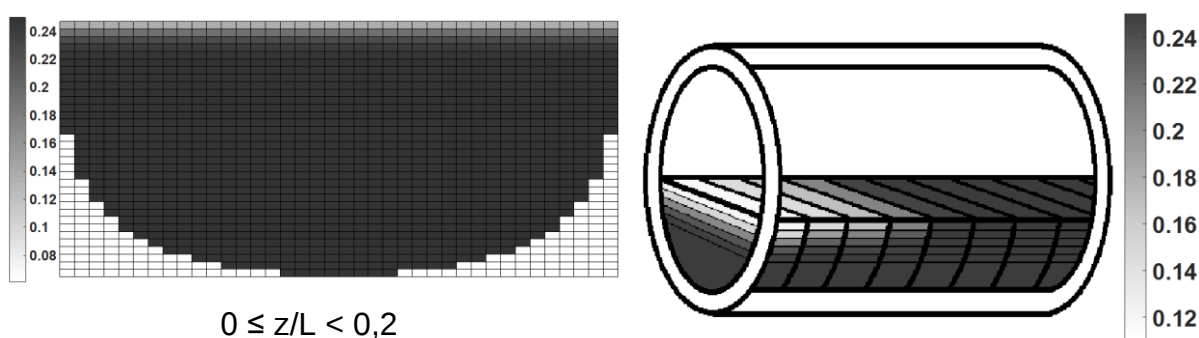


FONTE: Elaborado pela autora.

b. Simulações com $Q = 5$ L/min

Na Figura 4.15 é apresentado o perfil de concentração de água para o leito de sílica em grau de enchimento 0,5, $Q = 5$ L/min e $t = 5$ h. Dada a proximidade entre $D_{\text{eff},S}$ e $\delta_{\text{bed},S}$, $D_{\text{eff},S}$ foi adotado nessas simulações.

Figura 4.15 – Perfil de concentração de água obtido por simulação de transferência de massa em um tambor horizontal parcialmente preenchido por partículas de sílica em grau de enchimento 0,5 ($X_{0,S} = 0,25$ kg/kg de sólido seco; $D_{\text{eff},S} = 1,83$ m²/s; $X_{\text{eq},S} = 0,02$ kg/kg de sólido seco; $t = 5$ h).



FONTE: Elaborado pela autora.

Assim como para a vazão de 50 L/min, o transporte de massa se dá através de uma diferença de concentração desenvolvida devido ao contato da camada superficial do leito com a passagem de ar seco. Note que a baixa vazão de ar promove taxas de transferência de massa discretas em $0 \leq z/L < 0,2$, correspondente à primeira fatia axial em contato com o ar seco, e decresce ao longo do comprimento do tambor. Como indicado pelos dados experimentais mostrados na subseção 4.3.1 (*Umidades de equilíbrio das partículas de sílica e bagaço de cana*), variações na concentração de água na superfície do leito não são observadas a partir de $z/L = 0,5$. Nesta posição, apenas a difusão axial é considerada. Porém, os gradientes instalados em conjunto com o baixo coeficiente efetivo de difusão não são suficientes para que variações em X possam ser observadas em $t = 5$ h.

Os perfis para bagaço de cana se desenvolveram de forma similar. Este leito de partículas permite que a análise seja transposta para uma situação real de cultivo sólido, desde que se assuma que a presença do microrganismo não promove alterações nas propriedades físicas, estruturais e de transporte do leito. Casciatori (2015) cultivou o fungo *Trichoderma reesei* em uma mistura entre bagaço de cana e

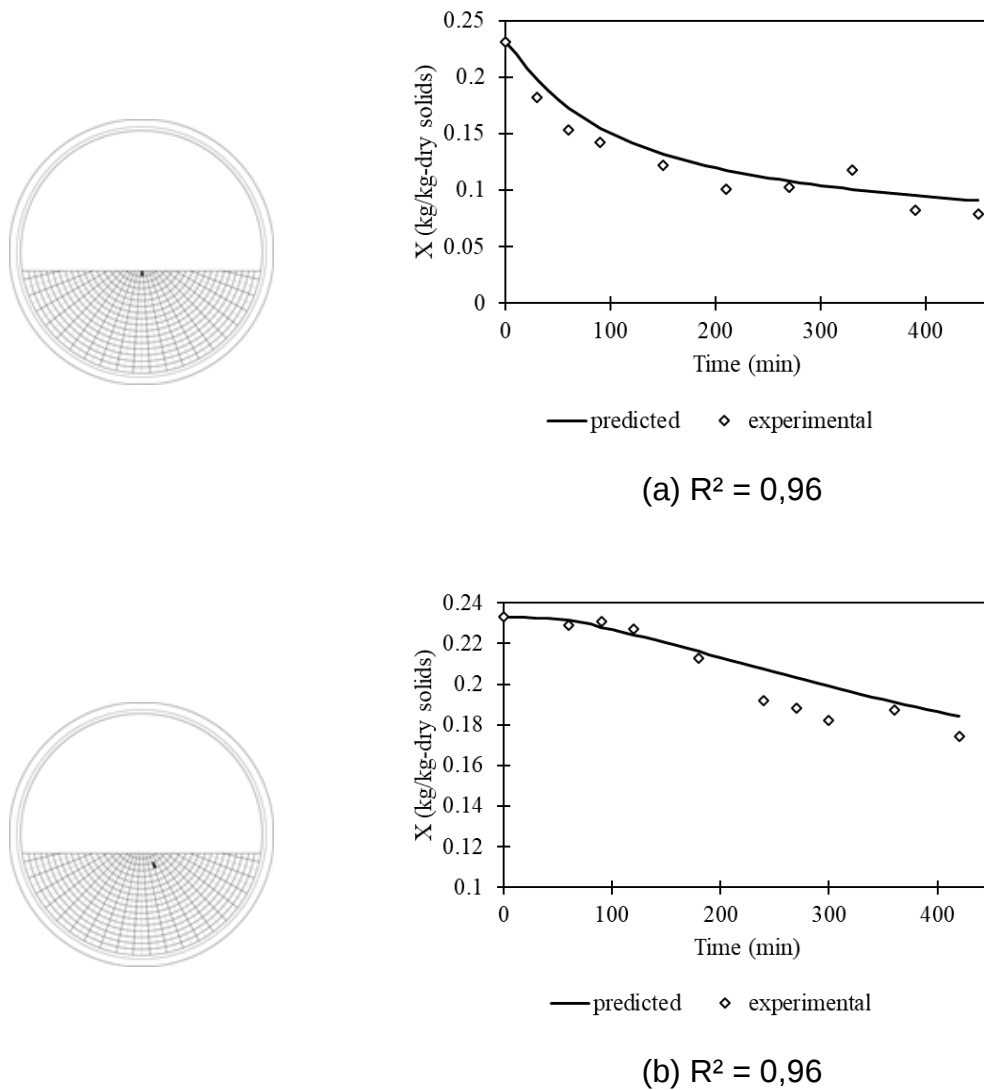
farelo de trigo na proporção 9:1 em embalagens plásticas mantidas a 28 °C variando-se o conteúdo de umidade das partículas entre 2,3; 3 e 4 kg/kg de sólido seco. As atividades de endoglucanase, β -glicosidase e celulasas totais mostraram que o conteúdo inicial de umidade das partículas influencia fortemente o rendimento do processo, pois baixas atividades foram reportadas na mais baixa umidade inicial. Em um tambor preenchido em grau de enchimento 0.5 por bagaço de cana com umidade de equilíbrio dada a 96 % de umidade relativa (0.25 kg/kg de sólido seco; CASCIATORI et al., 2015), umidade inicial de 3 kg/kg de sólido seco e $Q = 5$ L/min, as simulações mostram que o leito apresentaria umidade de 1.5 kg/kg de sólido seco na profundidade de 3.3 cm até $z/L = 0.4$ em $t = 24$ h. Observe que o tempo total de cultivo deste fungo é de 9 dias e que a umidade alcançada em $t = 1$ dia é menor do que aquela analisada por Casciadori (2015) e dita como inadequada. Em termos de volume de leito, esta profundidade corresponde a cerca de 30 % do volume total do meio de cultivo, o que indica que o processo seria comprometido. Neste ponto, estratégias de controle devem ser adotadas para que se evite o ressecamento do leito. Tada et al. (2019) recomenda a aspersão de água sobre a superfície do leito estático, seguido de rotações para homogeneização seguindo-se instruções de Tada et al. (2017b) para o grau de enchimento analisado.

4.4.5. Verificação do modelo

Nas Figuras 4.16 e 4.17 estão apresentados os perfis experimentais e simulados para leitos de sílica e bagaço de cana, respectivamente, para $Q = 50$ L/min. Duas posições foram escolhidas no leito para que variações de umidade pudessem ser verificadas ao longo do tempo do ensaio, quais sejam, na superfície do leito e uma posição interna a 3,5 cm da superfície. Boa concordância entre os perfis experimentais e simulados foram obtidos.

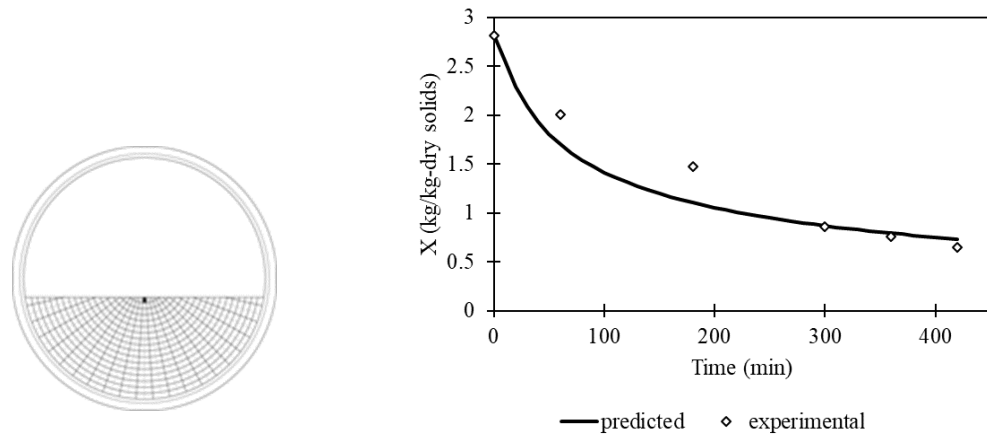
O perfil experimental para o leito de sílica em $Q = 50$ L/min mostra que as partículas na superfície do leito alcançariam umidade de 0,09 kg/kg de sólido seco em $t = 450$ min. Considerando-se a boa concordância entre os dados experimentais e simulados e, portanto, a capacidade do modelo proposto de representar o transporte de massa, as simulações indicam que 24 h não seriam suficientes para que a umidade de equilíbrio fosse alcançada nesta posição do leito.

Figura 4.16 – Verificação do modelo em comparação com perfis experimentais coletados em leito de sílica com introdução de ar paralelo à superfície do leito de partículas a 50 L/min ($X_0 = 0.231$ kg/kg de sólido seco; $X_{eq} = 0.025$ kg/kg de sólido seco; $T = 25$ °C; $D_{eff,s} = 1.83 \times 10^{-9}$ m² s⁻¹; grau de enchimento 0.5).

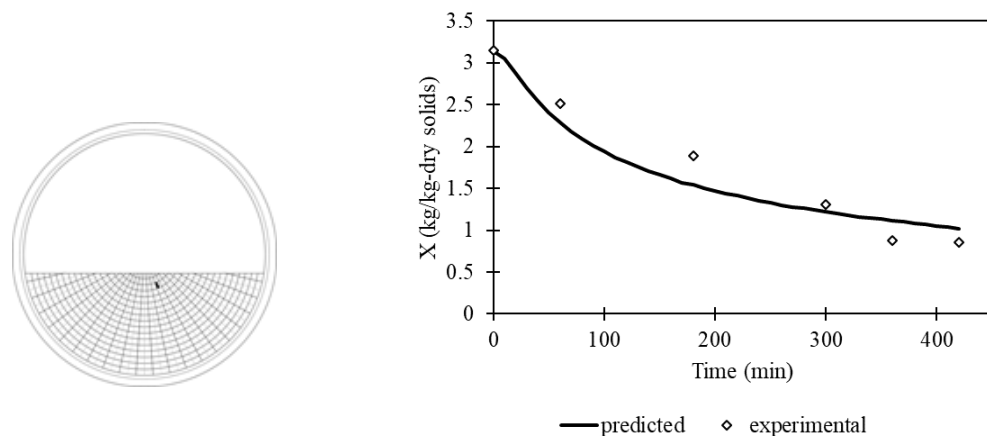


FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 4.17 – Verificação do modelo em comparação com perfis experimentais coletados em leito de bagaço de cana com introdução de ar paralelo à superfície do leito de partículas a 50 L/min ($X_0 = 3$ kg/kg de sólido seco; $X_{eq} = 0,08$ kg/kg de sólido seco; $T = 25$ °C; $D_{eff,s} = 1 \times 10^{-9}$ m² s⁻¹; grau de enchimento 0.5).



(a) $R^2 = 0,95$



(b) $R^2 = 0,88$

FONTE: Elaborado pela autora.

As taxas de transporte de massa, $\dot{j}$, podem ser calculadas fazendo-se a razão entre a variação do conteúdo de umidade por um determinado intervalo de tempo ($\dot{j} = \Delta X / \Delta t$). A partir dos resultados experimentais para $Q = 50$ L/min, $\dot{j}$ na superfície do leito de sílica ($\dot{j}_{S,sup}$) apresenta-se como dez vezes maior que o mesmo na posição de interior do leito ($\dot{j}_{S,centro}$; 3,5 cm da superfície) em $t = 60$ min, cujas magnitudes são de 10^{-5} e 10^{-6} kg/kg de sólido seco, respectivamente. Após 90 min, $\dot{j}_{S,sup}$ é 5 vezes maior que $\dot{j}_{S,centro}$, e nos tempos posteriores ambos são equivalentes. Portanto, a resistência interna é predominante nas fases iniciais do processo. Um comportamento similar foi

observado para o leito de bagaço de cana a 50 L/min. As taxas de transporte de massa mostraram que os 60 minutos iniciais são responsáveis pelo surgimento de gradientes de umidade entre as posições de superfície e centro analisadas, uma vez que a perda de água na superfície acontece duas vezes mais rápido do que na posição interna. Para os demais tempos, as taxas de transporte de massa são equivalentes em ambas as posições.

A predominância da resistência interna pode ser relacionada ao número de Biot (Bi), aqui modificado (Bi_m) e calculado como:

$$Bi_m = \frac{Kh_m \ell}{\Lambda_{eff}} \quad (4.31)$$

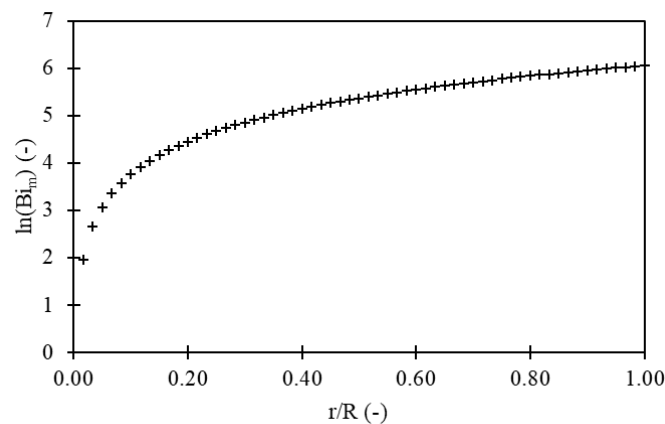
Com

$$\ell = \frac{V}{A} \cdot \frac{r}{R} \quad (4.32)$$

em que Λ_{eff} é o coeficiente efetivo de difusão, representado por D_{eff} ou δ_{bed} , ℓ é o comprimento característico, V é o volume do leito, A é a área superficial do leito exposta ao sobre espaço e a razão r/R representa um fator de correção para representar a posição de interesse dentro do leito. Quando considerado $r = 0.15$, r/R é igual a 1 e a análise é aplicada a todo o pseudo-sólido.

Na Figura 4.18 está apresentada a distribuição de Bi_m ao longo da profundidade do leito de sílica a $Q = 50$ L/min e $\Lambda_{eff} = D_{eff,S}$. Para todo o leito, Bi_m apresenta valores expressivamente altos, indicando que, conceitualmente, a resistência interna é desprezível. Para regiões próximas à superfície do leito, isso se torna razoável devido à intensa perda de água esperada quando $r \rightarrow r_{i(\theta)}$. Conforme a razão r/R aumenta, Bi_m assume valores ainda maiores, o que indica que a resistência ao transporte difusivo efetivo aumenta com o aumento da profundidade do leito. Portanto, a resistência ao transporte é claramente difusiva.

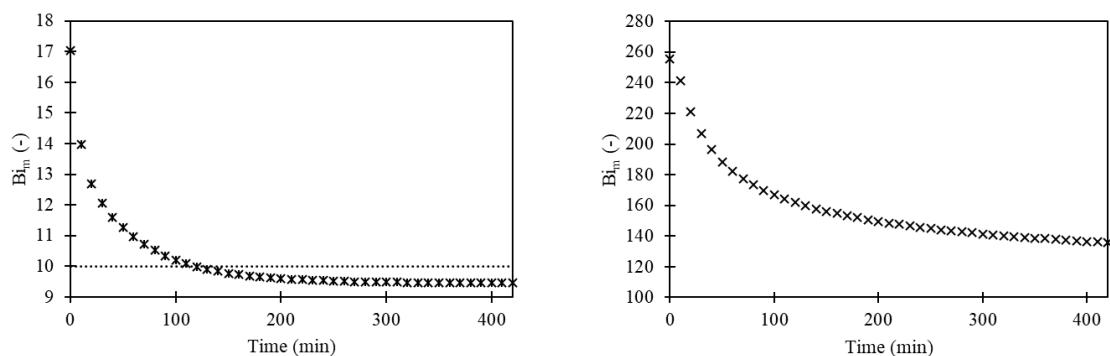
Figura 4.18 – Distribuição espacial de Bi_m ao longo da profundidade do leito de partículas de sílica com aeração a 50 L/min e grau de enchimento 0,5.



FONTE: Elaborado pela autora.

Já para o leito de bagaço de cana, a predominância de resistência interna não é verificada ao longo de todo o processo, como mostrado na Figura 4.19 para $Q = 50$ L/min e grau de enchimento 0,5. Note que a variação de Bi_m para as duas posições analisadas (superfície e a 3,5 cm da superfície) foram possíveis através de $\Lambda_{eff} = \delta_{bed,BC}(r,X)$.

Figura 4.19 – Evolução de Bi_m ao longo do tempo para duas posições de interesse em um leito de bagaço de cana que preenche um tambor horizontal em grau de enchimento 0,5, com $Q = 50$ L/min.



(a) Na superfície do leito

(b) A 3,5 cm da superfície do leito

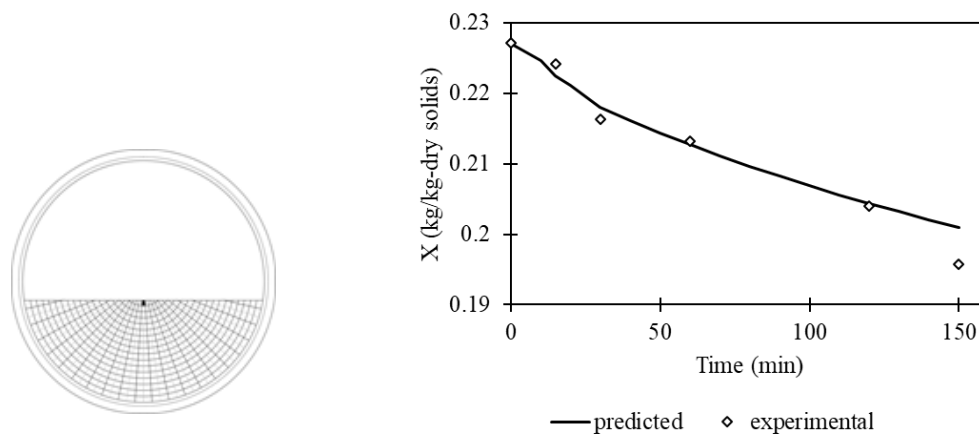
FONTE: Elaborado pela autora.

A posição de superfície do leito corresponde àquela gerada por simulação, onde $r \rightarrow r_i(\theta)$ e intensa perda de água é esperada. O perfil de Bi_m corrobora com a discussão

sobre as taxas de transporte de massa apresentada acima, pois Bi_m assume valores maiores que 10 até aproximadamente $t = 100$ min e diminui a partir desse instante. Isso porque, $\delta_{bed,BC(r,X)}$ aumenta ao longo do tempo, o que faz com que a resistência relacionada à difusão efetiva de massa seja menos intensa. Um comportamento similar foi observado para a posição interna (Figura 12.b), porém Bi_m foi maior que 10 durante todo o tempo analisado.

Na Figura 4.20 está apresentada a verificação do modelo para um leito de sílica e $Q = 5$ L/min. Apenas o perfil da posição na superfície é mostrado.

Figura 4.20 – Verificação do modelo em comparação com perfis experimentais coletados em leito de partículas de sílica com introdução de ar paralelo à superfície do leito de partículas a 5 L/min ($X_0 = 3$ kg/kg de sólido seco; $X_{eq} = 0,08$ kg/kg de sólido seco; $T = 25$ °C; $D_{eff,s} = 1 \times 10^{-9}$ m² s⁻¹; grau de enchimento 0.5).

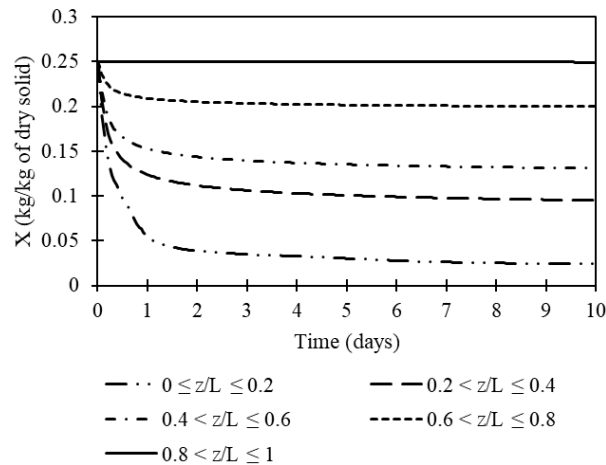


Leito de sílica gel, $Q = 5$ L/min

$$R^2 = 0,92$$

FONTE: Elaborado pela autora.

Em comparação com o perfil experimental para $Q = 50$ L/min, o aumento em dez vezes na vazão de ar promoveu o coincidente aumento em dez vezes na taxa de transporte de massa em $t = 60$ min e $z/L = 0,1$ para $Q = 5$ L/min. A partir desse ponto, as taxas são mais amenas. Tempos infinitamente longos ($t = 7$ dias) seriam requeridos para que a superfície do leito na porção axial mais próxima da entrada de ar atingisse o equilíbrio, como mostrado nos perfis temporais obtidos por simulação (Figura 4.21).

Figura 4.21 – Perfis temporais de umidade na superfície de um leito de sílica a $Q = 5$ L/min.

FONTE: Elaborado pela autora.

No primeiro dia de processo, as taxas de transporte de massa são razoáveis, e decrescem a partir daí para magnitudes de $10^{-7} - 10^{-8}$ kg/kg de sólido seco, até atingir a umidade de equilíbrio. Esta não foi alcançada nas demais posições axiais, indicando que a resistência ao transporte de massa é predominantemente externo. Variações na concentração de água não foram observadas na última fração axial ($0.8 < z/L \leq 1$) para $t = 10$ dias. As amenas variações em $0.6 < z/L \leq 0.8$ foram possivelmente provocadas pela difusão efetiva na direção axial.

4.5. Conclusões parciais

As conclusões parciais desta seção estão pontuadas a seguir:

- O modelo a uma fase proposto para prever a variação de umidade em leitos de partículas inorgânicas (sílica gel) e orgânicas (bagaço de cana) apresentou boa concordância com os perfis de umidade experimentais obtidos em tambor horizontal a 25°C ;
- A boa concordância entre o modelo e os dados experimentais dão confiança aos parâmetros determinados experimentalmente, com destaque para as

umidades de equilíbrio escrita como função da posição axial através do ajuste do modelo de Peleg para baixas vazões;

- As correlações disponíveis na literatura para cálculo dos coeficientes efetivos de difusão teóricos mostraram-se adequadas para o leito de sílica gel e razoavelmente adequadas para o leito de bagaço de cana, com destaque para as possíveis razões que levaram ao distanciamento do valor experimental no último caso;
- Para o leito de bagaço de cana, uma adequação foi proposta para representar D_{eff} em função da porosidade local considerando-se a posição radial e a umidade das partículas. As regiões mais próximas à parede do leito são fortemente influenciadas pela porosidade como função da posição radial, enquanto que as demais regiões são gerenciadas pela porosidade relacionada à umidade das partículas. Para ensaios de até dez horas, D_{eff} é bem representado pela porosidade em função da posição radial e/ou pela umidade das partículas; enquanto que ensaios mais longos devem considerar preferencialmente a variação da porosidade em função da umidade das partículas;
- O número de Biot modificado foi introduzido para ambos os leitos e vazões de ar. Este adimensional indicou que a resistência é predominantemente interna em todo o domínio do leito de sílica a 50 L/min. Para o leito de bagaço de cana, a análise foi feita pontualmente para a posição de superfície, em que se constatou resistência interna nos tempos iniciais, com posterior predominância de resistências equivalentes, e resistência interna durante todo o tempo analisado em uma posição a 3,5 cm da superfície do leito. Para a vazão de 5 L/min, a resistência ao transporte é predominantemente externa.

CAPÍTULO 5. BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA

5.1. Introdução

Na seção anterior foi abordada a secagem de leitos fundos a partir da diminuição da umidade relativa do ar de secagem em temperatura constante. Para se aproximar de processos de secagem convencionais, nos quais a umidade absoluta do ar é diminuída devido ao aumento de temperatura, neste capítulo é admitido o aumento da temperatura nas fronteiras do objeto a ser seco, de modo que o processo deva ser observado a partir do transporte simultâneo de calor e massa. No que diz respeito aos fenômenos de transporte envolvidos em processos em movimentação, a secagem de leitos particulados tem sido representada a partir de modelos matemáticos propostos para prever os perfis de temperatura e umidade através de balanços de massa e energia (WANG et al., 2010; FREIRE et al., 2017; BRITO et al., 2017).

Estudos teóricos aplicados sistemas particulados de partículas inorgânicas têm sido reportados pela literatura desde a década de 30 e apresentam tanto dados experimentais como resultados obtidos a partir de modelos matemáticos. Colburn (1931) foi o primeiro a reportar estudos experimentais de transferência de calor em colunas empacotadas por materiais granulares. Coberly e Marshall (1951) aplicaram o conceito de que as resistências externas não são desprezíveis na região de parede para o transporte de calor, que mais tarde foi utilizada também por Tada et al. (2017). Argo e Smith (1953) detalharam a transferência de calor em um cilindro empacotado que, já na década de 50, era objeto de estudo devido às investigações acerca do funcionamento de reatores catalíticos. Yagi e Wakao (1959) apresentaram um estudo experimental sobre transferências de calor e massa em leitos empacotados por esferas de vidro, partículas de chumbo e esferas de aço e propuseram a modelagem, porém a partir de experimentos conduzidos e modelados separadamente para calor e massa. Fedkiw e Newman (1982) abordaram a determinação experimental de dois coeficientes importantes na transferência de massa em meios reacionais em colunas empacotadas com escoamento de fluido a baixas velocidades que representam as taxas de reação local e global, respectivamente, em que a primeira se relaciona à teoria do filme. Winterberg e Tsotsas (2000) propuseram a solução de modelos para

predição de perfis de temperatura em cilindros empacotados com diferentes configurações, entre elas, uma das quais aplicada à região anular entre cilindros concêntricos, baseada em perfis experimentais disponíveis na literatura, em que os coeficientes de transferência de calor na região de parede também foram considerados. Herz et al. (2012a) apresentaram um estudo experimental em um leito particulado em um tambor rotativo envolvendo coeficientes de transferência de calor existentes na região de parede, que envolve o contato existente entre partículas adjacentes e entre partículas e parede, além de um coeficiente de penetração. Nafsun e Herz (2016) apresentaram os perfis de temperatura em posições angulares e radiais de um leito de esferas de vidro colocado em um tambor rotativo durante as rotações nas camadas ativa e passiva. Tada et al. (2017a) apresentaram perfis experimentais de temperatura em um leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal estático e propuseram a representação matemática da transferência de calor. Os autores apresentaram também a estimativa e abordagem de parâmetros de transporte, tal como um coeficiente de transferência de calor na região de parede, como empregado por Coberly e Marshall (1951) e Herz et al. (2012a).

O estudo apresentado nesta seção trata-se também de um estudo teórico e fundamental a partir da proposição de modelos matemáticos a uma fase para predição dos perfis de temperatura e umidade em leitos sem reação colocados em um tambor horizontal estático, em que pretende-se observar como atuam os mecanismos de transporte nas fronteiras de um leito particulado no não-equilíbrio. Os modelos foram propostos para as situações físicas apresentadas utilizando-se partículas inorgânicas e, posteriormente, partículas orgânicas. Balanços de massa e energia para a fase gasosa escoante no sobre espaço também foram propostos e solucionados simultaneamente aos balanços para o leito de partículas, e a verificação do modelo foi feita considerando três tamanhos de tambor e duas vazões de ar. As situações apresentadas e as equações propostas serão utilizadas como base para a proposição de modelos matemáticos que representem a situação de um leito orgânico durante o cultivo sólido a partir do conceito de modelos a uma fase.

5.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta seção estão apresentados a seguir:

- Propor balanços de energia e massa e solucioná-los simultaneamente afim de prever perfis de temperatura e umidade de meios porosos compostos por partículas orgânicas e inorgânicas de geometrias variadas dispostas em tambores horizontais estacionários parcialmente preenchidos em conjunto com equações específicas para a fase gasosa escoante no sobre espaço;
- Obter relações entre a condutividade térmica efetiva de um leito de partículas de sílica ($K_{0,s}$) em função da temperatura e seu conteúdo de umidade para acoplá-lo ao modelo, bem como as variações da temperatura sobre a difusividade efetiva de água no leito (D_{eff});
- Validar os modelos propostos através da comparação entre perfis preditos e perfis experimentais.

5.3. Materiais e métodos

5.3.1. Preparo das partículas

As partículas de sílica (4 – 8 mm) foram empregadas secas ou úmidas nos ensaios experimentais. A umidificação das partículas foi feita através de injeção de ar saturado até que elas adquirissem predominância de coloração rosa, como apresentado no Capítulo 4 (*Balanços de Massa*). Neste momento, três amostras de 1 g cada foram levadas para determinação de umidade em analisador halógeno Ohaus® modelo MB 35 (Ohaus Corporation, Parsippany, USA). As partículas foram deixadas em repouso expostas ao ambiente com ar saturado por mais 24 horas, e o conteúdo de umidade foi novamente verificado. Quando não constatada variação no teor de umidade em um intervalo de 24 horas, as partículas foram acondicionadas em recipientes plásticos e estavam prontas para utilização.

Em ensaios para determinação de condutividade térmica efetiva na estagnação, foram empregadas partículas de sílica com conteúdo de umidade de 0%, 10% e 20% (base úmida), que correspondem às frações de 0; 0,11 e 0,25 kg-água/kg-sólido seco. A umidade de 0,11 kg-água/kg-sólido seco foi obtida misturando-se frações mássicas iguais de partículas secas e totalmente úmidas (0,25 kg-água/kg-sólido seco). A mistura foi armazenada em recipiente plástico e deixada em repouso durante um período máximo de 7 dias, sendo revolvida manualmente a cada dia. Decorrido este período, cinco porções de 1 g eram coletadas para determinação do conteúdo de

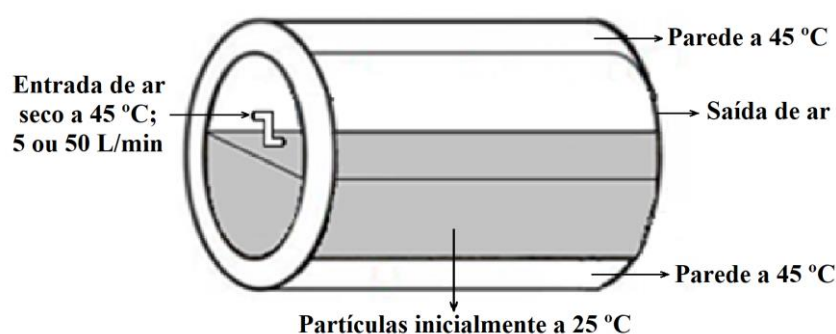
umidade. Quando eram verificadas diferenças entre os teores de umidade das amostras, as partículas eram deixadas em repouso por mais 24 horas e o teor de umidade era determinado, até que as diferenças entre as amostras fossem consideradas aceitáveis, ou seja quando menores que 0,5% (b.s.).

As fibras de bagaço de cana foram preparadas conforme descrito no item 4.2.1 do capítulo *Balanços de Massa*. Para utilização, as fibras foram umidificadas com água destilada até 75% (b.u.), que corresponde a 3 kg-água/kg-sólido seco, e armazenadas em embalagens plásticas em câmara de refrigeração a 18 °C durante 7 dias para posterior utilização.

5.3.2. Experimentos de calor e massa em tambor horizontal

Os experimentos de calor e massa foram executados em tambores horizontais com funcionamento idêntico ao apresentado no capítulo 4 (Balanços de Massa). Como diferencial, as fronteiras foram mantidas a 45 °C, enquanto que as partículas estavam inicialmente a 25 °C. As vazões de ar utilizadas nos ensaios foram as de 5 e 50 L/min, referenciadas como baixa e alta vazões, respectivamente. Uma representação simplificada do aparato é mostrado na Figura 5.1. O tambor foi mantido estático durante todo o ensaio.

Figura 5.1 – Esquema sintetizado do aparato experimental utilizado para execução dos ensaios de calor e massa em tambor horizontal.



FONTE: Elaborado pela autora.

Os ensaios foram realizados em tambores horizontais com diferentes dimensões, porém com funcionamento idêntico. São três tambores, referenciados nesta tese como tambores pequeno, médio e grande. Na Tabela 5.1 estão

apresentadas as cargas de partículas úmidas de sílica gel e bagaço de cana requeridas para preencher os tambores em grau de enchimento 0,5, bem como as dimensões dos tambores.

Tabela 5.1 – Cargas de partículas úmidas de sílica gel e bagaço de cana requeridas para preencher os tambores horizontais utilizados em ensaios de transferência de calor e massa em grau de enchimento 0,5 e dimensões dos tambores utilizados.

Tambor	Dimensões do tambor (cm)		Carga de sílica a 0,25 kg/kg-ss (kg)	Carga de bagaço de cana a 3 kg/kg-ss (kg)
	$d_{\text{int,tambor}}$	L_{tambor}		
Pequeno	10	20	5,2	0,27
Médio	20	40	13,2	1,36
Grande	31	74	29,3	4,1

FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis de umidade foram coletados assim como descrito na seção anterior. Durante o tempo do ensaio, amostras do leito eram coletadas e levadas para determinação direta de umidade em analisador halógeno. Termopares do tipo T foram introduzidos perpendicularmente à superfície do leito em posições conhecidas para que os perfis de temperatura na superfície, centro e nas proximidades da parede fossem coletados; todas as posições no leito são consideradas no seu centro angular e a profundidade na qual o sensor encontra-se inserido no leito será apresentada quando conveniente. Os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados COMPACT-DAQ (National Instruments, Austin, EUA) gerenciado por uma rotina do software LabView v.8 Instruments 5 (National Instruments, Austin, EUA).

5.3.3. Balanços de massa e energia

Os balanços de massa e energia foram propostos para prever as variações na temperatura e na umidade do leito de partículas ao longo do tempo. O acoplamento entre as equações se deu através da possível variação dos parâmetros efetivos de transporte em relação à temperatura e/ou à umidade das partículas e através de termos no modelo, quais sejam: o termo de remoção de água por evaporação devido aos aumentos de temperatura adicionado ao balanço de massa e o termo que

representa a energia liberada devido à evaporação de água adicionado ao balanço de energia.

O balanço de massa está apresentado na Eq. (5.1). Esta equação foi baseada naquela apresentada, solucionada e verificada na Seção 4 (*Balanços de Massa*), porém adicionada de um termo de evaporação de massa provocada pelo aumento da temperatura.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right] + \frac{\rho_{\text{ar}}}{\rho_s} V_r \frac{dX_{\text{abs}}}{dr} \quad (5.1)$$

em que ρ_{ar} e ρ_s são as densidades do ar e do material sólido, respectivamente, V_r é a velocidade de escoamento do ar na direção radial, calculada assumindo-se convecção natural ($Sh_{\text{esfera}} = 2$) e X_{abs} é a umidade absoluta do ar.

A umidade absoluta do ar, X_{abs} , pode ser escrita como o produto entre a capacidade máxima do ar de transportar água, f , e a temperatura do ar. Assumindo-se um modelo a uma fase, impõe-se também que o fluido e o sólido estão em equilíbrio térmico. Assim, o termo de evaporação pode ser escrito como segue:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right] + \frac{\rho_{\text{ar}}}{\rho_s} V_r f \frac{dT}{dr} \quad (5.2)$$

onde T é a temperatura local no leite.

O balanço de energia foi baseado naquele proposto por Tada et al. (2017a) para transporte de calor em um tambor horizontal parcialmente preenchido por leite inorgânico e seco, apresentado na Eq. (5.3). Tratando-se de leitos úmidos, o efeito da possível movimentação de ar na direção radial foi incluído e representado pelo segundo termo à direita da equação, como veículo de transporte quando da consideração de que existiu transporte de água devido ao aumento de temperatura no balanço de massa apresentado na Eq. (5.2).

$$\rho_{\text{bed}} C_{p_{\text{bed}}} \frac{\partial T}{\partial t} = K_0 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \left[(C_{p_{\text{ar}}} - \lambda f) \rho_{\text{ar}} V_r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (5.3)$$

em que ρ_{bed} e $C_{p_{\text{bed}}}$ denotam a densidade e o calor específico do leite, respectivamente, $C_{p_{\text{ar}}}$ é o calor específico do ar, K_0 é a condutividade térmica efetiva

na estagnação do leito, λ é o calor latente de vaporização da água e f é a umidade de saturação do ar na temperatura T .

Algumas hipóteses foram consideradas para solução das Eqs. (5.2) e (5.3), quais sejam: temperatura do ar no sobre espaço constante a 45 °C ao longo do comprimento do tambor; escoamento do ar no sobre espaço paralelo à superfície do leito de partículas ao longo do comprimento e igualmente distribuído em toda a largura do tambor; densidades e calores específicos do ar e do leito assumidos constantes; velocidade do ar na direção radial, V_r , considerada constante ao longo da coordenada radial e do tempo.

As condições iniciais e de contorno para solução das Eqs (5.2) e (5.3) estão apresentadas a seguir. Observe-se que os contornos para solução do balanço de massa são os mesmos apresentados no capítulo anterior (*Balanços de Massa*).

$$t = 0, \quad \left| \begin{array}{l} X = X_0 \\ T = T_0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.4) \\ (5.5) \end{array}$$

$$r = r_{i(\theta)}, \quad \left| \begin{array}{l} D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial r} = -Kh_m(X - X_{\text{eq}}) \\ K_0 \frac{\partial T}{\partial r} = -h_c(T_g - T) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.6) \\ (5.7) \end{array}$$

$$r = R, \quad \left| \begin{array}{l} D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \\ K_0 \frac{\partial T}{\partial r} = h_w(T_w - T) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.8) \\ (5.9) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} z = 0, \\ \text{(entrada de} \\ \text{ar)} \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \\ K_0 \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.10) \\ (5.11) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} z = L, \\ \text{(saída de ar)} \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \\ K_0 \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.12) \\ (5.13) \end{array}$$

As Eqs. (5.7) e (5.9) já foram reportadas por Tada et al. (2017a) para solução de um modelo de transferência de calor neste mesmo tambor horizontal. Na posição $r = r_{i(\theta)}$ [Eq. (5.7)], h_c é um coeficiente de transferência de calor entre o ar escoante no sobre espaço e a superfície do leito. A posição $r = R$ [Eq. (5.9)] representa a parede do tambor, onde a resistência à penetração de calor advindo da parede aquecida à temperatura T_w para a primeira camada de leito é representada pelo coeficiente de transferência de calor h_w .

Balanços de massa e energia específicos para a fase gasosa escoante também foram propostos, dados nas Eqs. (5.14) e (5.15). Observe-se que os balanços são unidimensionais com variações admitidas somente ao longo da direção axial. As variações da temperatura e umidade do gás ao longo da espessura da camada de gás escoante foram desprezadas pois, de acordo com a teoria da camada limite, o baixo número de Reynolds forneceria espessura da camada limite maior do que o raio do tambor. Portanto, optou-se por considerar valores médios nessa dimensão.

A Eq. (5.14) descreve que a variação de umidade no ar é ocasionada pela transferência de massa na corrente de ar por advecção e pela convecção a partir do contato do gás com a superfície úmida do leito. Na Eq. (5.15), a variação de entalpia local do ar é dada pela somatória das seguintes contribuições: energia transportada com a corrente de ar por advecção, convecção pelo contato com a superfície do leito e pela energia advinda da vaporização de água da superfície do leito para a fase gasosa.

$$\rho_{ar} \frac{\partial X_g}{\partial t} + \rho_{ar} V_z \frac{\partial X_g}{\partial z} = Kh_m \rho_s \frac{(X - X_{eq})}{\ell^*} \quad (5.14)$$

$$\rho_{ar} C_{p_{ar}} \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_{ar} C_{p_{ar}} V_z \frac{\partial T_g}{\partial z} = -h_c \frac{(T_g - T)}{\ell^*} - \rho_s \lambda Kh_m \frac{(X - X_{eq})}{\ell^*} \quad (5.15)$$

em que X_g e T_g denotam umidade absoluta e temperatura da fase gasosa escoante no sobre espaço e ℓ^* é um comprimento característico, calculado pela razão entre o elemento de volume representativo, neste caso dado por $R^2 \theta dz$, e a área superficial de troca assumida como uma placa plana de comprimento dz e largura $2R$.

As condições iniciais e de contorno estão apresentadas a seguir.

$$t = 0, \quad \left| X_g = X_{g,0} \right. \quad (5.16)$$

$$\left| T_g = T_{g,0} \right. \quad (5.17)$$

$$z = 0, \quad \left| X_g = X_{g,0} \right. \quad (5.18)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{(entrada de} \\ \text{ar)} \end{array} \right| T_g = T_{g,0} \quad (5.19)$$

$$z = L, \quad \left| \frac{\partial X_g}{\partial z} = 0 \right. \quad (5.20)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{(saída de ar)} \end{array} \right| \frac{\partial T_g}{\partial z} = 0 \quad (5.21)$$

A partir de X_g e T_g , as umidades de equilíbrio da sílica ($X_{eq,S}$) e do bagaço de cana ($X_{eq,BC}$) foram calculadas a partir do modelo de Oswin, cujos parâmetros foram obtidos para partículas de bagaço de cana por Casciatori et al. (2015) e ajustados às isotermas apresentadas por Inagaki et al. (1996) para partículas de sílica. As umidades de equilíbrio estão apresentadas nas Eqs. (5.22) e (5.23) como função da atividade de água.

$$X_{eq,S} = 0,063 \left(\frac{A_w}{1 - A_w} \right)^{0,68} \quad (5.22)$$

$$X_{eq,BC} = 0,052 \left(\frac{A_w}{1 - A_w} \right)^{0,409} \quad (5.23)$$

em que A_w é a atividade de água calculada como segue:

$$A_w = \frac{X_g P_{atm}}{P_w^* (X_g + 0,62413)} \quad (5.24)$$

em que P_{atm} é a pressão atmosférica e P_w^* é a pressão de vapor de saturação de vapor de água no ar, dada por:

$$P_w^* = 133,322 \exp \left(18,3036 - \frac{3816,44}{T_g - 46,13} \right) \quad (5.25)$$

com T_g em Kelvin.

Os balanços de massa e energia foram solucionados simultaneamente. Os termos de variação espacial foram discretizados de igual tamanho utilizando-se o método das diferenças finitas; as equações diferenciais ordinárias resultantes foram escritas em linguagem MATLAB® (MathWorks, Natick, Massachusetts, EUA) e solucionadas simultaneamente pelo método das fórmulas de diferenciação com passo da variável tempo definido pelo uso do solucionador *ode15s*. As simulações foram conduzidas visando-se as vazões de ar empregadas, 5 ou 50 L/min, e as dimensões dos tambores (pequeno, médio ou grande).

Além da dependência direta do balanço de massa para com a temperatura, dada pelo acréscimo do termo de evaporação de água do leito devido aos aumentos de temperatura, os balanços de massa e energia permaneciam acoplados por meio das variações dos parâmetros de transporte. Os coeficientes de difusão de água em leitos porosos de sílica e bagaço de cana foram escritos com dependência direta da temperatura, já apresentados no capítulo 4. A condutividade térmica efetiva na estagnação de um leito de bagaço de cana foi escrita com dependência direta da umidade das partículas, extraído de Casciotori et al. (2013), a 25 °C. A condutividade térmica efetiva na estagnação de um leito de sílica foi determinada experimentalmente como função da temperatura e da umidade das partículas, tal como apresentado a seguir no item 5.4.4 desta tese.

5.3.4. Parâmetros requeridos pelo modelo

Na Tabela 5.2 estão apresentados os parâmetros físicos e térmicos requeridos para solução dos balanços de massa e energia.

Tabela 5.2 – Parâmetros requeridos para solução simultânea dos balanços de massa e energia para obtenção de perfis de temperatura e umidade em leitos de partículas e sílica e fibras de bagaço de cana colocados em tambor horizontal parcialmente preenchido, com escoamento de ar seco paralelo à superfície do leito de partículas.

Símbolo	Descrição	Valor	Referências
	Condutividade térmica		Obtido
$K_{0,s}$	efetiva do leito de partículas de sílica	$K_{0,s} = f(T,X)$	experimentalmente pelo método da sonda linear

Continuação: Tabela 5.2.

$K_{0,BC}$	Condutividade térmica efetiva do leito de fibras de bagaço de cana	$K_{0,BC} = f(X)$	Casciatori et al. (2013)
ε_S	Porosidade do leito de sílica	0,4 m ³ vazios/m ³ total	Determinado experimentalmente por deslocamento de volume
ρ_{ar}	Densidade do ar a 25 °C	1,18 kg/m ³	Perry e Chilton (1973)
	Densidade do ar a 45 °C	1,14 kg/m ³	
ρ_S	Densidade da sílica	2000 kg/m ³	
ρ_{BC}	Densidade do leito de fibras de bagaço de cana a 75% (b.u.)	318 kg/m ³	Casciatori et al. (2014)
$C_{p,ar}$	Calor específico do ar	1180 J/kg K	Himmelblau, 1982
$C_{p,S}$	Calor específico da sílica	940 J/kg K	Perry e Chilton (1973)
$C_{p,BC}$	Calor específico do bagaço de cana seco	1760 J/kg K	Prieto (2003)
$C_{p,\text{água}}$	Calor específico da água	4184 J/kg K	Perry et al. (2008)
$D_{eff,S}$	Difusividade efetiva de água no leito de partículas de sílica	$D_{eff,S} = f(T)$	Determinados experimentalmente, Capítulo 4
$D_{eff,BC}$	Difusividade efetiva de água no leito de fibras de bagaço de cana	$D_{eff,BC} = f(T)$	
h_w	Coeficiente de transferência de calor entre a parede do tambor e a primeira camada do leito	11160 J/hm ² K	Tada et al. (2017a)
Variáveis de processo			
Variáveis	Descrição	Valor	
T_0	Temperatura inicial do leito	25 °C	
$T_{g,0}$	Temperatura do ar de entrada	45 °C	
T_w	Temperatura da parede interna do tambor		
$X_{S,0}$	Umidade inicial das partículas de sílica	0,25 kg-água/kg-sólido seco	

Continuação: Tabela 5.2.

$X_{BC,0}$	Umidade inicial das fibras de bagaço de cana	3 kg-água/kg-sólido seco
$X_{g,0}$	Umidade inicial da fase gasosa	0,0065 kg/kg de ar seco
V_r	Velocidade do ar na direção radial	Eq. (3.15), Seção 3
F	Capacidade máxima do ar de carregar água	0,00246 kg-água/kg-ar °C
Λ	Calor latente de vaporização da água	241430 J/kg-água
R	Raio do tambor	0,05 a 0,15 m
L	Comprimento do tambor	0,10 a 0,74 m

FONTE: Elaborado pela autora.

Os parâmetros do leito, ρ_{bed} e $C_{p,bed}$, foram calculados a partir da soma ponderada pela porosidade entre as frações volumétricas de sólido úmido e de ar.

O coeficiente de transferência de calor entre a superfície do leito e o ar escoante no sobre espaço, h_c , foi calculado a partir da soma entre as contribuições convectiva e evaporativa, apresentada na Eq. (5.26). A contribuição convectiva foi calculada utilizando-se as correlações de Gnielinski (1976), já utilizadas por Tada et al. (2017a) para estimativa do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície de um leito de esferas de vidro e o ar no sobre espaço em um tambor de 30 cm de diâmetro e 74 cm de comprimento. A contribuição evaporativa deu-se conforme apresentado na Eq. (5.27).

$$h_c = h_{conv} - h_{evap} \quad (5.26)$$

$$h_{evap} = \rho_{ar} V_z X_g^* \Delta H_{vap} \quad (5.27)$$

em que X_g^* é a umidade de saturação da fase gasosa e ΔH_{vap} é a entalpia de evaporação da água. A X_g^* é dada por:

$$X_g^* = \frac{0,62413 P_w^*}{P_{atm} - P_w^*} \quad (5.28)$$

5.3.5. Determinação experimental da condutividade térmica efetiva do leito de sílica gel na estagnação ($K_{0,s}$)

Um delineamento fatorial 2^k foi utilizado para determinar $K_{0,s}$ e verificar a dependência do parâmetro em relação à temperatura e umidade das partículas. Na Tabela 5.3 estão apresentados os fatores e os níveis considerados neste delineamento.

Tabela 5.3 – Níveis dos fatores na análise de dependência de $K_{0,s}$.

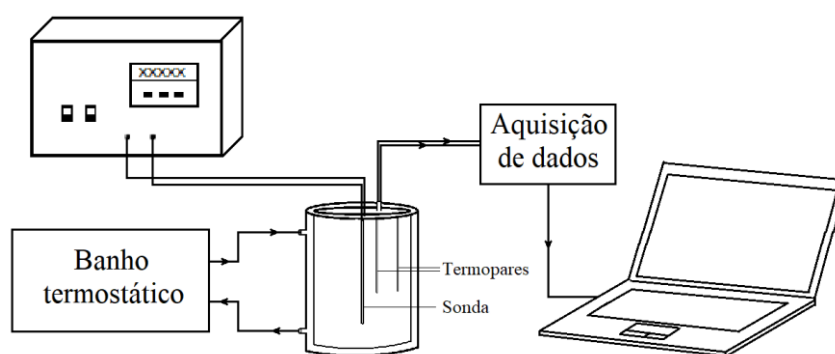
Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
Temperatura (°C)	25	37,5	50
Umidade das partículas (kg/kg de sólido seco)	0	0,11	0,25

FONTE: Elaborado pela autora.

Utilizou-se o método da sonda linear proposto por Van der Held e Van Drunen (1949). Uma célula de medidas cilíndrica com 10 cm de diâmetro interno e 24 cm de comprimento, que possuía camisa externa para refrigeração e tampas construídas em nylon foi empregada para determinação de $K_{0,s}$. Uma resistência elétrica e um termopar do tipo T formavam um conjunto com 6,5 mm de diâmetro externo e 21 cm de comprimento que estava acoplado no centro radial da tampa superior. A resistência elétrica estava conectada a um controlador de tensão de corrente contínua, de modo que a potência dissipada pela resistência era conhecida. Outros dois termopares foram inseridos em duas posições radiais conhecidas, cada um com 10 cm de comprimento. Portanto, existiam três termopares: um estava incorporado à sonda, tão perto quanto possível da resistência elétrica, o segundo estava a uma distância de 2 cm da resistência e o último estava a 1 cm da parede. Os três termopares estavam conectados a um sistema de aquisição de dados COMPACT-DAQ (National Instruments, Austin, EUA) gerenciado por uma rotina do software *LabView* v.8 Instruments 5 (National Instruments, Austin, EUA). Nestes ensaios, uma tensão de 15 V foi aplicada à resistência elétrica e as temperaturas nas três posições foram adquiridas. O ensaio era finalizado quando verificada variação de temperatura na posição mais distante da resistência elétrica e pouca variação acusada pelo termopar intermediário. A determinação de $K_{0,s}$ para cada condição experimental apresentada

na Tabela 5.3 foi feita em triplicata. Na Figura 5.2 está apresentado um diagrama esquemático do aparato experimental utilizado para determinação de $K_{0,s}$.

Figura 5.2 – Aparato experimental utilizado para determinação da condutividade térmica efetiva na estagnação de um leito de sílica gel.



FONTE: Elaborado pela autora.

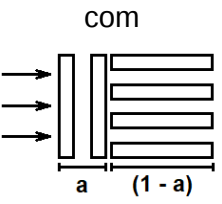
A influência estatística dos fatores temperatura e umidade das partículas sobre o parâmetro $K_{0,silica}$ foi verificada através de análise de variância ANOVA em nível de significância de 5% ($p < 0,05$), seguida de um teste de comparação entre médias, se necessário.

5.3.6. Estimativa de parâmetros efetivos de transporte por meio de correlações

No capítulo 4 (Balanços de Massa), mostrou-se que a combinação entre as correlações de Winterberg e Tsotsas (2000) e Schlünder (1966), e Winterberg et al. (2000b) e Krischer e Esdorn (1956) foram adequadas para cálculo das difusividades efetivas de água em leitos compostos por partículas esféricas e cilíndricas. Tais correlações foram originalmente propostas para cálculo da condutividade térmica efetiva desses leitos, então pressupõe-se que possam ser utilizadas também com êxito para cálculo desses parâmetros. Assim, como na seção anterior, as contribuições associadas à presença de percolação de ar são nulas, de modo que o parâmetro efetivo do leito é equivalente àquele em ausência de percolação de ar, aqui referenciado como contribuição estática. As correlações, agora escritas em termos do parâmetro efetivo de transferência de calor por condução, estão apresentadas no

Quadro 5.1. Nessas equações, K_0 é a condutividade térmica efetiva do leito de partículas, para o qual os índices “esfera” e “cilindro” referem-se à geometria das partículas que o compõem, K_{SOL} é a condutividade térmica do sólido, K é a condutividade térmica molecular do fluido e ε é a porosidade do leito. Recorda-se que $K_{0,esfera}$ independe da porosidade do leito e fornece um valor médio, enquanto que $K_{0,cilindro}$ depende de ε .

Quadro 5.1 – Correlações disponíveis na literatura para cálculo da condutividade térmica efetiva em leitos empacotados por partículas esféricas e cilíndricas em ausência de percolação por ar.

Partícula	Correlação	Eq.	Referência
Esférica	$\frac{K_{0,esfera}}{K} = \frac{2}{1 - K/K_{SOL}} \left[\frac{\ln(K_{SOL}/K^*)}{1 - K^*/K_{SOL}} - 1 \right]$	(5.29)	Schlünder (1966)
Cilíndrica	Posicionamento paralelo à direção de referência $\frac{K_I}{K} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{K_{SOL}}{K^*}$	(5.30)	Krischer e Esdorn (1956)
	Posicionamento perpendicular à posição de referência $\frac{K_{II}}{K} = \frac{1}{\varepsilon + \frac{1 - \varepsilon}{K_{SOL}/K^*}}$	(5.31)	
	Parâmetro médio,  $\frac{K_{0,cilindro}}{K} = \frac{1}{\frac{1 - a}{K_I/K^*} + \frac{a}{K_{II}/K^*}}$	(5.32)	

FONTE: Elaborado pela autora.

Para as partículas de sílica, a condutividade térmica efetiva do leito foi calculada e comparada com aquela obtida experimentalmente para a temperatura de 25 °C, que será apresentada a seguir na subseção Resultados e discussão. Já para o leito de bagaço de cana, utilizou-se de uma abordagem distinta. As correlações apresentadas no Quadro 5.1 para leitos empacotados por partículas cilíndricas foram utilizadas para estimativa da condutividade térmica do sólido úmido ($K_{SOL,BC+A}$), representado por K_{SOL} nas Eqs. (5.30) e (5.31). Para tanto, foram tomados os resultados de Casciatori et al. (2014) sobre a porosidade média de um leito de bagaço de cana em função da

umidade das partículas e os resultados de Casciatori et al. (2013) sobre a determinação experimental da condutividade térmica efetiva na estagnação de leitos de bagaço de cana a diferentes umidades da partícula, aqui chamada de $K_{\text{exp,BC}}$. Através das correlações, $K_{0,\text{cilindro}}$ foi calculado através de um valor iniciador atribuído arbitrariamente a K_{SOL} . Considerando-se que $K_{0,\text{cilindro}}$ deva ser tão próximo quanto possível dos resultados de $K_{\text{exp,BC}}$ apresentados por Casciatori et al. (2013), a ferramenta *Solver* do software Microsoft Excel foi utilizada para estimar o valor de K_{SOL} que fornecesse o menor erro relativo absoluto possível entre o $K_{\text{exp,BC}}$ e o $K_{0,\text{cilindro}}$ calculado através das Eqs. (5.30) a (5.32), para cada uma das umidades de partículas. O erro relativo absoluto foi calculado conforme mostrado na Eq. (5.33).

$$\text{ERA} = \frac{|K_{\text{exp,BC}} - K_{0,\text{cilindro}}|}{K_{\text{exp,BC}}} \quad (5.33)$$

A partir da estimativa de K_{SOL} , que fornece $K_{\text{SOL,BC+A}}$, é possível se estimar a condutividade térmica do bagaço de cana seco ($K_{\text{SOL,BC}}$) utilizando-se o modelo de resistências em paralelo, apresentado na Eq. (5.34).

$$K_{\text{SOL,BC+A}} = K_A x_A + K_{\text{SOL,BC}} x_{\text{SOL}} \quad (5.34)$$

em que K_A é a condutividade térmica molecular da água pura e x_A e x_{SOL} representam as frações volumétricas de água e de sólidos secos (b.u.) presentes na amostra úmida, respectivamente, cuja somatória é igual a 1.

5.4. Resultados e discussão

5.4.1. Condutividade térmica efetiva do leito de sílica gel ($K_{0,S}$)

Na Tabela 5.4 estão apresentados os valores obtidos na determinação experimental de $K_{0,S}$ para as condições experimentais adotadas.

Tabela 5.4 – Valores para $K_{0,S}$ obtidos experimentalmente pelo método da sonda linear.

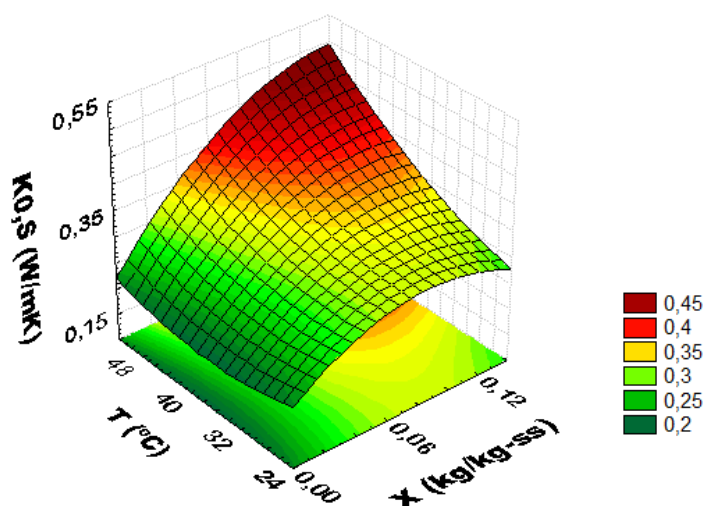
Temperatura (°C)	Umidade (kg-água/kg-sólido seco)	$K_{0,S}$
------------------	----------------------------------	-----------

25	0	$0,26 \pm 0,011$
25	0,12	$0,35 \pm 0,013$
37,5	0,06	$0,34 \pm 0,004$
50	0	$0,27 \pm 0,024$
50	0,12	$0,45 \pm 0,015$

FONTE: Elaborado pela autora.

A análise estatística para os resultados experimentais evidenciou que ambos os fatores, temperatura e umidade inicial da amostra, e também a interação entre eles são significativos a um nível de significância de 5%. Na Figura 5.3 está apresentada a superfície de resposta que ilustra a tendência de $K_{0,silica}$ em relação à temperatura e à umidade. Aparentemente, a tendência é que $K_{0,silica}$ assuma valores tão próximos à condutividade térmica da água quanto maior o conteúdo de umidade das partículas, resultado similar ao obtido por Casciatori et al. (2014) para fibras de bagaço de cana.

Figura 5.3 – Superfície de resposta gerada a partir da determinação de K_0 de um leito de partículas de sílica variando-se o conteúdo de umidade das partículas (0 a 0,121 kg-água/kg-sólido seco) e a temperatura do ensaio (25 a 50 °C).



FONTE: Elaborado pela autora.

O modelo estatístico dado pela análise de variância está apresentado na Eq. (5.35). Esta equação foi incorporada à solução dos balanços de massa e energia para descrever as variações de $K_{0,s}$ como função da temperatura e da umidade do leito.

$$K_{0,s} = 0,2642 - 0,729X - 0,000667T + 0,055XT \quad (5.35)$$

A condutividade térmica da sílica fundida foi reportada por Mikkola et. al (2018) como 1,38 W/mK, cujo valor distancia-se dos valores encontrados experimentalmente no presente trabalho. No entanto, deve-se considerar que a condutividade térmica determinada experimentalmente refere-se a um parâmetro efetivo e compreende todas as possíveis formas de transporte neste sistema, tais como a condução no interior das partículas, entre as partículas, através da fase gasosa e os fenômenos de interface entre a fase gasosa e a fase sólida. Além disso, tratando-se de uma partícula porosa com capacidade de retenção de água, deve-se considerar a existência de poros dispersos na microestrutura das partículas, como sugerido por Cai e Yu (2011), em um estudo sobre a influência da tortuosidade das partículas sobre o transporte de massa por capilaridade, cujas considerações neste sentido podem ser transpostas para o transporte de calor (PIA; CASNEDI, 2017).

5.4.2. Estimativa de parâmetros de transporte de interesse através de correlações

Para o leito de sílica, o resultado direto de $K_{0,esfera}$ foi de 0,20 W/mK ao se utilizar o valor de 2,4 W/mK para óxido de silício reportado por Perry e Chilton (1976), que é relativamente próximo àquele obtido experimentalmente para o leito seco a 25 °C. Considerando-se a condutividade térmica da sílica fundida de 1,39 W/mK apresentada por Mikkola et al. (2018), o parâmetro efetivo calculado seria de 0,17 W/mK. Note que a correlação proposta por Schlünder et al. (1966) parece absorver variações relativas à condutividade térmica do sólido, já que o distanciamento entre K_{SOL} em quase duas vezes promoveu uma diferença de apenas 0,03 W/mK sobre o parâmetro efetivo calculado, o que pode ser considerado desprezível. Assim e também neste caso, a correlação de Schlünder et al. (1966) foi capaz de predizer com êxito o parâmetro efetivo para o leito de esferas de sílica apresentado neste trabalho.

Na Tabela 5.5 estão apresentados os resultados para K_{SOL} de bagaço de cana úmido, aqui referenciado como $K_{SOL,BC+A}$, em leitos compostos por partículas a diferentes umidades. Os erros relativos absolutos (ERA) entre $K_{exp,BC}$ e $K_{0,cilindro}$, que forneceram $K_{SOL,BC+A}$, foram inferiores a 0,0001.

Observe-se que $K_{SOL,BC+A}$ apresentou resultados próximos dentro do intervalo de umidade de 0,075 a 0,33 kg/kg de sólido seco, com valor médio de $0,33 \pm 0,015$ W/mK,

como resposta à fração de água relativamente baixa, indicando predominância da propriedade do sólido. Os resultados apontaram notável variação do parâmetro quanto maior a umidade das partículas, com aumento de aproximadamente 45% sobre o valor do parâmetro em umidade de 0,72 kg/kg de sólido seco, em comparação com o valor médio de referência de 0,33 W/mK. Para umidades superiores a 0,72 kg/kg de sólido seco, os valores de $K_{\text{SOL,BC+A}}$ ultrapassaram aquele conhecido para água pura, atingindo até 1,36 W/mK. Isso já não teria consistência, uma vez que a composição da partícula seca é mantida e, considerando-se as relações simplificadas para cálculo de parâmetros efetivos de meios compostos por duas fases, a condutividade molecular do conjunto água + sólido não deveria ultrapassar a maior condutividade térmica entre os constituintes que, nesse caso, é a da água pura.

Tabela 5.5 – Condutividade térmica do bagaço de cana úmido calculada ($K_{\text{SOL,BC+A}}$) a partir do ajuste do modelo de Krischer e Esdorn (1975) aos dados experimentais de Casciadori et al. (2013).

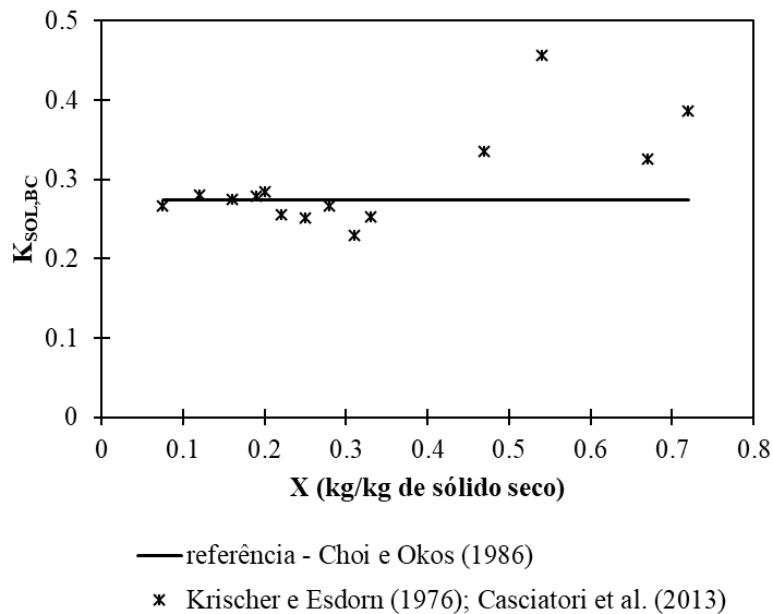
X (kg/kg-sólido seco)	ϵ (-)	$K_{\text{exp,BC}}^*$ (W/mK)	$K_{0,\text{cilindro}}^{**}$ (W/mK)	$K_{\text{SOL,BC+A}}$ (W/mK)
0,075	0,889	0,057	0,057	0,291
0,12	0,887	0,06	0,060	0,316
0,16	0,884	0,065	0,065	0,321
0,19	0,883	0,064	0,064	0,332
0,20	0,882	0,064	0,064	0,339
0,22	0,881	0,062	0,062	0,319
0,25	0,879	0,063	0,063	0,323
0,28	0,877	0,066	0,066	0,342
0,31	0,874	0,064	0,064	0,320
0,33	0,873	0,067	0,067	0,341
0,47	0,863	0,081	0,081	0,423
0,54	0,856	0,095	0,095	0,510
0,67	0,849	0,089	0,089	0,440
0,72	0,845	0,097	0,097	0,481
1,27	0,806	0,207	0,207	0,975
2,33	0,745	0,364	0,364	1,393
4	0,68	0,439	0,439	1,361

* Dados extraídos de Casciadori et al. (2013); ** Calculados a partir das correlações de Krischer e Esdorn (1976). FONTE: Elaborado pela autora.

Casciatori et al. (2013) discutiu sobre os seus resultados experimentais obtidos para a amplitude de umidade de partícula reportada no presente trabalho. Mantendo-se as condutividades térmicas do sólido e do gás constantes e variando-se apenas a porosidade do leito e o conteúdo de água no modelo de resistências em paralelo, o parâmetro calculado descreveu uma reta em função da umidade das partículas, enquanto que os dados experimentais indicavam tendência exponencial. Os erros entre os parâmetros calculado e experimental aumentaram com a umidade das partículas. Na ocasião, os autores justificaram a tendência exponencial observada nos dados experimentais devido à formação de um filme de água líquida sobre a partícula, ou seja, a água presente possivelmente não se encontrava totalmente adsorvida pela fase sólida. A partir dessa suposição, a condução efetiva de calor deixa de ser considerada através das duas fases do meio poroso, sólido úmido e gás, e passa a ser considerada através de um sistema trifásico, composto pelo sólido úmido, água líquida sobre a superfície do sólido úmido e gás, supondo-se ainda que o gás encontra-se em equilíbrio com a fase sólida e não há evaporação de água. Aliado a isso, os modelos de Krischer e Esdorn também não preveem a presença de água desprendida e os fenômenos que possam estar relacionados ao seu deslocamento através do sólido e/ou do gás. A isso deve-se a inconsistência no cálculo do $K_{SOL,BC+A}$ (Tabela 5.5) e, consequentemente, do $K_{SOL,BC}$ (Figura 5.4). No entanto, os métodos utilizados podem ser considerados satisfatórios para estimativa dos parâmetros efetivos de transporte a baixas ou moderadas umidades.

Aplicando-se as correlações de Choi e Okos (1986) como valor de referência para a condutividade térmica do bagaço de cana seco, obtém-se o valor de 0,275 W/mK, considerando-se que as partículas são compostas por 96% de fibras e 4% de cinzas (SOARES, 2012; ROCHA et al., 2015). Também é comum se utilizar essas correlações fazendo-se a soma ponderada das frações de sólido seco e de água presentes em uma porção úmida. Na Figura 5.4 estão apresentados os resultados obtidos para o bagaço de cana seco ($K_{SOL,BC}$) no presente trabalho, calculados a partir da combinação entre os modelos de Krischer e Esdorn (1976), Casciatori et al. (2013) e das frações mássicas de água e de sólidos secos [Eqs. (5.30) a (5.32) e (5.34)]. O traço contínuo representa o valor de referência para o parâmetro, calculado a partir de Choi e Okos (1986).

Figura 5.4 – Condutividade térmica do bagaço de cana seco ($K_{SOL,BC}$) obtidos a partir da combinação entre as correlações de Krischer e Esdorn (1976) e os resultados experimentais de Casciatori et al. (2013). O traço contínuo representa $K_{SOL,BC}$ de referência calculado utilizando-se correlação de Choi e Okos (1986).



FONTE: Elaborado pela autora.

Tomando-se todos os valores de $K_{SOL,BC}$ calculados e apresentados na Figura 5.4, a média correspondente é de $0,287 \pm 0,043$ W/mK, próxima ao valor de referência. Nota-se que a proximidade entre os valores calculados e o de referência é característica de leitos formados por partículas com conteúdo de umidade moderado, enquanto que o distanciamento entre os parâmetros é evidente em umidades a partir de 0,47 kg/kg de sólido seco. Excluindo-se os pontos mais distantes (maiores umidades), a média de $K_{SOL,BC}$ obtida é de 0,264 W/mK, que ainda assim é próxima da antiga e também do valor de referência. No entanto, a exclusão dos últimos quatro pontos promoveu diminuição considerável do desvio padrão entre as amostras, agora de 0,017 kg/kg de sólido seco, com consequente diminuição do coeficiente de variação, que era de 20,72 % e, agora, é de 6,44%. Então, considera-se que a combinação entre o modelos de Krischer e Esdorn (1976) e os dados experimentais de Casciatori et al. (2013) pode ser utilizada com segurança para cálculo das propriedades térmicas efetivas de um leito úmido de bagaço de cana para umidades de partículas iguais ou inferiores a 0,33 kg/kg de sólido seco, correspondente a 24 % de umidade em base úmida.

5.4.3. Simulações

Na Tabela 5.6 estão apresentadas as velocidades superficiais para cada vazão de ar e tamanho de tambor, bem como os respectivos valores calculados para os coeficientes de transferência de calor e massa por convecção, requeridos para cada simulação. Os demais parâmetros utilizados nas simulações são aqueles previamente apresentados no item 5.3.5.

Tabela 5.6 – Velocidades superficiais de escoamento de ar em tambores de diferentes escalas parcialmente preenchidos por partículas em grau de enchimento 0,5 sob vazões de 5 e 50 L/min.

Parâmetro	Tambor pequeno		Tambor médio		Tambor grande	
	5 L/min	50 L/min	5 L/min	50 L/min	5 L/min	50 L/min
V_z (cm/s)	2,1	21,0	0,5	5,3	0,2	2,3
h_m (m/h)	4,14	13,14	1,48	4,64	0,792	2,27
$h_c \times 10^3$ (J/hm ² K)	37,37	118,1	9,34	29,55	7,85	17,25

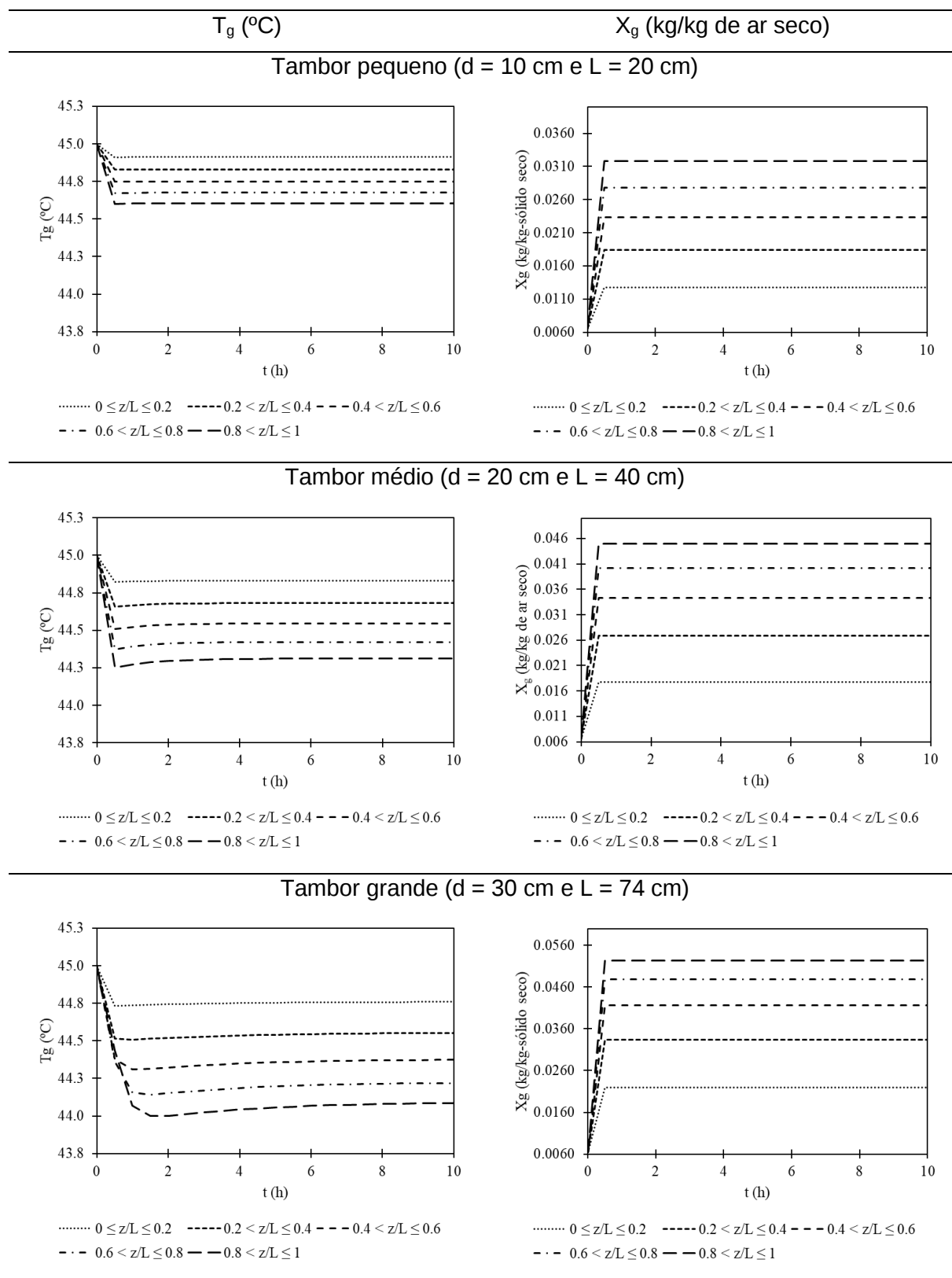
FONTE: Elaborado pela autora.

a. Introdução de ar inicialmente seco em escoamento paralelo à superfície do leito a 50 L/min

As simulações mostradas a seguir referem-se a $Q = 50$ L/min em diferentes escalas de tambores horizontais. Os perfis de T_g e X_g para os leitos de sílica e de bagaço de cana estão apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6 para tambores de diferentes tamanhos.

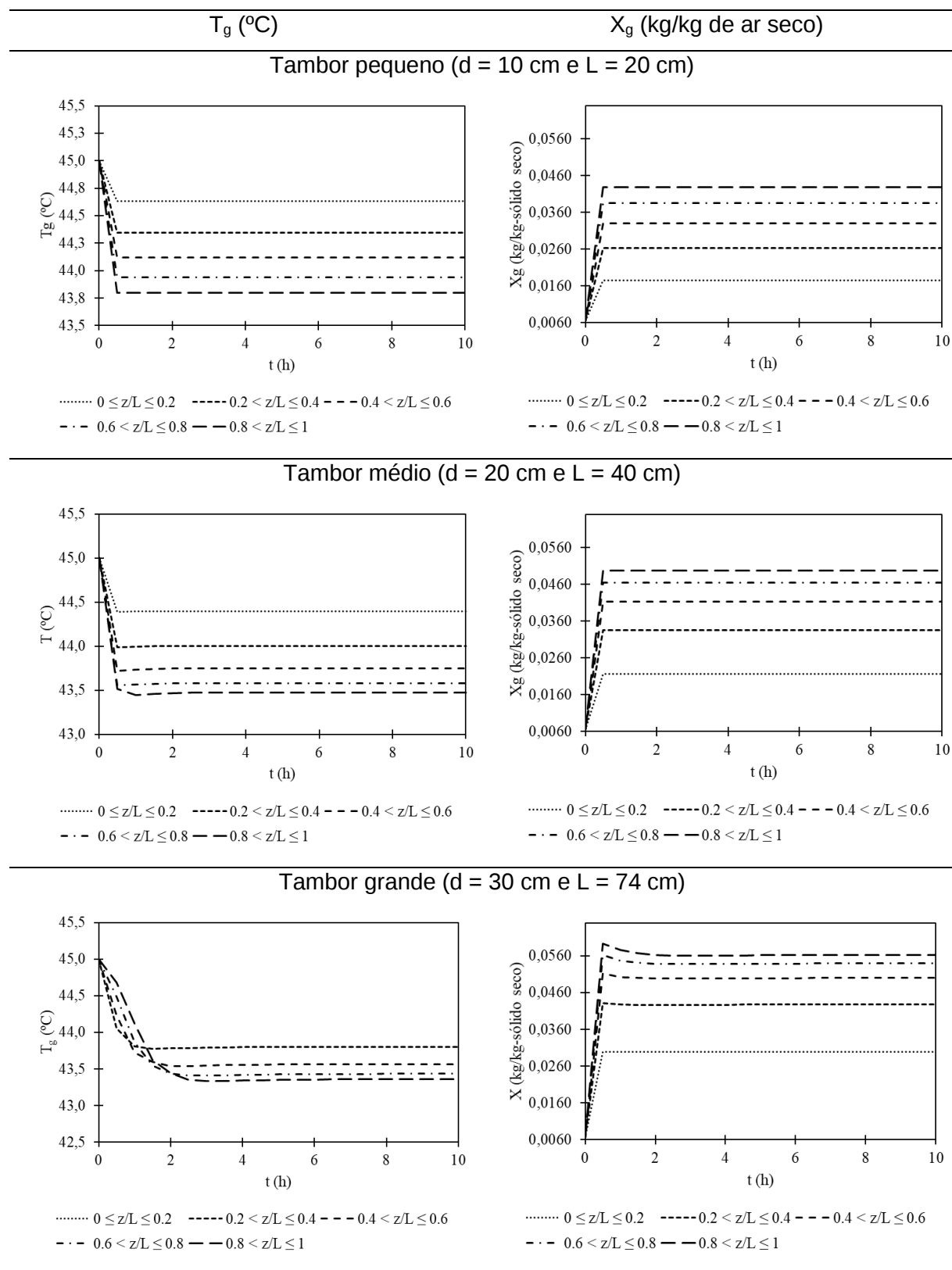
Os perfis de T_g apresentaram variações máximas de 1 e 1,8 °C, de modo que variações expressivas em X_g não foram observadas ao se manter T_g igual a 45 °C. Essa afirmação é suportada pelo cálculo da somatória do erro médio relativo, dado na Eq. (5.36), entre os perfis temporais de X_g obtidos com T_g variável ou constante a 45 °C, assumindo-se esta última condição como referência.

Figura 5.5 – Perfis temporais de temperatura e umidade do gás (T_g e X_g , respectivamente), para diferentes tambores horizontais parcialmente preenchidos em grau de enchimento 0,5 por partículas de sílica gel com escoamento de ar seco paralelo à superfície do leito a 50 L/min.



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.6 – Perfis temporais de temperatura e umidade do gás (T_g e X_g , respectivamente), para diferentes tambores horizontais parcialmente preenchidos em grau de enchimento 0,5 por partículas de bagaço de cana com escoamento de ar seco paralelo à superfície do leito a 50 L/min.



 FONTE: Elaborado pela autora.

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{g,45,t} - X_{g,v,t}|}{X_{g,45,t}} \quad (5.36)$$

em que $\bar{e}$ é a somatória do erro médio relativo, $X_{g,45}$ e $X_{g,v}$ referem-se aos dados de X_g obtidos com T_g constante e variável, respectivamente; o índice t representa cada instante t na simulação e N é o número de dados analisados.

Na Tabela 5.7 estão apresentados a somatória dos erros médios relativos para cada fração axial e tambor. Observe-se que o erro médio relativo foi inferior a 8 % entre os valores médios de X_g para cada seção longitudinal e leito de partículas considerados, com erro máximo de 7,4 % para o leito de bagaço de cana na extremidade axial final do maior tambor em $t = 10$ h. Assim, acredita-se que tais variações de X_g possam ser consideradas desprezíveis na determinação da umidade das partículas do leito (X). Os erros em X_g para leitos de sílica são cerca de três vezes superiores aos de leito de bagaço de cana devido à natureza das partículas, que apresentam diferentes umidades de equilíbrio para uma mesma atividade de água. Portanto, nos demais de resultados de simulação, T_g será assumida constante e igual a 45 °C.

Tabela 5.7 – Erro médio relativo entre perfis de umidade do gás (X_g) considerando-se o perfil de T_g e $T_g = 45$ °C.

Tambor	Frações axiais									
	$0 \leq z/L \leq 0,2$		$0,2 \leq z/L \leq 0,4$		$0,4 \leq z/L \leq 0,6$		$0,6 \leq z/L \leq 0,8$		$0,8 \leq z/L \leq 1$	
	Sílica	BC	Sílica	BC	Sílica	BC	Sílica	BC	Sílica	BC
Pequeno	0	1,07	0	2,12	0,67	3,33	0,58	3,79	1,02	4,44
Médio	0	2,99	1,17	4,23	0,95	5,78	1,56	5,98	2,09	6,73
Grande	1,37	3,69	1,41	5,09	2,06	6,19	2,55	7,00	3,08	7,41

FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis de X_g mostram que o ar de saída é mais úmido quanto maior a dimensão do tambor para os dois tipos de partículas, pois a velocidade superficial v_0 é menor em tambores de maiores dimensões (vide Tabela 5.4, previamente apresentada). Esta variação de X_g é refletida nos perfis de X , que apresentam

variações axiais mais acentuadas com o aumento do tambor e serão apresentados a seguir.

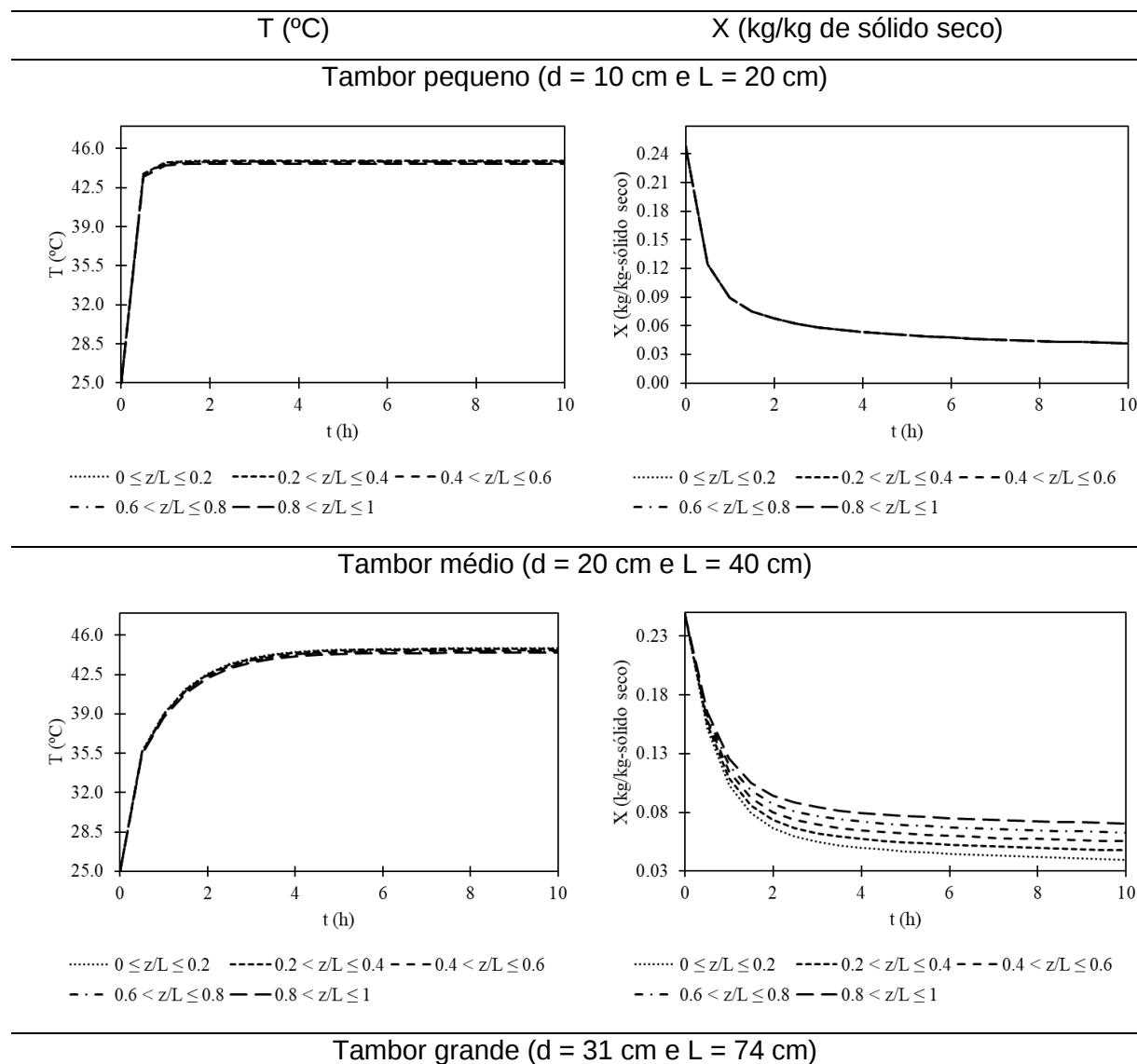
Com relação aos mecanismos predominantes, tem-se que todo o acúmulo de vapor d'água na fase gasosa escoante se dá pela troca existência entre o gás e a superfície do leito. Observe-se que as taxas de transferência de massa do sólido para o ar são praticamente constantes ao longo do domínio axial em tambor pequeno para ambos os leitos de partículas, o que permite inferir que a convecção é predominante e que, se as taxas são constantes, espera-se que variações axiais de X na superfície do leito sejam desprezíveis. Para os tambores médio e grande, observou-se a diminuição das taxas de ganho de umidade ao longo de z , sendo este um notável indicativo de que a convecção passa a ser menos intensa, possivelmente devido à diminuição do gradiente de umidade ocasionada pela sua umidificação gradual ao longo de z e pela queda no coeficiente h_m . No entanto, o ganho de massa pela fase gasosa indica que ainda há a secagem da superfície do leito mesmo na extremidade axial final. Essa observação corrobora com o observado no capítulo anterior para balanços de massa em tambor a 25 °C, para o qual a vazão de 50 L/min de ar seco sobre a superfície de um leito de sílica em tambor grande ainda mantinha capacidade de estabelecer transporte de massa com a superfície úmida do leito; no entanto, as taxas de transferência de massa eram constantes naquela ocasião, enquanto que as taxas de transferência de massa decrescem ao longo do comprimento do tambor para um sistema não-isotérmico para os tambores médio e grande. A 45 °C, a umidade de saturação do ar (X_{sat}) corresponde a 0,065 kg/kg de ar seco; portanto, a fase gasosa não atinge a saturação em nenhum dos casos apresentados.

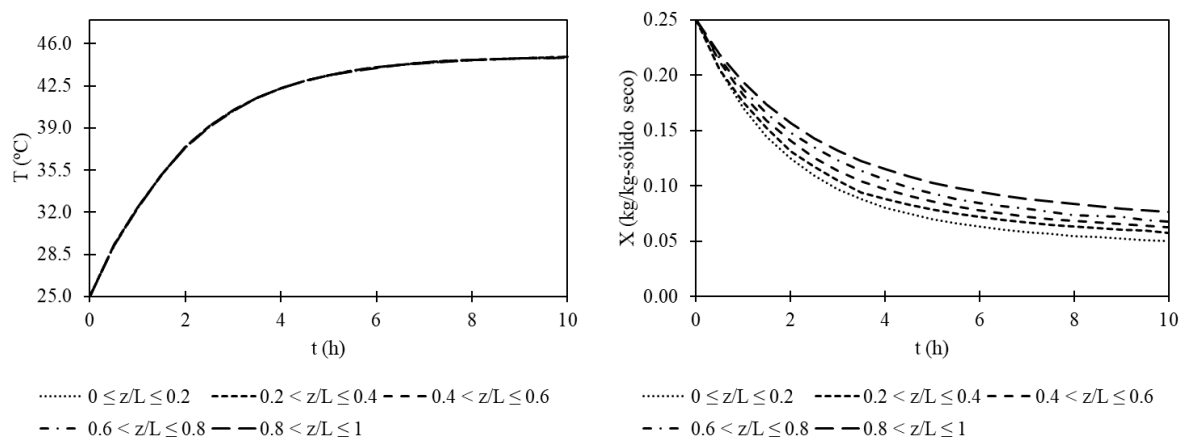
Nas Figuras 5.7 e 5.8 estão apresentados os perfis de temperatura (T) e umidade do sólido (X) na superfície do leito exposta ao sobre espaço para diferentes dimensões dos tambores e escoamento de ar seco paralelo à superfície do leito a 50 L/min, para os leitos de sílica gel e bagaço de cana, respectivamente.

De modo geral, observa-se similaridade entre os perfis dos leitos de sílica (Figura 5.7) e de bagaço de cana (Figura 5.8). Sutis diferenças foram notadas entre os perfis axiais de temperatura, sendo que a temperatura em cada fração axial tende à sua respectiva T_g , exceto para os leitos em tambor pequeno, cujo equilíbrio é atingido impreterivelmente a 45 °C. Como as variações de temperatura do gás foram pequenas, foram feitas simulações fixando-se $T_g = 45$ °C em todo o domínio axial, e

os resultados indicaram que a temperatura na superfície do leito tende também a T_g , indicando que na superfície do leito o equilíbrio térmico pode ser assumido.

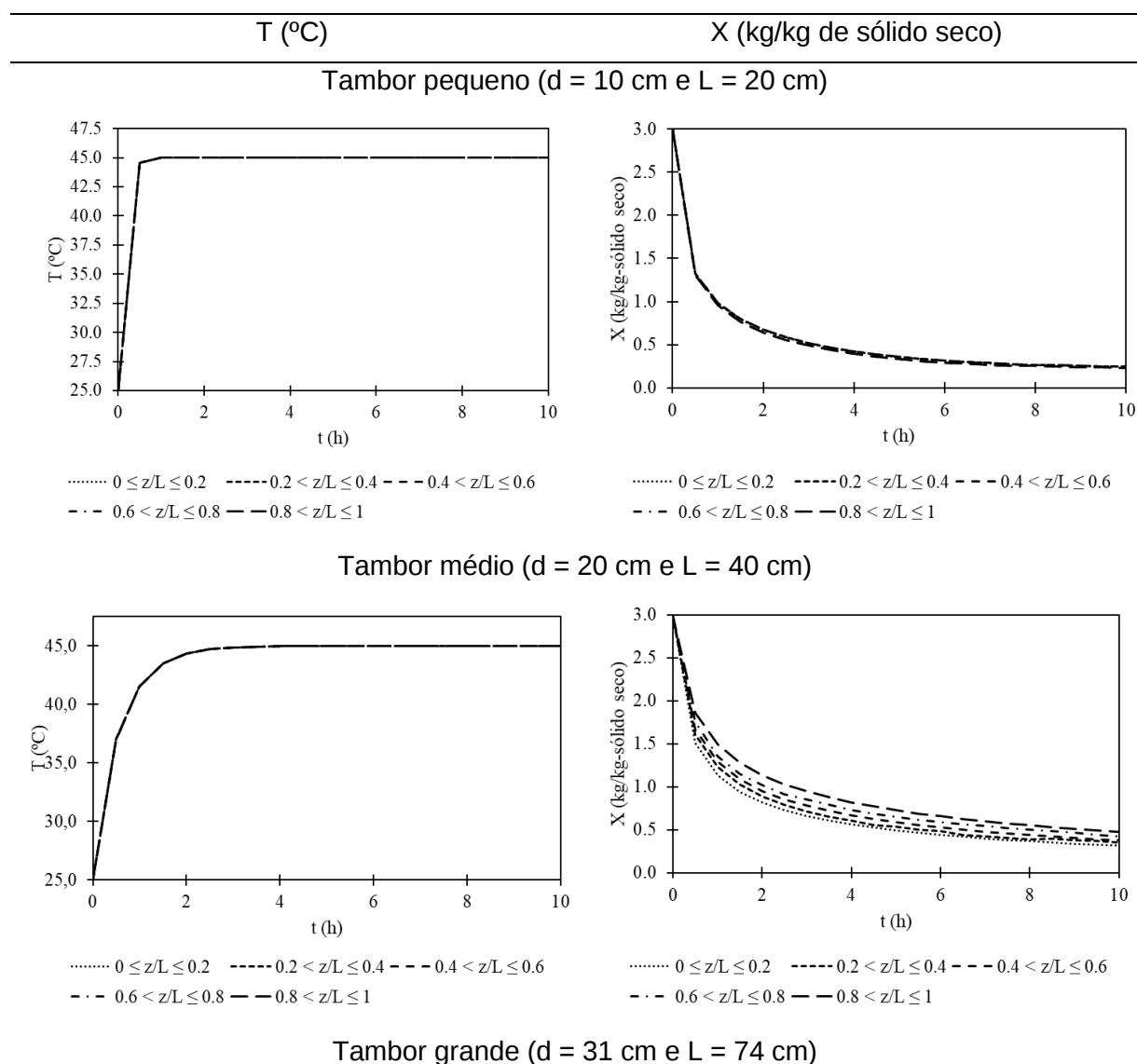
Figura 5.7 – Perfis temporais de temperatura e umidade na superfície de um leito de sílica gel que parcialmente preenche tambores de diferentes dimensões em grau de enchimento 0,5 e $Q = 50$ L/min.

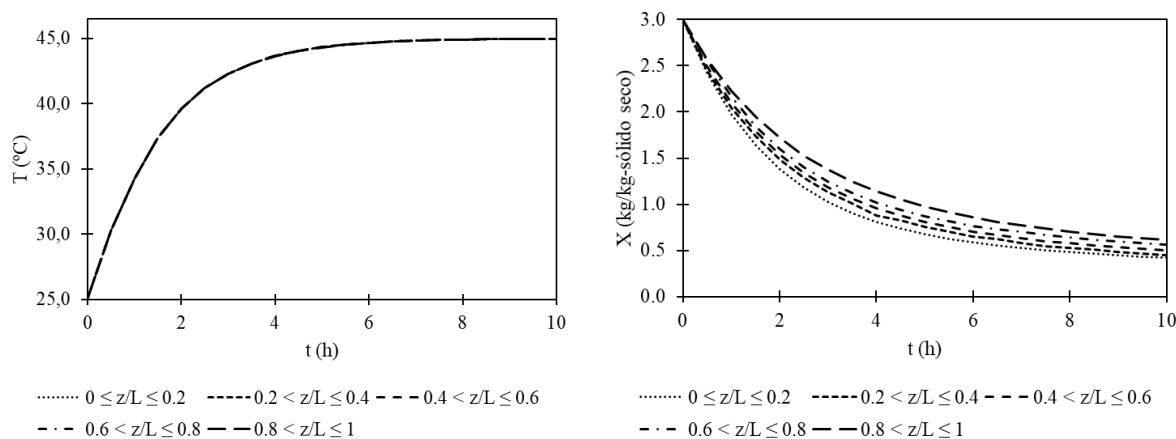




FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.8 – Perfis temporais de temperatura e umidade na superfície de um leito de bagaço de cana que parcialmente preenche tambores de diferentes dimensões em grau de enchimento 0,5 e $Q = 50$ L/min.





FONTE: Elaborado pela autora.

Tada et al. (2017a) discutiram sobre a transferência de calor em leitos secos em um tambor similar ao grande com introdução de ar a 5 L/min, e concluíram que a parede representava grande resistência à transferência de calor e que, a partir daí, todo o transporte se daria por condução no meio pseudo-homogêneo. No presente trabalho, observa-se que a área de troca e o mecanismo convectivo também impõem importante influência sobre a superfície do leito, fazendo com que haja equilíbrio térmico nesta posição, por meio dos mecanismos convectivo e de evaporação de massa. Em modelos a duas fases, Von Meien e Mitchell (2002) e Casciadori et al. (2016) discutiram sobre os coeficientes volumétricos de transferência de calor, que eram relativamente altos devido à grande área externa das partículas disponível para troca e faziam com que a temperatura do fluido se aproximasse da temperatura do sólido em leitos empacotados para cultivo sólido, de tal modo que os perfis de temperatura das fases sólida e gasosa eram praticamente idênticos. No presente trabalho, os coeficientes de transferência por convecção foram calculados a partir de correlações que incluem a contribuição de possíveis microturbulências causadas pela superfície irregular da geometria, o que o aproxima da situação real e deve incluir implicitamente o aumento da área de troca devido à alta rugosidade da superfície do leito, assumida como geometria genérica de placa plana. Contudo, as variações de T_g ao longo do tempo e do espaço são desprezíveis para os casos apresentados neste trabalho, então torna-se conveniente tratá-la a partir de uma constante.

A perda de água na superfície do leito tem tendência oposta aos perfis de temperatura para cada dimensão de tambor. Os efeitos da convecção de massa são mais expressivos no início das simulações, quando os gradientes de umidade são mais expressivos, e diminuem ao longo do tempo, conforme a umidade do leito

aproxima-se da umidade de equilíbrio do sólido (INAGAKI et al., 1996; CASCIATORI et al., 2015), ou a umidade do gás se aproxima de sua umidade de saturação. Variações axiais da umidade do sólido são mais expressivas no tambor de maior dimensão, o que não foi observado em sistema isotérmico em $Q = 50$ L/min. Naquele caso, os resultados experimentais para um leito de sílica no tambor grande com aeração a 50 L/min indicaram que as variações axiais eram desprezíveis. No sistema não-isotérmico, as variações axiais observadas são atribuídas aos efeitos da evaporação de água da superfície do sólido para o gás, que desenvolve um perfil de umidade ao longo do comprimento do tambor e, portanto, tem seu potencial de capturar umidade gradativamente diminuído quando $z \rightarrow L$.

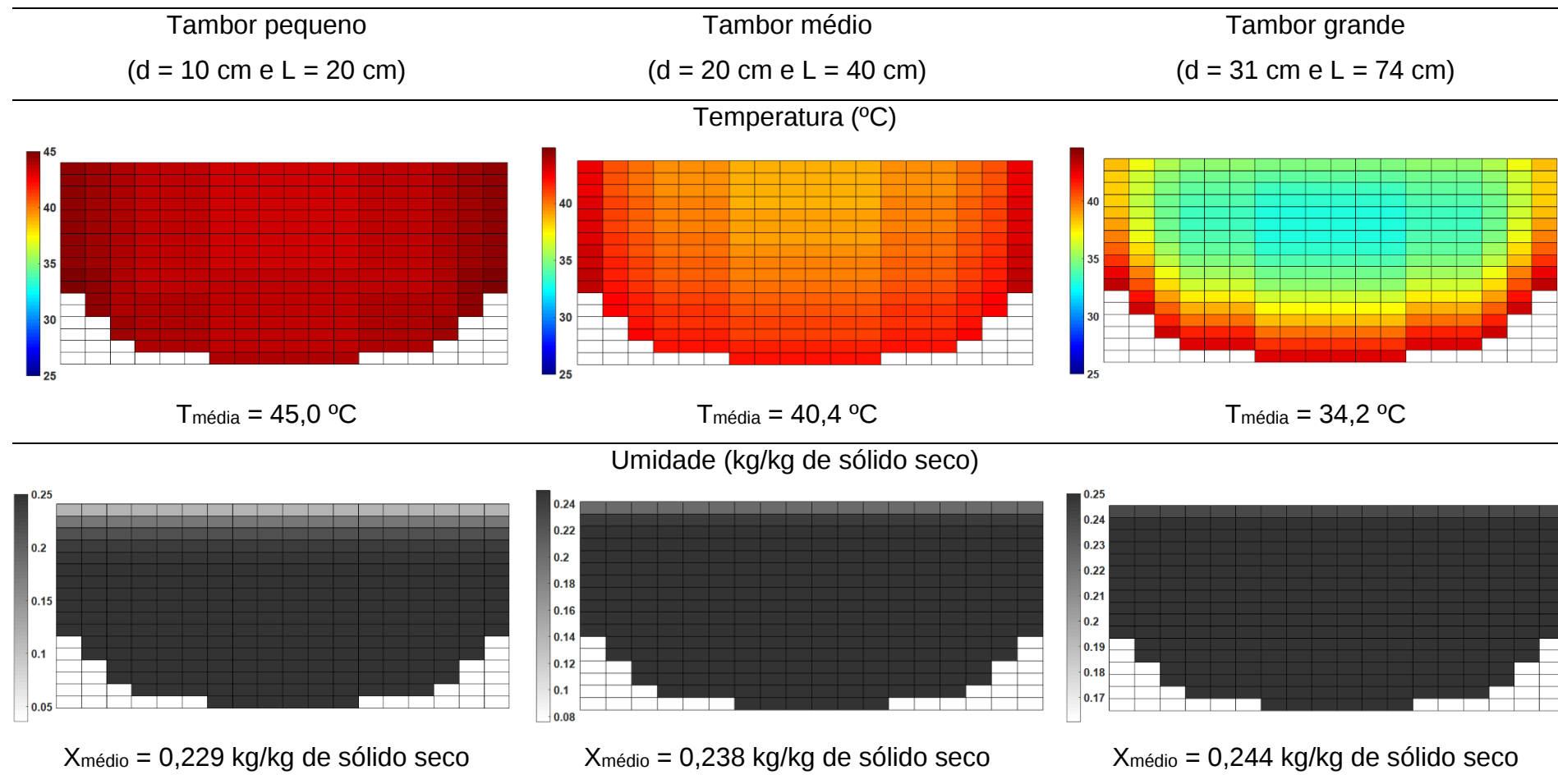
Os perfis espaciais para T e X para cada tambor e leito de partícula a $Q = 50$ L/min, centro axial e $t = 2$ h são apresentados em seguida nas Figuras 5.9 e 5.10.

Os perfis espaciais de temperatura para todos os tambores mostram que o transporte de calor é induzido principalmente através da penetração de calor advindo da parede do tambor para o interior do leito. Em tambores de menores dimensões, a ação da parede em conjunto com o mecanismo de condução efetivo são impressos na temperatura média do leito, que é maior quanto menor o tambor para um mesmo instante t . Nos tambores pequeno e médio preenchidos com leito de sílica, uma distribuição praticamente homogênea de temperatura é alcançada já em $t = 2$ h, bem como para todos os tambores preenchidos com leito de bagaço de cana. No tambor grande com partículas de sílica, um perfil de temperatura pode ser observado em que a superfície do leito parece exercer função secundária no aquecimento do leito. Correlacionando-se os perfis de temperatura com os de umidade, infere-se que a energia absorvida pelo leito para que haja evaporação de água não promove impactos sobre o perfil de temperatura do sólido, que apresentou temperaturas muito similares quando o balanço de T_g foi considerado ou com T_g igual a 45°C .

Os leitos de bagaço de cana encontram-se notavelmente mais aquecidos do que os de sílica em $t = 2$ h e em tambores médio e grande. Isso é atribuído à condutividade térmica efetiva de cada leito na estagnação, que é maior para o leito de bagaço de cana. Aliado a isso, a resistência à condução do calor advindo da parede do tambor aquecida parece ser menor em tambores menores, já que o comprimento característico é menor, o que contribui para que aumentos de temperatura mais expressivos sejam observados em um menor intervalo de tempo até que o equilíbrio térmico seja alcançado. Os efeitos das propriedades do leito sobre o perfil de T na

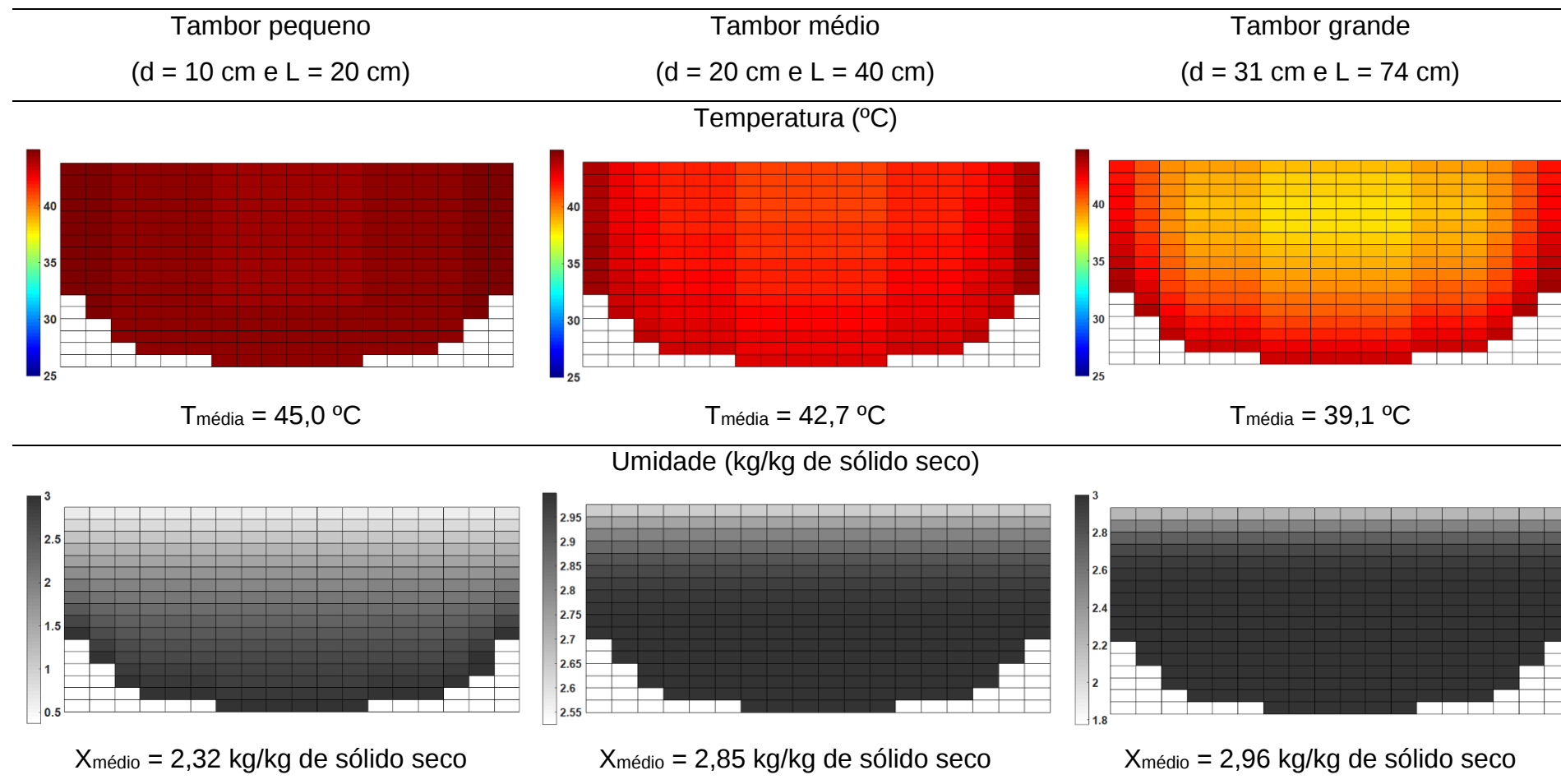
superfície estão ilustrados na Figura 5.11, que apresenta as variações de temperatura ao longo do tempo em cada leito e tambor com $Q = 50 \text{ L/min}$. Nesta figura, ΔT significa a diferença de temperatura na superfície do leito referentes aos instantes t e $t+1$ na posição axial central.

Figura 5.9 – Perfis espaciais de temperatura e umidade de um leito de sílica gel que parcialmente preenche tambores de diferentes tamanhos em grau de enchimento 0,5, na posição axial $0.4 < z/L \leq 0.6$ (meio axial), $Q = 50$ L/min e $t = 2$ h.



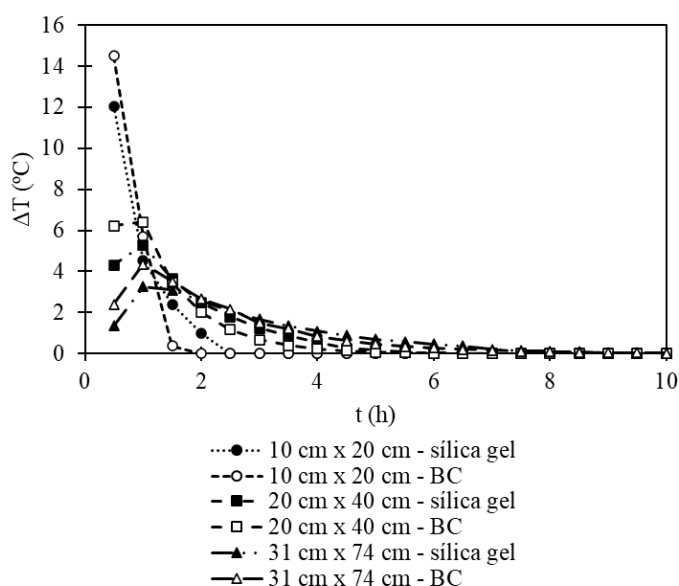
FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.10 – Perfis espaciais de temperatura e umidade de um leito de bagaço de cana que parcialmente preenche tambores de diferentes tamanhos em grau de enchimento 0,5, na posição axial $0.4 < z/L \leq 0.6$ (meio axial), $Q = 50$ L/min e $t = 2$ h.



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.11 – Variações de T na superfície do leito ao longo do tempo para diferentes dimensões de tambor e leito de partículas em vazão de 50 L/min e grau de enchimento 0,5.



FONTE: Elaborado pela autora.

Nesta figura observa-se que os ΔT em leitos de bagaço de cana são maiores que aqueles para o leito de sílica gel em todos os tambores, o que é atribuído à natureza do leito. Para uma mesma dimensão do tambor, perfis de ΔT com tendências similares são obtidos, sendo este comportamento associado aos parâmetros operacionais do sistema. O sistema aproxima-se do equilíbrio térmico quando ΔT tende a zero. Na superfície do leito, essa tendência é atingida em aproximadamente 1, 3 e 5,5 h para bagaço de cana e 1,5, 4,5 e 7,5 h para leito de sílica em tambores pequeno, médio e grande, respectivamente.

Os perfis de umidade do sólido são semelhantes àqueles apresentados no capítulo anterior para tambor isotérmico. O transporte de massa ocorre unicamente através da superfície, já que a parede do tambor é considerada impermeável. Diferentemente dos perfis de temperatura, o aumento da velocidade superficial ocasionada pela diminuição nas dimensões do tambor é visível sobre o transporte de massa por convecção em ambos os leitos de partículas. A superfície do leito perde água de forma mais intensa nos tambores menores, pois a velocidade superficial é maior e fornece coeficientes de transferência de massa também maiores. Quanto ao interior do leito, observa-se a diferença entre os dois sólidos adotados, com difusividades de massa efetivas com diferenças de quase dez vezes. Enquanto que a

superfície do leito de sílica em tambor pequeno apresenta apreciável redução de umidade, seu interior pouco parece sofrer alterações. Já o leito de bagaço de cana teve uma redução média de aproximadamente 20 % de sua massa inicial neste mesmo tambor, e isso é atribuído à ação dos mecanismos conjuntos de convecção e difusão efetiva.

Aparentemente, o termo que representa o transporte de massa em meio ao leito de partículas devido aos aumentos de temperatura não promoveram variações de X nas proximidades da parede do tambor, que são as regiões mais quentes, e mantém umidade igual à umidade inicial das partículas em $t = 2$ h em tambor grande, por exemplo. Esse termo adicionado ao modelo depende diretamente da temperatura local, bem como da velocidade de escoamento do gás em meio às partículas. Tendo-se que as proximidades da parede do tambor são as regiões mais rapidamente aquecidas, a inexpressão desse termo deve-se à velocidade de escoamento do gás. Tal velocidade foi calculada através de correlações disponíveis na literatura para leitos compostos por partículas esféricas (sílica gel) e cilíndricas (fibras de bagaço de cana) e convecção natural; portanto, $Sh = 2$. Nessa ocasião, as velocidades superficiais do gás na direção radial em meio ao leito de partículas calculadas são da ordem de 10^{-6} m/s. Os efeitos deste termo, que visa representar o fenômeno de Soret, podem ser considerados desprezíveis para a amplitude de temperatura trabalhada.

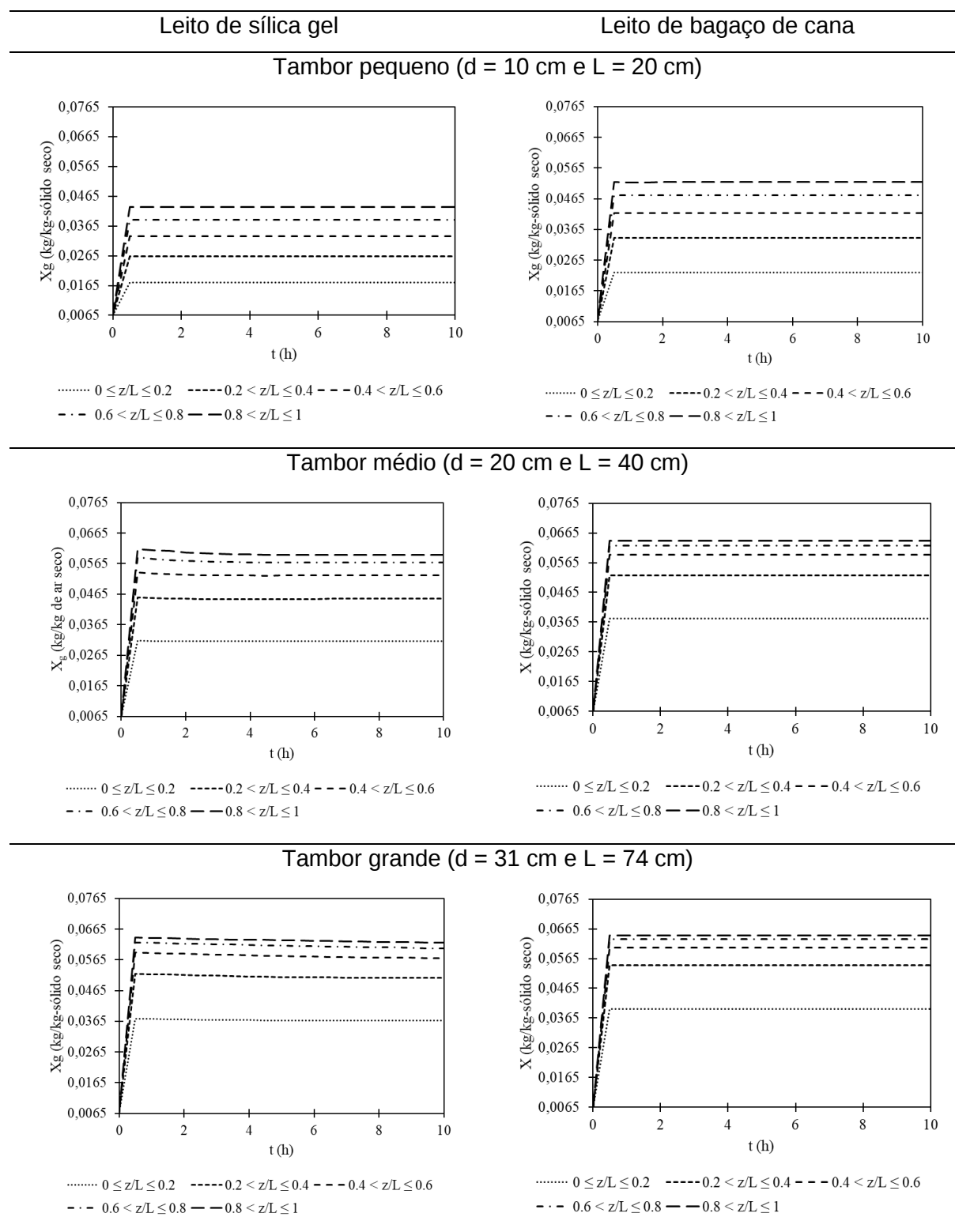
Um outro aspecto interessante indicado nos perfis das Figuras 5.9 e 5.10 é que o equilíbrio térmico é atingido antes mesmo do equilíbrio mássico no tambor de menor dimensão, ou seja, o processo passa a ser isotérmico após um instante t . Se gradientes de temperatura entre as fases gasosa escoante e sólida são negligenciáveis, a contribuição do calor evaporativo sobre a temperatura também o é, e então o balanço de energia passa a ser facultativo e o problema poderia ser resolvido apenas através de um balanço de massa considerando-se T e T_g constantes a 45 °C. A partir deste momento, a temperatura permanece constante mesmo com a contínua perda de água através da superfície do leito.

b. Introdução de ar inicialmente seco em escoamento paralelo à superfície do leito a 5 L/min

Na Figura 5.12 estão apresentados os perfis de X_g no sobre espaço de leitos de sílica gel e de bagaço de cana em diferentes tambores a $Q = 5$ L/min. Assim como

para $Q = 50 \text{ L/min}$, variações de T_g foram desprezíveis e T_g foi assumida como constante a 45°C .

Figura 5.12 – Perfis temporais de umidade do gás que escoia a 5 L/min sobre a superfície de leitos de sílica gel e de bagaço de cana, que parcialmente preenchem tambores horizontais de diferentes dimensões em grau de enchimento 0,5.

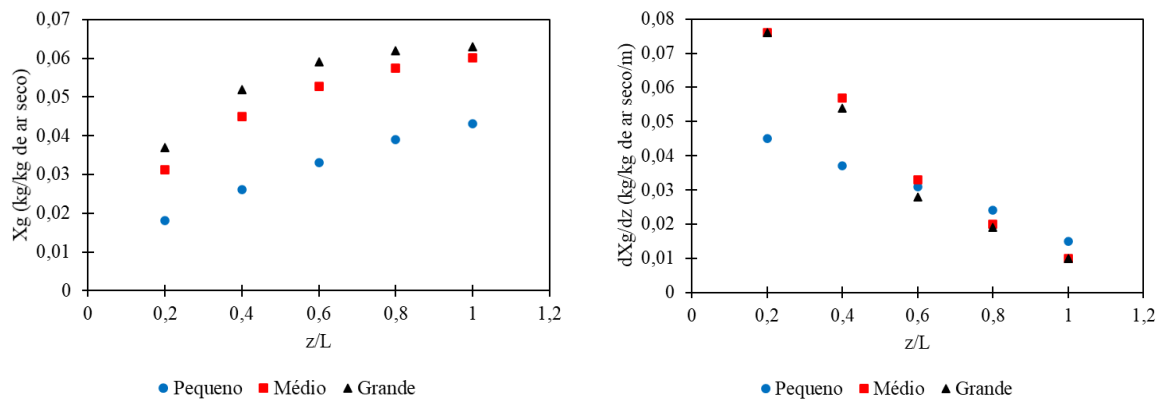


FONTE: Elaborado pela autora.

A umidade do gás na primeira fração axial aumenta com mais intensidade com o aumento das dimensões tambor. Isso pode estar relacionado ao mecanismo de advecção, que é mais intenso quanto maior é a velocidade superficial de escoamento do gás, v_0 . Numericamente, isso é suportado pelo contorno de primeira espécie empregado impõe que X_g tenda a $X_{g,0}$ com mais intensidade em tambores de menores dimensões, nos quais v_0 é maior. Esse comportamento também foi apresentado nos perfis de X_g com $Q = 50$ L/min.

As taxas de ganho de vapor d'água decrescem ao longo do comprimento em todos os tambores, indicando que o mecanismo de convecção estabelecido entre a superfície do leito e o ar escoante é menos intenso. Considerando-se as taxas observadas nas primeiras posições axiais, essa diminuição relaciona-se à condição do gás, que já retém quantidade apreciável de vapor d'água e aproxima-se da condição de saturação. Desse modo, a força motriz é diminuída e resulta em menores taxas de ganho de massa. Assim como para 50 L/min, o gás não atingiu a saturação em qualquer tambor e leito de partículas abordados. Os gráficos apresentados na Figura 5.13 sustentam tal discussão, com dados extraídos ou calculados a partir das simulações apresentadas para a umidade do gás em presença de leito de sílica em $t = 2$ h. Observe-se que as umidades para os três tambores crescem de modo similar, mas as taxas de variação de umidade para o tambor pequeno diferem dos demais, que permanecem iguais. Com as taxas iguais, entende-se que os mecanismos convectivos atuantes nos dois tambores são iguais, enquanto que difere em tambor pequeno.

Figura 5.13 – Variação de ganho de umidade pela fase gasosa ao longo do comprimento dos tambores parcialmente preenchidos por leito de sílica em $t = 2$ h e $Q = 5$ L/min.



FONTE: Elaborado pela autora.

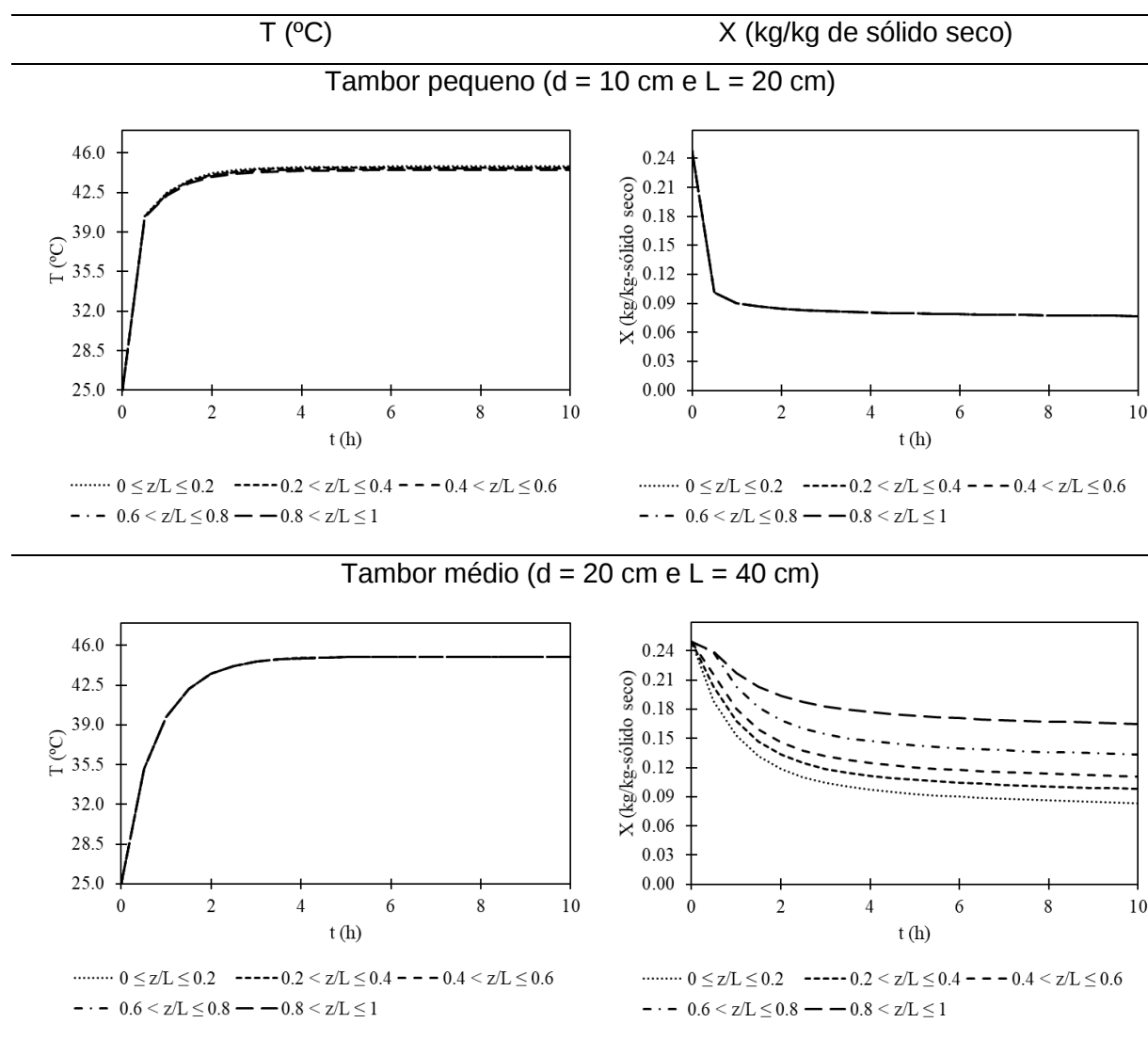
Nas Figuras 5.14 e 5.15 estão apresentados os perfis temporais de temperatura e umidade para a superfície dos leitos de sílica e de bagaço de cana, respectivamente, ao longo do comprimento de diferentes tambores. Variações axiais de X não foram observadas ao longo de z em tambor pequeno, o que sugere que as resistências externas ao transporte de massa sejam desprezíveis e que as diferenças em aproximadamente três vezes entre as taxas de transporte de massa nas posições axiais e finais não foram suficientes para que variações axiais de massa no sólido fossem observadas. Em concordância com os perfis de X_g , as taxas de perda de água na superfície do leito decrescem com o comprimento dos tambores médio e grande. Esse fato difere dos resultados obtidos anteriormente em tambor grande isotérmico parcialmente preenchido com leito de sílica gel, para o qual os dados experimentais indicaram que a transferência de massa na superfície do leito era mantida apenas até o meio axial do tambor. Em ocorrência simultânea ao transporte de calor, o transporte de massa continua a acontecer em todo o domínio axial, ainda que de forma mais amena na porção final do tambor. Para estes casos, os perfis de X sugerem que as resistências externas ao transporte de massa não são desprezíveis.

Além disso, X não varia com z em tambor pequeno após 2 h e se torna praticamente constante, enquanto que os perfis de X em tambores médio e grande não apresentam esse mesmo comportamento. Com a imposição de $T_g = 45^\circ\text{C}$ para essas simulações, assume-se que o calor evaporativo é o mesmo em todos os tambores, portanto, essa diferença entre os perfis de X nos tambores deve estar associada à umidade do gás ao longo de z e à velocidade superficial do gás escoante. Para o leito de sílica há uma variação considerável de X_g do tambor pequeno para o médio, o que não foi observado para o leito de bagaço. Desse modo, suspeita-se que

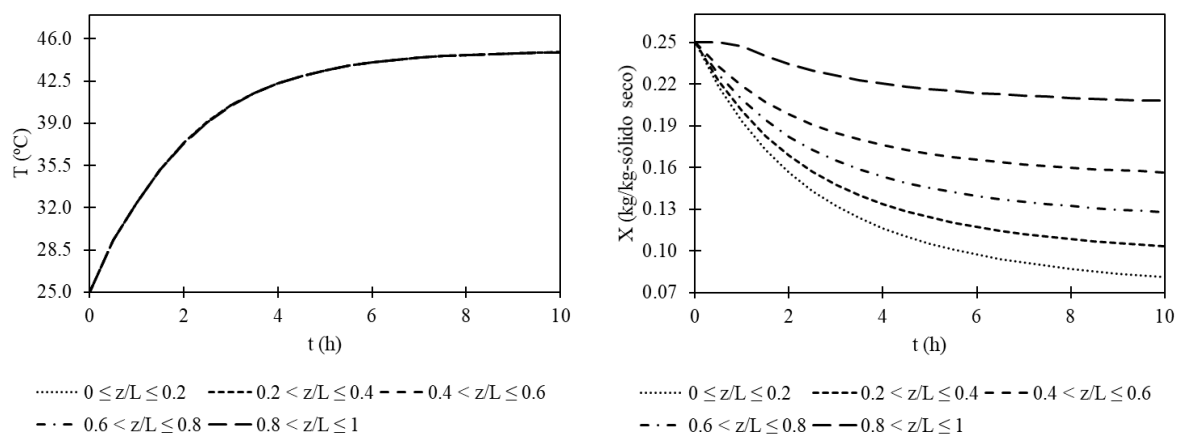
os comportamentos distintos de X entre os tambores pequeno e médio estejam associados fortemente à velocidade superficial de escoamento da corrente de gás.

Assim como a 50 L/min, os perfis de temperatura na superfície para ambos os leitos não apresentaram variações axiais. Observa-se comportamento semelhante à maior vazão quanto às curvas, que são mais acentuadas para bagaço de cana. Em tambores pequenos, o equilíbrio térmico nesta região é atingido antes de decorridas duas horas de processo, assim como para 50 L/min. Isso indica que os mecanismos de transferência de calor na superfície do leito são secundários em tambor pequeno, pois a temperatura na região de superfície parece não depender da vazão de ar utilizada.

Figura 5.14 – Perfis temporais de temperatura e umidade na superfície de um leito de sílica gel que parcialmente preenche tambores de diferentes dimensões em grau de enchimento 0,5 e $Q = 5$ L/min.



Tambor grande (d = 31 cm e L = 74 cm)

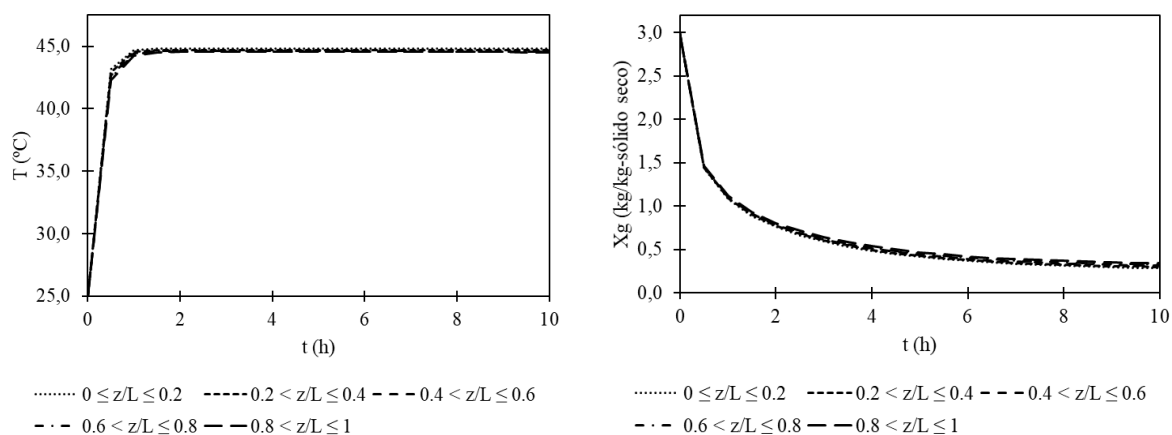


FONTE: Elaborado pela autora.

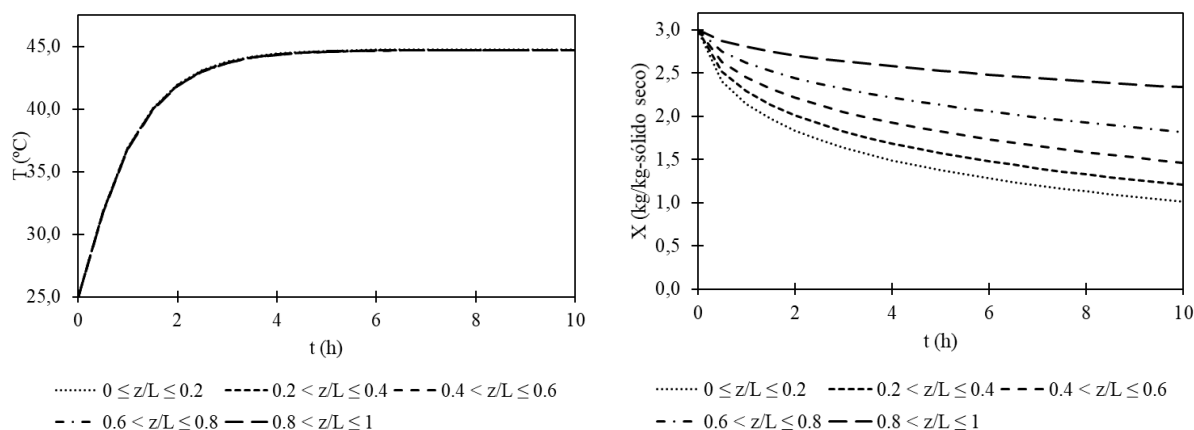
Figura 5.15 – Perfis temporais de temperatura e umidade na superfície de um leito de bagaço de cana que parcialmente preenche tambores de diferentes dimensões em grau de enchimento 0,5 e $Q = 5$ L/min.

 T (°C) X (kg/kg de sólido seco)

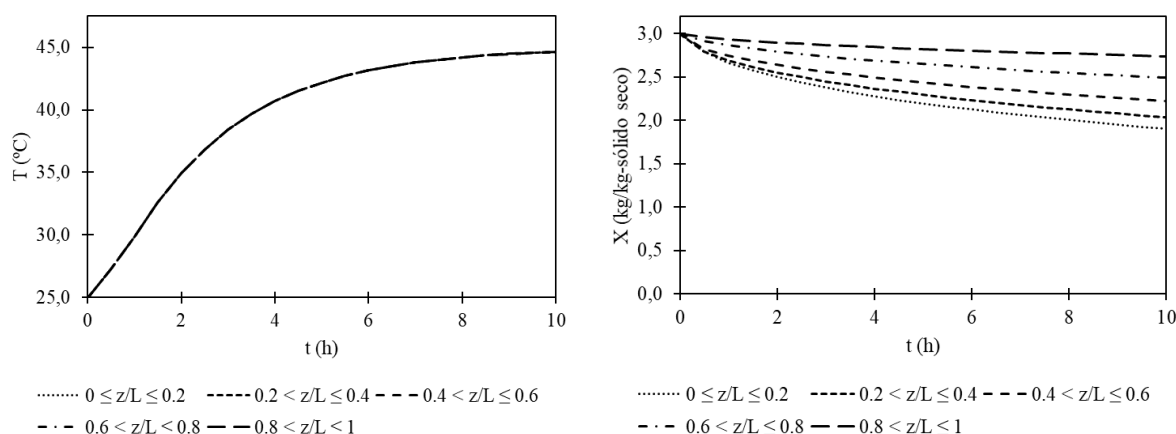
Tambor pequeno (d = 10 cm e L = 20 cm)



Tambor médio (d = 20 cm e L = 40 cm)



Tambor grande (d = 31 cm e L = 74 cm)



FONTE: Elaborado pela autora.

Nas Figuras 5.16 e 5.17 estão apresentados os perfis espaciais de temperatura e de umidade para os leitos de sílica gel e de bagaço de cana, respectivamente, em diferentes tambores. A posição axial escolhida para estas simulações foi $0,4 < z/L \leq 0,6$, que corresponde ao centro axial, e $t = 2$ h. O equilíbrio térmico é alcançado em tambor pequeno para ambos os leitos de partículas assim como foi para 50 L/min, portanto, esse fato independe da vazão utilizada e o transporte de calor ocorre majoritariamente por influência da parede do tambor. As temperaturas médias em tambor médio para os leitos de bagaço de cana e de sílica variam em aproximadamente 3 °C, indicando influência do meio sobre o transporte de calor efetivo. Comportamento similar foi observado para o tambor grande, com variações de aproximadamente 3 °C entre um leito de partícula e outro. Isso infere que o efeito convectivo na superfície do leito não promove variações sobre os perfis de temperatura dos tambores médio e grande, apesar de suas respectivas velocidades superficiais serem distintas. Essa observação é válida para os dois tipos de partículas.

Os perfis espaciais de temperatura em tambor pequeno indicam que o equilíbrio térmico a 45,0 °C é noticiado em todo o domínio espacial em $t = 2$ h. Considerando-se o observado através dos perfis temporais da temperatura na superfície do leito apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15, que também acusavam equilíbrio térmico, infere-se que a parede desempenha papel importante sobre o transporte de calor e a superfície do leito pouco parece influir sobre a temperatura do leito. A predominância de cada fronteira pode ser justificada através da razão Λ entre a área disponível para troca em cada fronteira e o volume de leito. Na superfície, essa área corresponde à área superficial aproximada a uma placa plana e, na parede, é a área lateral do leito,

correspondente a 50% da área lateral do cilindro. Na Tabela 5.8 estão apresentados os valores das razões para cada tamanho de tambor.

Tabela 5.8 – Razões entre as áreas disponíveis para troca nas fronteiras de parede e superfície e o volume de leito para cada tambor.

Dimensões do tambor		L/d	V	Áreas superficiais		Razões λ	
D	L			A _{parede}	A _{superfície}	A _{parede} /V	A _{superfície} /V
10	20	2	785,4	314,2	200	0,4	0,25
20	40	2	6283,2	1256,6	800	0,2	0,13
31	74	2,4	27926,4	3603,4	2294	0,13	0,08

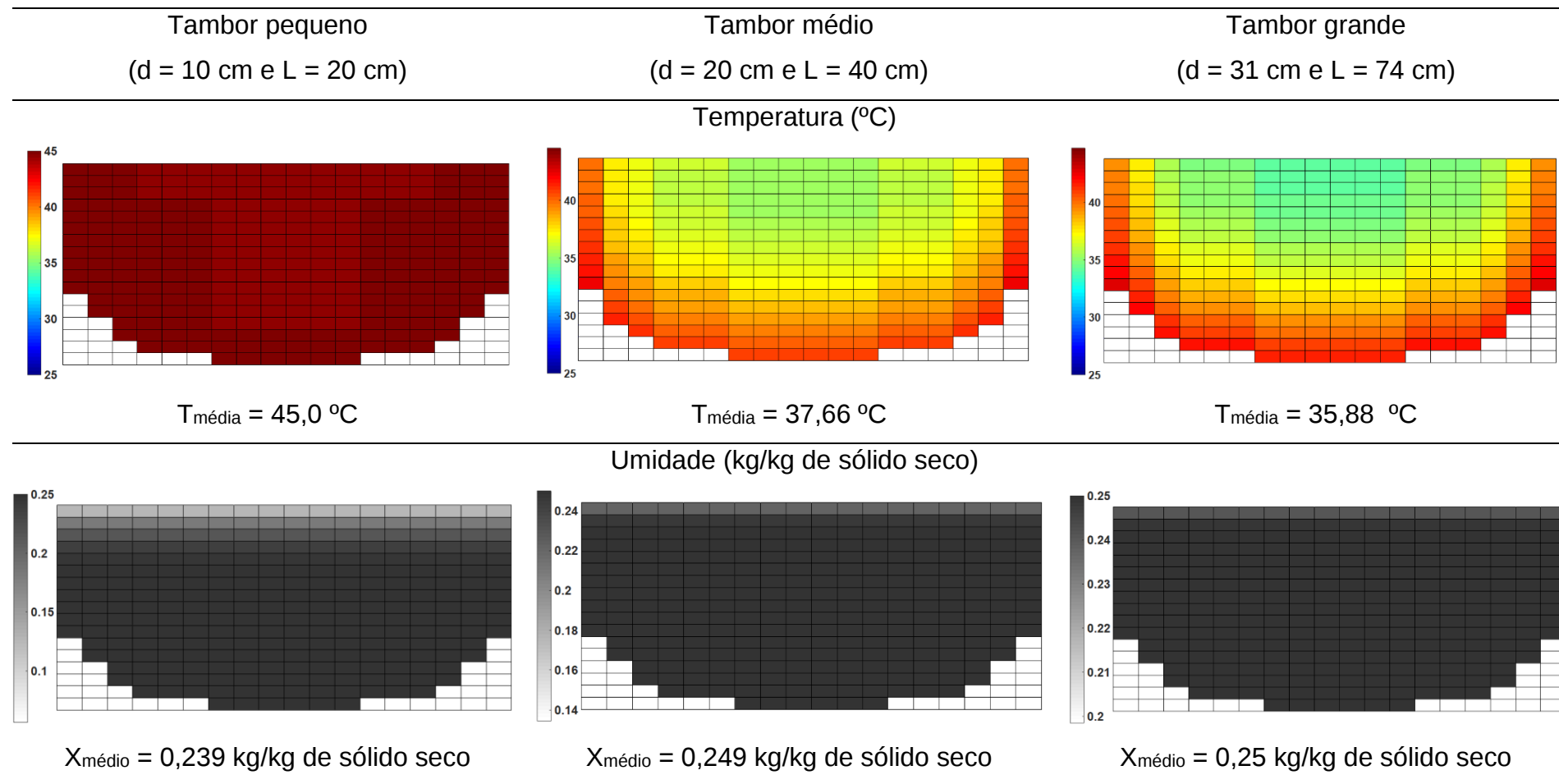
FONTE: Elaborado pela autora.

A parede do tambor é predominante nos tambores pequeno e médio, enquanto que sua influência é diminuída em tambor grande. O cálculo do número de Biot poderia auxiliar no entendimento dos mecanismos de transferência de calor predominantes em cada caso. No entanto, essa estimativa não é trivial neste sistema, pois as fronteiras estão sujeitas a mecanismos distintos e simultâneos de calor e massa. Assim, suportado pelos perfis espaciais de temperatura e pelas razões λ , sugere-se que as resistências internas sejam desprezíveis em tambores pequenos, o que justifica o apreciável aumento de temperatura em um intervalo de tempo relativamente curto, mesmo para a posição na superfície livre do leito. Para os tambores médio e grande, os perfis de temperatura são graduais, de modo que a resistência interna não é desprezível e, a se julgar pelos perfis de temperatura na camada superficial do leito (Figura 5.14 e 5.15), a resistência externa nesta fronteira é desprezível para os tambores pequeno e médio, mas é considerável para o tambor grande. Assim, é possível que os regimes de propagação de calor sejam de resistência interna desprezível para o tambor pequeno, de resistência externa desprezível para o tambor médio e de resistências equivalentes para o tambor grande. Evidentemente, esta suposição não leva em consideração a penetração de calor por meio da parede do tambor.

Os perfis espaciais de temperatura para os leitos úmidos diferem daqueles apresentados por Tada et al. (2017) para um leito seco de esferas de vidro em tambor grande. Naquela ocasião, a superfície livre do leito desempenhava uma importante zona de aquecimento do leito, seguida pela parede do tambor, enquanto que no

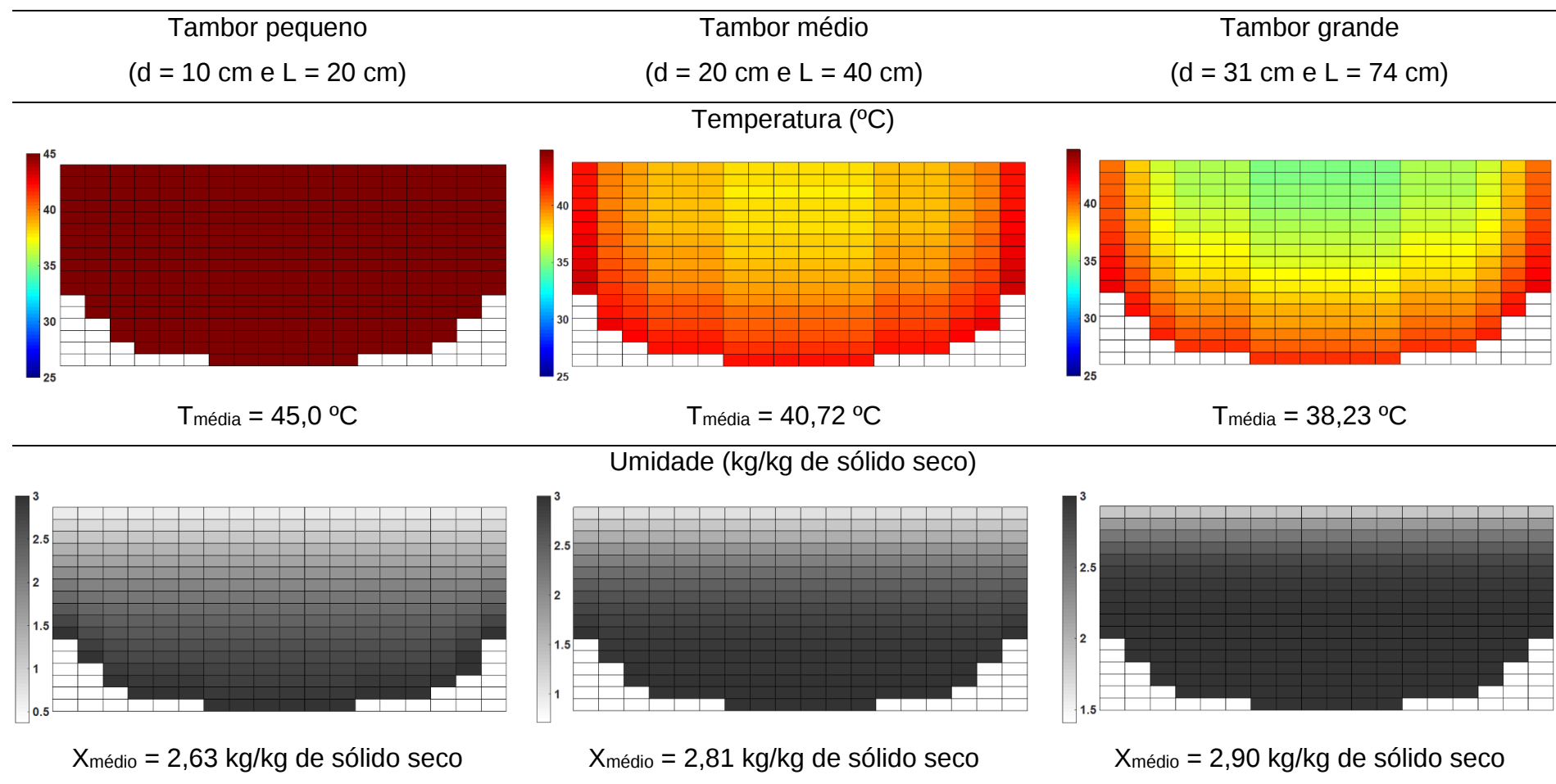
presente trabalho o aquecimento da superfície do leito ocorre majoritariamente por meio do contato com a parede aquecida em conjunto com a condução efetiva de calor através do interior do leito em direção à superfície. Mais uma vez, o mecanismo convectivo na superfície é fraco em comparação aos demais, e os perfis espaciais de temperatura no interior do leito pouco variam com a profundidade do leito no centro angular, mas variam consideravelmente com a distância da parede.

Figura 5.16 – Perfis espaciais de temperatura e umidade de um leito de sílica gel que parcialmente preenche tambores de diferentes tamanhos em grau de enchimento 0,5, na posição axial $0.4 < z/L \leq 0.6$ (meio axial), $Q = 5 \text{ L/min}$ e $t = 2 \text{ h}$.



FONTE: Elaborado pela autora.

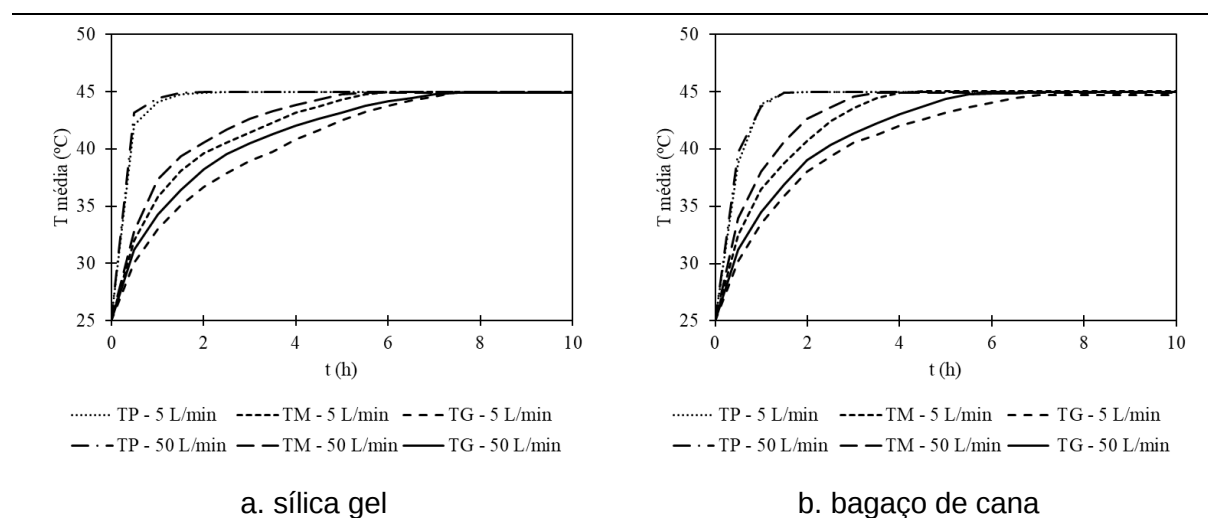
Figura 5.17 – Perfis espaciais de temperatura e umidade de um leito de bagaço de cana que parcialmente preenche tambores de diferentes tamanhos em grau de enchimento 0,5, na posição axial $0.4 < z/L \leq 0.6$ (meio axial), $Q = 5 \text{ L/min}$ e $t = 2 \text{ h}$.



FONTE: Elaborado pela autora.

Tempos inferiores a 7 h foram requeridos para que os leitos de partículas atingissem o equilíbrio térmico nos diferentes tambores sob diferentes vazões de ar. Na Figura 5.18 estão apresentadas as temperaturas médias dos leitos em função do tempo para cada vazão de ar, tipo de partícula e tamanho de tambor.

Figura 5.18 – Perfis de temperatura média dos leitos de sílica gel (à esquerda) e bagaço de cana (à direita) em diferentes tambores sob diferentes vazões de ar em $0 \leq t \leq 10$ h.



FONTE: Elaborado pela autora.

Para o tambor pequeno pode-se observar que os perfis de temperatura média são próximos para as duas vazões de ar, o que sustenta a discussão apresentada anteriormente de que o transporte de calor é governado majoritariamente pela parede do tambor nessa escala. Esse é um aspecto interessante, pois os perfis espaciais de umidade apontaram diferenças entre uma vazão de ar e outra em tambor pequeno. Desse modo, assumindo-se que as propriedades físicas e de transporte do leito de partículas não sejam afetadas pela presença do microrganismo, considera-se que a operação em vazões mais baixas possa ser mais adequada em tambor pequeno em cultivo sólido, pois o ressecamento sofrido pelo leito de partículas a partir de sua superfície seria menos intenso. Nos tambores médio e grande, observa-se que as maiores vazões de ar forneceram as maiores temperaturas médias ao longo do tempo, como consequência ao aumento da velocidade superficial e do coeficiente de transferência de calor.

c. Introdução do número de Biot de massa

O número de Biot de massa (Bi_m) foi apresentado no capítulo anterior e foi calculado ao longo da profundidade de um leito de partículas de sílica, tomando-se como fator de correção a razão r/R . Para o leito de bagaço de cana, o Bi_m foi calculado para duas posições de interesse no leito (superfície e interior) ao longo do tempo, pois $D_{eff,BC}$ calculado através de correlações dependia da porosidade do leito, que era função do tempo.

No presente capítulo, o número de Biot também será introduzido para transporte de massa, agora considerando-se o número de Biot clássico [Eqs. (5.37) e (5.38)] e a variação do parâmetro efetivo D_{eff} com a temperatura. Para tanto, a temperatura média do leito é utilizada para determinação do D_{eff} , que é assumido como constante para todo o leito em cada instante t até $t = 10$ h para ambas as vazões de ar. Os coeficientes h e K assumiram valores médios calculados a partir de T_g ; portanto, a variação da contribuição convectiva ao longo do tempo foi desprezível, com erros médios relativos inferiores a 6 %. Logo, os resultados apresentados a partir desta análise mostram apenas os efeitos da temperatura (ou transferência de calor) sobre o D_{eff} e toda a variação de Bi_m ao longo do tempo deve-se à variação da temperatura. Esse procedimento de cálculo foi realizado para os leitos de sílica gel e de bagaço de cana. Na Figura 5.19 estão apresentados os cálculos de Bi_m para cada um dos leitos de partículas, vazões e tambores para $0 < t \leq 10$ h.

$$Bi_m = \frac{Kh_m L}{D_{eff}} \quad (5.37)$$

Com

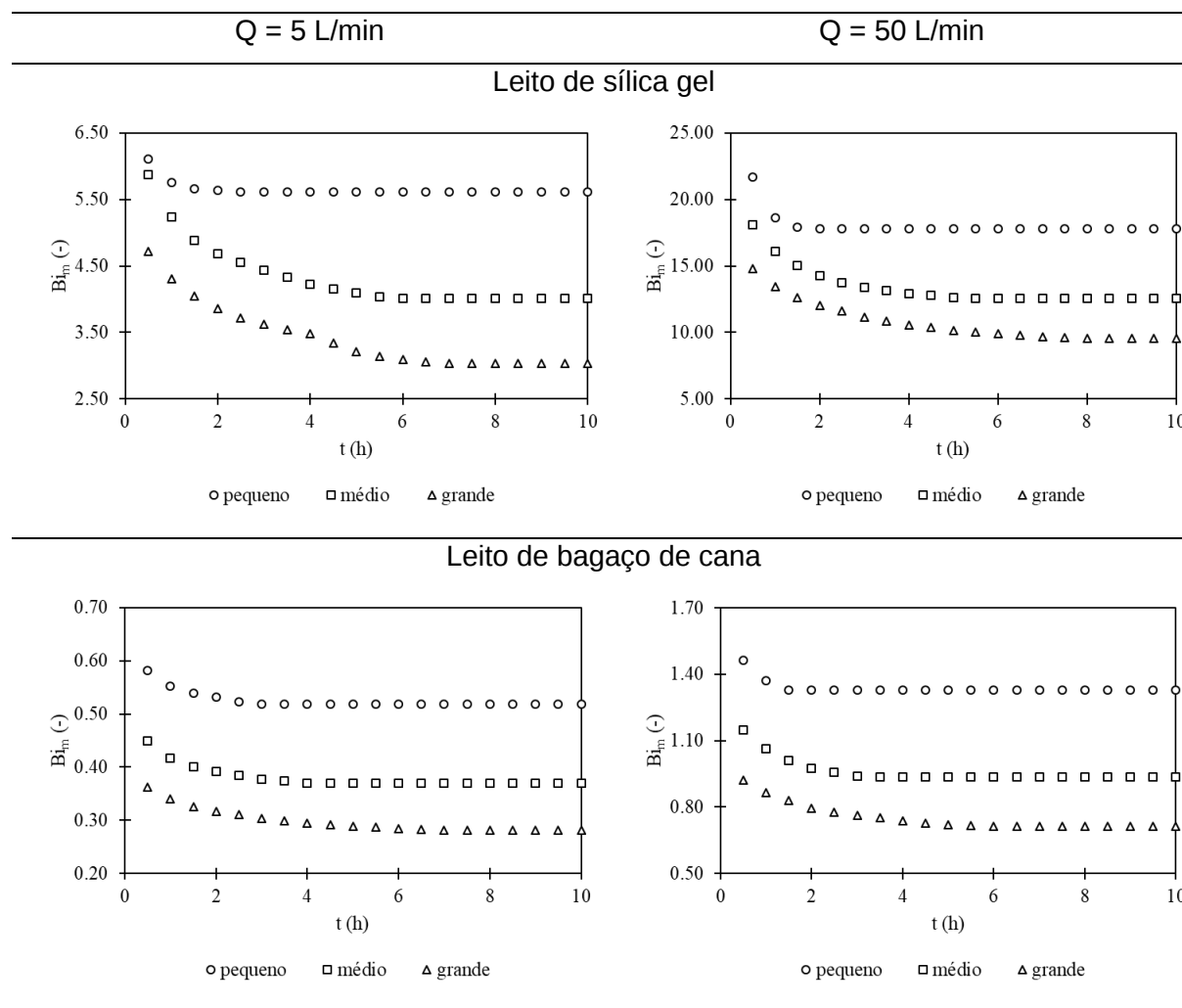
$$L = \frac{\Lambda}{A_t} \quad (5.38)$$

em que Λ é o volume do leito e A_t é a área de troca, correspondente à área superficial do leito.

Observe-se que Bi tende assintoticamente para um valor constante em todas as situações. Os perfis de Bi_m para os leitos de bagaço de cana sob diferentes vazões de ar obedecem tendência de crescimento com o aumento do tamanho do tambor. Isso pode estar relacionado à fraca dependência do coeficiente D_{eff} com a temperatura

para esse tipo de leito, o que não foi observado para o leito de sílica. Exceto para sílica a 50 L/min, o regime das resistências predominantes sobre o transporte de massa permanece o mesmo entre todos os tambores para uma mesma vazão de ar.

Figura 5.19 – Número de Biot de massa calculado a partir de D_{eff} dependente da temperatura média do leito de partículas para $0 < t \leq 10$ h em tambores horizontais de diferentes tamanhos.



FONTE: Elaborado pela autora.

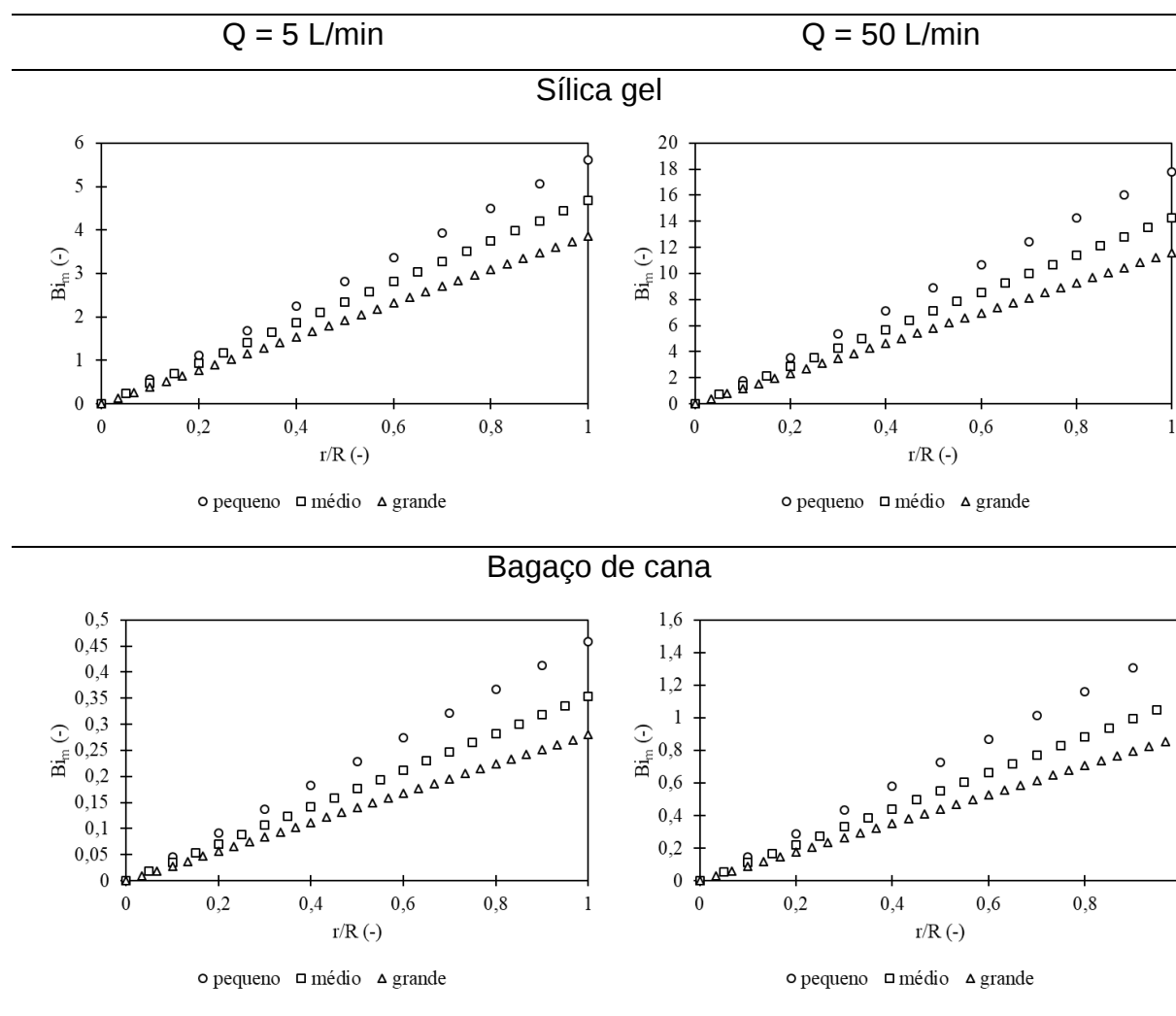
Resistências equivalentes foram obtidas para os leitos de sílica 5 L/min e de bagaço de cana a 5 e 50 L/min, o que esclarece que os tambores pequenos preenchidos com bagaço de cana não estão sob resistência interna desprezível, apesar da intensa perda de umidade (vide Figuras 5.16 e 5.17). Para essas situações, o sistema tenderia a resistência interna desprezível com o aumento da dimensão do tambor, o que forneceria coeficientes de transferência de massa por convecção menores e poderia diminuir a relação volume por área de troca.

Resistências externas podem ser negligenciadas nos três tambores preenchidos por leitos de sílica gel a 50 L/min. Nessa ocasião, considera-se que o transporte de massa é fortemente induzido pelo mecanismo convectivo, que promove gradientes de umidade bem estabelecidos na superfície do leito. Para o tambor grande com esferas de sílica, isso é verdade até $t = 6$ h. A partir daí, Bi_m assume valores menores que 10 e as resistências tornam-se equivalentes. Este instante é próximo daquele em que o sistema atinge o equilíbrio térmico, quando De_{eff} assume valores maiores e o mecanismo difusivo toma parte de forma igualitária ao convectivo no transporte de massa. Não é possível se observar este fenômeno nos perfis espaciais mostrados na Figura 5.16 para o leito de sílica a 50 L/min, pois em $t = 2$ h as resistências externas ao transporte de massa são desprezíveis.

O número de Biot calculado acima corresponde ao adimensional clássico, que toma como comprimento característico a razão entre o volume do pseudo-sólido e a área disponível para troca. Assumindo-se um fator de correção r/R , em que r é cada posição radial e R é o raio do tambor, tem-se um número de Biot modificado, já introduzido no Capítulo 4. Este número de Biot pode auxiliar na compreensão dos fenômenos de transporte efetivos cada posição no leito. Assume-se o centro angular do leito e a primeira fração axial para tal análise.

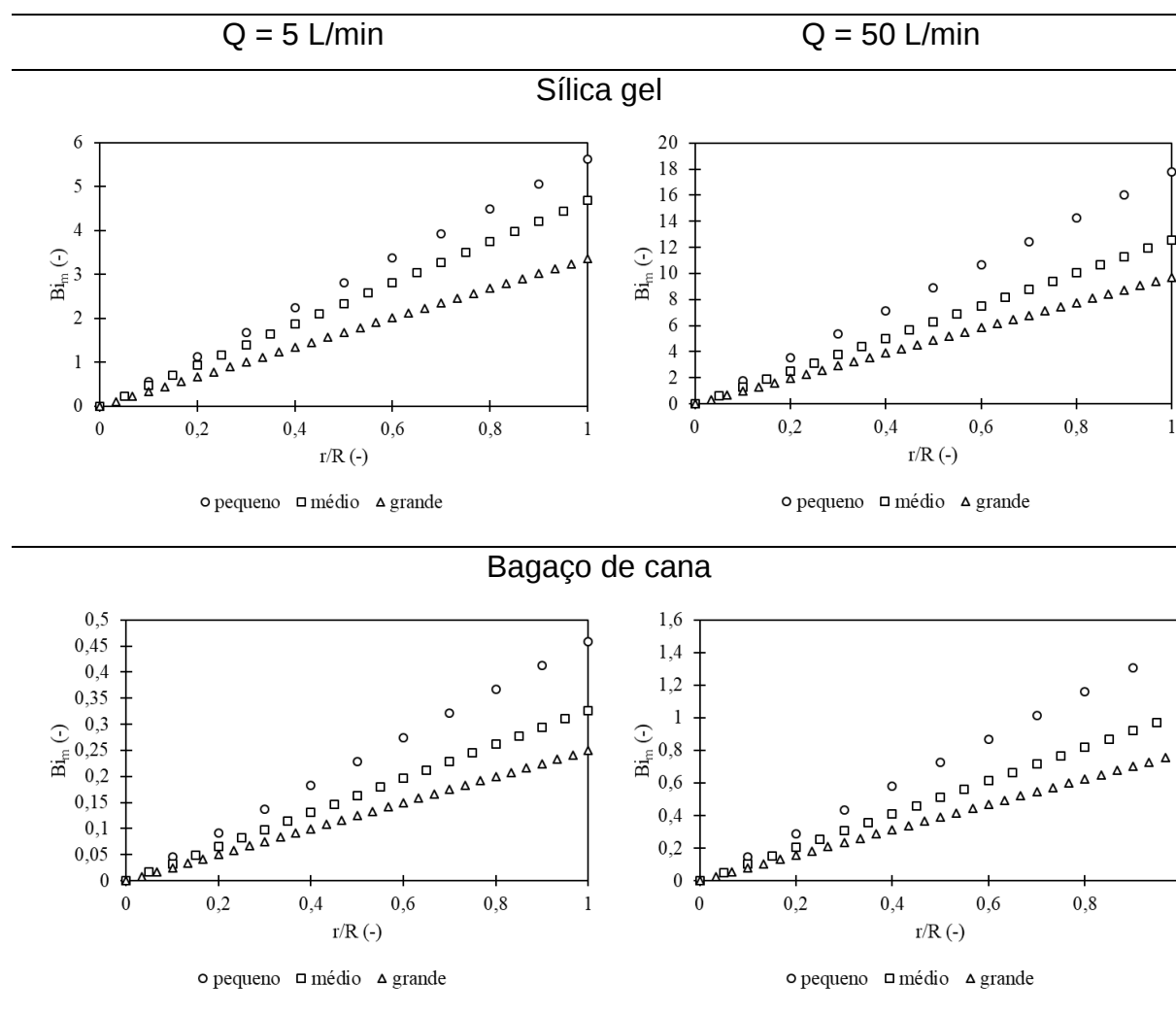
De forma similar como no cálculo do número de Biot clássico, as temperaturas médias dos leitos de partículas foram utilizadas para cálculo de um De_{eff} em cada instante t de interesse. Nessa análise, são apresentados os números de Bi_m para os tempos 2; 6,5 e 10 h. Esses tempos foram escolhidos baseados nos resultados obtidos para a análise de Biot clássico, que apresentou alteração no regime de resistências dos sistemas em $t = 6,5$ h. Em $t = 10$ h, espera-se que todos os leitos de partículas em qualquer tambor tenha atingido o equilíbrio térmico, motivo pelo qual o número de Biot modificado foi calculado para esse instante. Nas Figuras 5.20 a 5.22 estão apresentados os números de Biot modificados para 2; 6,5 e 10 h, respectivamente. No limite $r/R \rightarrow 0$, $Bi_m \rightarrow 0$ independentemente do tamanho do tambor, vazão de operação ou leito de partícula. Isso pode ser interpretado como a ausência de resistência interna e ausência de um possível perfil de X nessa posição.

Figura 5.20 – Número de Biot modificado ao longo da profundidade do leito de partículas que parcialmente preenche os tambores horizontais pequeno, médio e grande em grau de enchimento 0,5 em $t = 2$ h e diferentes vazões de ar.



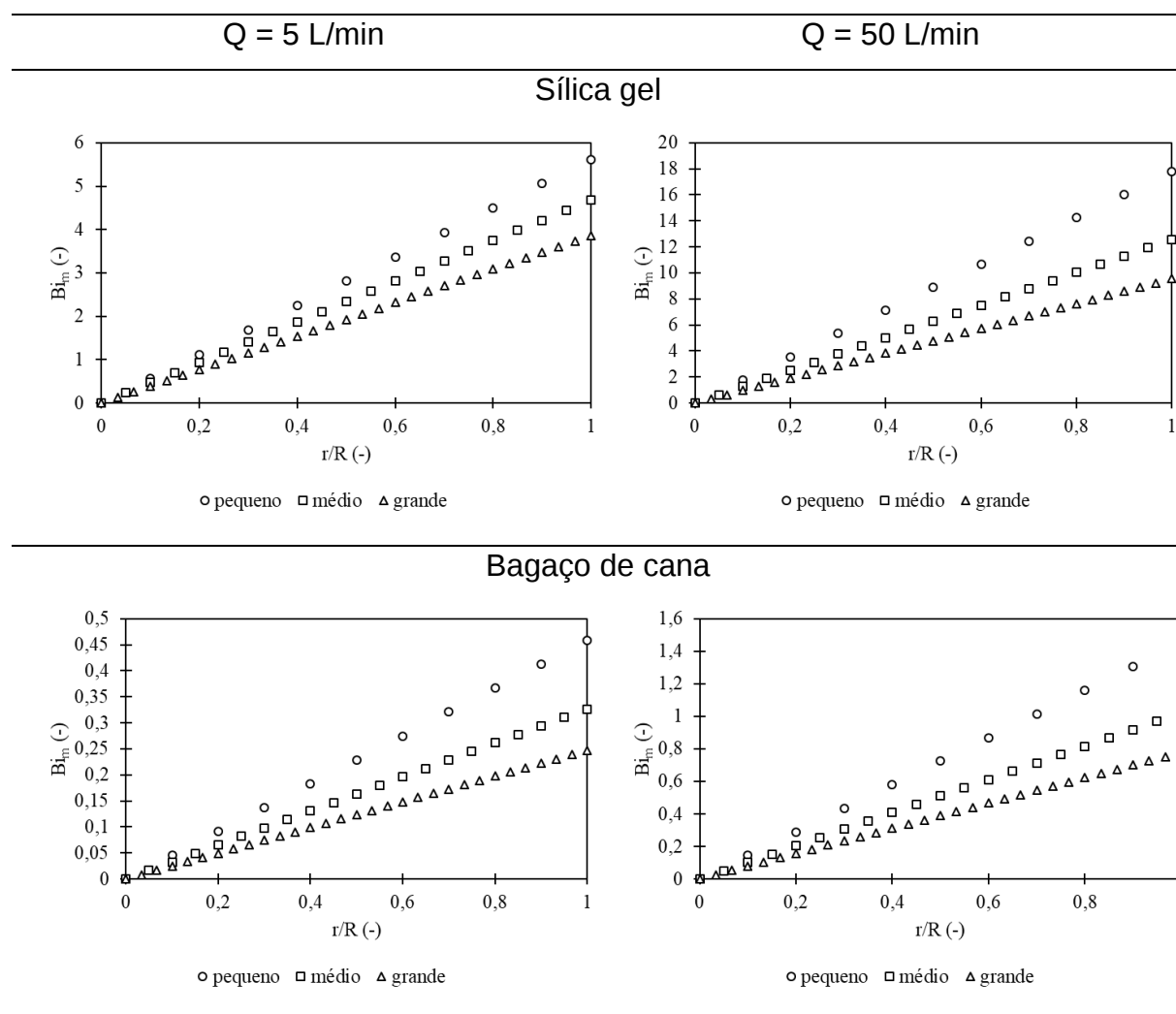
FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.21 – Número de Biot modificado ao longo da profundidade do leito de partículas que parcialmente preenche os tambores horizontais pequeno, médio e grande em grau de enchimento 0,5 em $t = 6,5$ h e diferentes vazões de ar.



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.22 – Perfis do número de Biot modificado ao longo da profundidade do leito de partículas que parcialmente preenche os tambores horizontais pequeno, médio e grande em grau de enchimento 0,5 em $t = 10$ h e diferentes vazões de ar.



FONTE: Elaborado pela autora.

Os leitos de sílica 5 L/min e bagaço de cana a 50 e 5 L/min caracterizaram-se por apresentar resistências internas desprezíveis nas proximidades da superfície do leito, com evolução para resistências equivalentes com o aumento de r , indicando que os mecanismos de convecção e de difusão efetiva desempenham simultaneamente importante papel sobre o transporte de massa nesse leito de partículas em todos os tempos observados.

Já para o leito de sílica a 50 L/min, observou-se alteração nos regimes de resistências ao transporte de massa ao longo do tempo. Para $t = 2$ h, apenas o tambor pequeno atingira o equilíbrio térmico. Nos tempos de 6,5 e 10 h, o equilíbrio térmico é verificado em todos os tambores para esta partícula (dados não mostrados). Em $t = 2$ h, todos os tambores apresentaram resistências equivalentes nas proximidades da

superfície do leito e resistência externa desprezível ao longo de r . Quando B_{im} acima de 10 é noticiado no interior do leito, entende-se que o transporte de massa é governado pela difusão efetiva, ou seja, todo o transporte está condicionado ao coeficiente efetivo D_{eff} . Com o passar do tempo, apenas os tambores pequeno e médio apresentam esse comportamento e todo o domínio radial do tambor grande apresenta equivalência nas resistências ao transporte de massa.

Se o objetivo do processo é a secagem do leito, é interessante que se possam manter desprezíveis as resistências externas nas proximidades da superfície do leito para que gradientes de umidade possam ser instalados de forma eficiente nesta região, ao passo que resistências no mínimo equivalentes deveriam ser atingidas ao longo de r . Por outro lado, quando se objetiva evitar o transporte de massa e o ressecamento do leito, é interessante que se mantenha resistências equivalentes na superfície – ou, na melhor das hipóteses, resistência interna desprezível – o que indicaria que esse processo possui coeficiente de transporte de massa por convecção relativamente baixo. A partir daí, o interior do leito poderia apresentar resistência externa desprezível, indicando a resistência ao transporte relacionada ao coeficiente de difusão efetiva de água.

5.4.4. Validação do modelo

Os perfis experimentais de temperatura e umidade foram coletados em tambores pequeno, médio e grande preenchidos em grau de enchimento 0,5 por leitos de sílica gel e de bagaço de cana. No tambor grande, a umidade relativa do ar de entrada foi aferida na saída do tambor ($0,8 \leq z/L < 1$). Os perfis de temperatura no leito foram coletados em diferentes posições radiais e angulares nas frações axiais de entrada e saída de ar e no meio axial ($0,4 \leq z/L < 0,6$). A umidade local foi verificada em posições preferencialmente de superfície do leito. Nem todos os perfis de temperatura e umidade são mostrados nesta tese para todas as posições analisadas.

O primeiro conjunto de verificações refere-se ao tambor pequeno. Na Figura 5.23 estão apresentados perfis de temperatura para $Q = 50$ L/min. Não foram verificadas variações axiais entre os perfis coletados, motivo pelo qual apenas uma posição axial foi utilizada para validação do modelo. Boa concordância entre os perfis experimentais e preditos foram obtidos, sustentados por coeficientes de correlação apreciáveis (R^2

$\geq 0,87$) e quadrados do erro médio inferiores a 10 % da amplitude de temperatura tomada nos experimentos (25 a 45 °C).

Figura 5.23 – Verificação do modelo em tambor pequeno preenchido por partículas de sílica gel e de bagaço de cana em grau de enchimento 0,5 com introdução de ar seco a 50 L/min em escoamento paralelo à superfície do leito.

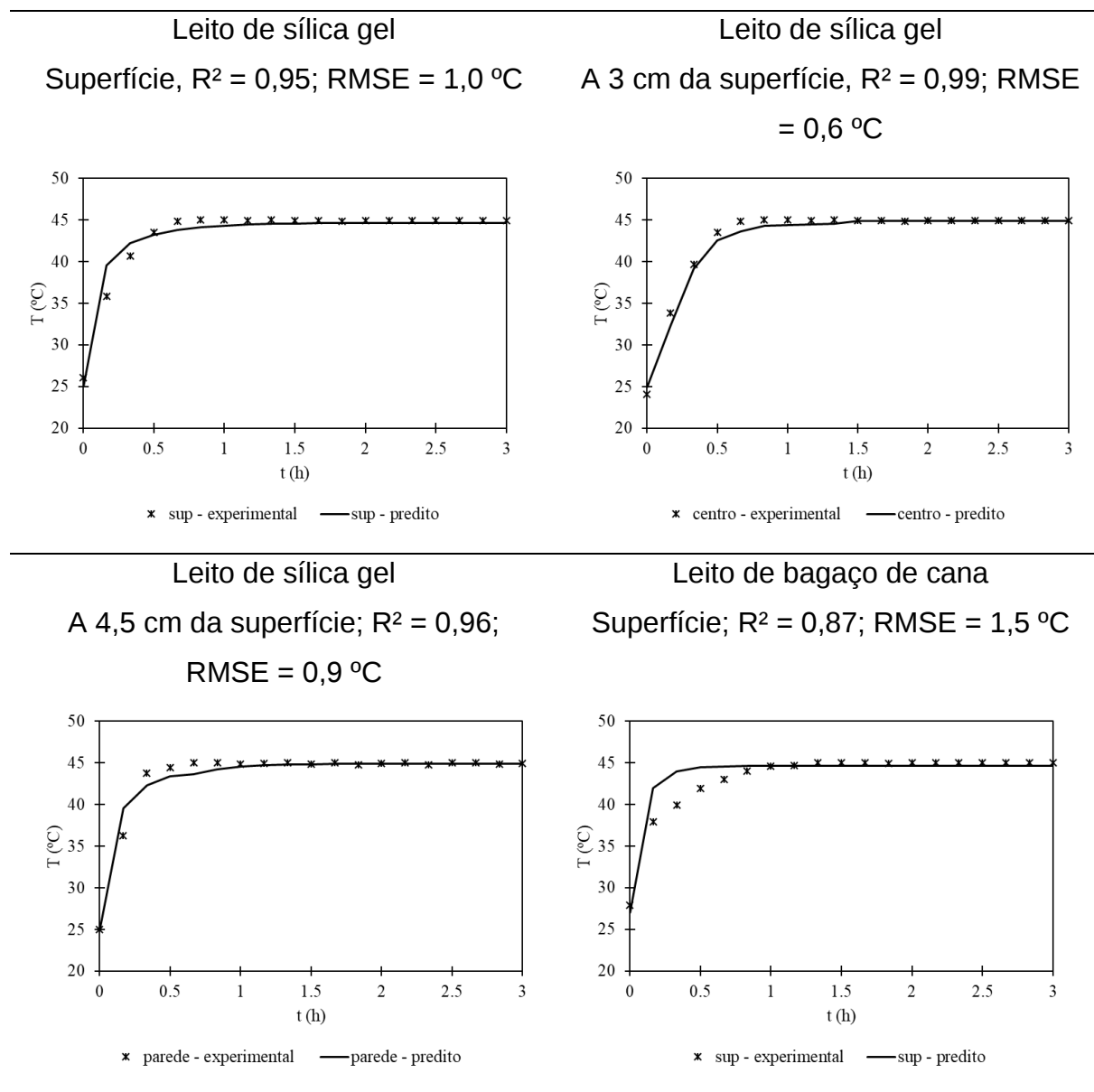
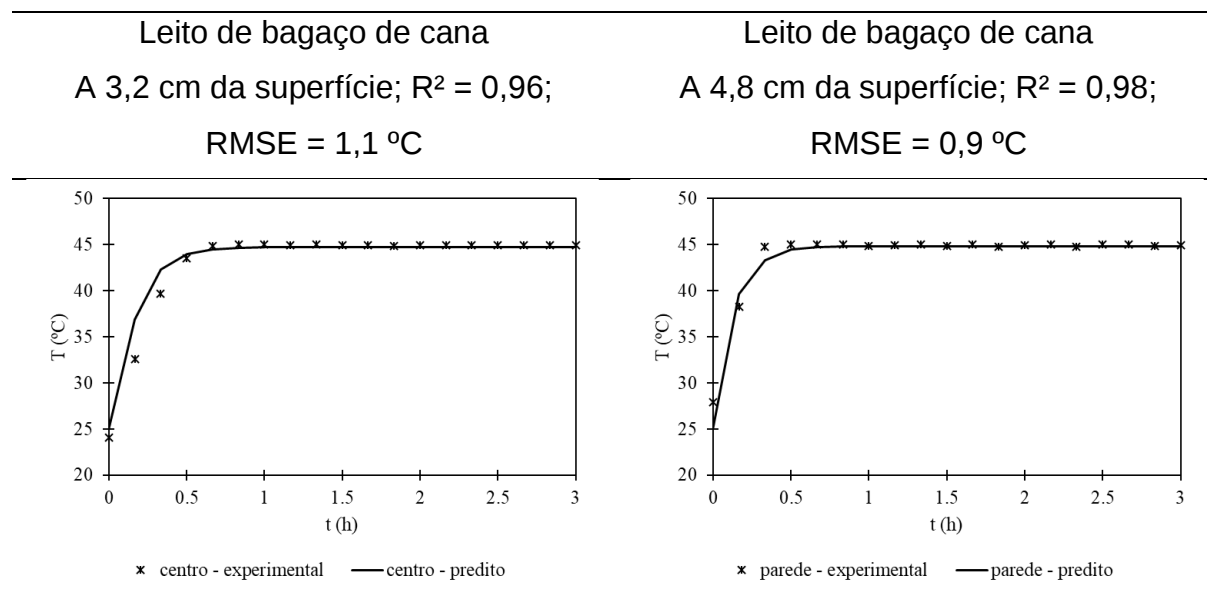


Figura 5.23: continuação

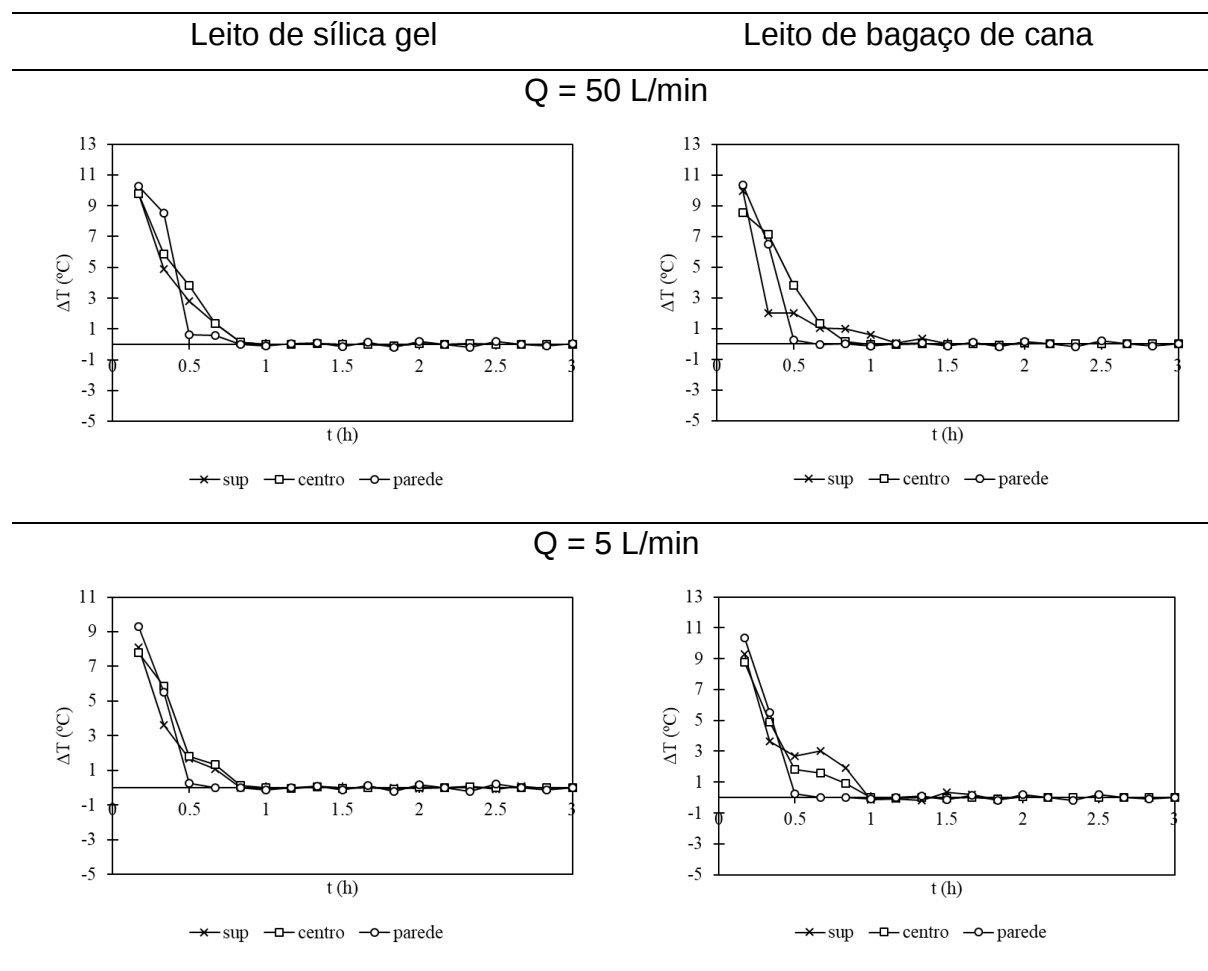


FONTE: Elaborado pela autora.

Observe-se que o intervalo de tempo para análise dos perfis de temperatura foi reduzido a 3 h para esses ensaios e que as posições analisadas atingiram a temperatura de 45 °C antes mesmo da primeira hora. Os perfis de temperatura experimentais nas proximidades da parede do tambor parecem descrever comportamento que se aproxima da concepção de ausência de resistências externas ao transporte de calor nessa posição, pois as variações de temperatura com o tempo são maiores nesta região, o que permite inferir que o coeficiente de parede seja também alto e Bi para o transporte de calor assumiria valores maiores que 10. Assim, um contorno de primeira espécie poderia também representar o fenômeno satisfatoriamente, como previamente observado por Bertucci et al. (2017) em ensaios em um tambor de dimensões similares contendo partículas secas de bagaço de cana. Comportamento semelhante foi observado quando empregada vazão de ar de 5 L/min em tambor pequeno para ambos os tipos de partículas (perfis de temperatura não apresentados nesta tese).

Na Figura 5.24 estão apresentadas as quedas de temperatura ao longo do tempo, calculados através da diferença entre duas temperaturas medidas em dois instantes t consecutivos, considerando-se os perfis experimentais para tambor pequeno para ambas as vazões e leitos de partículas. O sistema atinge equilíbrio térmico quando ΔT tende a zero.

Figura 5.24 – Quedas de temperatura ao longo do tempo em diferentes posições em leitos de sílica gel e de bagaço de cana, que preenchem um tambor pequeno em grau de enchimento 0,5 com escoamento de ar paralelo à superfície do leito a diferentes vazões.



FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis experimentais de temperatura apresentaram tendências similares de queda de temperatura para todas as posições analisadas, independente do leito de partículas e vazão de ar empregados. As quedas de temperatura em todo o leito de forma homogênea sugerem e sustentam a hipótese de que as resistências internas ao transporte de calor são negligenciáveis, possivelmente por conta da influência da parede aquecida em relação ao volume de leito a ser aquecido, que já foi citado e discutido anteriormente. De forma mais minuciosa, as quedas de temperatura em leitos de bagaço de cana foram ligeiramente maiores que os de sílica nos primeiros instantes de processo, o que está relacionado diretamente à condutividade térmica efetiva de cada leito. Os equilíbrios térmicos foram alcançados em aproximadamente

45 e 30 minutos para as vazões de 5 e 50 L/min, respectivamente, e não dependeu do leito de partículas.

Os perfis de umidade na superfície dos leitos em tambor pequeno a diferentes vazões estão apresentados na Figura 5.25 para os leitos de sílica gel e de bagaço de cana e ambas as vazões.

Figura 5.25 – Verificação do modelo utilizando-se perfis de umidade na superfície dos leitos de sílica gel e de bagaço de cana colocados em tambor pequeno preenchido em grau de enchimento 0,5 com introdução de ar seco a 5 ou 50 L/min em escoamento paralelo à superfície do leito.

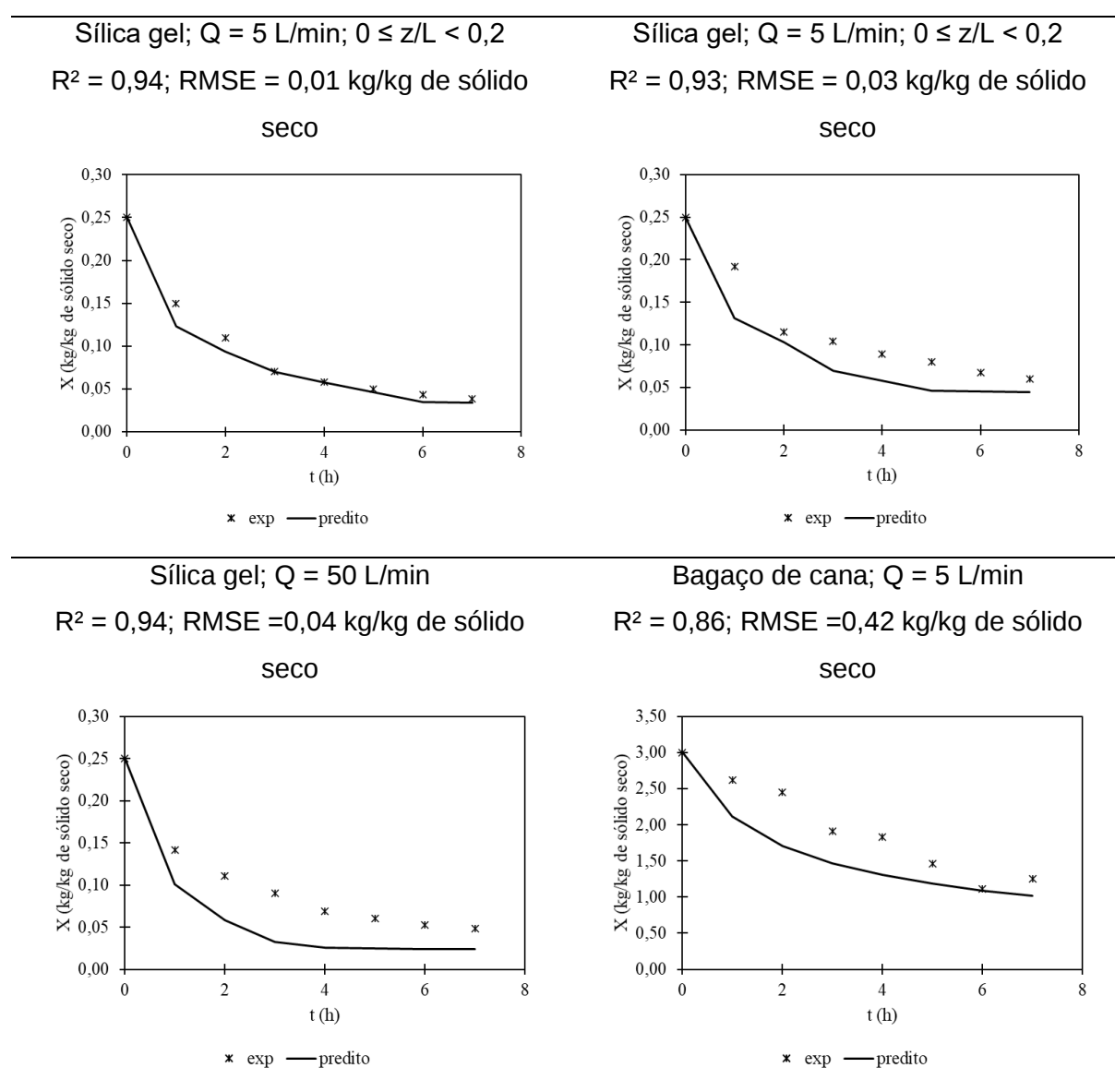
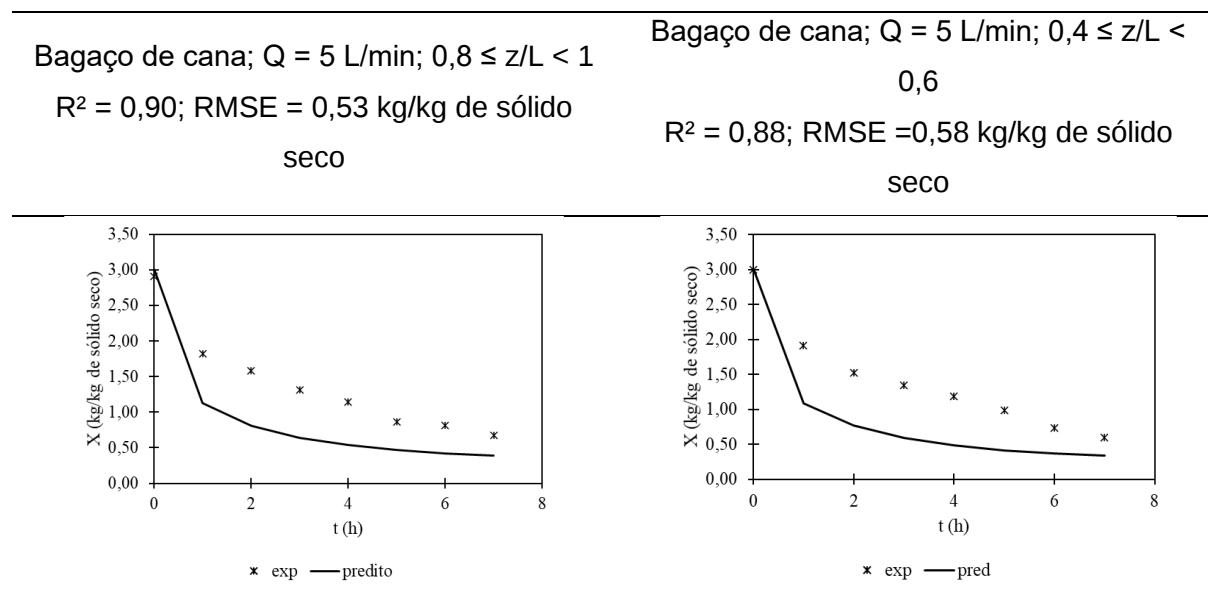


Figura 5.25: continuação.

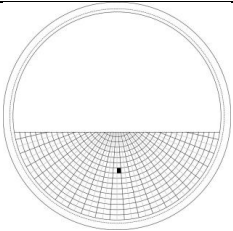
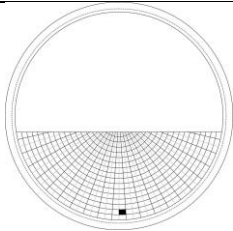


FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis temporais de X na superfície do leito mostram que esta posição perde umidade gradativamente, o que descarta a hipótese imediata de que o processo ocorra em ausência de resistências externas para ambas as vazões de ar e leitos de partículas. Recorda-se que o cálculo de número de Biot local modificou apontou resistências equivalentes quando $r \rightarrow r_{i(\theta)}$ em leito de sílica, com evolução para resistências externas desprezíveis ao transporte de massa em posições mais profundas do leito. Após 7 h de ensaio, o tambor foi aberto e amostras do interior do leito foram coletadas, cujas umidades estão apresentadas na Tabela 5.9 para cada leito de partículas e vazão de ar.

O interior do leito de sílica submetido à secagem a 5 L/min não apresentou variações de X para as posições analisadas. Inicialmente, isso poderia indicar que o sistema se encontra sob domínio da resistência interna devido à dificuldade que se tem em se transferir massa através de seu interior. No entanto, os cálculos para número de Biot local modificados anteriormente, suportam a ideia de que o sistema está sob resistências equivalentes, ou seja, as resistências interna e externa estão presentes. Isso é afirmado quando comparado este dado, apresentado na Tabela 5.9, com o perfil espacial apresentado para essa situação física na Figura 5.15, no qual os gradientes instalados na superfície devido ao escoamento de ar inicialmente seco a 5 L/min eram muito sutis.

Tabela 5.9 – Umidades no interior de leitos de bagaço de cana e de sílica gel em tambor pequeno sob diferentes vazões de ar.

Leito – Vazão						
	Experimental	Predito	Erro relativo (%)	Experimental	Predito	Erro relativo (%)
Sílica – 5 L/min	0,25	0,25	0	0,25	0,25	0
Sílica – 50 L/min	0,246	0,25	-1,63	0,25	0,25	0
BC – 5 L/min	1,34	1,18	11,94	2,94	2,93	0,34
BC – 50 L/min	0,81	1	-23,46	2,78	2,91	-4,68

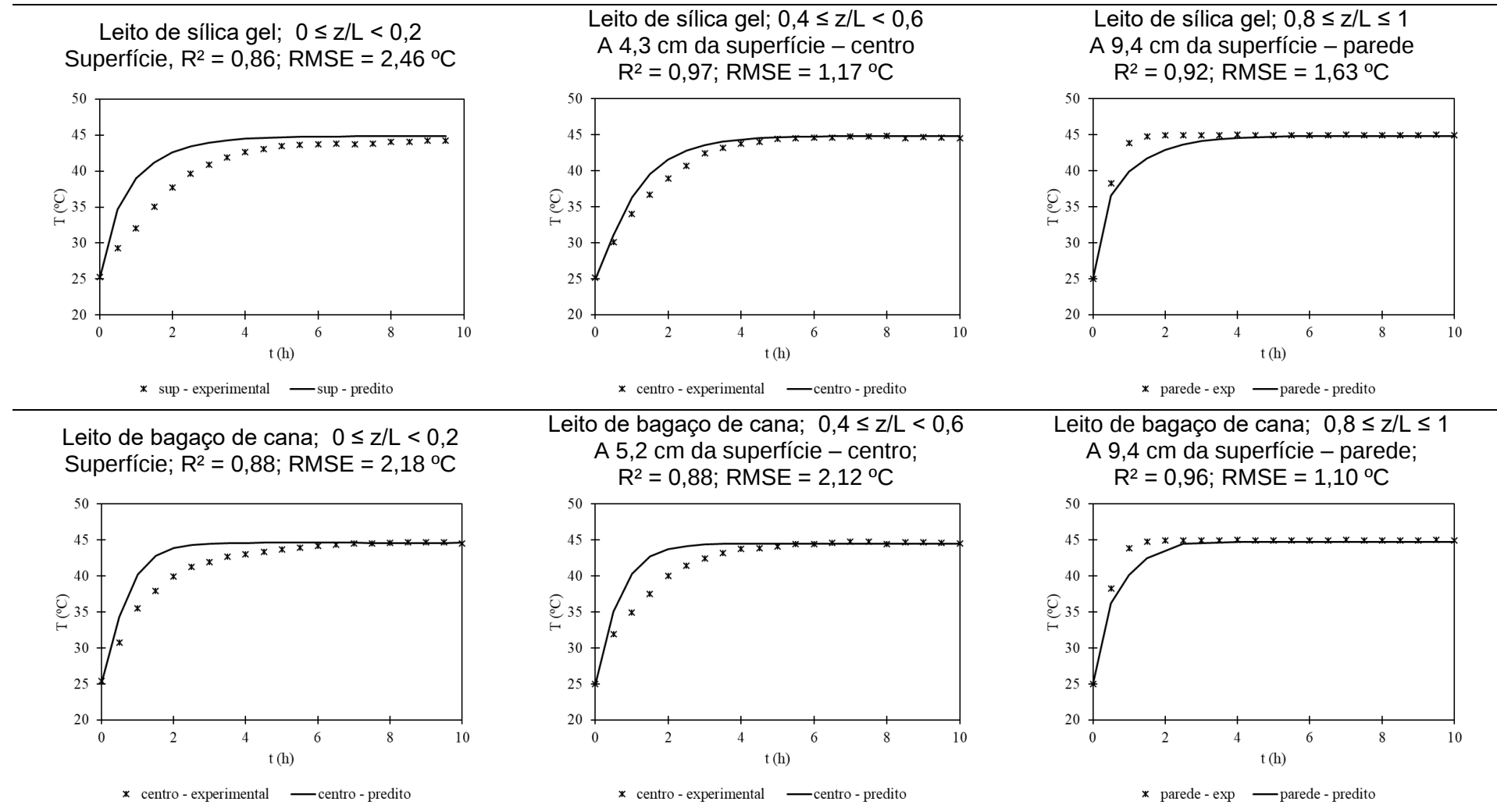
(*) Erro relativo = $[(X_{\text{exp}} - X_{\text{pred}})/X_{\text{exp}}] * 100$. FONTE: Elaborado pela autora.

O interior do leito de sílica com aeração a 50 L/min também apresentou variações de umidade desprezíveis. Essa observação também corrobora com o número de Biot local modificado calculado, que propõe presença de resistências internas ao longo de praticamente toda a profundidade do leito. Ou seja, existem gradientes de umidade instalados na superfície do leito em contato com o ar escoante, onde se acusa resistências equivalentes, porém, a resistência interna ao transporte de massa no interior do leito é tão intensa que, mesmo em presença de tais gradientes, não é capaz de descrever movimentação de massa.

Variações de umidade foram reportadas no interior de leitos de bagaço de cana submetidos ao contato com o ar a diferentes vazões. Esse fato também concorda com o cálculo do número de Biot modificado, que acusou resistências equivalentes para qualquer profundidade do leito. Os erros relativos calculados para esse leito foram superiores a 20 % a 2,5 cm da superfície do leito e 50 L/min, sendo o máximo obtido em 50 L/min. Tais valores podem ser considerados aceitáveis tendo em vista a natureza irregular deste tipo de partícula e as dificuldades relacionadas à amostragem para análise.

O segundo conjunto de verificações refere-se ao tambor médio. Nesse sistema, presença de resistências equivalentes foram propostas para o transporte de calor e verificadas por cálculo do número de Biot local modificado para o transporte de massa em diferentes profundidades de leito. A verificação dos perfis de temperatura é apresentada na Figura 5.26 para ambos os leitos de partículas e vazões de ar.

Figura 5.26 – Verificação do modelo em tambor médio preenchido por leitos de sílica gel e de bagaço de cana em grau de enchimento 0,5 com introdução de ar seco a 50 L/min em escoamento paralelo à superfície do leito.



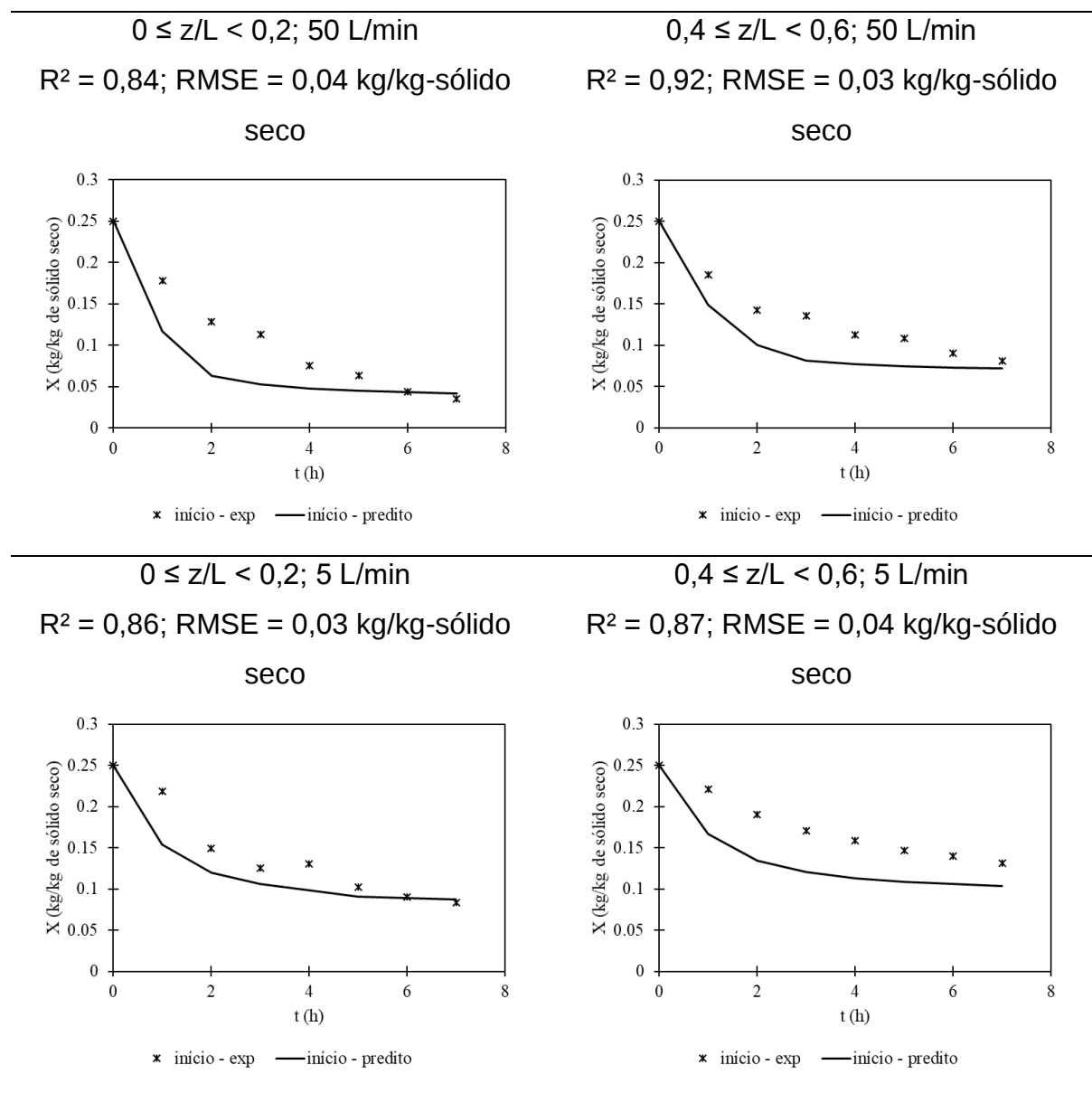
FONTE: Elaborado pela autora.

Ajustes satisfatórios entre os perfis experimentais e preditos de temperatura são observados. Observe-se que os perfis experimentais de T nas proximidades da parede do tambor apresentam aumento súbito de temperatura, o que sugere que um contorno de primeira espécie poderia ser empregado para representar esta região e que as resistências externas locais seriam desprezíveis. Procedendo-se como para tambores pequenos, o cálculo do módulo da diferença de temperatura ao longo do tempo para cada perfil experimental reafirma esta hipótese. Os aumentos de temperatura são graduais e ocorrem de forma mais intensa em leitos de bagaço de cana do que em leitos de sílica gel, possivelmente por conta da natureza das partículas. O que se observa são aumentos de temperatura em torno de 4 a 6 °C para posições de superfície e interior do leito após os primeiros 30 minutos, enquanto que aumentos de até 15 °C foram reportados em posições próximas à parede do tambor para este mesmo intervalo de tempo. Os graduais aumentos a variadas intensidades em diferentes regiões do leito descartam que resistências internas sejam desprezíveis e, especialmente na superfície, representam a presença de resistências externas ao transporte de calor; o que induz a afirmar que o sistema esteja sob resistências equivalentes. O mesmo comportamento em termos de aumentos de temperatura foi observado para ambos os leitos com aeração a 5 L/min (perfis não apresentados).

Na Figuras 5.27 e 5.28 estão apresentadas as verificações do modelo para perfis de umidade em tambor médio a 50 e 5 L/min em leitos de sílica gel e de bagaço de cana, respectivamente. Os ajustes obtidos para os perfis de umidade em tambor médio são considerados razoavelmente satisfatórios apesar do visível distanciamento entre perfis experimentais e preditos em algumas posições no leito. Em tambor pequeno, o equilíbrio térmico é atingido em intervalos de tempo relativamente curtos, então considera-se que as fases gasosa e sólida em meio ao leito encontrem-se na mesma temperatura durante a maior parte do tempo. Desse modo, o termo que representa o transporte de massa devido aos aumentos de temperatura e gerenciado por uma velocidade no sentido radial v_r , tem pouca ou nenhuma influência sobre os perfis de umidade. Já em tambor médio, tempos maiores são requeridos para que o equilíbrio térmico seja alcançado, e então a movimentações de água devido aos aumentos de temperatura ainda devem ser contempladas no balanço. Como mencionado anteriormente, este termo é gerenciado por uma velocidade v_r calculada a partir de correlações para convecção natural em meio ao leito de partículas, que pode ter sido subestimada a depender do arranjo e da natureza irregular das

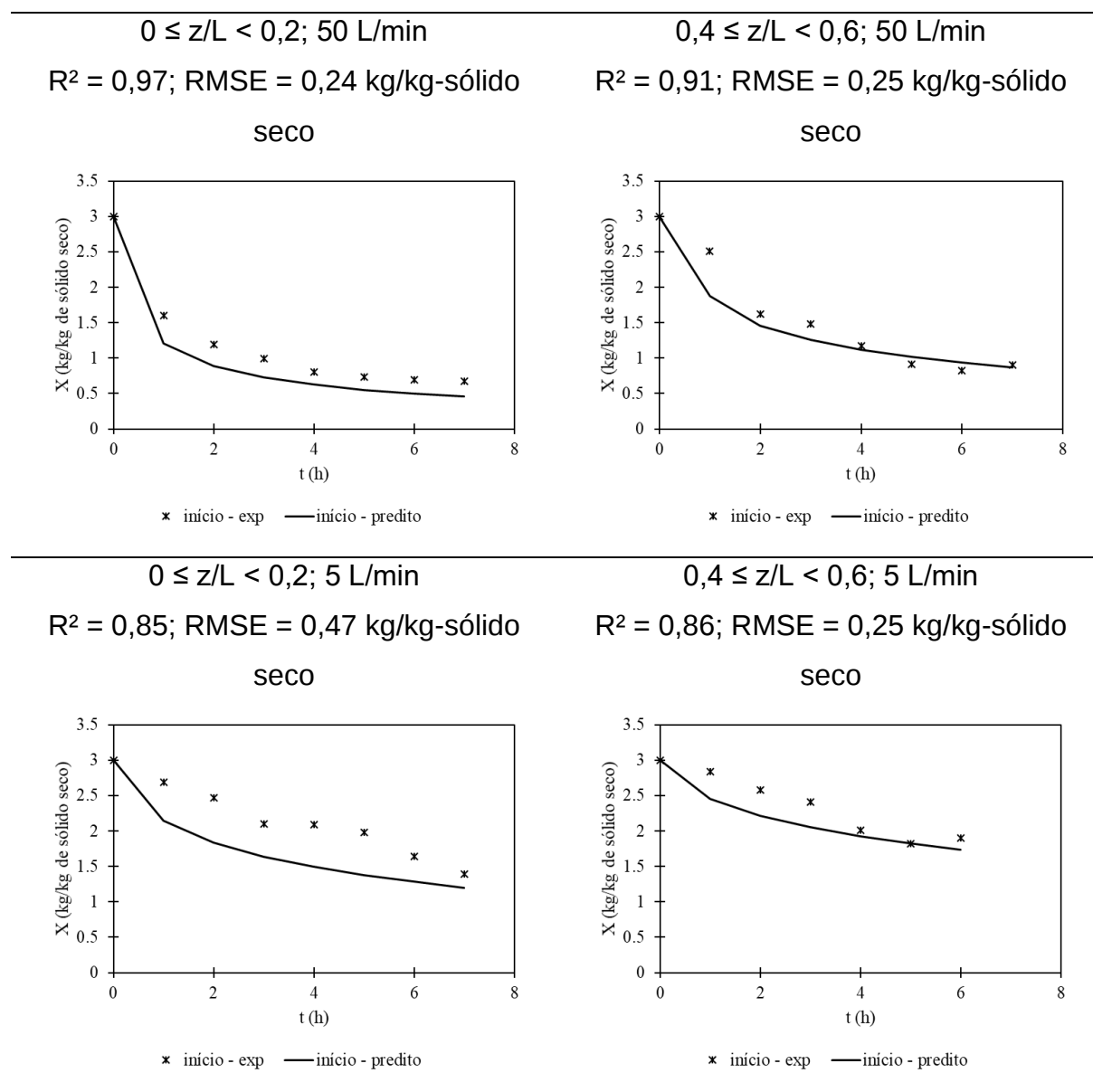
partículas. Essa é uma limitação do uso de modelos a uma fase, pois as informações acerca da fase gasosa e suas interações com o sólido não são consideradas, o que dificulta o entendimento de fenômenos complexos existentes em meio ao leito poroso limita a melhoria na qualidade de ajustes.

Figura 5.27 – Verificação do modelo a partir de perfis de umidade na superfície de leitos de sílica gel em tambor médio com aeração a 50 e 5 L/min.



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.28 – Verificação do modelo a partir de perfis de umidade na superfície de leitos de bagaço de cana em tambor médio com aeração a 50 e 5 L/min.



FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis experimentais na superfície do leito em diferentes posições axiais mostram variações ao longo do comprimento para ambos os leitos. Para todos os leitos, exceto o de sílica a 50 L/min, o cálculo do número de Biot modificado acusou que as resistências ao transporte de massa são equivalentes. Para este leito em específico, obteve-se resistência externa desprezível. Dados experimentais no interior do leito foram coletados para 50 L/min em leitos de sílica para os tempos de 7, 9 e 10 h de ensaio em uma posição a 5,3 cm da superfície do leito no centro angular e fração axial inicial. Os dados de umidade corresponderam a 0,248; 0,247 e 0,249 para respectivos tempos em ordem crescente. Ou seja, esses dados suportam a hipótese

de que as resistências internas são muito intensas, não havendo transporte de massa em regiões mais profundas do leito mesmo após 10 h de processo; e indicam que a difusão efetiva governa o transporte.

O último conjunto de verificações refere-se aos leitos de sílica gel e bagaço de cana em tambor grande com $Q = 50 \text{ L/min}$, apresentado nas Figuras 5.29 e 5.30, respectivamente. Todas as posições apresentadas são referenciadas partindo-se da superfície do leito no centro angular. A umidade da fase gasosa escoante foi monitorada na saída do tambor ao longo do tempo e está apresentada na Tabela 5.10 para os dois leitos de partículas, bem como os dados obtidos por simulação.

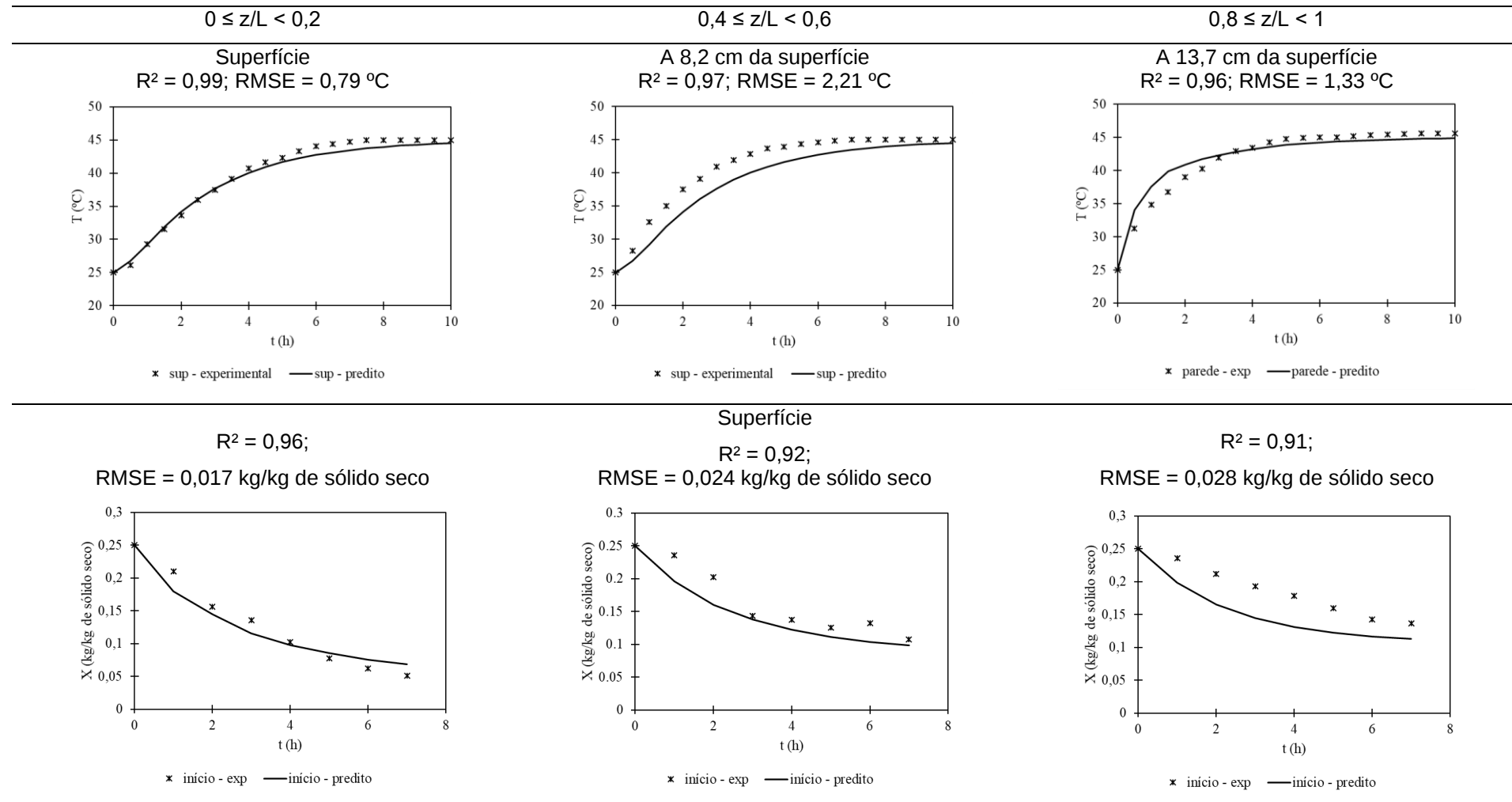
Ajustes satisfatórios entre os dados experimentais e simulados foram obtidos. Acerca dos perfis de temperatura para regiões próximas à parede do tambor, observa-se que o coeficiente de transferência de calor utilizado no limite em que $r \rightarrow R$, extraído de Tada et al. (2017a) forneceu ajustes razoavelmente satisfatórios, o que indica que a resistência ao transporte de calor nesse tambor para qualquer tipo de leito de partículas pode ser satisfatoriamente representado pelo coeficiente dado pelos autores naquela ocasião. Ou seja, a resistência ao transporte de calor da parede do tambor aquecida para a primeira camada de leito está substancialmente relacionada à geometria e dimensões do equipamento e independe do leito de partículas utilizado.

O perfil simulado de temperatura para a superfície do leito de bagaço de cana apresentou leve distanciamento em relação ao perfil experimental, o que pode estar associado à estimativa do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície e o ar no sobre espaço. Este coeficiente foi o mesmo utilizado por Tada et al. (2017a) em conjunto com a contribuição da evaporação de água da superfície do leito para o sobre espaço. Naquela ocasião, os autores obtiveram bons ajustes entre perfis de temperatura na região de superfície de um leito constituído por partículas esféricas. De forma similar, o leito esférico aqui apresentado também rendeu bons ajustes na região de sua superfície, possivelmente porque o método de cálculo deste coeficiente foi adequado considerando-se a área disponível para troca na superfície. Tratando-se de um leito de bagaço de cana, a área superficial real é maior do que aquele de um leito constituído por partículas esféricas (CASCIA TORI et al., 2016), o que promoveria aumento do coeficiente em questão. Este é um fato que a correlação não abrange. Neste sentido, infere-se que a contribuição dos fenômenos nesta interface sobre a temperatura local tenha sido subestimada, causando impacto visível sobre os perfis de temperatura simulados, já que se espera que a contribuição da

superfície do leito sobre o transporte de calor seja apreciável (vide Tabela 5.8 e perfis espaciais apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10).

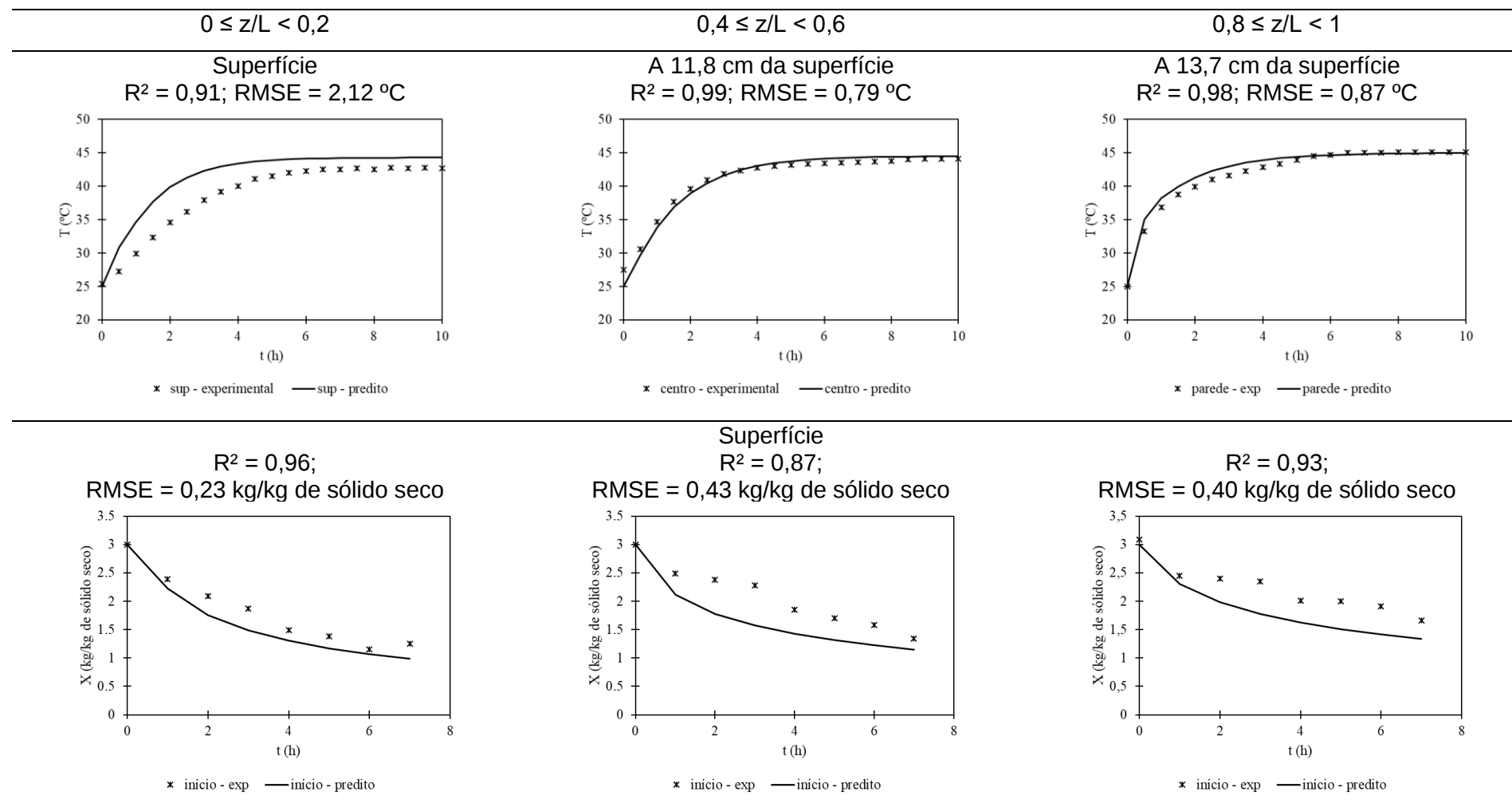
As predições para a fase gasosa foram consideradas satisfatórias em acordo com os coeficientes RMSE relativamente baixos. Observe-se que perfil simulado para X_g assume constância já em $t = 1$ h para ambos os leitos de partículas, enquanto que os perfis experimentais apresentam aumento de umidade com o passar do tempo. Quanto a isso, é necessário ter cautela ao se afirmar que o ar que deixa o tambor alcançaria umidade de saturação ao longo do tempo. Reconhece-se que os métodos utilizados para aferição e monitoramento da umidade do ar utilizando-se um termo higrômetro manual e convertendo-se a leitura, dada em umidade relativa, para umidade absoluta apresenta limitações; no entanto, considera-se que os dados obtidos são satisfatórios para fins da verificação do modelo. Por fim, nota-se que os perfis experimentais de umidade apresentaram valores superiores aos simulados, o que sustenta a hipótese de que o coeficiente de transferência de massa por convecção na superfície do leito tenha sido ligeiramente subestimado. Tendo isso em vista, considera-se também que os erros relativos calculados são aceitáveis.

Figura 5.29 – Verificação do modelo em tambor grande preenchido com partículas de sílica em grau de enchimento 0,5 com introdução de ar seco a 50 L/min em escoamento paralelo à superfície do leito ($T_{g,0} = 46,1\text{ °C}$; $X_{0,g} = 0,0065\text{ kg/kg de ar seco}$).



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.30 – Verificação do modelo em tambor grande preenchido com partículas de bagaço de cana em grau de enchimento 0,5 com introdução de ar seco a 50 L/min em escoamento paralelo à superfície do leito ($T_{g,0} = 44,5\text{ °C}$; $X_{0,g} = 0,0065\text{ kg/kg de ar seco}$).



FONTE: Elaborado pela autora.

Tabela 5.10 – Umidade do gás escoante no sobre espaço a 50 L/min em tambor grande parcialmente preenchido por leitos de sílica e de bagaço de cana em grau de enchimento 0,5.

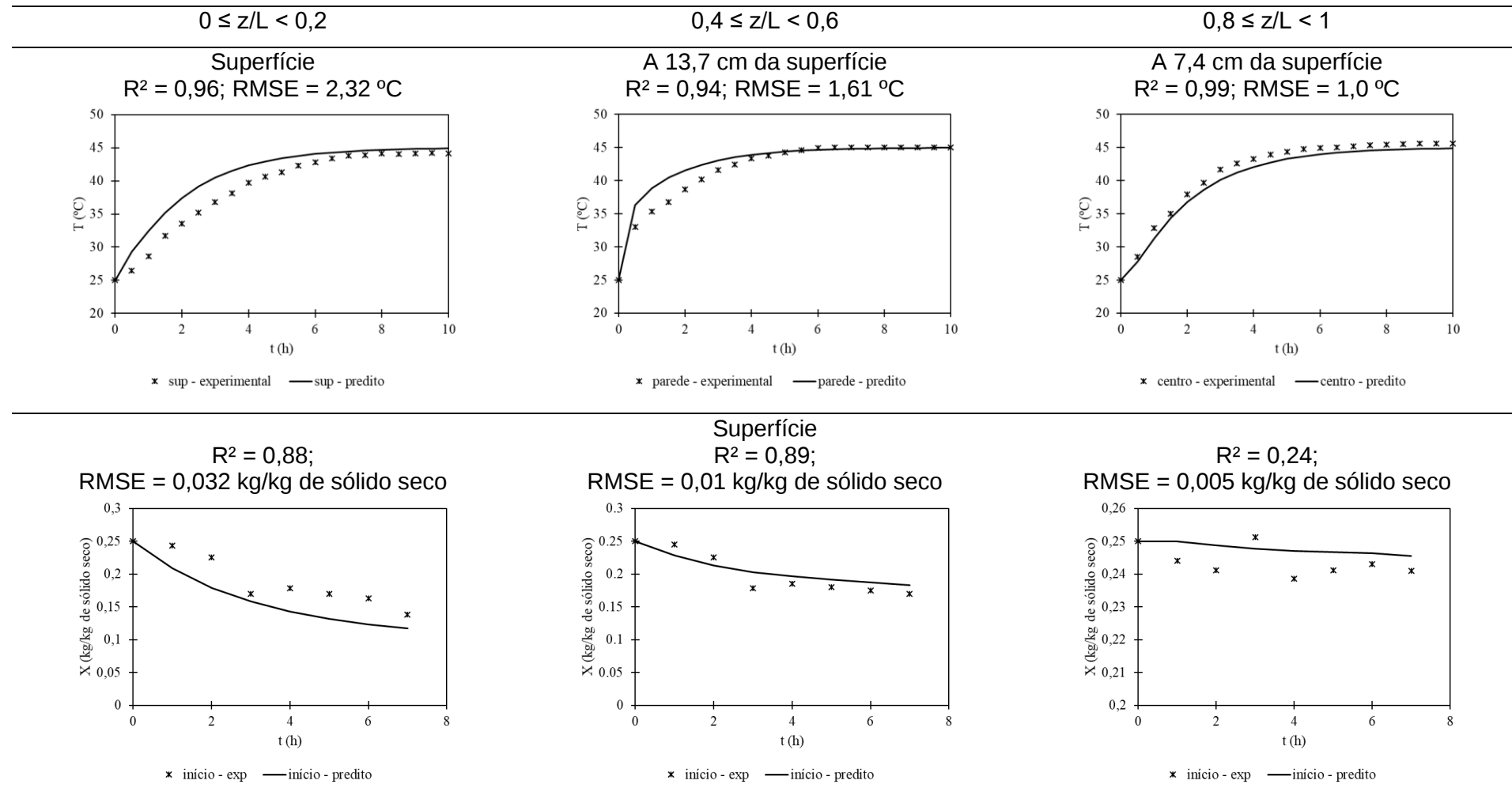
t (h)	Sílica			Bagaço de cana		
	Exp	Predito	Erro relativo (%)	Exp	Predito	Erro relativo (%)
0	0,0064	0,0065	-1,6	0,0068	0,0065	4,4
1	0,0560	0,0524	6,4	0,0549	0,0505	8,0
3,5	0,0581	0,0524	9,8	0,0547	0,0505	7,7
5	0,0540	0,0524	3,0	0,0581	0,0505	13,1
7	0,0587	0,0524	10,7	0,0594	0,0505	15,0
RMSE	0,006 kg/kg de ar seco			0,006 kg/kg de ar seco		

FONTE: Elaborado pela autora.

Nas Figuras 5.31 e 5.32 são apresentados perfis de temperatura e umidade dos leitos de sílica gel e de bagaço de cana, respectivamente, colocados no tambor grande com aeração a $Q = 5 \text{ L/min}$.

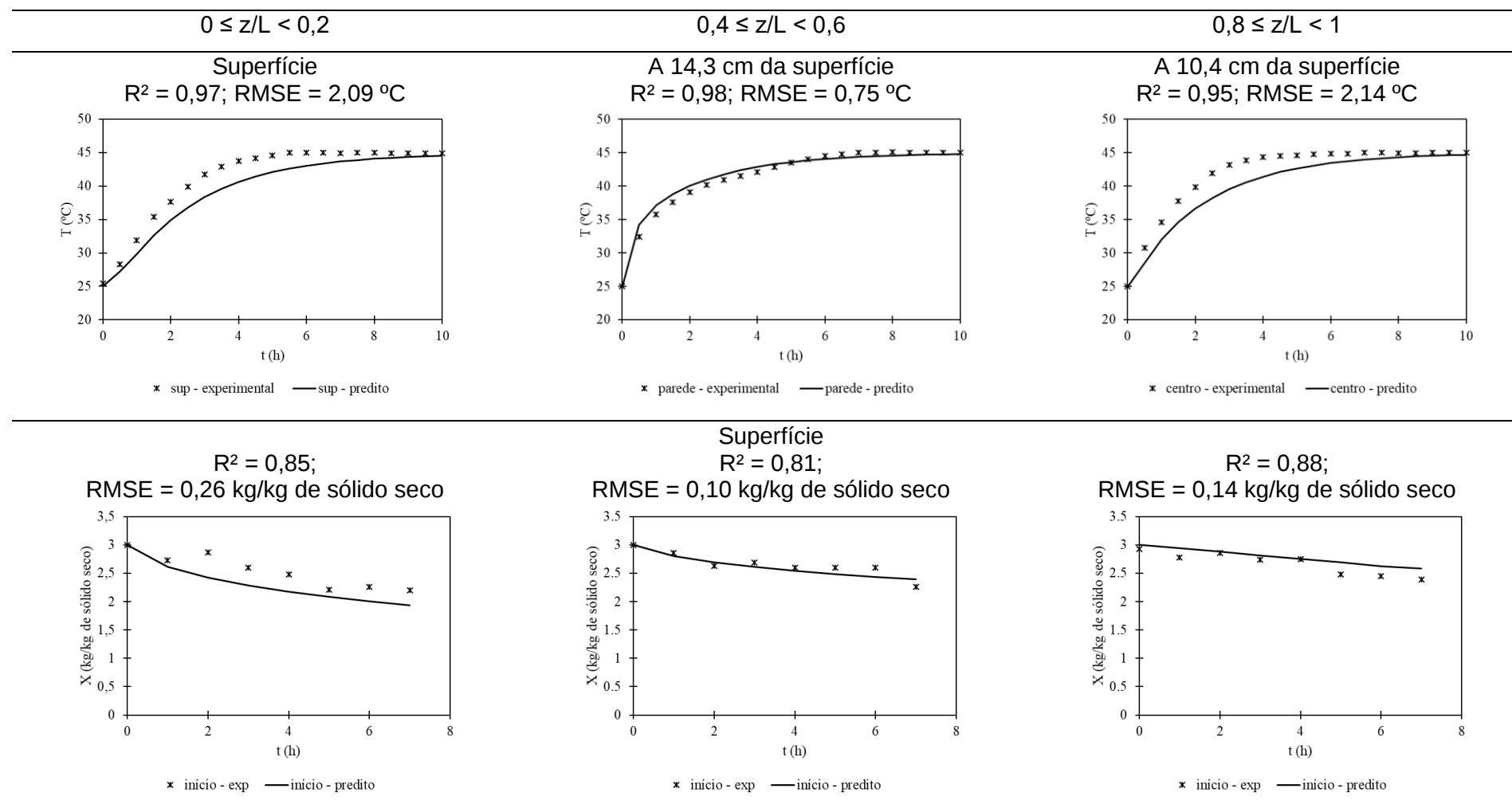
Os ajustes apresentados para a baixa vazão de ar em tambor grande parcialmente preenchido por ambos os tipos de partículas são também satisfatórios. Observe-se que os perfis de temperatura simulados acompanham os perfis experimentais, e que o coeficiente de transferência de calor parece ser devidamente representado, especialmente tratando-se dos perfis de temperatura para a superfície do leito. A boa concordância entre os perfis experimental e simulado nesta posição do leito pode estar associada à vazão de ar empregada, que é baixa, e pode ser aproximada e interpretada como convecção natural em acordo com Tada et al. (2017). Com a diminuição da velocidade superficial, a contribuição associada à presença da fase gasosa é também diminuída e promove impactos mais amenos sobre a superfície do leito. Ajustes satisfatórios entre os perfis de temperatura foram obtidos para as demais posições do leito, bem como para os perfis de umidade na superfície do mesmo. Os resultados de temperatura e umidade da fase gasosa na saída do tambor não estão disponíveis para estes ensaios.

Figura 5.31 – Verificação do modelo em tambor grande preenchido com partículas de sílica gel em grau de enchimento 0,5 com introdução de ar seco a 5 L/min em escoamento paralelo à superfície do leito ($T_{g,0} = 45,1\text{ °C}$; $X_{0,g} = 0,0065\text{ kg/kg de ar seco}$).



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 5.32 – Verificação do modelo em tambor grande preenchido com bagaço de cana em grau de enchimento 0,5 com introdução de ar seco a 5 L/min em escoamento paralelo à superfície do leito ($T_{g,0} = 45,2\text{ °C}$; $X_{0,g} = 0,0065\text{ kg/kg de ar seco}$).



FONTE: Elaborado pela autora.

5.5. Conclusões parciais

As considerações parciais referentes a esse capítulo estão apresentadas como segue:

- Os modelos propostos foram capazes de prever satisfatoriamente os perfis de temperatura e umidade em diferentes posições de leitos de bagaço de cana e de sílica gel dispostos em tambores horizontais de diferentes tamanhos e sob diferentes vazões de ar escoante paralelamente à superfície do leito de partículas;
- A condutividade térmica efetiva de um leito de partículas de sílica ($K_{0,s}$) foi determinada experimentalmente como função da temperatura e da umidade das partículas e mostrou-se dependente a esses fatores;
- Correlações foram utilizadas para se calcular a $K_{0,s}$, obtendo-se valores próximos aos experimentais, e para se estimar a condutividade térmica de partículas de bagaço de cana, até então desconhecida;
- As simulações apresentadas para a fase gasosa mostraram variações axiais e temporais da temperatura, T_g , pouco expressivas e maiores umidades do ar, X_g , foram observadas na saída do tambor para leitos de bagaço de cana, ainda que o ar não tenha sido saturado em quaisquer tambores, tipo de partícula ou vazões de ar;
- Quanto aos perfis espaciais de temperatura e umidade do leito, a parede do leito representa importante mecanismo em sobre a transferência de calor em tambores pequenos, independentemente da vazão de ar. Os mecanismos de transferência de calor por convecção na superfície do leito são secundários e pouco contribuem para baixas vazões de ar. Atingiu-se equilíbrio térmico antes do equilíbrio mássico, de modo que o transporte de massa passa a ser isotérmico a partir de determinados instantes, distintos para cada dimensão de tambor e tipo de partícula;
- O número de Biot de massa clássico foi calculado para todos os casos, acusando ausência de resistências externas somente em leito de sílica gel, para todos os tambores e alta vazão de ar no sobre espaço, devido à forte resistência ao transporte de massa por difusão no interior do leito decorrente do baixo coeficiente efetivo de difusão massa. Para os demais leitos, tambores

e vazões, resistências equivalentes foram observadas e relacionadas ao desenvolvimento de perfis de umidade no interior do leito;

- Números de Biot modificados foram calculados conforme apresentados na Seção 4 introduzindo-se um fator de correção referente à posição radial que possibilitou observar que com o aumento da profundidade de um leito de sílica gel, para altas vazões de ar, , as resistências internas são muito intensas e governam o transporte de massa para tempos elevados de simulação;
- O modelo foi validado e ajustes satisfatórios foram obtidos entre perfis experimentais e simulados, evidenciando a potencialidade do modelo proposto em representar os transportes simultâneos de calor e massa em tambores horizontais estáticos parcialmente preenchidos por partículas orgânicas e inorgânicas.

CAPÍTULO 6. BALANÇOS PARA CULTIVO SÓLIDO

6.1. Introdução

O cultivo em estado sólido (CES) é entendido como o crescimento de uma ou mais culturas sobre partículas com conteúdo de água suficiente para o crescimento e desenvolvimento do microrganismo e em ausência de gotejamento. Deste processo, também conhecido como *fermentação em estado sólido*, obtém-se compostos de alto valor agregado, tais como ácidos orgânicos (DEZAM et al., 2017; DESSIE et al., 2018; BAI et al., 2020), pigmentos (SRIANTA et al., 2016; PENGNOI et al., 2017) e enzimas (ERGUN; UREK, 2017; IDRIS et al., 2017; MARQUES et al., 2018). Ressalta-se que o rendimento e a estabilidade de compostos são apreciáveis, assim como o custo-benefício da utilização de resíduos provenientes da agroindústria como principais fontes de carbono e nitrogênio.

Modelos matemáticos têm sido utilizados para predição e monitoramento de variáveis de interesse durante o processo, tais como a temperatura e a umidade do leito de partículas. Os modelos mais clássicos propostos para representar processos de CES foram propostos para biorreatores de leito empacotado e geralmente assumem que o ar soprado a partir da base do equipamento não provoca o ressecamento das partículas, já que é introduzido saturado de vapor d'água. Esta consideração é uma aproximação razoável que tem mostrado resultados razoavelmente bons (SAUCEDO-CASTAÑEDA et al., 1990; SANGSURASAK; MITCHELL, 1995; 1998; MITCHELL et al., 1999; ASHLEY; MITCHELL; HOWES, 1999; FANAEI; VAZIRI, 2009; CUNHA et al., 2019); no entanto, pesquisas mostraram também que o ressecamento do leito torna a representação matemática mais realística quando aumentos consideráveis de temperatura são observados, pois leva ao aumento da capacidade de saturação da fase gasosa, favorecendo eventos de evaporação e alterando a disposição de água no meio, que é um fator limitante para o êxito do processo (VON MEIEN; MITCHELL, 2002; CASCIATORI et al., 2016).

Os modelos reportados pela literatura para tambores comumente assumem a rotação contínua durante o processo. O modelo de Stuart e Mitchell (2003) foi proposto para um tambor rotativo e validado com dados experimentais de Stuart et al. (1999) em cultivo sólido de *Aspergillus oryzae* em leito de farelo de trigo sob rotação contínua

a 10 e 50 rpm. Os autores apresentaram balanços de energia, massa e predições de conteúdo de biomassa ao longo do tempo. Schutyser et al. (2003) estenderam sua investigação sobre mistura e movimentação de partículas de trigo em tambor rotativo para os transportes simultâneos de calor e massa, já que água era atomizada sobre a superfície do leito durante o processo. Os autores utilizaram dados experimentais para estimativa de parâmetros de transporte e as predições do modelo são discutidas com foco no controle das variáveis de processo. Wang et al. (2010) apresentaram um modelo que contempla o transporte de massa em leito de talos de sorgo em presença de *Saccharomyces cerevisiae* TSH-SC-1 em cultivo sólido anaeróbico, também sob agitação constante. Estes foram os únicos modelos encontrados na literatura aplicáveis a cultivo sólido em biorreatores de tambor. Em comum, observa-se que todos admitem rotação contínua, cuja aplicação pode favorecer a dissipação de calor, porém, requer-se cautela pois as estruturas fisiológicas do microrganismo podem sofrer danos irreparáveis devido ao cisalhamento excessivo (RAGHAVARAO; RANGANATHAN; KARANTH, 2003). Grajales (2014) obteve bons resultados em termos de atividades enzimáticas sob regimes intermitentes de rotação após cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em bagaço de cana e farelo de trigo disposto em tambor rotativo em graus de enchimento de até 0,5. Tada et al. (2019) discutiu sobre a importância das rotações na dissipação de calor em tambores rotativos parcialmente preenchidos por esse tipo de substrato, em acordo com os resultados e proposições de Schutyser et al. (2001). Assim, além dos fenômenos envolvidos durante os eventos de rotação, é importante se conhecer a distribuição espacial das variáveis de interesse durante os períodos estáticos em processos sob rotação intermitente.

Este capítulo apresenta a proposição de um modelo a uma fase para representar o cultivo sólido em um biorreator de tambor para CES durante a fase estática do processo. Utilizou-se do modelo proposto para leitos sem reação proposto e verificado no Capítulo 5, ao qual foi adicionado um termo que representa o calor gerado pelo microrganismo proveniente de suas atividades metabólicas. Para tanto, utilizou-se de parâmetros cinéticos que podem ser obtidos de ajuste de dados experimentais de quantificação de biomassa (GOMES, 2015; SAITHI et al., 2016), teor de proteínas (CASCIATORI, 2015) ou a cinética de gases de respiração (CUNHA et al., 2019) à equação logística clássica, que é uma maneira empírica e muito usual para se representar o crescimento do microrganismo (MITCHELL et al., 2004; FANAEI; VAZIRI, 2009). Neste estudo de caso, optou-se pela utilização da cinética de liberação

de gás carbônico. O modelo foi validado a partir de dados experimentais de temperatura e umidade durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b e um meio composto por bagaço de cana e farelo de trigo, cuja combinação de substrato e microrganismo favorece a produção de celulases em acordo com investigações prévias deste grupo de pesquisa (ZANELATO et al., 2012; GOMES, 2015; PEREZ; CASCIATORI; THOMÉO, 2019).

6.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste capítulo estão apresentados a seguir:

- Propor balanços de massa e energia para o leito em presença de microrganismo;
- Obter parâmetros de crescimento fúngico a partir da cinética de liberação de gás carbônico durante o cultivo;
- Coletar perfis de temperatura e umidade durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambor horizontal estático, bem como dados experimentais de umidade e temperatura do gás escoante;
- Verificar o modelo proposto em comparação com os perfis experimentais de temperatura e umidade.

6.3. Materiais e métodos

6.3.1. Cultivo em estado sólido em tambor horizontal

a. Microrganismo, substrato e solução de esporos

Utilizou-se do fungo termofílico *Myceliophthora thermophila* I-1D3b, potencial excretor de enzimas celulolíticas e hemicelulolíticas de interesse industrial e objeto de pesquisa de trabalhos já desenvolvidos por este grupo de pesquisa (ZANELATO, 2012; CASCIATORI, 2011; 2015; PEREZ; CASCIATORI; THOMÉO, 2019). A cepa foi mantida sob a superfície de meio de cultivo Potato Ágar-Dextrose (PDA) previamente autoclavado (121 °C, 1,1 atm, 20 minutos), solidificado e disposto em tubos de ensaio. Os tubos foram mantidos sob refrigeração.

Frascos Erlenmeyer contendo meio PDA foram autoclavados e solidificados em temperatura ambiente, após o que uma fração de células dos tubos de ensaio foram transferidas para a superfície do meio. Os frascos foram levados à câmara BOD a 45 °C, onde permaneceram por 96 horas. Decorrido este tempo, a solução de esporos foi preparada adicionando-se solução nutriente autoclavada e resfriada [0,35 % (m/v) de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 0,3 % (m/v) de KH_2PO_4 ; 0,05 % (m/v) de $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$; 0,05 % (m/v) de CaCl_2 e 0,1 % (v/v) de Tween 80, ajustado a pH 5] à superfície do meio cultivado e raspando-a gentilmente com uma alça de platina. A alíquota de 0,1 mL foi levada para contagem de esporos em câmara de Neubauer, cuja concentração foi ajustada para 10^7 esporos/g de sólido seco em relação à massa de substrato orgânico utilizado no CES. Como substrato, utilizou-se uma mistura entre bagaço de cana (BC) e farelo de trigo (FT) na proporção 7:3 em peso (7BC:3FT), tal como recomendado por Zanelato et al. (2012) e utilizado posteriormente por Gomes (2015), Casciadori et al. (2016) e Perez, Casciadori e Thoméo (2019). As partículas secas foram colocada em embalagens plásticas de polipropileno e levadas para autoclavagem. Para os tambores grande, médio e pequeno, massas de sólidos secos de 1050, 341 e 66,5 g foram requeridas para preenchimento de 50 % de seus respectivos volumes internos.

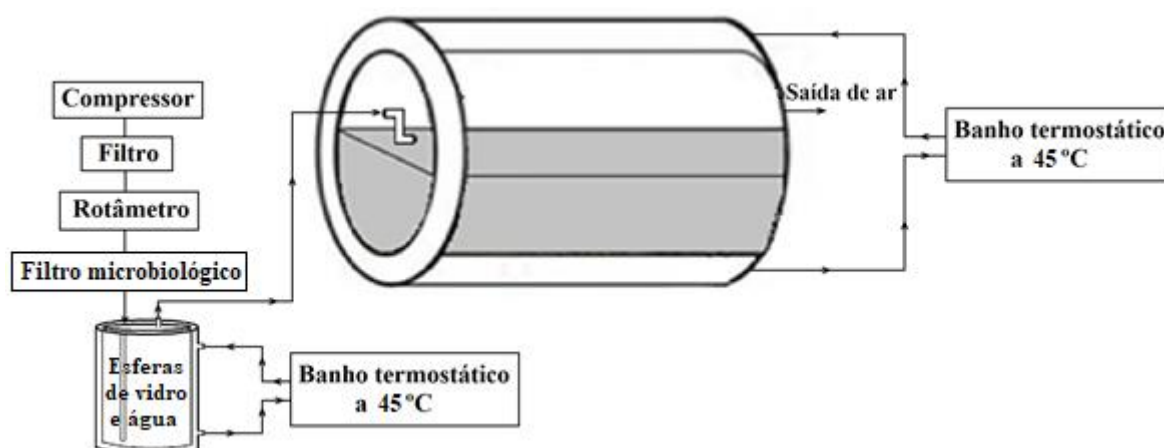
b. Tambores horizontais

Os ensaios de cultivo em estado sólido (CES) foram conduzidos nos três tambores de diferentes dimensões já apresentados no capítulo anterior e referenciados como tambores pequeno (10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento), médio (20 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento) e grande (31 cm de diâmetro e 74 cm de comprimento).

Assim como apresentado no capítulo anterior, os tambores utilizados para CES também possuíam camisa externa para refrigeração, por onde circulava água fornecida por um banho termostático mantido em temperatura controlada de 45 °C, e a aeração era feita por um orifício em uma das tampas, localizado a 2 cm da superfície do leito de partículas. O escoamento de ar também foi admitido como paralelo à superfície do leito, e o ar era recolhido na tampa oposta, que possuía um orifício de igual tamanho. Embora se tenha conhecimento de que a vazão de ar precisa ser ajustada a depender das dimensões do equipamento, o fluxo de 5 L/min foi mantido em todos os ensaios, independentemente das dimensões dos tambores. Como

diferencial em relação aos ensaios experimentais apresentados no capítulo 5, o ar utilizado em cultivo sólido era feito passar por um filtro para retirada de impurezas grosseiras e por um rotâmetro, através do qual se ajustava a vazão requerida de 5 L/min. Após isso, o ar passava por um filtro microbiológico e seguia para a coluna empacotada para acondicionamento do ar. As condições requeridas pelo cultivo sólido neste estudo de caso era 75 – 96 % de umidade relativa (UR) a 45 °C. Para tanto, o ar era feito passar através de um cilindro vertical encamisado de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento recheado por esferas de vidro e água, em escoamento ascendente. Água a 45 °C circulava através da camisa desse cilindro, mantendo-o em temperatura constante. As esferas de vidro atuavam como barreira física para impedir que água líquida fosse arrastada para o interior do sistema fermentativo e também para que o tempo de retenção de ar no cilindro fosse maior. O ar deixava este cilindro com uma carga de vapor d'água a 45 °C, que era verificada utilizando-se um higrômetro manual na saída do cilindro, após o que adentrava o tambor horizontal. O cilindro para condicionamento de ar e o tambor horizontal foram previamente autoclavados a 121 °C e 1,1 atm por 20 minutos. Na Figura 6.1 está apresentado uma ilustração do aparato experimental utilizado.

Figura 6.1 – Aparato experimental utilizado em ensaios de cultivo sólido em tambor horizontal.



FONTE: Elaborado pela autora.

c. Inoculação, cultivo e monitoramento das variáveis operacionais de interesse

A inoculação da mistura 7BC:3FT previamente autoclavada em embalagens plásticas foi feita em câmara de fluxo com exaustão adicionando-se a solução de

esporos em quantidade suficiente para que a concentração fosse de 10^7 esporos/g de sólido seco e a umidade das partículas atingisse 3 kg/kg de sólido seco. A mistura foi revolvida manualmente para homogeneização e disposta no tambor horizontal, após o que o mesmo foi lacrado e levado para a sala de fermentadores, na qual o banho termostático e o cilindro para condicionamento de ar já se mantinham nas condições operacionais. Termopares do tipo T foram dispostos em meio ao leito de partículas para monitoramento da temperatura. O ar que saía do tambor escoava através de um tubo isolado termicamente para canalização do fluxo até um cilindro vertical empacotado com esferas de vidro mantido a 1,5 °C para diminuição de seu conteúdo de umidade conforme indicado pelo catálogo operacional do analisador de gases. Após isso, o fluxo gasoso foi levado até um analisador de gases Magellan Biotech (Magellan Instruments, Reino Unido) que, assim como os termopares, estava conectado a um sistema de aquisição de dados COMPAQ-DAQ (National Instruments, Austin, USA) gerenciado por uma rotina do software LabView (National Instruments, Austin, USA). Os sinais elétricos transmitidos pelos sensores eram convertidos em % CO₂ para gases e °C para temperatura.

Quando conveniente, a tubulação que levava o ar de saída do biorreator até o cilindro para resfriamento era desconectada deste último para monitoramento manual da umidade do gás de saída utilizando-se um higrômetro Minipa MTH-1362. Uma pequena perfuração foi feita nessa tubulação, suficiente para que a bainha do termopar fosse inserida perpendicularmente ao fluxo de ar. Para evitar possíveis perdas de fluxo de ar, a perfuração já com o termopar instalado foi vedada com silicone. A saída deste termopar foi também conectada ao sistema de aquisição de dados para monitoramento da temperatura do gás de saída do tambor.

O tambor em pequena escala possui uma tampa frontal construída em acrílico dividida através de um corte horizontal no centro radial. Essa tampa foi utilizada durante cultivo sólido neste tambor. A cada 24 horas, o tambor foi desconectado do aparato experimental e levado à câmara de fluxo com exaustão para retirada de amostras para determinação de umidade. As amostras foram cuidadosamente coletadas, a fim de que não fossem provocadas perturbações intensas na disposição das partículas. As amostras foram revestidas com folha de alumínio e armazenadas em recipiente de vidro. Ao fim da coleta de amostras, o tambor foi levado novamente a constituir o aparato experimental para CES. O mesmo procedimento de coleta de amostras foi realizado para CES em tambor em média e grande escalas, exceto pelo

fato de que as amostras em tambor grande eram coletadas sem que o mesmo fosse levado à câmara de fluxo com exaustão. Os dados experimentais de umidade foram expressos em base úmida quando seguidos pelo símbolo de porcentagem (%), ou em base seca, quando seguidos pela unidade kg/kg de sólido seco.

Duas condições ambientais foram estabelecidas em ensaios em tambor pequeno, enquanto que apenas uma foi conduzida em tambores médio e grande, com o intuito de verificar o modelo matemático proposto que será apresentado mais adiante. No Quadro 6.1 estão apresentadas as condições experimentais utilizadas em ensaios de CES nos tambores horizontais. O intervalo de 96-100% de umidade relativa é apresentado e corresponde à variação de UR verificada durante os ensaios de cultivo sólido. Para as simulações, UR = 96 % foi empregada.

Quadro 6.1 – Condições experimentais aplicadas e monitoramento em ensaios de cultivo em estado sólido em tambores horizontais de pequena, média e grande escalas.

	Pequena escala (10 cm × 20 cm)		Média escala (20 cm × 40 cm)	Grande escala (31 cm × 74 cm)
Ensaio	1	2	3	4
<i>Condições experimentais</i>				
Temperatura da parede	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C
Temperatura do ar de entrada	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C
Umidade relativa do ar de entrada	75 %	96 - 100 %*	75 %	96 - 100 %*
<i>Monitoramento de variáveis</i>				
Temperatura do leito	x	x	x	x
Umidade do leito	x	x	x	x
Cinética de gases		x	x	x
Temperatura do ar de saída		x	x	x
Umidade do ar de saída		x	x	x

* variação de UR verificada durante os ensaios experimentais. FONTE: Elaborado pela autora.

A cada ensaio de cultivo sólido em tambor horizontal, três cultivos em embalagens plásticas eram realizados. Para tanto, embalagens plásticas de polipropileno com 20 cm de comprimento e 12 cm de largura recebiam 5 g de substrato seco, e tinham, em sua abertura, bocais de PVC e um tampão de algodão, formando um conjunto que impedia maiores contaminações e permitia as trocas gasosas. Esse conjunto foi levado à autoclave em condições supracitadas e atuava como ensaio controle, de modo que o desempenho visual do cultivo em biorreatores deveria ser semelhante àqueles em escala de embalagens plásticas. Após o resfriamento da embalagem, a solução de esporos suspensa em solução nutriente foi adicionada ao substrato seco de modo que a concentração final de esporos foi de 10^7 esporos/g de sólido seco e a umidade final do material sólido foi de 3 kg/kg de sólido seco. As embalagens foram revolvidas manualmente para homogênea distribuição de umidade no sólido e levadas a acondicionamento em câmara BOD a 45 °C, onde foram mantidas por 96 horas.

d. Extração da solução enzimática bruta

Ao final do cultivo, dividiu-se o leito em cinco frações axiais de mesmo comprimento. Cada fração foi transferida cuidadosamente para embalagens plásticas e adicionada de água destilada em temperatura ambiente na concentração de 20 mL/g de sólido seco. Após isso, as embalagens foram fechadas, levadas a uma câmara de agitação orbital e mantidas sob agitação a 100 rpm por 30 min. O material foi filtrado em pano, inicialmente, para a retirada dos materiais grosseiros, após o que o sobrenadante foi filtrado a vácuo utilizando-se papel filtro. O líquido resultante foi centrifugado a 10000 rpm por 15 min a 5 °C e o sobrenadante foi tomado como solução enzimática bruta.

e. Quantificação de atividade enzimática de endoglucanase (CMCase)

A atividade enzimática de endoglucanase foi quantificada como indicativo global da produção de celulasas pelo fungo. Para tanto, seguiu-se metodologia apresentada por Ghose (1987), iniciando-se com a reação entre 0,1 mL da solução enzimática e 0,9 mL de solução de carboximetilcelulose (CMC, Sigma) em tubo de ensaio. Os tubos

foram mantidos a 60 °C em banho termostático durante 10 minutos, após o que a reação foi interrompida pela adição de 1 mL de reagente DNS (ácido-1,3-dinitrosalicílico). Prosseguiu-se com a quantificação de açúcares redutores (MILLER, 1959) levando-se os tubos a banho em ebulição por 10 minutos, seguido de banho de gelo para paralisar a reação. Após essa etapa, as amostras adquirem coloração em tons castanhos, cuja intensidade é diretamente proporcional à concentração de açúcares redutores no meio. Por fim, 8 mL de água destilada foram adicionados a cada tubo e as amostras foram levadas para leitura de absorbância em espectrofotômetro a 540 nm. Procedimento similar foi feito para amostras controle, nas quais o extrato enzimático foi adicionado após a paralisação da reação pela adição de reagente DNS, ou seja, não houve ação da enzima e liberação de açúcares. Portanto, essa amostra mantinha coloração amarela, característica do reagente DNS. As atividades enzimáticas foram expressas em unidade de atividade enzimática (U) por mL, interpretada como a quantidade de enzima requerida para liberar 1 µmol de glicose por minuto de reação por mL de extrato enzimático.

6.3.2. Balanços de massa e energia

Os balanços de massa e energia foram propostos para prever as variações na temperatura e na umidade do leito de partículas ao longo do tempo durante o cultivo sólido e é baseado naquele apresentado e validado no Capítulo 5. Para se representar a geração de calor associada às atividades metabólicas do microrganismo (Q_g), um termo foi adicionado ao balanço de energia, apresentado na Eq. (6.1). O balanço de massa é similar àquele apresentado no capítulo anterior, e está apresentado na Eq. (6.2).

$$\rho_{bed} C_{p_{bed}} \frac{\partial T}{\partial t} = K_0 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \left[(C_{p_{ar}} - \lambda f) \rho_{ar} V_r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q_g \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right] + \frac{\rho_{ar}}{\rho_s} V_r f \frac{dT}{dr} \quad (6.2)$$

O calor de geração Q_g foi expresso da seguinte forma:

$$Q_g = \phi \frac{dY}{dt} \quad (6.3)$$

em que ϕ denota um fator de conversão de CO₂ liberado em energia e Y é a concentração de CO₂ liberado pelo microrganismo. A cinética de crescimento (dY/dt) é dada pela equação logística clássica, apresentada na Eq. (6.4).

$$\frac{dY}{dt} = \mu Y \left(1 - \frac{Y}{Y_{\max}}\right) \quad (6.4)$$

em que μ é a taxa específica de liberação de CO₂ e $Y_{\max}$ é a concentração máxima de CO₂. Estes parâmetros foram obtidos ajustando-se o modelo logístico não linear à cinética de liberação de CO₂ coletada experimentalmente, conforme apresentado por Cunha et al. (2019). A sensibilidade do crescimento com a temperatura foi assumida conforme sugerido por Sangsurasak e Mitchell (1998) e está apresentada na Eq. (6.5). Nesta relação, μ é nulo se $T \geq T_{\max}$ e é imposto como igual a μ_{opt} se $T \leq T_{\text{opt}}$.

$$\mu = \left[\frac{b + (T_{\max} - T_{\text{opt}})}{(T_{\max} - T_{\text{opt}})} \right] \left[\frac{\mu_{\text{opt}}(T_{\max} - T)}{b + (T_{\max} - T)} \right], \quad \text{para } T_{\text{opt}} < T < T_{\max} \quad (6.5)$$

Algumas hipóteses foram levadas em consideração para solução das Eqs. (6.1) e (6.2), quais sejam: temperatura do ar constante a 45 °C no sobre espaço ao longo do comprimento do tambor; escoamento do ar paralelo à superfície do leito de partículas e igualmente distribuído em toda a área superficial do leito; densidades e calores específicos do ar e do leito assumidos constantes; velocidade do ar na direção radial, V_r , considerada constante; a presença do microrganismo não provocou variações nas propriedades do leito; e negligenciou-se a possível liberação de água durante o cultivo.

As condições iniciais e de contorno para solução das Eqs. (6.1) e (6.2) são as mesmas apresentadas no capítulo anterior, incluindo-se os balanços de massa e energia para a fase gasosa escoante no sobre espaço. Para a Eq. (6.4), assume-se que $X = X_0$ no tempo inicial t_0 .

Os balanços de massa e energia foram solucionados simultaneamente. Os termos de variação espacial foram discretizados de igual tamanho utilizando-se o método das diferenças finitas e as equações diferenciais ordinárias resultantes foram escritas em linguagem MATLAB® (MathWorks, Natick, Massachusetts, USA) e

solucionadas simultaneamente pelo método das fórmulas de diferenciação com passo da variável tempo definido pelo uso do solucionador *ode15s*.

6.3.3. Parâmetros cinéticos requeridos pelo modelo

Na Tabela 6.1 estão apresentados os parâmetros cinéticos requeridos pelo modelo e as variáveis de processo. Os parâmetros físicos e térmicos utilizados são os mesmos que aqueles apresentados no Capítulo 5.

Tabela 6.1 – Parâmetros cinéticos e de processo requeridos para solução dos balanços de massa e energia propostos para predizer perfis de temperatura e umidade durante cultivo sólido em tambor horizontal parcialmente preenchido.

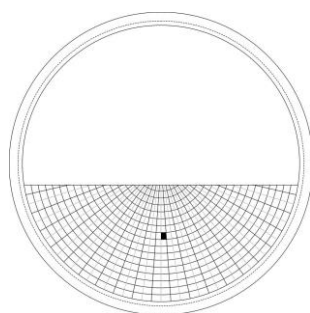
Símbolo	Descrição	Valor	Referências ou comentários
<i>Variáveis de processo</i>			
T_0	Temperatura inicial do leito		
T_g	Temperatura inicial do ar de entrada	45 °C	Condições operacionais ótimas para crescimento do fungo termofílico utilizado neste estudo de caso
T_w	Temperatura da parede do tambor		
X	Umidade inicial do leito	3 kg/kg de sólido seco	
X_g	Umidade inicial do ar de entrada	variável	Quadro 6.1
<i>Parâmetros cinéticos</i>			
Φ	Fator de conversão de mol de CO ₂ liberado em energia	9,3 KJ/mol	Cunha et al. (2019)
Y_0	Quantidade inicial de CO ₂	Tabela 6.2	Obtidos neste trabalho
$Y_{\max}$	Quantidade máxima de CO ₂		
M	Taxa específica de liberação de CO ₂	Eqs. (6.5) a (6.7)	Sangsurasak e Mitchell (1998)
μ_{opt}	Taxa máxima de liberação de CO ₂	Tabela 6.2	Obtido neste trabalho

FONTE: Elaborado pela autora.

6.3.4. Simulações e verificação do modelo

Os perfis temporais de temperatura e umidade do leito (T e X, respectivamente), foram extraídos em uma posição radial e angular específica em que o sobreaquecimento pudesse ser verificado. Tal posição é apresentada na Figura 6.2. Assim como os perfis de T e X, os perfis temporais de temperatura e umidade do gás (Tg e Xg, respectivamente), são mostrados para cada posição axial dos leitos de partículas dispostos em cada um dos três tambores para as condições de introdução de ar de 75 e 96 % de umidade relativa.

Figura 6.2 – Posição interna na qual os perfis temporais de temperatura e umidade são apresentados em resultados em simulação.



FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis espaciais de T e X são mostrados para os instantes $t = 24$ h, correspondente ao instante em que maior atividade respiratória foi observada para condições ideais de cultivo, como será mostrado na seção Resultados e discussão. Tais perfis foram extraídos na posição axial intermediária ($0,4 \leq z/L \leq 0,6$).

A verificação do modelo foi feita comparando-se os perfis de temperatura do leito e umidade das partículas com os respectivos perfis preditos pelo modelo. Como indicadores de ajuste foram utilizados o coeficiente de correlação (R^2) e o erro médio quadrado (RMSE).

6.4. Resultados e discussão

6.4.1. Ensaios de cultivo sólido de *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em tambores horizontais

a. Avaliação qualitativa

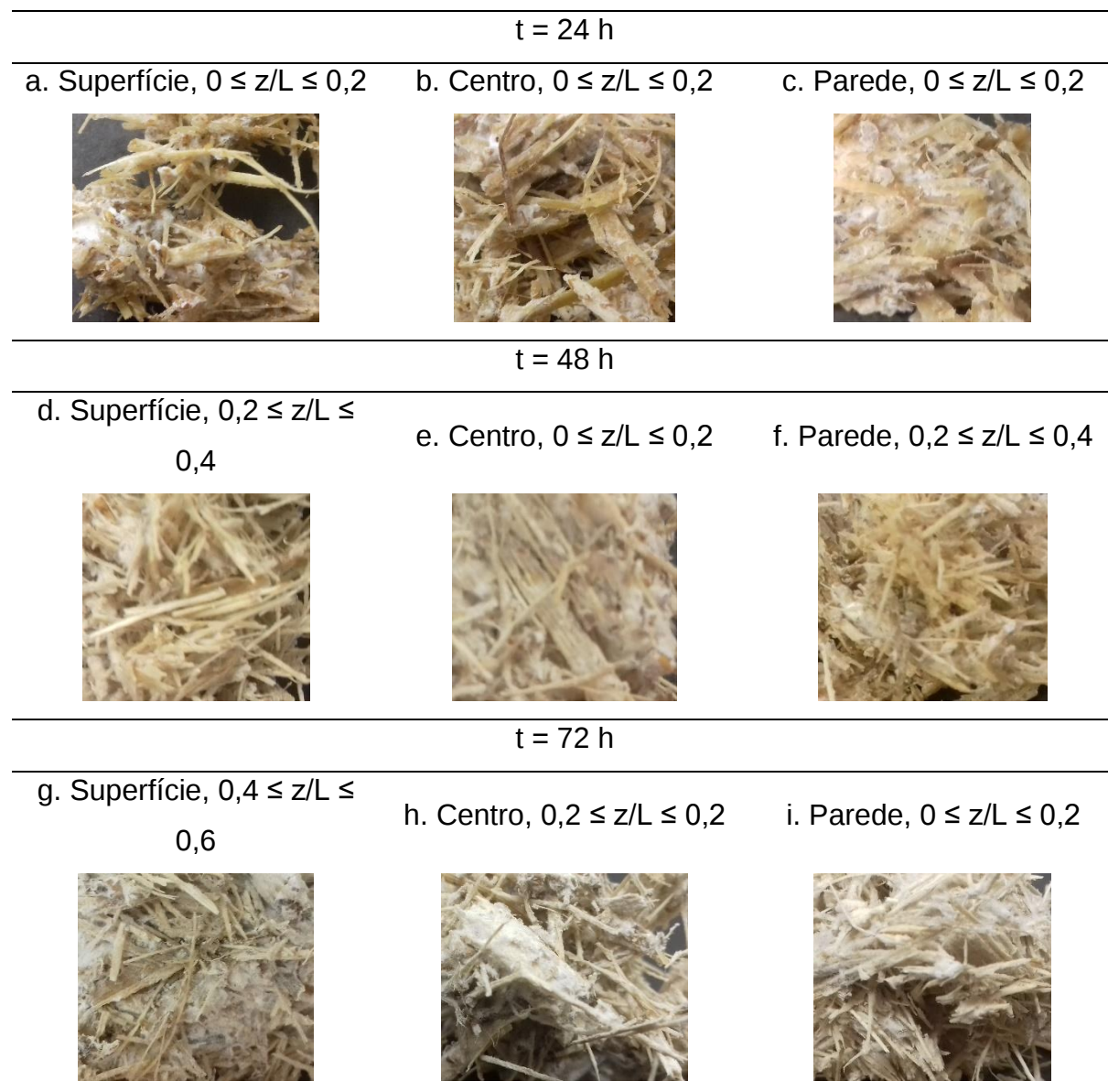
Nesta subseção são apresentadas as avaliações visuais de crescimento em ensaios de cultivo sólido conduzidos em tambores horizontais de 10, 20 e 30 cm de diâmetro interno seguindo-se as condições apresentadas previamente no Quadro 1.

Na Figura 6.3 estão apresentadas fotografias de amostras coletadas em diferentes posições do leito e a cada 24 horas para tempos entre 24 e 72h para o tambor de 10 cm de diâmetro com introdução de ar a 5 L/min e 75 % de umidade relativa. A umidade do ar foi verificada a cada 24 horas e variou de 69,12 a 78,51 %.

As amostras coletas decorridas as primeiras 24 horas de ensaio apresentaram aparência satisfatória e similar à do ensaio controle conduzido em embalagens plásticas. O substrato tinha aspecto úmido e o micélio fúngico parecia tomar espaço entre os poros do leito. O crescimento fúngico foi visivelmente uniforme em todas as posições analisadas. Em $t = 48$ h, o substrato coletado na superfície do leito apresentou aspecto visivelmente mais seco, com partículas mais livres e sem a formação de aglomerados, como pode ser visto na Figura 5.4.d. As amostras de centro e parede do tambor também apresentaram aspecto de partículas com decréscimo de umidade. Visualmente, o crescimento de micélio fúngico pareceu ser inferior em comparação com o ensaio controle.

Em $t = 72$ h, observou-se acúmulo de água líquida junto à parede do tambor, que pode ter sido ocasionado pelo não isolamento térmico das extremidades axiais do tambor. A mudança de textura das partículas devido à perda de água foi também perceptível e observou-se não uniformidade espacial de micélio fúngico nas posições analisadas. A posição de parede apresentou crescimento insatisfatório, conforme apresentado na Figura 5.4.i. Grajales (2014) também observou este acontecimento em cultivo de *M. thermophila* I-1D3b sobre a mesma mistura de substratos utilizada no presente trabalho em tambor de 30 cm de diâmetro e 74 cm de comprimento, com reporte de presença de água líquida junto à parede do tambor. Na ocasião, a autora associou a água em excesso à possível condensação de vapor d'água na fase gasosa. Resultados obtidos por esse grupo de pesquisa mostraram que a cepa I-1D3b de *M. thermophila* requer aspectos nutricionais específicos para que apresente crescimento em cultivo submerso (SILVA, 2017), de modo que o seu crescimento não é esperado em presença de partículas sólidas de bagaço de cana e farelo de trigo com água líquida não retida pela matriz sólida. Assim, a presença de água líquida pode ter inibido o crescimento do microrganismo na posição de parede e extremidades axiais.

Figura 6.3 – Fotografias de amostras coletadas durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambor de 10 cm de diâmetro com aeração a 5 L/min e 75 % de umidade relativa, a cada 24 horas em diferentes posições do leito para $24 \leq t \leq 72$ h.

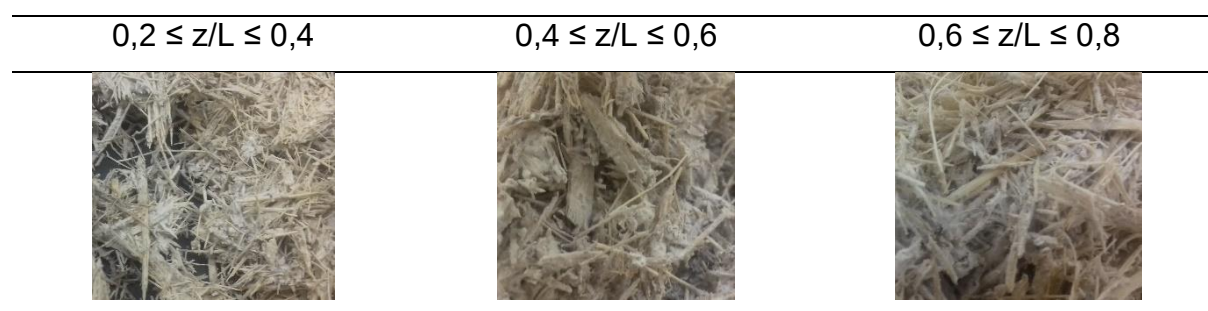


FONTE: Arquivo pessoal. Elaborado pela autora.

Ao final do cultivo em $t = 96$ h, verificou-se distribuição uniforme de umidade em todas as posições radiais e angulares do leito. Por esse motivo, decidiu-se dividir o leito de partículas em fatias axiais, com determinação de umidade de cada fração axial e sem distinção entre as posições radiais e angulares. O desvio padrão médio máximo entre doze amostras de uma mesma posição axial foi de 0,24 kg/kg de sólido seco, o

que sustenta a metodologia utilizada. As fotografias de amostras coletadas ao final do cultivo estão apresentadas na Figura 6.4. O aspecto do substrato era de visivelmente seco em todas as posições axiais. Casciatori et al. (2015) apresentou resultados sobre a cinética de dessorção de partículas de bagaço de cana e de farelo de trigo em umidades relativas controladas. Ao final de quatro dias a 70 % de umidade relativa, os autores obtiveram umidades dos sólidos em torno de 13 e 17 % para bagaço de cana e farelo de trigo, respectivamente. Fazendo-se uma interpolação linear simples entre os dados apresentados pelos autores, a umidade do bagaço de cana em $t = 96$ h a 75 % de umidade relativa seria de 13,25 % e o farelo de trigo apresentaria umidade de 17,25 %, enquanto que a umidade experimental verificada no presente trabalho foi de aproximadamente 30 % em base úmida. Assim, infere-se que a biomassa fúngica possa atuar como uma barreira ao transporte efetivo por difusão de massa através do leito de partículas.

Figura 6.4 – Fotografias de amostras coletadas ao final de 96 h de cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambor de 10 cm de diâmetro com aeração a 5 L/min e 75 % de umidade relativa.



FONTE: Arquivo pessoal. Elaborado pela autora.

Crescimento insatisfatório foi também verificado no ensaio em tambor com 20 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento com introdução de ar a 75 % de umidade relativa. Decorridas 96 horas de cultivo, o tambor foi aberto para coleta de amostras para determinação de umidade local. Neste momento, observou-se que a superfície do leito estava visivelmente ressecada. Na posição axial mais próxima à saída de ar ($0,8 < z/L \leq 1$), a umidade era de 58,3 %. O aumento de temperatura do leito devido à atividade metabólica do microrganismo aliado às interações com a fase gasosa promovem aumento da temperatura da fase gasosa, o que, por sua vez, eleva a capacidade de retenção de vapor d'água pelo gás, provocando o ressecamento da superfície do leito de partículas. O intenso ressecamento das partículas não foi

observado em outras posições radiais do leito, para as quais o valor mínimo de umidade obtido foi de 68,1 %.

Como consequência do ressecamento das partículas, o crescimento do microrganismo foi visualmente insatisfatório na superfície de todo o leito, pois a atividade de água é fator limitante para o crescimento de *M. thermophila*. Supondo-se que a umidade relativa do ar tenha se mantido em 75 % durante todo o tempo de cultivo, é esperada a redução em torno de 36 % sobre o rendimento de atividade enzimática de endoglucanases ao final do processo (Casciadori et al., 2015). Na Figura 6.5 estão apresentadas fotografias de amostra de leito do ensaio 4 coletadas em diferentes posições do leito: superfície, centro e próximo à parede. Duas fotografias são apresentadas para cada posição radial em diferentes posições axiais, o que evidencia que o crescimento não foi uniforme. Observe-se que a biomassa fúngica é notável em algumas posições do leito, e é ausente nas amostras de superfície.

Figura 6.5 – Fotografias de amostras da matriz sólida de bagaço de cana e farelo de trigo (7:3 m/m) após cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambor horizontal estático de 20 cm de diâmetro interno e 40 cm de comprimento durante 96 horas em diferentes posições no leito ($Q = 5 \text{ L/min}$; $UR = 75 \%$; grau de enchimento = 0.5).

Superfície	Centro do leito	Próximo à parede do tambor
		
0,4 < z/L ≤ 0,6	0,4 < z/L ≤ 0,6	0 < z/L ≤ 0,2
		
0,6 < z/L ≤ 0,8	0 < z/L ≤ 0,4	0,4 < z/L ≤ 0,6

FONTE: Arquivo pessoal. Elaborado pela autora.

A superfície do leito foi também caracterizada visualmente como região de alta porosidade devido ao menor conteúdo de água aderido às partículas. Segundo Pandey et al. (2000) e Hölker, Höfer e Lenz (2004), baixas umidades associadas às partículas dificultam a difusão de nutrientes e de oxigênio, o que provoca o acúmulo de metabólitos que podem inibir o crescimento do microrganismo. Nas demais regiões, observou-se a formação de aglomerados de partículas, como apresentado na Figura 6.6, que tinham em comum certa elasticidade perceptível através de tato e se desfaziam com certa dificuldade. Esses aglomerados são semelhantes aos descritos em Tada et al. (2017b), formados durante a mistura de bagaço de cana em um tambor de 30 cm de diâmetro com defletores internos.

Figura 6.6 – Fotografia de um aglomerado de partículas formado durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b sobre partículas de bagaço de cana e farelo de trigo (7:3 m/m) em tambor horizontal de 20 cm de diâmetro interno e 40 cm de comprimento parcialmente preenchido em grau de enchimento 0.5 ($Q = 5$ L/min; UR = 75 %).



FONTE: Arquivo pessoal.

Ainda em tambor de 20 cm de diâmetro, nem todas as amostras de aglomerados possuíam biomassa fúngica visualmente perceptível no seu interior, em especial aquelas mais próximas da parede do tambor. No entanto, água líquida desprendida não foi observada. Estima-se que as forças gravitacionais tenham promovido a compactação do leito, diminuindo sua porosidade e dificultando ainda mais as trocas gasosas em meio ao leito de partículas que, na ocasião, ocorriam por difusão. A espessura do leito no seu centro angular era de aproximadamente 10 cm. A diminuição de porosidade devido à compactação do meio e à umidade das partículas

já foi pontuada também por Hölker, Höfer e Lenz (2004) e Casciatori et al. (2014), respectivamente. Assim, infere-se que a escassa oferta de oxigênio possa ter sido um fator limitante para o crescimento do fungo, como tem sido reportado pela literatura acerca de biomassa fúngica e expressão de enzimas de interesse em cultivo sólido (RAHARDJO et al., 2005; GRAMINHA et al., 2008; RODRÍGUEZ-ZÚNIGA et al., 2011; AMORIM et al., 2011).

A mistura das partículas em momentos estratégicos aliada à aspersão de água sobre o leito de partículas estático podem atuar como mecanismos de prevenção do ressecamento do leito, da formação de aglomerados de partículas e da limitação de oferecimento de oxigênio nas regiões mais profundas. Nagel (2002) aplicou aspersão de água durante um determinado intervalo de tempo sobre um leito de grãos de trigo sob rotação contínua para prevenir o ressecamento das partículas. Os autores verificaram que, durante os momentos sem aspersão, a água fracamente aderida às partículas era redistribuída através do leito, de modo que os gradientes eventualmente desenvolvidos durante a aspersão desapareciam nos momentos sem aspersão de água. Schutyser et al. (2003) misturou um leito de farelo de trigo e verificou que uma boa estratégia para controle da temperatura e umidade das partículas seria a aspersão de água sobre o leito estático seguida de agitação para homogeneização do conteúdo de umidade. A mesma estratégia é recomendada por Tada et al. (2019) para estabilidade térmica de um leito composto por bagaço de cana e farelo de trigo na proporção 7:3 (m/m). Nesse sentido, os efeitos do ressecamento do leito e a formação de aglomerados nas regiões mais profundas poderiam ser minimizados se estratégias de prevenção tivessem sido empregadas.

Os ensaios realizados em tambores pequeno e grande com introdução de ar saturado não apresentaram ressecamento apreciável, com umidade mínima obtida em regiões de superfície do leito de aproximadamente 70 e 71,5 % em tambores pequeno e grande, respectivamente. No entanto, tal decréscimo não pareceu promover impactos negativos sobre o crescimento do fungo, que era visível e homogeneamente bem distribuído ao longo de toda a superfície do leito. No interior do leito, o micélio também pareceu se desenvolver de forma satisfatória. Entre os ensaios em tambores pequeno e grande, observou-se a condensação de vapor d'água na extremidade axial de saída de ar no tambor pequeno, enquanto que o mesmo não foi observado no tambor grande. Com isso, a porção de leito nas proximidades da parede do tambor na última fração axial apresentou crescimento visualmente

insatisfatório em tambor de menor dimensão. Na Figura 6.7 estão apresentadas fotografias obtidas em $t = 96$ h para os dois ensaios em diferentes posições do leito.

Figura 6.7 – Fotografias da mistura entre bagaço de cana e farelo de trigo após 96 horas de cultivo sólido por *M. thermophila* I-1D3b em tambores pequeno e grande em diferentes posições do leito.

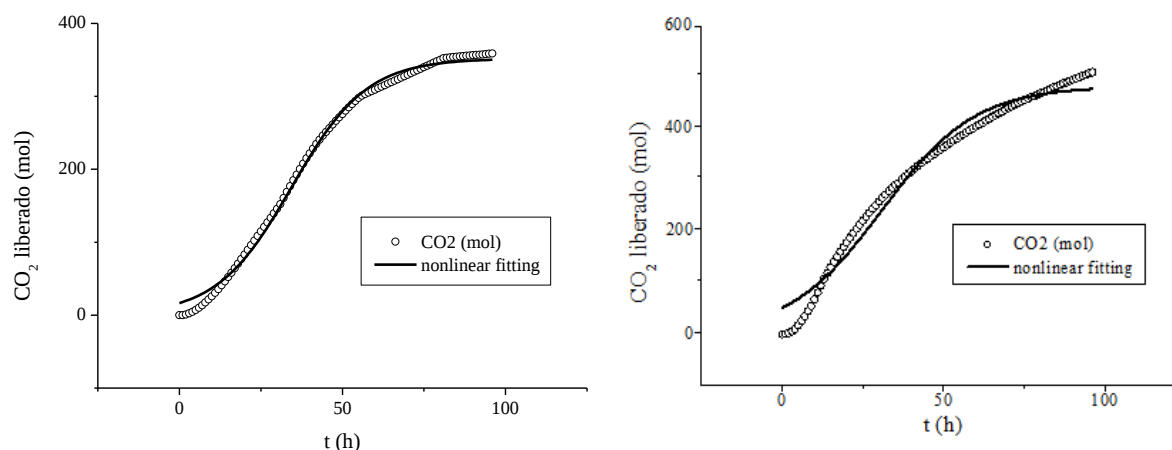
Tambor pequeno	Tambor grande	Tambor grande
Superfície; $0,6 < z/L \leq 0,8$	Superfície; $0,2 < z/L \leq 0,4$	Interior; $0,4 < z/L \leq 0,6$
		

FONTE: Arquivo pessoal. Elaborado pela autora.

b. Avaliação quantitativa: cinética de liberação de CO₂

As cinéticas de liberação de CO₂ foram determinadas para os ensaios a 75 % de UR em tambor médio e a 96-100% de UR em tambores pequeno e grande. O modelo logístico foi ajustado aos dados experimentais para cada ensaio, conforme apresentado na Figura 6.8 para $0 \leq t \leq 96$ h. A qualidade do ajuste foi medida pelo coeficiente de correlação $R^2 \geq 0,97$.

Figura 6.8 – Concentração de CO₂ acumulado liberado durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambores horizontais estáticos parcialmente preenchidos em grau de enchimento 0,5 por matriz porosa de bagaço de cana e farelo de trigo (7:3 m/m) para introdução de ar a (a) 75 % e (b) 96 % de umidade relativa; $Q = 5$ L/min.



(a) UR = 75 %, tambor médio

(b) UR = 96 %, tambor pequeno

FONTE: Elaborado pela autora.

Os parâmetros cinéticos obtidos para cada ensaio estão apresentados na Tabela 6.2. A taxa específica μ_{opt} e a quantidade máxima de CO_2 acumulada liberada, Y_{max} assumiram menores valores quando utilizadas condições não ideais de processo. Tais quedas podem estar associadas à disponibilidade de água. Casciatori et al. (2015) mostraram que partículas de bagaço de cana tem redução em aproximadamente 33% sobre o seu conteúdo inicial de umidade (75 % b.u.) quando armazenadas a 45 °C durante 48 horas em umidade relativa de 70 %. Mais tarde, os resultados em simulação a duas fases de Casciatori et al. (2016) sugeriram que a atividade de água se apresenta como um fator limitante para a expressão do crescimento fúngico em concentração de biomassa, experimentalmente determinada através da quantificação de proteínas totais. No presente trabalho, a leitura da cinética de gases apresenta-se como a expressão direta das variáveis ambientais sobre o crescimento fúngico. Com a taxa específica de crescimento menor em ensaios realizados sob condições não ideais de cultivo, espera-se que a fase logarítmica seja mais longa e então os picos de temperatura devam ser retardados, o que está intimamente relacionado ao metabolismo do microrganismo e não tem relação direta com a capacidade do equipamento de remover calor, como será mostrado a seguir na subseção Simulações. A quantidade máxima de CO_2 liberado acumulado também é menor sob condições de cultivo não ideais. Para simulações e verificação do modelo sob condições ideais, os parâmetros foram assumidos como os valores médios de $\mu_{\text{opt}} = 0,089 \text{ h}^{-1}$, $Y_0 = 8,7 \text{ mols}$ e $Y_{\text{max}} = 443,32 \text{ mols}$ acumulados.

Tabela 6.2 – Parâmetros cinéticos de crescimento de *M. thermophila* I-1D3b em tambores horizontais em diferentes escalas e condições experimentais.

Escola	Y_0 (mols)	Y_{max} (mols)	μ_{opt} (h ⁻¹)	Comentários
Pequena (10 cm × 20 cm)*	9,16	454,88	0,12	$T_g = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; UR = 96-100 %
Média (20 cm × 40 cm)*	8,37	321,76	0,091	$T_g = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; UR = 75 %
Grande (31 cm × 74 cm)*	8,23	431,77	0,11	$T_g = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; UR = 96-100 %

* dimensões dadas em diâmetro × comprimento do tambor. FONTE: Elaborado pela autora.

Assumindo que a cinética de consumo e liberação de gases está intimamente associada com o crescimento do fungo, conforme Wiegant (1992) e Wiegant et al. (1992), os parâmetros cinéticos obtidos através da atividade respiratória podem ser comparados àqueles disponíveis na literatura e determinados a partir da quantificação de biomassa. Gomes (2015) utilizou diferentes métodos para a quantificação de biomassa fúngica de *Myceliophthora thermophila* M.7.7 cultivado em matriz porosa de bagaço de cana e farelo de trigo (7:3 m/m) a 45 °C e 70 % de umidade durante 96 horas. A cinética de crescimento obtida pela determinação de N-acetilglicosamina (N-AG) forneceu $\mu = 0,078\text{ h}^{-1}$, próximo ao apresentado nesta tese. Pela técnica de quantificação de proteínas solúveis, a autora reportou $\mu = 0,127\text{ h}^{-1}$, com incremento de 62 % sobre μ obtido por N-AG. Diante disso, a autora discutiu sobre as incertezas associadas ao método de determinação de proteínas solúveis, atribuindo maior confiabilidade à determinação por N-AG. Casciotori (2015) utilizou o método de determinação de nitrogênio total (Kjeldahl) para a estimativa da cinética de crescimento de *M. thermophila* I-1D3b sobre partículas de bagaço de cana e farelo de trigo (7:3 m/m), e reportou $\mu_{opt} = 0,1\text{ h}^{-1}$, também próximo ao obtido na presente tese.

6.4.2. Simulações

a. Simulações em biorreatores de diferentes dimensões

Nas Figura 6.9 estão apresentados os perfis temporais de temperatura e umidade do meio de cultivo e do ar no sobre espaço durante cultivo de *M. thermophila* I-1D3b em tambores horizontais de 10, 20 e 30 cm de diâmetro, respectivamente, para

as diferentes posições axiais, supondo-se umidade relativa do ar de entrada de 75 % ($X_{g,0} = 0,046$ kg/kg de ar seco) e utilizando-se os parâmetros cinéticos obtidos para tal condição.

Os perfis de temperatura e umidade do leito foram extraídos de uma posição previamente mencionada na Figura 6.2 na seção Materiais e Métodos deste capítulo, na qual aumentos expressivos de temperatura e eventual perda de água eram esperados. Os perfis de temperatura apresentaram picos em aproximadamente 48 h nos tambores pequeno e médio, com maiores temperaturas na primeira fração axial, cuja umidade local é mais baixa em comparação às demais posições axiais (vide perfil de umidade do sólido). Com o ressecamento local, K_0 tende a diminuir drasticamente, dificultando a dissipação de calor do interior do leito em direção às fronteiras. Variações de umidade do sólido amenas ou desprezíveis foram observadas em tambor pequeno e médio, respectivamente, entre a segunda metade axial do tambor, que coincide com variações desprezíveis de temperatura. As maiores temperaturas nos tambores pequeno e médio foram de 45,6 e 47,3 °C, respectivamente. Após atingir a temperatura máxima, as temperaturas em ambos os tambores decresceram até a temperatura ideal de cultivo em $t = 96$ h.

Os perfis de temperatura no interior do tambor grande apresentaram comportamento distinto, uma vez que variações axiais não foram observadas e a temperatura máxima foi atingida em $t = 30$ h. Estima-se que o processo pudesse atingir temperaturas ainda maiores se a taxa específica de liberação de CO_2 , μ , não dependesse da temperatura. Nessa condição, à medida em que T atinge $T_{\text{máx}}$, fixada em 52 °C, μ tende a ser cada vez menor. Isso significa que a atividade respiratória do microrganismo estava comprometida a partir de $t = 30$ h e que a manutenção de T em 51,5 °C até $t = 70$ h indica que o sistema não é capaz de remover o calor gerado pelo microrganismo a tais taxas. Observa-se que a temperatura diminui até 47 °C durante as últimas 24 h de cultivo, já em estágio de declínio no qual a atividade respiratória do microrganismo é notavelmente mais baixa em acordo com Gomes (2015) e a atuação dos mecanismos de remoção de calor pelo equipamento frente às taxas de geração pelo fungo é observada.

Embora os aumentos de temperatura tenham sido apreciáveis no tambor grande, o ressecamento local não foi tão intenso se comparado aos obtidos para os demais tambores. Para compreender este evento, observe-se os perfis de X_g apresentados para cada tambor. Variações axiais são observadas em todos eles; no entanto, tem-

se que o gás escoante atinge umidades maiores em tambores de maiores dimensões. No tambor pequeno, o gás ainda possui capacidade de capturar água da superfície do leito, o que intensifica os possíveis gradientes de umidade e faz com que um perfil de umidade do sólido mais pronunciado seja desenvolvido. No tambor grande, o gás apresenta X_g superior a 0,06 kg/kg de ar seco, que corresponde a uma condição muito próxima à saturação. Assim, a força motriz para estabelecimento de gradientes entre a superfície do leito e o gás escoante é minimizada e os gradientes de umidade do leito são menos pronunciados ou inexistentes. Observe-se que os perfis temporais de X_g seguem a mesma tendência de X_g em ausência de reação, o que indica que o perfil de T_g não promoveu alterações sobre X_g em quaisquer um dos tambores.

Figura 6.9 – Perfis temporais de temperatura e umidade no interior do leito (T e X, respectivamente) e temperatura e umidade do gás (T_g e X_g , respectivamente) simulado para o de *M. thermophila* I-1D3b em tambores horizontais de diferentes dimensões, em diferentes posições axiais para até 96 h de cultivo com umidade relativa do ar de 75 % na entrada do sobre espaço.

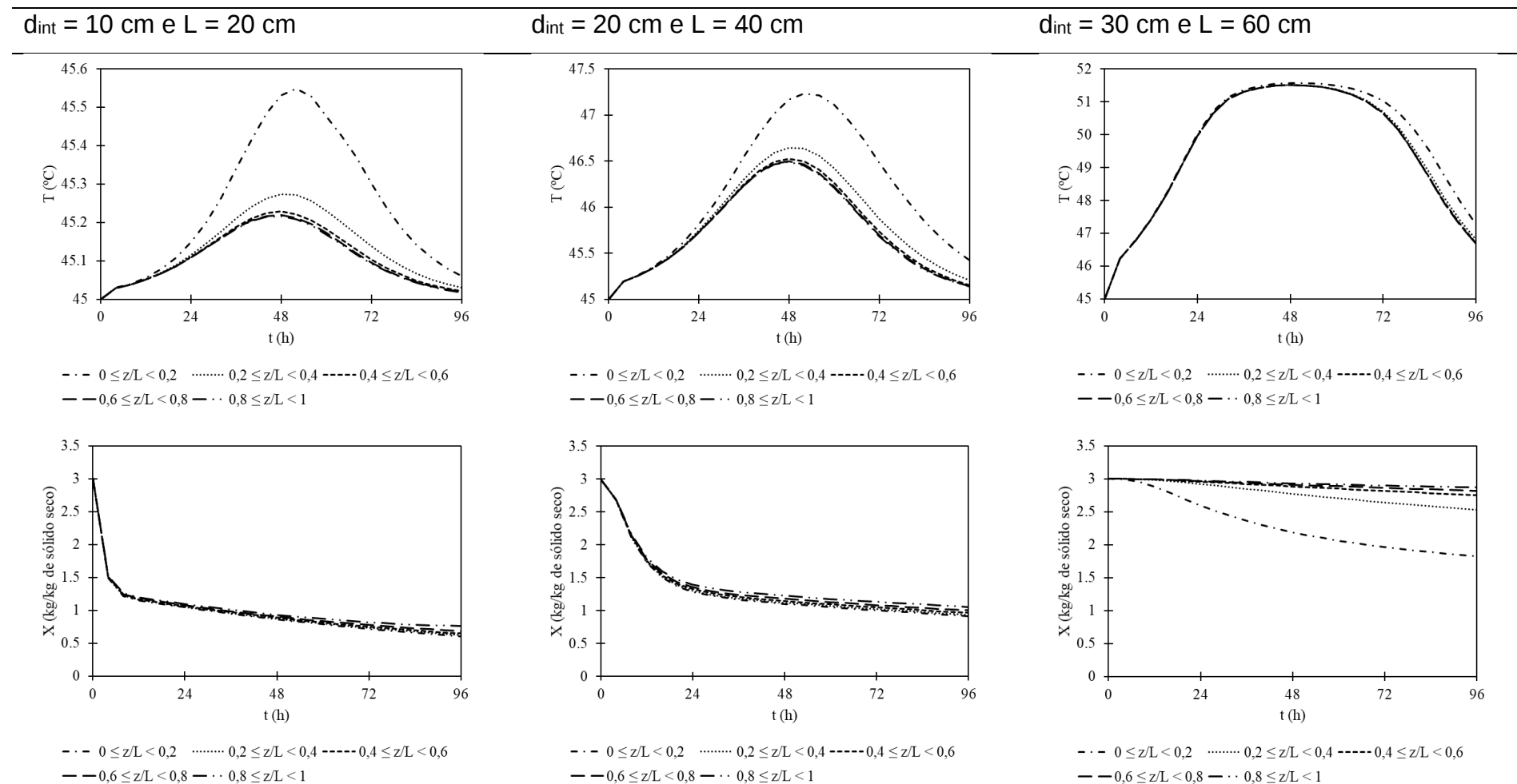
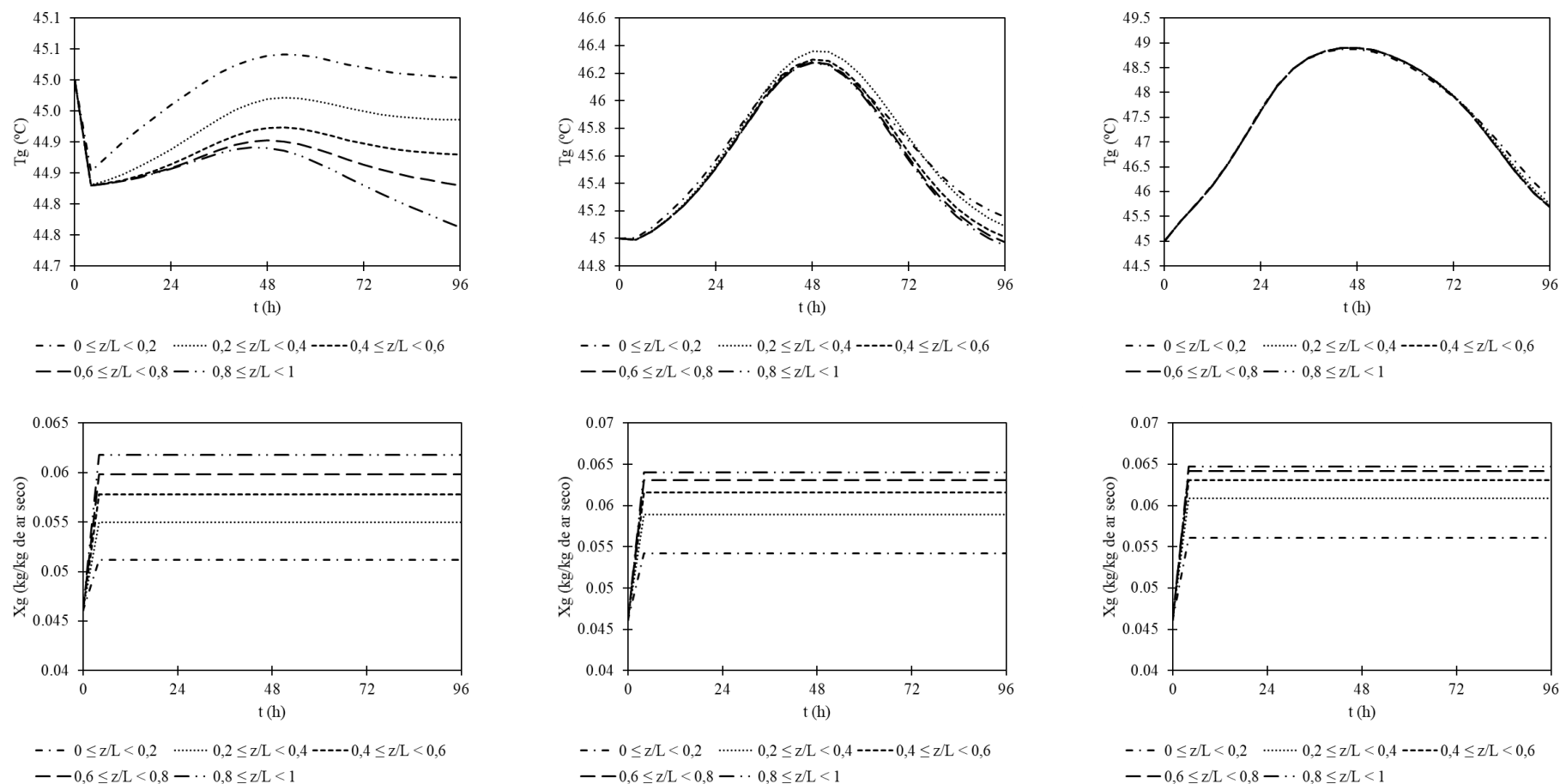


Figura 6.9: continuação.



d_{int} = diâmetro interno do tambor; L = comprimento do tambor. FONTE: Elaborado pela autora.

As variações de T_g em tambor pequeno foram desprezíveis. Em tambores médio e grande, tem-se que os perfis de T_g assumem a mesma tendência que os perfis de temperatura para o interior do leito, que, por sua vez, possuem a mesma tendência que os perfis de temperatura na superfície do leito. Destaca-se que a temperatura da fase gasosa apresenta pico em $t = 48$ h para o tambor médio, após o que decresce até $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. É provável que T_g tenda a T devido à condição do gás, que é soprado a uma vazão consideravelmente baixa, está confinado, possui inércia térmica baixa e sua temperatura inicial é próxima à temperatura da superfície do leito. Ainda, é provável que T_g sofresse pouca variação se vazões de ar infinitamente mais altas fossem utilizadas. Von Meien e Mitchell (2002) e Casciadori et al. (2016) apresentaram conclusões semelhantes quanto à tendência de T_g a T e atribuíram o fato ao alto coeficiente volumétrico de transferência de calor; no entanto, foram utilizados biorreatores de leito empacotado com ar escoando através dos poros, o que difere da situação apresentada nesta tese.

Em tambor pequeno, T_g e T apresentam tendências distintas; no entanto, as variações axiais e no tempo são desprezíveis e não permitem quaisquer conclusões. Nos tambores médio e grande, T_g independe da posição axial e segue tendência similar aos respectivos perfis de T . Observe-se que os perfis de X_g são similares nos dois tambores. Isso porque, com mais alta velocidade superficial em comparação com o tambor grande, o tambor médio apresenta mais intenso ressecamento do leito de partículas, sustentado pelos perfis de X . Especialmente no tambor médio, embora os perfis de T_g sejam similares aos de T em termos de tendência, observa-se que existe variação axial de T entre a primeira posição axial e as demais, enquanto que o mesmo não foi observado para os perfis de T_g . A primeira fração axial em tambor médio apresenta $T = 47,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_g = 46,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nas demais posições axiais, T_g tende a T . Em acordo com os perfis de X , se existe ressecamento no interior do leito, infere-se que a superfície do leito apresente ressecamento também intenso, pois o transporte no interior do leito é puramente difusivo em acordo com a análise apresentada no capítulo anterior. Essa condição na superfície é suportada também pelos perfis de X_g , que apresentam mais altas taxas de transferência de massa na primeira fração axial nos primeiros instantes de cultivo. Com taxas mais altas de transporte de massa na primeira fração axial, espera-se que a fase gasosa perca energia para a superfície do leito, motivo pelo qual a primeira fração axial possivelmente apresenta temperaturas

de gás mais amenas em comparação com T e não se difere nas demais posições axiais.

O emprego de ar saturado forneceu taxa específica de crescimento maior, estimada com o valor médio de $0,089 \text{ h}^{-1}$ para as simulações de T, X, T_g e X_g mostradas na Figura 6.10. Os perfis de T e X foram simulados para a mesma posição estratégica no leito apresentada na Figura 6.9, onde o sobreaquecimento era esperado. A evolução de cada variável é mostrada para todas as faixas axiais durante as 96 horas de cultivo.

Como já adiantado, os picos de temperatura no interior do leito foram percebidos mais precocemente quando o ar saturado foi considerado em comparação com as condições de operação não ideais, pois neste último a fase inicial de crescimento, caracterizada pela adaptação do microrganismo ao substrato e às condições ambientais, é mais longa.

Os perfis de temperatura do leito para ambas as condições ambientais apresentaram similaridade na tendência; no entanto, os perfis a 75 % de umidade apresentaram temperaturas mais baixas em todos os tambores. Isso porque quanto menor a umidade relativa do ar, maior é a taxa relacionada à evaporação de água do sólido para o ar, uma vez que os gradientes instalados são maiores, o que faz com que a temperatura do sólido diminua e favoreça o seu controle em valores próximos àquele ótimo para cultivo. No entanto, enquanto a evaporação se mantiver a taxas consideráveis, deve-se considerar também o ressecamento do leito. Como já mencionado anteriormente e sustentado pela literatura, a atividade de água e umidade de partículas é fator limitante ao crescimento do microrganismo, o que comprometeria o desempenho do processo. Em contrapartida, em uso de ar em condições próximas da saturação fornecem gradientes de umidade menos pronunciados, o que faz com que as taxas relacionadas à evaporação sejam menores e, assim, o resfriamento do leito não é tão eficientemente observado.

Figura 6.10 – Perfis temporais de temperatura e umidade no interior do leito (T e X , respectivamente) e temperatura e umidade do gás (T_g e X_g , respectivamente) durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambores horizontais de diferentes dimensões, em diferentes posições axiais para $0 \leq t \leq 96$ h com umidade relativa inicial de 96 %.

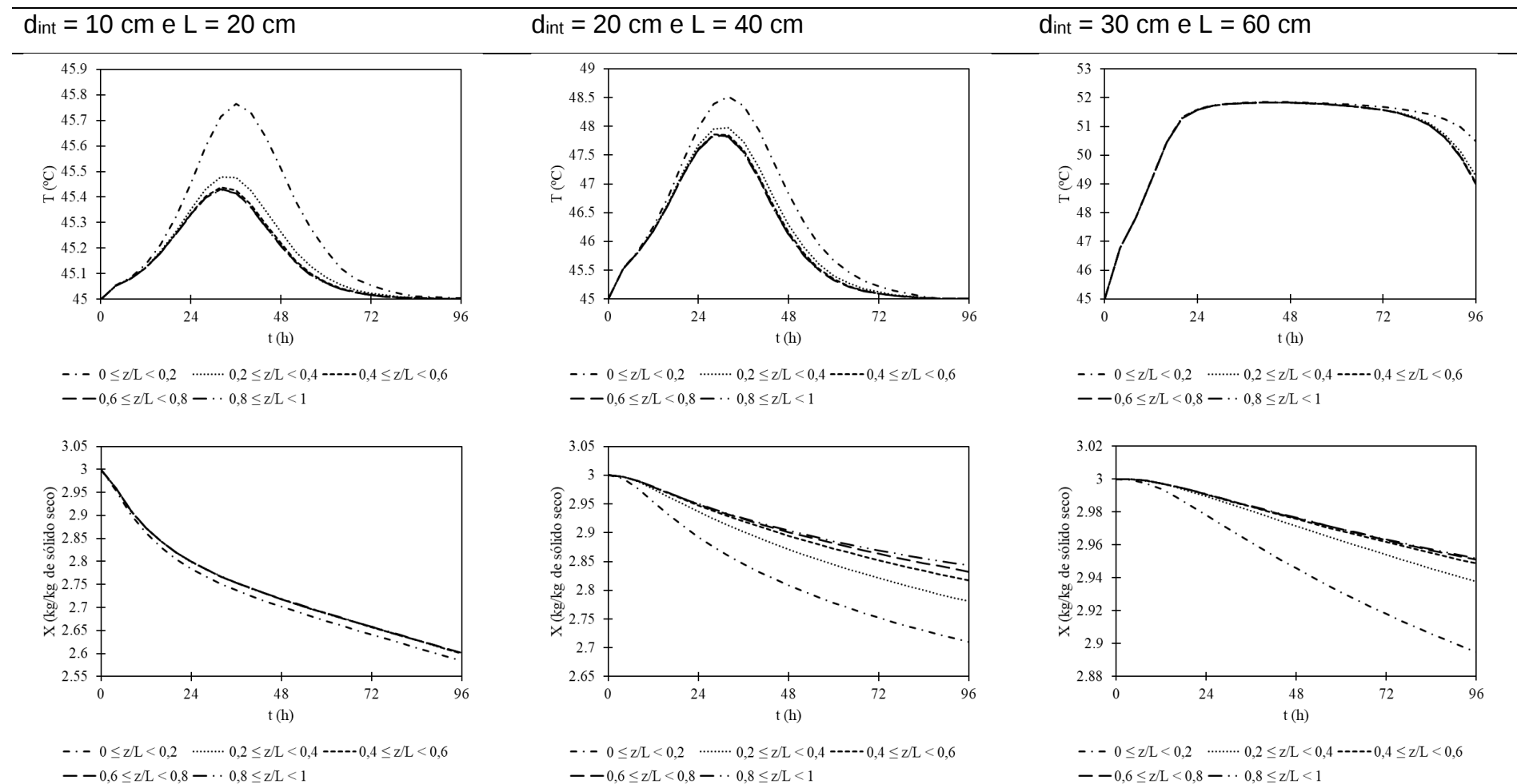
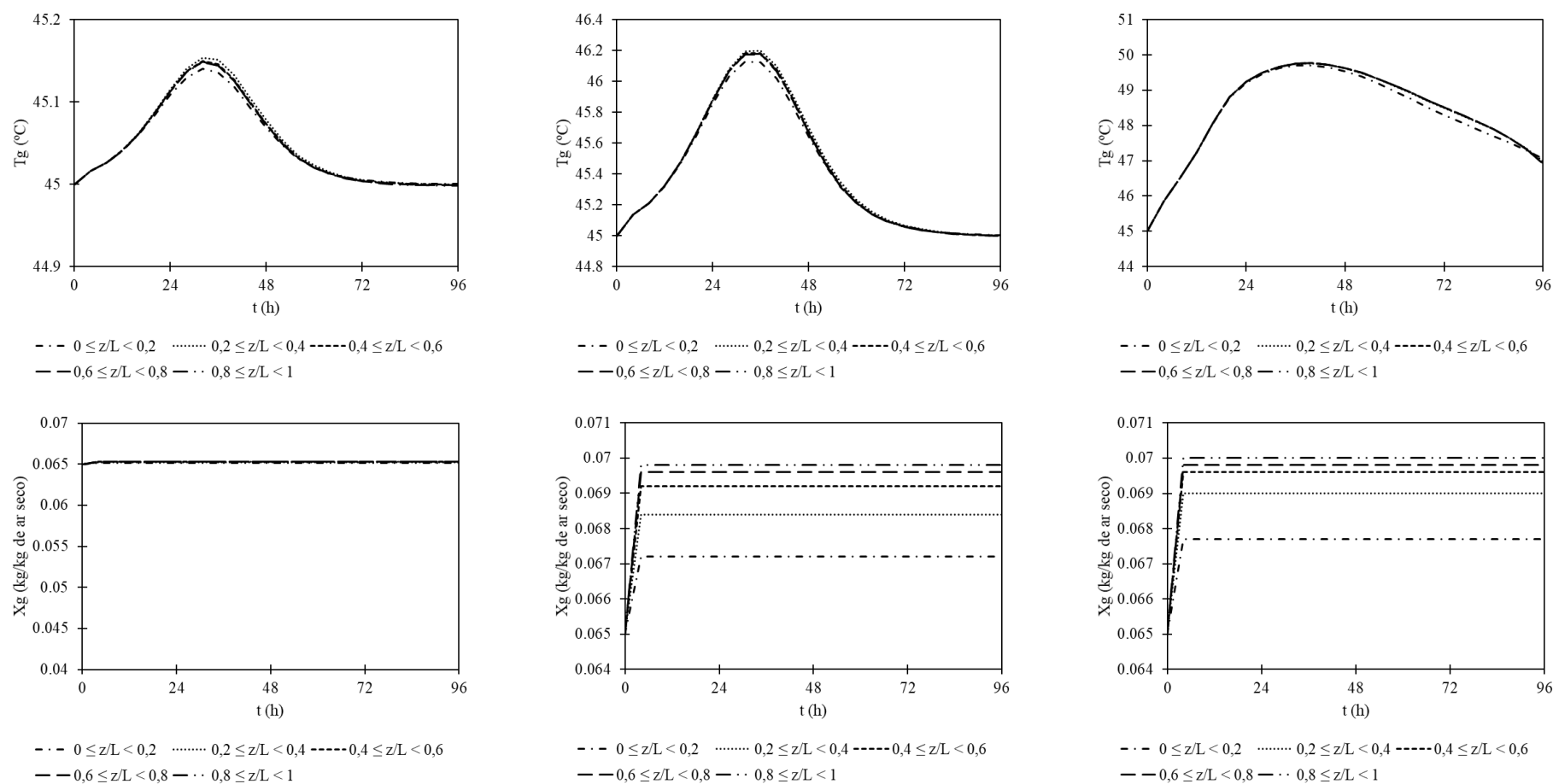


Figura 6.10: continuação.



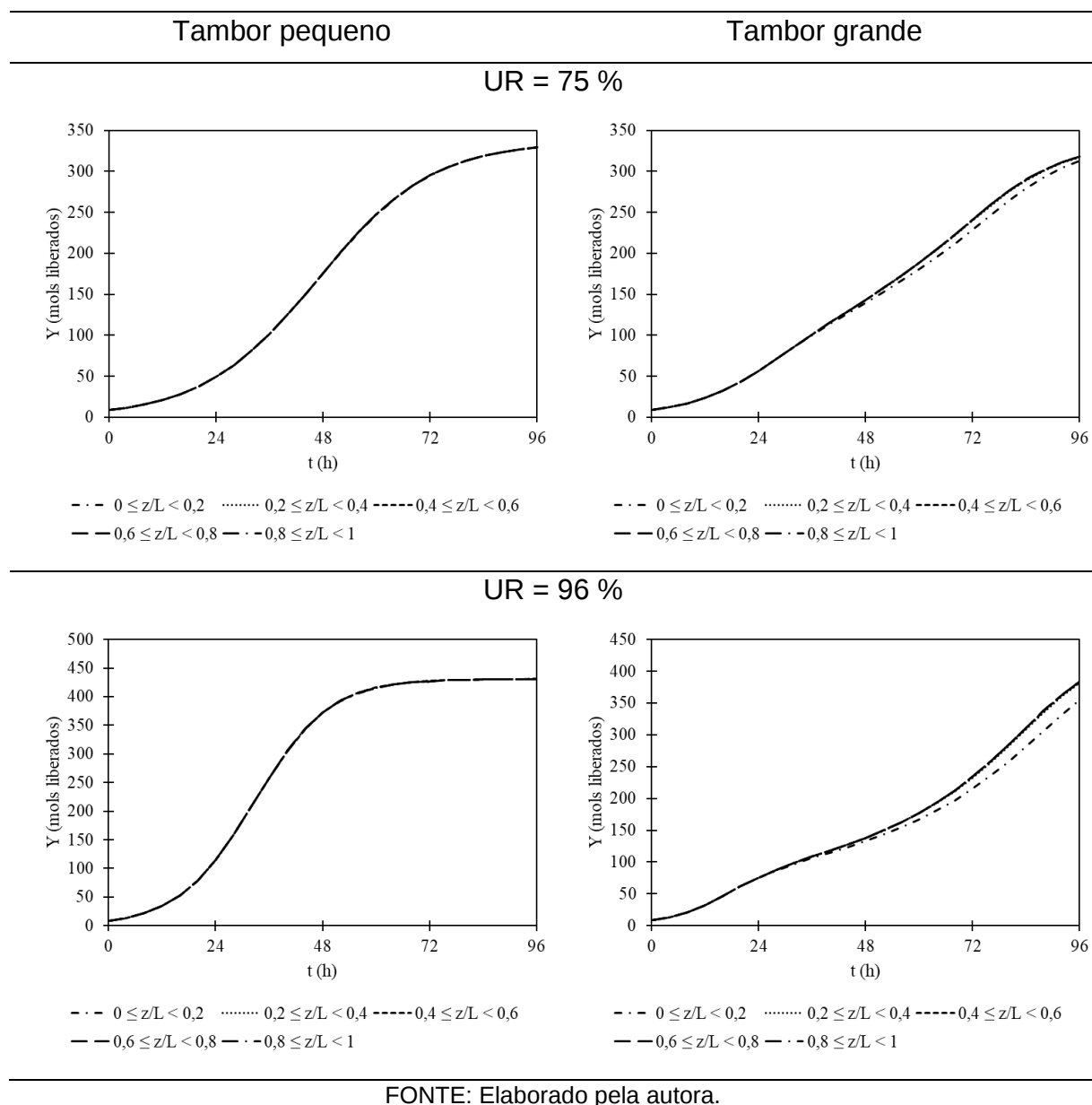
d_{int} = diâmetro interno do tambor; L = comprimento do tambor. FONTE: Elaborado pela autora.

As diferenças entre as máximas temperaturas no interior do leito da primeira fração axial em tambores pequeno, médio e grande quando a corrente de ar foi introduzida a 75 e 96 % de umidade relativa foram de 0,2, 1,3 e 1,3 °C, respectivamente. Tal diferença entre tambores pequenos pode ser considerada desprezível e justificada devido à intensa ação da parede do tambor sobre a remoção de calor, como já discutido no capítulo anterior. Como consequência, o controle de temperatura foi satisfatório durante todo o tempo de cultivo em ambas as condições de ar de entrada.

Observe-se que, ainda que muito próxima da saturação, a corrente de ar ainda é capaz de remover água da superfície do leito de modo que um perfil de X seja desenvolvido na posição de análise mesmo em instantes iniciais de processo, em que a temperatura da corrente gasosa é próxima da temperatura ótima de cultivo. Ao longo do cultivo, o ressecamento do leito é esperado para quaisquer umidades relativas de ar, pois o contato com a superfície gasosa aquecida devido à geração de calor promove a diminuição da umidade relativa da fase gasosa. As variações axiais de umidade do leito são desprezíveis em tambor pequeno em UR = 96 %; em tambores médio e grande, variações axiais são percebidas na primeira metade axial do tambor e, a partir daí, supõe-se que as taxas de transferência de massa através da superfície na outra metade axial sejam constantes. Perfis de X_g são desenvolvidos ao longo do comprimento do tambor e o gás deixa o tambor abaixo da saturação em todos os casos, o que permite que o leito continuamente perca água mesmo que a baixas taxas.

Os efeitos do sobreaquecimento em aproximadamente 6 °C em tambor grande podem ser visualizados nos perfis simulados de quantidade de CO₂ liberada (Y) ao longo do tempo, para mesma posição no leito tratada nas Figuras 6.9 e 6.10. Na Figura 6.11 estão apresentados os perfis de Y para os tambores pequeno e grande para as condições de ar a 75 e a 96 %. O perfil de Y para o tambor médio não é apresentado, pois é muito similar ao gerado para tambor pequeno. Não foram percebidas diferenças entre as posições axiais. Considera-se que os perfis ótimos de Y para cada condição de UR sejam aqueles obtidos em tambor pequeno, nos quais a temperatura é mais eficientemente controlada.

Figura 6.11 – Perfis temporais de quantidade de CO₂ liberada durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambores pequeno e grande parcialmente preenchidos em grau de enchimento 0,5 considerando-se duas umidades relativas do ar de entrada.



FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis de Y em tambor pequeno reproduzem os perfis de quantidade de CO₂ liberado coletados experimentalmente para ambas as umidades relativas de ar. Já os perfis em tambor grande, caracterizam-se pela ausência de tendência ao perfil de referência. No tambor pequeno, as fases lag e exponencial são muito bem definidas, enquanto que a respiração fúngica foi assumida como linear em tambor grande. Essa alteração na tendência deve-se à restrição de crescimento em função dos aumentos de temperatura. Em $t = 24$ h, o acúmulo de energia no interior do tambor grande,

expressa em um aumento de aproximadamente 5 °C sobre a temperatura do processo, faz com que a taxa específica de liberação de CO₂ decaia e assuma valores até 80 % menores que os valores ótimos para cada caso. Em tambores pequenos, nos quais a temperatura do leito durante o cultivo manteve-se muito próximo da ótima, a média de μ ao longo do tempo foi de $0,089 \pm 0,0002 \text{ h}^{-1}$ e $0,119 \pm 0,0002 \text{ h}^{-1}$ para as condições de menor e maior umidade do ar, respectivamente. Já para o tambor grande, obteve-se $0,048 \pm 0,024 \text{ h}^{-1}$ e $0,064 \pm 0,033 \text{ h}^{-1}$ para as mesmas condições, considerando que os parâmetros ótimos eram de 0,09 e 0,12 h⁻¹. Tal queda sobre os valores de μ e o desvio padrão relativamente alto em tambores grandes explicam a descaracterização dos perfis de Y como decorrência dos acúmulo de energia no interior do leito.

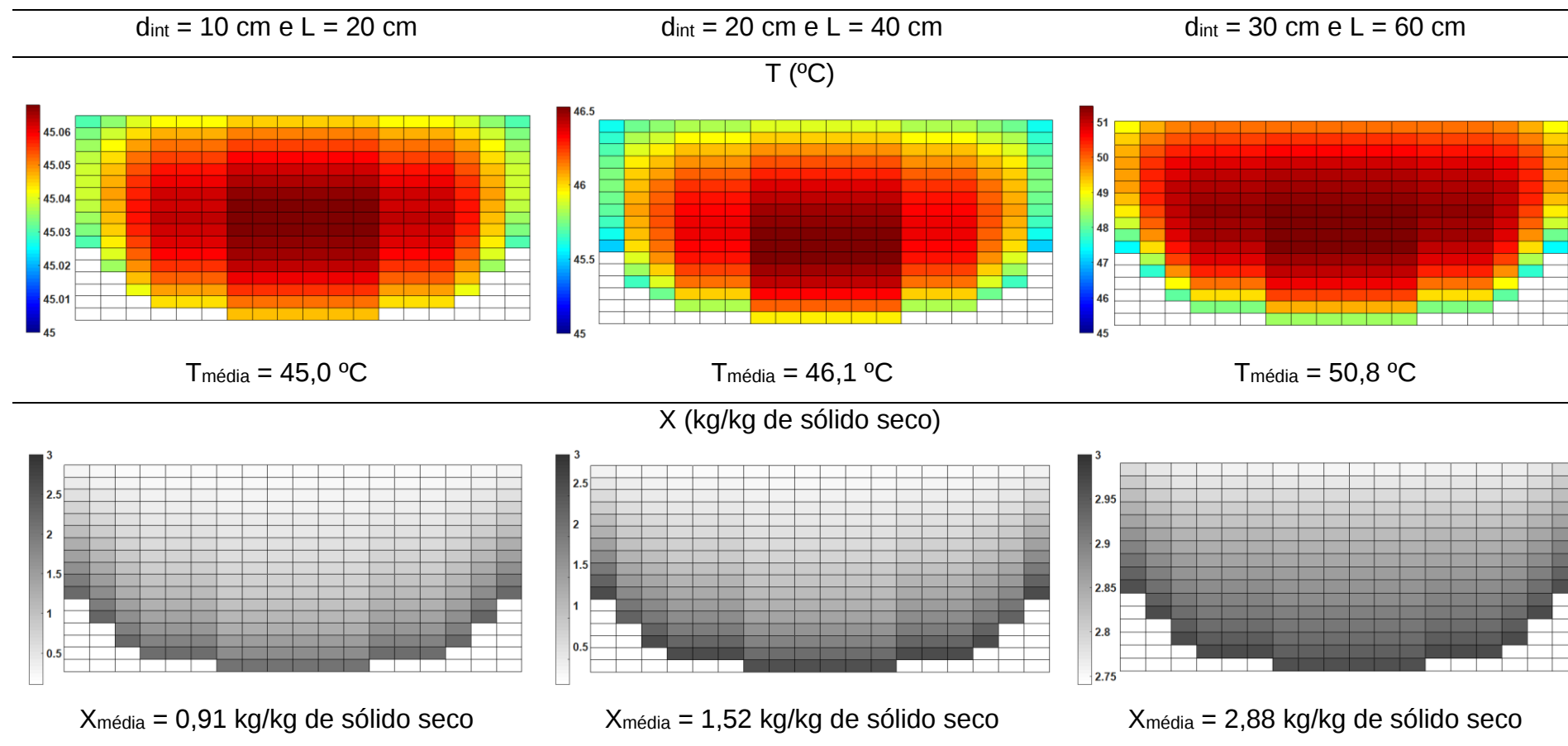
Observe-se que os parâmetros cinéticos não foram obtidos para todos os ensaios de cultivo em todos os tambores. Isso implica considerar que nem todos os impactos das condições do leito estão embutidas nos valores dos parâmetros cinéticos obtidos experimentalmente. Como exemplo, a temperatura do leito no tambor pequeno foi muito bem controlada ao longo do cultivo, porém o interior do leito apresentou severo ressecamento ao longo do tempo quando ar foi empregado a 75 % de umidade relativa. A perda de água através do leito promove a queda da atividade de água das partículas, que tem sido reportada pela literatura como fator limitante ao crescimento do microrganismo (GRAJEK; GERVAIS, 1987; ORIOL et al., 1988; PANDEY et al., 1994; ACUÑA-ARGÜELLES et al., 1994; LU; LI; WU, 2003; CORONA; SÁEZ; AGOSIN, 2005; VON MEIEN; MITCHELL, 2002; CASCIATORI et al., 2016). No entanto, os dados apresentados neste trabalho para a umidade relativa de 75 % estão disponíveis apenas para o tambor médio, no qual espera-se que as taxas de perda de água do leito sejam mais amenas do que em tambor pequeno e podem não representar fielmente os fenômenos envolvidos durante o cultivo nas demais escalas.

Nas Figuras 6.12 e 6.13 são mostrados os perfis espaciais de temperatura e umidade para os três tambores para as umidades relativas de 75 e 96 %, respectivamente, para $t = 48 \text{ h}$ e $0,4 \leq z/L < 0,6$. Observe-se que a temperatura foi satisfatoriamente controlada em tambor pequeno para ambas as umidades relativas, mesmo sob μ mais baixo e máxima temperatura esperada em $t = 48 \text{ h}$. Esse resultado concorda com a discussão apresentada no capítulo anterior sobre a ação da parede do tambor como importante fronteira para remoção de calor nesta dimensão. Sua superioridade frente ao escoamento paralelo de ar à superfície do leito é confirmada

ao se comparar os perfis espaciais de UR a 75 % e de 100%. Mesmo mantendo-se certa capacidade de evaporar água da superfície do leito, a diferença entre as temperaturas na superfície é de apenas 0,1 °C. As umidades médias do leito neste tambor apresentaram queda superior a duas vezes quando a menor UR foi empregada. Mesmo com tão pouca variação de temperatura, a umidade média do leito variou expressivamente de uma UR para outra, o que é preocupante para o metabolismo fúngico. Uma vez que a temperatura é adequadamente controlada, os efeitos da umidade do leito sobre o desempenho do processo seria visualizado através do perfil temporal de Y e, por vezes, através da quantificação de biomassa e/ou compostos de interesse ao final do cultivo.

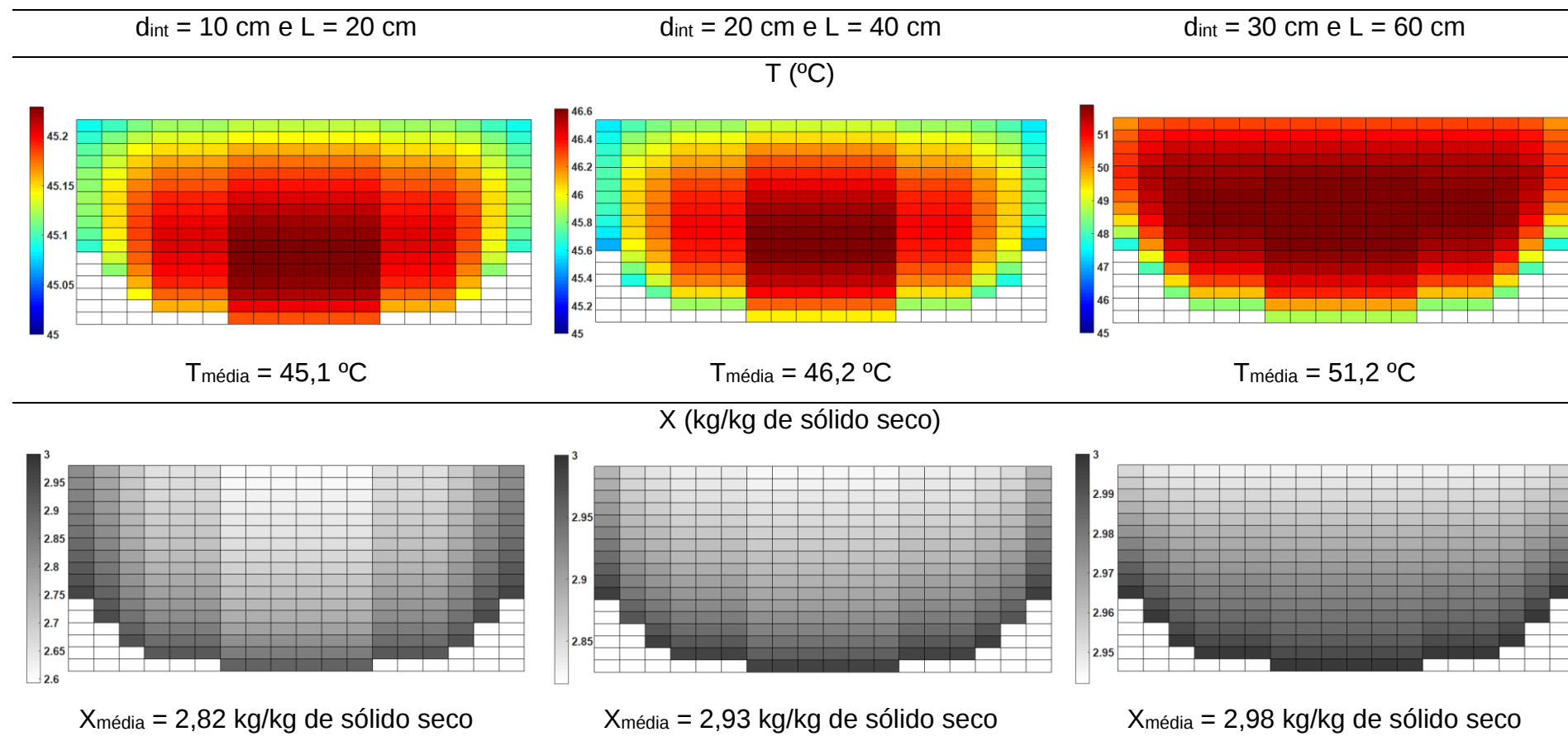
Os perfis de temperatura em todos os tambores apresentaram tendências similares sob ambas as condições de entrada do ar. Uma zona de sobreaquecimento instala-se no centro angular do leito em profundidade intermediária. As temperaturas são mais amenas nas proximidades da parede do tambor e na superfície, bem como nas extremidades angulares do leito, onde os mecanismos na parede e na superfície do leito atuam simultaneamente sobre uma quantidade de partículas notadamente menor. Sob UR = 75 %, o mecanismo de remoção de calor por evaporação é mais intenso, o que promove o ressecamento do leito e compromete o adequado crescimento do microrganismo. Como consequência, gera-se menor quantidade de calor. Já em UR = 96 %, remove-se calor por evaporação a taxas mais baixas e temperaturas mais altas nas regiões sobreaquecidas tomam lugar. Os perfis de umidade em ambas as situações devem ser observados com cautela, pois a utilização de UR = 75 % promoveu queda de aproximadamente 20 % sobre a umidade média inicial do leito, o que pode comprometer o metabolismo microbiano. A exemplo, Hassouni et al. (2006) reportou que apenas um terço de atividades enzimáticas de fitases são esperadas após cultivo sólido de *M. thermophila* sobre uma matriz de bagaço de cana a 45 °C e 60 % de umidade em comparação com o cultivo a 75 % de umidade.

Figura 6.12 – Perfis espaciais de temperatura e umidade do leito (T e X, respectivamente) durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambores horizontais de diferentes dimensões, em $0,4 \leq z/L < 0,6$ e $t = 48$ h, com umidade relativa inicial de 75 %.



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 6.13 – Perfis espaciais de temperatura e umidade do leito (T e X, respectivamente) durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambores horizontais de diferentes dimensões, em $0,4 \leq z/L < 0,6$ e $t = 48$ h, com umidade relativa inicial de 96 %.



FONTE: Elaborado pela autora.

De forma similar ao tambor médio, os perfis de T em tambor grande não diferiram visualmente a 75 % ou 100 % de UR. Para o primeiro caso, aproximadamente 80 % do leito encontra-se acima de 50 °C e, para o segundo, esta fração é de aproximadamente 89 %. Em contrapartida, o ressecamento do leito ao longo do tempo acontece de forma muito lenta, apresentando queda de umidade média inferior a 5 % sobre a umidade média inicial quando UR = 75 %. Assim, considera-se que, devido à baixa velocidade superficial da corrente gasosa escoante, a convecção na superfície do leito apresenta-se como uma resistência ao transporte de massa, o que restringe o surgimento de gradientes de umidade como nos demais tambores.

b. Atividades enzimáticas de endoglucanase

As atividades enzimáticas em endoglucanase estão apresentadas na Tabela 6.3 para as posições axiais de início (entrada de ar), meio e fim do tambor, em U por grama de sólido seco (U/g-ss). Em uma mesma posição axial, as médias diferiram entre si com relação aos tambores utilizados. Isso pode estar relacionado aos excessos de temperatura e ressecamento do leito, que são mais ou menos intensos conforme as dimensões do tambor utilizado, como mostrado e discutido previamente.

As médias das amostras em cada uma das posições axiais em um mesmo tambor não diferiram da respectiva amostra controle apenas em tambor grande com introdução de ar com umidade relativa de 96 %. As menores atividades enzimáticas foram obtidas em tambor pequeno a 75 % de UR, no qual a secagem do leito é mais severa apesar do controle de temperatura satisfatório, corroborando com a literatura quanto à limitação da atividade de água em termos de rendimento em compostos de interesse (LU; LI; WU, 2003; CORONA; SÁEZ; AGOSIN, 2005). Em tambores pequeno e grande a 96 % de UR, as atividades enzimáticas foram satisfatórias em relação ao controle, com destaque para os rendimentos em tambor pequeno estatisticamente superiores ao ensaio controle. Em UR de 96 %, a secagem do leito é notadamente menos severa e o controle de temperatura se dá com êxito apenas em tambor pequeno. Diferenças estatísticas foram observadas entre os tambores pequeno e grande em UR = 96 %, o que indica que as elevações de temperatura em tambor grande provocam influência sobre o rendimento em atividades enzimáticas de endoglucanase, ainda que de forma mais amena. Todas as amostras apresentaram diferenças significativas entre si em tambor médio em relação às posições axiais.

Tabela 6.3 – Atividades enzimáticas em endoglucanase em U/grama de sólido seco após 96 h de cultivo de sólido de *M. thermophila* I-1D3b sobre uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo em biorreator de tambor horizontal.

Tambor	UR	Posição axial			Controle
		$0 < z/L \leq 0,2$	$0,4 < z/L \leq 0,6$	$0,8 < z/L \leq 1$	
Pequeno	75 %	53,75 ^{aA} ± 2,04	56,14 ^{aA} ± 3,29	54,82 ^{aA} ± 1,54	129,06 ^b ± 1,90
	96 %	156,51 ^{aB} ± 4,51	146,27 ^{aB} ± 4,54	147,25 ^{aB} ± 5,35	128,91 ^b ± 2,09
Médio	75 %	67,08 ^{aC} ± 3,13	76 ^{bC} ± 3,07	84,48 ^{cC} ± 4,64	116,24 ^d ± 0,99
Grande	96 %	131,46 ^{aD} ± 5,65	128,68 ^{aD} ± 2,42	125,63 ^{aD} ± 6,17	133,73 ^a ± 2,81

Letras minúsculas diferentes em uma mesma linha representam diferença significativa entre as amostras de diferentes posições axiais em um mesmo tambor. Letras maiúsculas diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa entre amostras de uma mesma posição axial em diferentes tambores. FONTE: Elaborado pela autora.

Os resultados encontrados na literatura apontam cepas do fungo termofílico *M. thermophila* como potencial produtor de endoglucanases. Zanelato et al. (2012) cultivou *M. thermophila* I-1D3b em embalagens plásticas utilizando-se da proporção 1:1 entre bagaço de cana e farelo de trigo, atingindo 400 U/g-ss ao final do cultivo. Karnaouri, Topakas e Christakopoulos (2014) aplicou um gene excretor de endoglucanases originalmente extraído de *M. thermophila* em *Pichia pastoris*, para produção, purificação e caracterização destas enzimas, obtendo-se pico de 468 U/mL em aproximadamente 144 h de cultivo em placas de Petri. Cassia-Pereira et al. (2015) isolou cepas de fungos termofílicos de pilhas de resíduos agroindustriais e as identificou para aplicá-las em cultivo sólido de uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo na proporção 1:1 em embalagens plásticas, com o intuito de sinalizar potenciais excretores de celulasas e xilanasas. Dentre os microrganismos investigados, *Myceliophthora* sp. JCP 1-4 destacou-se com a maior produção de endoglucanases, correspondente a 357,51 U/g-ss, seguido pela cepa DABM 23/45,

com 314,27 U/g-ss. Estes resultados são absolutamente promissores e ultrapassam em aproximadamente três vezes os melhores resultados em biorreator obtidos neste trabalho para a cepa I-1D3b do fungo.

Em contrapartida, Perez, Casciadori e Thoméo (2019) cultivaram *M. thermophila* em uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo na mesma proporção que a apresentada neste trabalho, utilizando-se de biorreatores de leito empacotado com 7,62 e 20 cm de diâmetro com fluxo de ar saturado constante a 0,00213 m/s, e reportaram resultados similares aos aqui apresentados para rendimento em endoglucanases. As máximas atividades enzimáticas foram observadas no topo do biorreator (180 U/g-ss), onde não se observou compactação do meio ao final do cultivo, com atividades mínimas no meio axial da coluna (~40 U/g-ss). As atividades reportadas para o biorreator de maior diâmetro não ultrapassaram 100 U/g-ss e foram associadas às dificuldades de remoção de calor pela parede da coluna, que atingiu até 55 °C no centro radial, fato similar ao aqui observado.

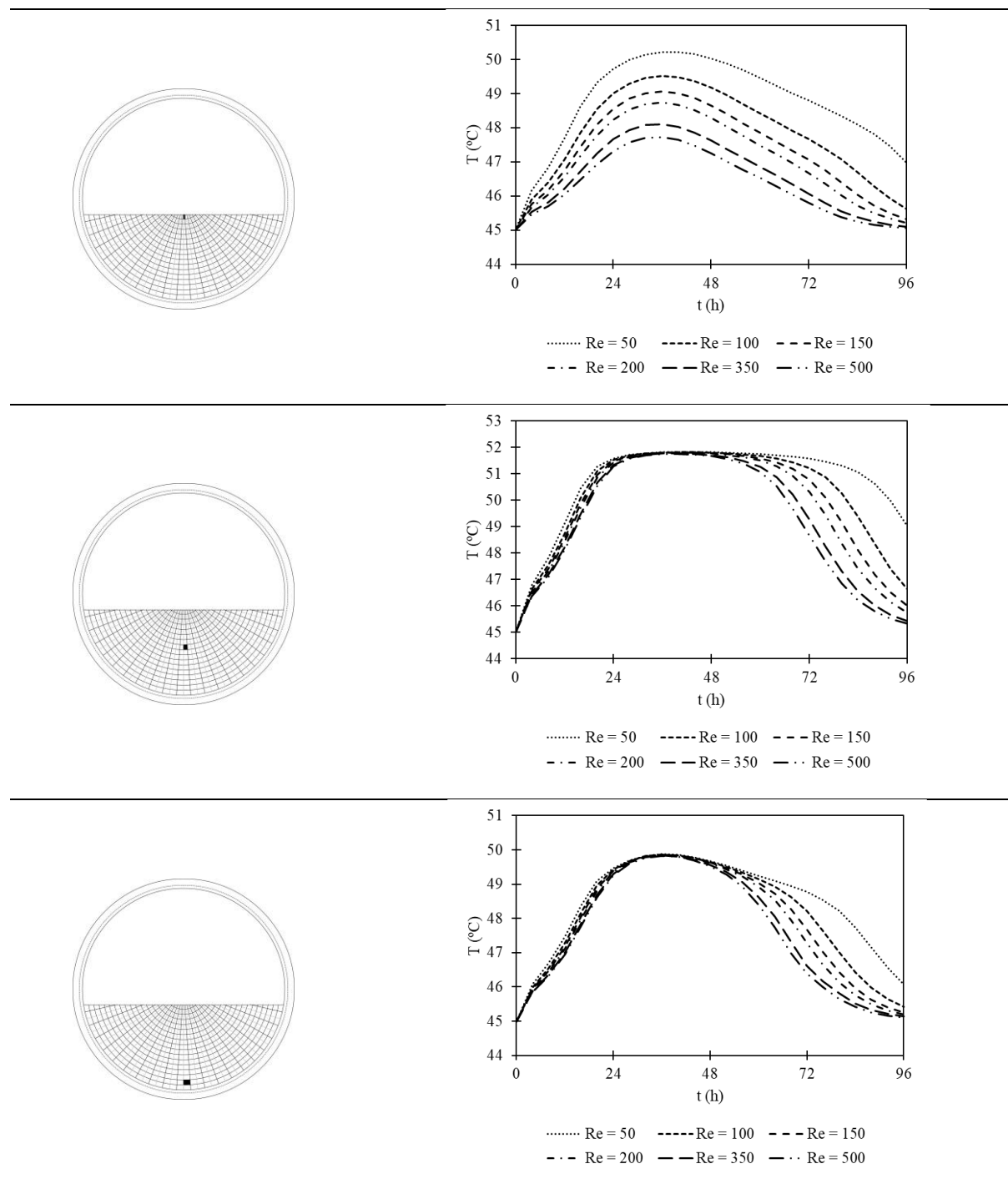
c. Efeito das velocidades superficiais de escoamento sobre a temperatura do leito em tambor grande

Os rendimentos em atividades enzimáticas de endoglucanase foram afetados pelos aumentos de temperatura em tambor grande. Como discutido anteriormente e já apontado por Tada et al. (2017a), a região da parede do tambor apresenta grande resistência à penetração de calor para a primeira camada de leito mais próxima, ao passo que a resistência interna ao transporte de calor não deve ser desprezada, portanto uma alternativa para minimizar a instalação de zonas sobreaquecidas seria a potencialização da ação conjunta dos mecanismos de convecção e evaporação na superfície do leito. Neste sentido, a umidade absoluta do ar de entrada poderia ser diminuída; contudo, o indesejável e até então ausente ressecamento do leito tomaria lugar. Por conta disso, optou-se apenas pelo aumento da vazão do ar de entrada a 96 % de UR, o que potencializaria preferencialmente o mecanismo de convecção. Nessa seção serão abordados os perfis de temperatura e umidade em tambor grande sob diferentes vazões de ar, partindo-se de 5 L/min.

Na Figura 6.14 estão apresentados os perfis de temperatura preditos aplicando-se velocidades superficiais que forneçam $50 \leq Re < 500$ para posições radiais e angulares de superfície, meio e nas proximidades da parede do tambor. Todos os

perfis foram extraídos na posição axial intermediária. A partir daqui, as diferentes vazões de ar serão representadas pelo respectivo número de Reynolds.

Figura 6.14 – Perfis de temperatura preditos em diferentes posições radiais e angulares em leito de bagaço de cana e farelo de trigo que preenche um tambor horizontal grande em grau de enchimento 0,5 durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b sob diferentes velocidades superficiais de ar no sobre espaço.



FONTE: Elaborado pela autora.

Os perfis de temperatura locais mostraram que o aumento da velocidade superficial da fase gasosa escoante promove diminuição da temperatura na região de superfície do leito, onde existe contato direto com o ar escoante. A $Re = 50$, o pico de temperatura nesta posição é alcançado a $50,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que a $Re = 500$, o pico se dá em $47,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Além disso, observa-se que o tempo de permanência em temperaturas mais elevadas é maior quanto menor é a vazão, o que evidencia o potencial da fase gasosa em remover calor após $t = 24\text{ h}$, correspondente ao instante em que as máximas temperaturas são esperadas. Essa última observação é aplicada também para posições mais profundas no leito: o aumento da velocidade superficial faz com que o tempo de permanência em altas temperaturas seja mais restrito. Por outro lado, tal aumento não impede que a temperatura máxima de $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ seja atingida. Comportamento similar foi observado nas proximidades da parede do tambor, onde a mesma temperatura é atingida para todas os adimensionais de Reynolds no momento do pico e o reestabelecimento da temperatura do processo é alcançado para as maiores vazões. Desta forma, evidencia-se que a resistência interna à transferência de calor domina o processo nas posições mais internas do leito.

Baseado nos resultados de Perez, Casciadori e Thoméo (2019), tem-se que o aumento de temperatura até aproximadamente $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ prejudicou a produção de endoglucanases por *M. thermophila* I-1D3b em biorreator de leito empacotado de 20 cm de diâmetro. Em biorreator de 7,62 cm de diâmetro, os resultados em termos de atividades enzimáticas relativas em comparação com o ensaio controle em embalagens plásticas foram considerados satisfatórios entre 0,61 e 1,36 e as máximas temperaturas reportadas foram próximas a $49\text{ }^{\circ}\text{C}$, observadas em regiões de menores atividades enzimáticas. Zanelato et al. (2012) obteve resultados promissores em termos de atividades enzimáticas de endoglucanase cultivando-se o fungo *M. thermophila* I-1D3b em bagaço de cana e farelo de trigo acondicionados em embalagens plásticas nas mesmas proporções que a utilizada no presente trabalho em temperaturas iguais ou inferiores a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Neste sentido, infere-se que as temperaturas superiores a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ possam causar prejuízos à secreção de enzimas, e este critério é utilizado neste trabalho como temperatura crítica. Na Tabela 6.4 estão apresentadas as frações volumétricas de leito com temperaturas superiores a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ao longo do cultivo a diferentes velocidades superficiais do gás escoante no sobre espaço em tambor grande, indicadas por simulação. A diminuição das frações

sobreaquecidas com o aumento da velocidade superficial sugere que a superfície do leito é uma potencial fronteira para atuação do controle de temperatura pela introdução de ar, desde que a vazão utilizada seja adequada.

Tabela 6.4 – Frações volumétricas de leito com temperaturas superiores a 50 °C durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em uma mistura entre bagaço de cana e farelo de trigo que preenche um tambor de 30 cm de diâmetro e 74 cm de comprimento em grau de enchimento 0,5, com introdução de ar a UR de 96 % a diferentes velocidades superficiais do gás no sobre espaço.

t (h)	Número de Reynolds (-)					
	50	100	150	200	350	500
24	0,85	0,81	0,75	0,63	0,57	0,47
48	0,84	0,79	0,68	0,62	0,53	0,34
72	0,59	0,40	0,29	0,17	0,13	0,87
96	0,17	0,08	0	0	0	0

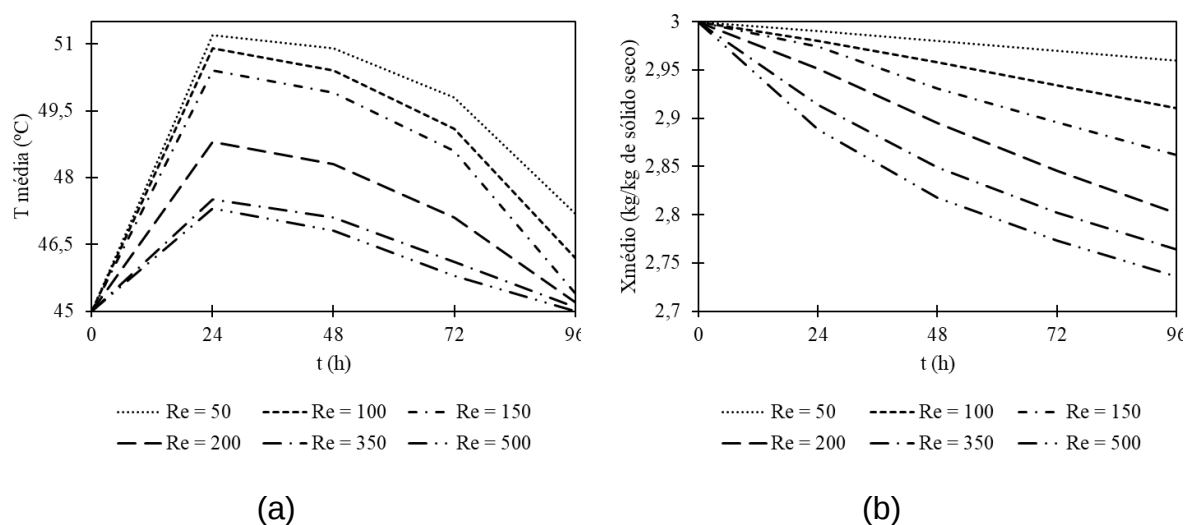
FONTE: Elaborado pela autora.

A situação mais drástica é dada em $Re = 50$ e $t = 24$ h, em que aproximadamente 85 % do leito encontra-se com temperatura superior a 50 °C e então considera-se que apenas 15 % manteria condições razoavelmente propícias para o desenvolvimento satisfatório do fungo. A temperatura de processo não é retomada ao final do cultivo, que apresenta sobreaquecimento em cerca de 17 % do leito. Considerando-se os resultados de Gomes (2015), que mostram que as taxas de secreção de enzimas são maiores nas primeiras e nas últimas 24 h de processo, infere-se que $Re \leq 50$ na superfície do leito possa não ser adequado para cultivo sólido em tambor com essas dimensões, sendo necessário o aumento da vazão para que a quedas na temperatura média do leito possam ser efetivamente alcançadas nesses períodos e, conseqüentemente, o rendimento de compostos de interesse não seja afetado.

As frações de leito sobreaquecidas tendem a diminuir com o aumento da vazão. Observe-se que $Re = 500$ sugere que uma fração inferior a 50 % do leito seria subutilizada em termos de rendimentos mesmo no instante onde se espera aumentos mais intensos de temperatura. Na Figura 6.15 estão apresentados os perfis de temperatura e umidade médias para diferentes velocidades superficiais, expressas em termos de adimensionais de Reynolds, aplicadas em simulação do cultivo sólido em tambor grande. A temperatura média do leito calculada para diferentes Re sustenta

ainda que a amplitude $100 \leq Re \leq 150$ também não seria indicada, pois o leito atingiria T média de aproximadamente 51 e 50,5 °C, respectivamente, o que promoveria ainda a subutilização do equipamento (Figura 6.15a). Com $Re \geq 200$, o leito apresentaria temperaturas médias inferiores a 49 °C, o que é dito como satisfatório. O ressecamento do leito não é esperado mesmo para as vazões mais altas estudadas neste capítulo, como mostrado nos perfis médios de umidade ao longo do tempo de cultivo para diferentes vazões (Figura 6.15b), indicando que o uso de vazões de ar mais altas poderia ser viável. O cálculo do erro médio relativo entre a umidade média do leito de duas posições axiais foi inferior a 1 % e considerado desprezível.

Figura 6.15 – Perfis temporais de (a) temperatura e (b) umidade médias do leito de bagaço de cana e farelo de trigo utilizado para cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em tambor horizontal de 30 cm de diâmetro e 74 cm de comprimento preenchido em grau de enchimento 0,5 sob diferentes velocidades superficiais do gás no sobre espaço.



FONTE: Elaborado pela autora.

6.4.3. Verificação do modelo

Perfis experimentais de temperatura e umidade foram coletados durante os ensaios de cultivo sólido em biorreatores de tambor horizontal de diferentes tamanhos. Como mencionado anteriormente, os ensaios foram conduzidos mantendo-se os biorreatores totalmente estáticos durante o cultivo. Na Figura 6.16 estão apresentados os perfis de temperatura experimentais e preditos para as diferentes condições experimentais e posições no leito, para os quais bons ajustes foram obtidos. Nota-se

que a utilização de cinética de liberação de gases específica para cada UR empregada favoreceu a previsão dos picos de temperatura em concordância com os experimentais.

Em tambor pequeno, os perfis em posições internas no leito mostram picos de temperatura em 45,5 e 45,6 °C para UR de 75 e 96 %, respectivamente, sendo esta diferença considerada desprezível. Neste sentido, os dados experimentais sustentam a discussão apresentada anteriormente com relação à alta capacidade de controle de temperatura em tambor com essas dimensões. Os picos de temperatura em tambores médio a 75 % de UR e grande a 96 % de UR foram de 47 e 52 °C, respectivamente, em posições mais internas no leito.

Na Figura 6.17 estão apresentadas as verificações do modelo a partir de perfis de umidade em diferentes tambores e condições experimentais. Em ensaios com UR = 75 %, a perda de água através da superfície é mais pronunciada, desenvolvendo-se um perfil característico de decaimento exponencial. Observa-se que os perfis experimentais apresentaram umidades maiores do que o perfil predito pelo modelo. Isso pode estar relacionado à presença da biomassa fúngica, que pode representar uma resistência adicional ao transporte de massa ou, ainda, que a água possivelmente gerada pelo microrganismo, negligenciada no balanço de massa, não foi desprezível. As perdas de umidade foram sutis ao longo do tempo em ensaios a UR de 96 %.

Figura 6.16 – Verificação do modelo proposto em relação à temperatura local durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b em uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo que preenche biorreatores horizontais de diferentes tamanhos em grau de enchimento 0,5.

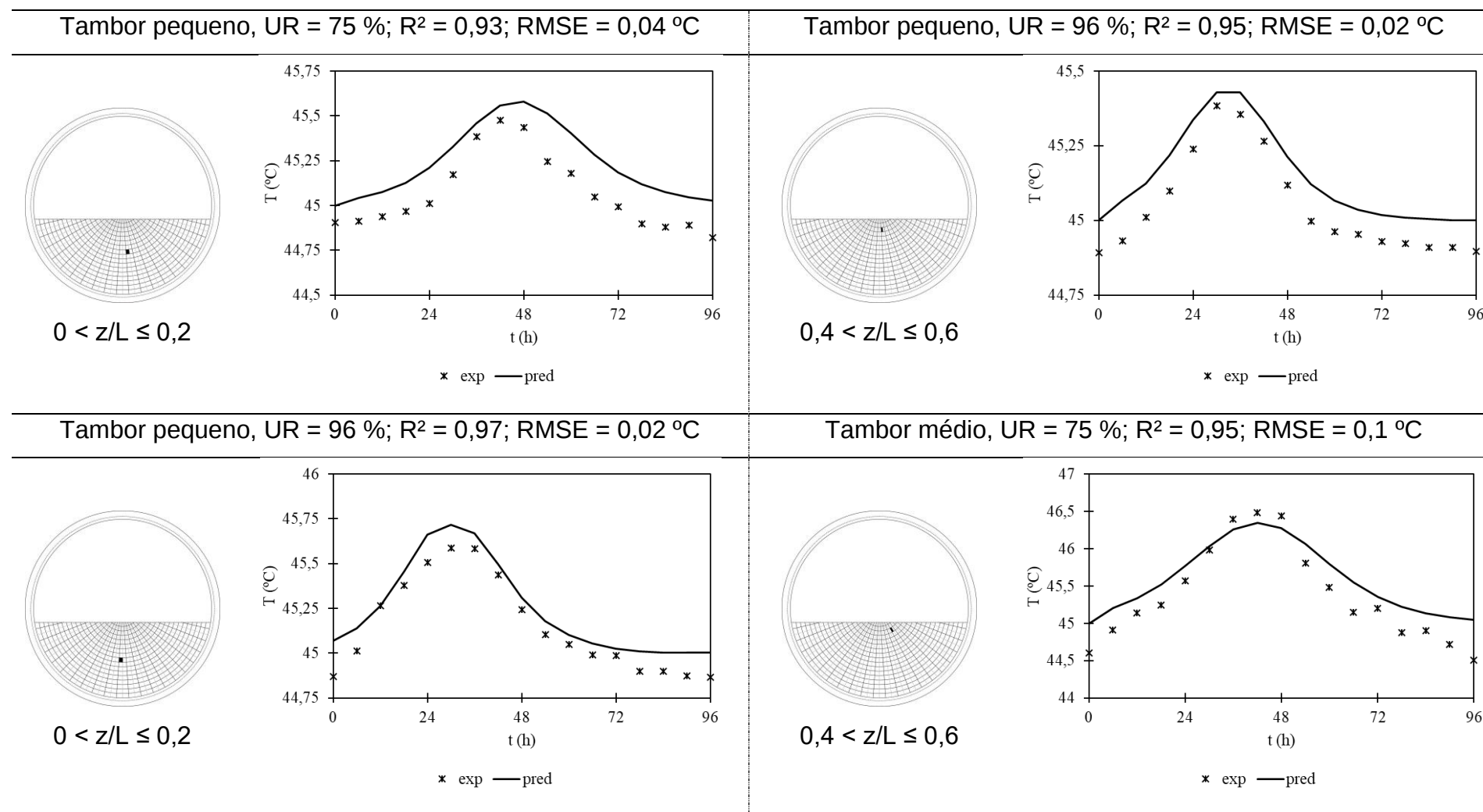
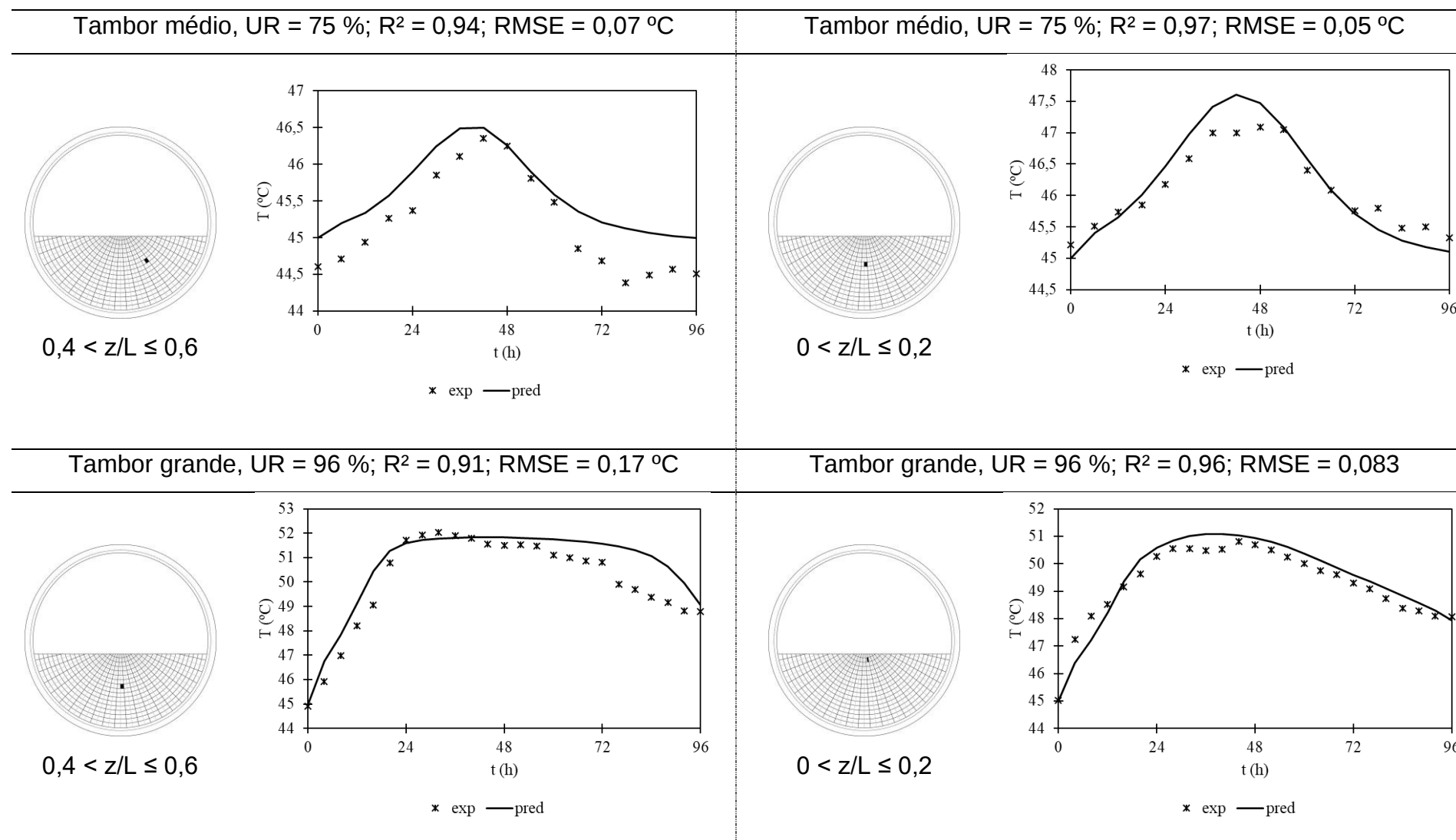
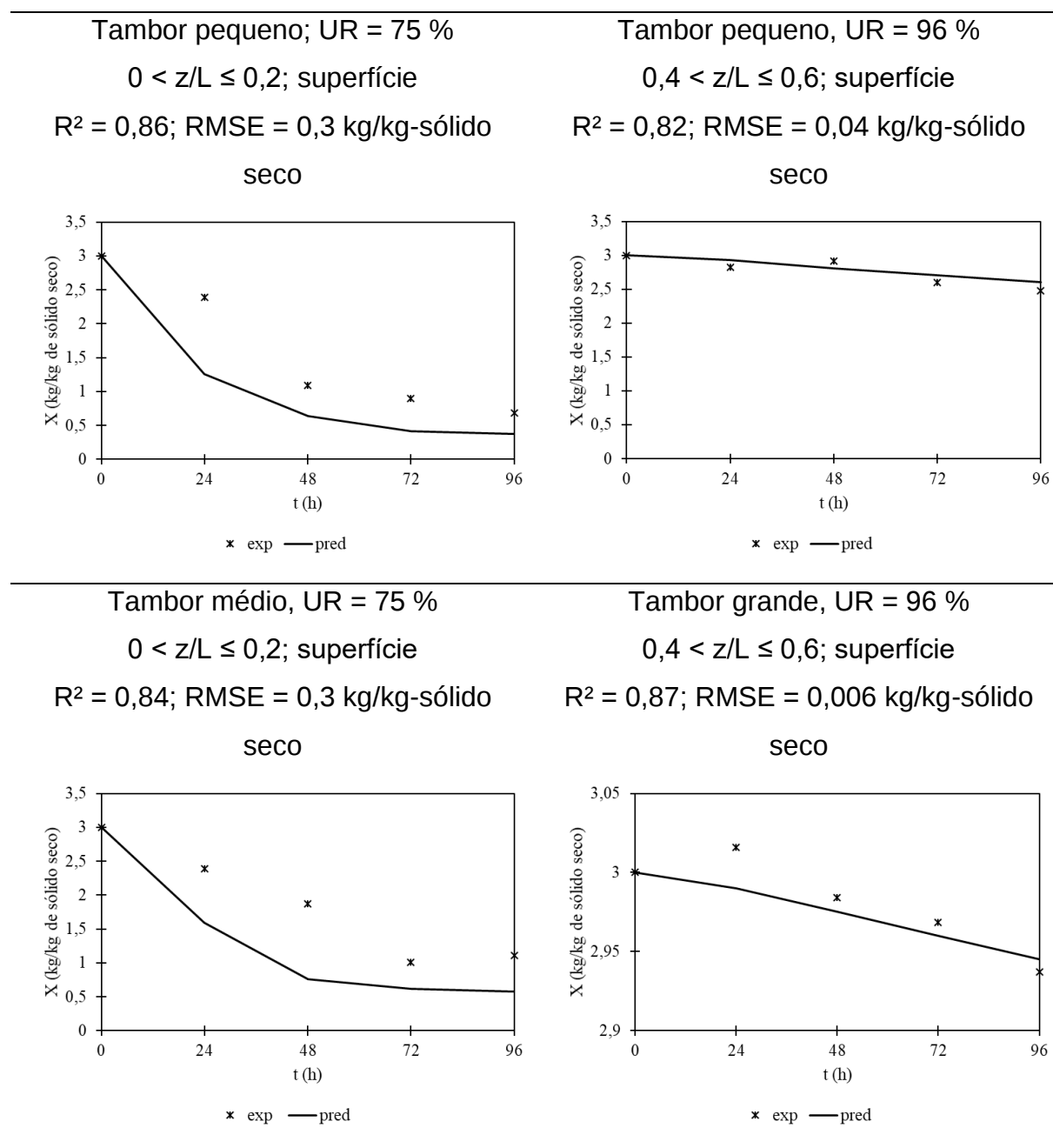


Figura 6.16: continuação



FONTE: Elaborado pela autora.

Figura 6.17 – Perfis temporais de umidade na superfície do leito em diferentes tambores e condições experimentais durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b.



FONTE: Elaborado pela autora.

Suportados pelos coeficientes R^2 , as predições de temperatura concordaram de forma mais satisfatória com os perfis experimentais. Como mencionado anteriormente, o modelo foi capaz de prever os eventos de pico de temperatura em todas as escalas de tambores, o que direciona a sua aplicabilidade em estudos de aumento de escala desde que conhecida a cinética de liberação de gases. Apesar de consideradas satisfatórias, as predições para umidade no leito apresentaram

distanciamento considerável em relação aos perfis experimentais, principalmente sob UR de 75 %.

Os perfis experimentais a UR = 75 % apresentaram valores pontuais de umidade superiores aos preditos pelo modelo. Este evento já havia sido observado em algumas ocasiões no capítulo anterior, então suspeita-se que o coeficiente de transferência de massa entre a superfície e o gás no sobre espaço tenha sido superestimado. Ainda, há de se considerar que a água proveniente das atividades metabólicas do fungo não foi computada no balanço de massa. Portanto, ao mesmo tempo em que o leito sofre ressecamento devido ao aumento da umidade relativa do gás escoante, água é liberada e apenas o primeiro evento foi considerado no modelo apresentado nesta tese. Casciotori et al. (2016) apresentaram aumento de umidade de até 10 % (b.u) sobre a umidade inicial de 75 % ao final do cultivo de *M. thermophila* I-1D3b em biorreator de leito fixo percolado por ar e empacotado por bagaço de cana e farelo de trigo. Os autores apresentaram um modelo a duas fases que previam a geração de água metabólica e, embora os resultados experimentais acusassem o aumento da umidade ao fim do cultivo, o modelo indicou que o processo findara com umidade de 75 %. Os autores não apresentaram os perfis temporais de umidade, de modo que não se sabe se existiu variação de umidade durante o cultivo e a condição inicial foi reestabelecida nos momentos finais ou se não houve quaisquer variações, então não convém afirmar que as taxas de perda de água pelo substrato eram iguais às de geração de água pelo microrganismo nesse sistema. Perez, Casciotori e Thoméo (2019) já não reportaram aumentos tão expressivos na umidade final do substrato para condições de cultivo similares às de Casciotori et al. (2016), o que dificulta a análise.

Em cultivo sólido de *Aspergillus niger* em farelo de trigo em biorreator de coluna empacotada, Fanaei e Vaziri (2009) apoiaram-se em Von Meien e Mitchell (2002) ao desconsiderar o balanço de massa por afirmarem que a atividade de água deste substrato é pouco afetada pela sua umidade. No entanto, Nagel et al. (2001) já havia mensurado a quantidade de água liberada neste sistema, que atingiu 8,35 g após 71,1 h de cultivo e correspondeu a aproximadamente 20 % da umidade inicial do substrato. Em realidade, o balanço de Nagel e colaboradores considera a água metabólica gerada e a água requerida para a hidrólise do amido, sendo o total de água gerada de 10,44 g, indicando que a água gerada não pode ser considerada desprezível neste sistema de cultivo sólido.

As propriedades higroscópicas do bagaço de cana e do farelo de trigo foram apresentadas por Casciadori et al. (2015). Segundo os autores, a cinética de absorção de água pelas duas partículas ocorrem de formas diferentes, com destaque para o farelo de trigo que é mais higroscópico, com absorção de água 38 % maior que o bagaço de cana. Além disso, o farelo de trigo manteve a sua capacidade de absorção e atingiu 80 % de umidade ao final de 10 dias de ensaio, conforme o proposto pelos autores. Diferentemente, o bagaço de cana atingiu aproximadamente 75 % de umidade após 5 dias de ensaio e, ao final de 10 dias, a sua umidade era de 76 %, o que mostra a sua restrita capacidade de absorção quando as partículas encontram-se próximas à umidade de máxima retenção de água (Tada et al., 2019).

Sob condições de cultivo ideais ($T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 100\%$) as perdas de água por evaporação são mínimas. Segundo os resultados de Casciadori et al. (2015), isso induziria a refletir que a água possivelmente gerada por *M. thermophila* I-1D3b seria dificilmente absorvida por completo pelo bagaço de cana, que é o constituinte majoritário deste leito de partículas, sendo absorvida preferencialmente pelas partículas de farelo de trigo. No entanto, os resultados de Casciadori et al. (2015) indicaram que ao menos 5 dias seriam requeridos para que as partículas de bagaço de cana, já a 75 % (b.u), absorvessem qualquer quantidade de água excedente, o que supera o tempo de cultivo de 4 dias. Desse modo, ocasionalmente a água gerada poderia encontrar-se desprendida junto à parede do tambor, como reportado por Grajales et al. (2014) e descrito em alguns ensaios de cultivo sólido nesta tese. Outra possibilidade para o sistema de cultivo ideal ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 100\%$) seria a adsorção de água pelas partículas, estando disposta na forma de filmes sobre a superfície do sólido. Este evento foi discutido por Casciadori et al. (2013) como justificativa ao comportamento da condutividade térmica efetiva na estagnação de um leito de bagaço de cana, que tendia à condutividade térmica molecular da água com o aumento da umidade das partículas. Considerando-se que toda ou parte da água gerada pelo fungo mantém-se adsorvida ao sólido, sua adição ao balanço de massa possivelmente promoveria o aumento da condutividade térmica efetiva do leito. Com isso, o calor gerado pelo microrganismo seria mais facilmente dissipado e os perfis de temperatura simulados apresentariam temperaturas mais baixas. Como não se sabe, ao certo, a quantidade de água gerada por este fungo, é impossível prever os impactos da presença deste termo sobre os balanços de massa e energia em $UR = 100\%$.

Quanto aos cultivos sob UR = 75 %, esta UR foi utilizada nesta tese com o intuito de verificar os possíveis efeitos da perda de água pelo leito de partículas e as previsões do modelo. Na realidade, dificilmente se utiliza condições similares a esta em processos de cultivo sólido, pois esta condição induz ao indesejável ressecamento das partículas. Contudo, admitindo-se esta condição extraordinária como usual, o modelo apresentado nesta tese deveria obrigatoriamente apresentar o termo de geração de água. Isso porque, suportado pelos perfis de umidade (Figura 6.17), o modelo prevê perda de água mais severa do que os resultados experimentais, de modo que a adição do referido termo poderia fornecer resultados mais próximos da realidade. Além disso, a reposição de umidade seria necessária com o uso de baixa UR, como recomendado por Schutyser et al. (2003) e Tada et al. (2019). Neste sentido, é imprescindível se conhecer a umidade do leito momentos antes da reposição de água para que as quantidades suficientes sejam aplicadas e se reestabeleça a umidade ideal de cultivo de 75 % (b.u.).

A exemplo, observe-se os perfis de umidade experimental e predito a UR = 75 %, previamente apresentados na Figura 6.17. Em tambor médio, as previsões indicam umidade na superfície do leito de 1,6 kg/kg de sólido seco, enquanto que a determinação experimental foi de 2,39 kg/kg de sólido seco. Neste sentido, o modelo indicaria a necessidade de adição de 364 mL para cada kg de sólido seco, enquanto que, em realidade, seria necessário a adição de apenas 156 mL de água/kg de sólido seco nesta condição. É evidente que estas quantidades não seriam adicionadas para todo o leito de partículas pois apenas a superfície apresenta tal ressecamento. Em $t = 24$ h, a porção superficial do leito com ressecamento próximo ao verificado é de 38 %. Neste sentido, o modelo recomendaria adição de 138 mL de água, enquanto que o ideal seria de 59 mL. Esta previsão não foi feita para os instantes seguintes, pois assume-se que, se a água é repostada em $t = 24$ h, as condições iniciais são reestabelecidas e a perda de água ocorre da mesma forma como no intervalo $0 \leq t \leq 24$ h. Fazendo-se a mesma análise para tambor pequeno a UR de 75 %, a fração volumétrica de leito com ressecamento corresponde a 48 % em $t = 24$ h, o que faz com que o modelo recomende a adição de 49 mL de água ao sistema, enquanto que o ideal seria apenas 17 mL. Nestes casos, a adição do termo que representa a geração metabólica de água pelo fungo seria indispensável.

Na Tabela 6.5 estão apresentados os resultados para T_g e X_g na saída de cada tambor, com concordância satisfatória entre os perfis. As maiores diferenças entre os

dados experimentais e preditos pelo modelo foram obtidas para T_g em tambor grande, cujas diferenças ultrapassaram 1 °C. Ainda assim, o modelo é considerado consistente e capaz de fornecer boas previsões, pois os perfis experimental e simulado apresentam a mesma tendência.

Tabela 6.5 – Perfis temporais de temperatura e umidade do gás (T_g e X_g , respectivamente) na saída de diferentes tambores e condições experimentais durante cultivo sólido de *M. thermophila* I-1D3b.

t (h)	T _g (°C)		X _g (kg/kg de ar seco)	
	experimental	predito	experimental	predito
Tambor médio, UR inicial = 75 %				
24	45,4	45	0,060	0,064
48	46,3	45,9	0,063	0,064
72	45,8	45,6	0,061	0,064
96	45,2	45,4	0,052	0,064
	RMSE = 0,16 °C		RMSE = 0,004 kg/kg de ar seco	
Tambor pequeno, UR inicial = 96 %				
	experimental	predito	experimental	predito
24	45	45,05	0,066	0,0651
48	45	45,1	0,063	0,0651
72	45,2	45	0,066	0,0651
96	45	45	0,066	0,0651
	RMSE = 0,06 °C		RMSE = 0,001 kg/kg de ar seco	
Tambor grande, UR inicial = 96 %				
	experimental	predito	experimental	predito
24	50,2	49,1	0,069	0,07
48	50,1	49,9	0,071	0,07
72	49,8	48,8	0,068	0,07
96	47,8	47,3	0,069	0,07
	RMSE = 0,39 °C		RMSE = 0,001 kg/kg de ar seco	

FONTE: Elaborado pela autora.

6.5. Conclusões parciais

As conclusões parciais deste capítulo estão pontuadas como segue:

- Ajustes satisfatórios foram obtidos entre os perfis experimentais e preditos para temperatura e umidade do sólido e temperatura e umidade do gás escoante ao longo do cultivo; porém, eventualmente, a adição de um termo que represente a geração metabólica de água no balanço de massa poderia fornecer melhores resultados.
- Visualmente, as condições mais restritas de umidade de gás promoveram ressecamento do leito e crescimento insatisfatório ao final do cultivo, refletindo-se sobre as atividades de endoglucanase. O mesmo não foi verificado para ensaios utilizando-se ar a umidade relativa de 96 %, para os quais as atividades enzimáticas foram estatisticamente iguais ou superiores ao ensaio controle em embalagens plásticas.
- O ajuste da cinética de crescimento microbiano por meio da liberação de gás carbônico foi feito para umidades relativas de 75 e 96 %, obtendo-se taxas específicas de crescimento próprias para cada umidade. Para a menor umidade relativa do ar houve retardo no pico de temperatura em relação à maior umidade. As temperaturas máximas alcançadas durante o processo são maiores para a maior umidade relativa do ar.
- Quanto aos perfis de temperatura no leito preditos pelo modelo, o tambor pequeno é o único capaz de remover todo o calor gerado pelo microrganismo.
- Nos tambores pequeno e médio houve variação axial de temperatura, que não foi observada em tambor grande.
- Os perfis de temperatura do gás escoando no sobre espaço assumem a mesma tendência que os perfis de temperatura no leito em todos os tambores.
- Perfis axiais de umidade do gás são desenvolvidos em todos os tambores, com umidade menor que a saturação na saída de cada tambor, portanto o gás continua a capturar água da superfície do leito mesmo que a baixas taxas em ambas as umidades relativas de entrada.
- Embora a parede imponha o mecanismo de remoção mais eficiente no tambor pequeno, para o tambor grande a convecção através da superfície é

determinante para o controle de temperatura do leito, recomendando-se altas vazões de ar saturado no *headspace* para um efetivo controle.

CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final desta tese, considera-se que as etapas propostas até a proposição de um modelo matemático mais realístico foram fundamentais para o seu êxito na predição de variáveis de processo no estudo de caso de cultivo sólido do fungo termofílico *Myceliophthora thermophila* I-1D3b sobre um leito estático de bagaço de cana e farelo de trigo em tambores horizontais de diferentes tamanhos, com potencial de aplicação em estudos de aumento de escala deste tipo de biorreator.

CAPÍTULO 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- Obter parâmetros de transporte de calor e massa para a mistura entre bagaço de cana e farelo de trigo em presença de microrganismo;
- Verificar os modelos de calor e massa aplicando-se diferentes graus de enchimentos nos diferentes tambores;
- Incluir um termo que represente a possível geração metabólica de água ao longo do cultivo;
- Verificar o modelo proposto para fungos mesofílicos;
- Propor uma relação entre a concentração de biomassa fúngica por métodos indiretos e a liberação de gases;
- Proposição de modelo a duas fases para predição dos perfis de interesse de leitos estáticos e compreensão mais detalhada dos fenômenos envolvidos;
- Apresentar um modelo que descreva a dinâmica das partículas de bagaço de cana e farelo de trigo durante os períodos de agitação, supondo-se que se adote regime intermitente de rotação neste equipamento;
- Estabelecer um critério de homogeneidade de partículas baseado no número de rotações necessárias para que um elemento de volume representativo apresente umidade e/ou temperatura médias do leito de partículas;
- Acoplar as soluções para leitos estáticos e leitos dinâmicos, com vistas à possível utilização dos mecanismos disponíveis no biorreator de tambor rotativo de interesse para remoção de calor e manutenção das condições ótimas de cultivo em escala piloto;
- Apresentar estratégias operacionais que sejam adequadas para realização de cultivo sólido em regime intermitente de rotações em escala industrial.

REFERÊNCIAS

ACHENBACH, E. Heat and flow characteristics of packed beds. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 10, n. 1, p. 17-27, 1995.

ACUÑA-ARGÜELLES, M.; GUTIÉRREZ-ROJAS, M.; VINIEGRA-GONZÁLEZ, G.; FAVELA-TORRES, E. Effect of water activity on exo-pectinase production by *Aspergillus niger* CH4 on solid state fermentation. **Biotechnology Letters**, v. 16, n. 1, p. 23-28, 1994.

ALONSO, E.; GALLO, A.; ROLDÁN, M. I.; PÉREZ-RÁBAGO, C. A.; FUENTEALBA, E. Use of rotary kilns for solar thermal applications: Review of developed studies and analysis of their potential. **Solar Energy**, v. 144, p. 90-104, 2017.

AMORIM, G. M.; SANTOS, T. C.; PACHECO, C. S. V.; BARRETO, I. M. A.; FREIRE, D. M. G.; FRANCO, M. Fermentação de farelo de cacau por *Aspergillus niger* para obtenção de lipases. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 8, n. 1, p. 24-27, 2012.

ARGO, W. B.; SMITH, J. M. Heat transfer in packed beds: prediction of radial rates in gas-solid beds. **Chemical Engineering Progress**, v. 49, n. 8, p. 443-451, 1953.

ARORA, S.; RANI, R.; GHOSH, S. Bioreactors in solid state fermentation technology: Design, applications and engineering aspects. **Journal of Biotechnology**, v. 269, p. 16-34, 2018.

ASHLEY, V. M.; MITCHELL, D. A.; HOWES, T. Evaluating strategies for overcoming overheating problems during solid-state fermentation in packed bed bioreactors. **Biochemical Engineering Journal**, v. 3, p. 141-150, 1999.

BAI, J.; LIU, F.; LI, S.; LI, P.; CHANG, C.; FANG, S. Solid-state fermentation process for gibberellin production using enzymatic hydrolysate corn stalks. **Bioresources**, v. 15, n. 1, p. 429-443, 2020.

BANGA, J. R.; SINGH, R. P. Optimization of air drying of foods. **Journal of Food Engineering**, v. 23, n. 2, p. 189-211, 1994.

BEAVERS, G. S.; SPARROW, E. M.; RONDENZ, D. E. Influence of bed size on the flow characteristics and porosity of randomly packed beds of spheres. **Journal of Applied Mechanics**, v. 40, n. 3, p. 655-660, 1973.

BEDANE, A. H.; EIC, M.; FARMAHINI-FARAHANI, M.; XIAO, H. Water vapor transport properties of regenerated cellulose and nanofibrillated cellulose films. **Journal of Membrane Science**, v. 493, p. 46-57, 2015.

BEQUETTE, B. W. **Process Dynamics: Modeling, Analysis and Simulation**. Prentice Hall PTR: New Jersey, 1998.

BERTUCCI, V. F.; TADA, É. F. R.; THOMÉO, J. C. Modelagem e simulação de transferência de calor em tambor horizontal parcialmente preenchido com partículas orgânicas. In: **XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação**

Científica, 2017, São Carlos. Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2017, disponível on-line.

BIZ, A.; FINKLER, A. T. J.; PITOL, L. O.; MEDINA, B. S.; KRIEGER, N.; MITCHELL, D. A. Production of pectinases by solid-state fermentation of a mixture of citrus waste and sugarcane bagasse in a pilot-scale packed-bed bioreactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 111, p. 54-62, 2016.

BOUYOUCOS, G. J. Effect of temperature on the movement of water vapor and capillary moisture in soils. **Journal of Agricultural Research**, v. 5, p. 141-172, 1915.

BRITO, R. C.; PÁDUA, T. F.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum [*Sorghum bicolor* (L) moench]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 117, p. 95-105, 2017.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CAI, J.; YU, B. A discussion of the effect of tortuosity on the capillary imbibition in porous media. **Transport in porous media**, v. 89, n. 2, p. 251-263, 2011.

CAMERON, I. T.; WANG, F. Y.; IMMANUEL, C. D.; STEPANEK, F. Process system modelling and applications in granulation: A review. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 14, p. 3723-3750, 2005.

CASCIATORI, F. P. **Obtenção de parâmetros físicos e térmicos para simulação e projeto de bioreactores de fermentação em estado sólido em leito fixo**. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2011.

CASCIATORI, F. P. **Produção de celulases fúngicas por fermentação em estado sólido: ampliação de escala de biorreatores de leito fixo**. 2016. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2015.

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. **Chemical Engineering Journal**, v. 287, p. 103-116, 2016.

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; LOPES, K. C. M.; SOUZA, A. G.; THOMÉO, J. C. Stagnant Effective Thermal Conductivity of Agro-Industrial Residues for Solid-State Fermentation. **International Journal 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 by-products applicable for solid-state fermentation: Experimental data and effects on process performance. **Chemical Engineering Journal**, v. 255, p. 214-224, 2014.

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; ZANELATO, A. I.; THOMÉO, J. C. Hygroscopic properties of solid agro-industrial by-products used in solid-state fermentation. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 114-123, 2015.

CASSIA-PEREIRA, J.; MARQUES, N. P.; RODRIGUES, A.; OLIVEIRA, T. B.; BOSCOLO, M.; SILVA, R.; GOMES, E.; MARTINS, D. A. B. Thermophilic fungi as new sources for production of cellulases and xylanases with potential use in sugarcane bagasse saccharification. **Journal of Applied Microbiology**, v. 118, p. 928-939, 2015.

CHAUDHURI, B.; MUZZIO, F. J.; TOMASSONE, M. S. Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners. **Powder Technology**, v. 198, p. 6-15, 2010.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. **Physical and Chemical Properties of Food**. Martin R. Okos (Ed.). ASAE, St. Joseph, MI, p. 35-77, 1986.

COBERLY, C. A.; MARSHALL, W. R. Temperature gradients in gas streams flowing through fixed granular beds. **Chemical Engineering Progress**, v. 47, n. 3, p. 141-150, 1951.

COLBURN, A. P. Heat transfer and pressure drop in empty, baffled, and packed tubes. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 23, n. 8, p. 910-913, 1931.

CORONA, A.; SÁEZ, D.; AGOSIN, E. Effect of water activity on gibberellic acid production by *Gibberella fujikuroi* under solid-state fermentation conditions. **Process Biochemistry**, v. 40, p. 2655-2658, 2005.

CUNHA, L. P.; CASCIATORI, F. P.; CENÇO, I. L.; THOMÉO, J. C. Production of conidia of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* ICB 425 in a tray bioreactor. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 42, n. 11, p. 1757-1768, 2019.

DESSIE, W.; ZHANG, W.; XIN, F.; DONG, W.; ZHANG, M.; MA, J.; JIANG, M. Succini acid production from fruit and vegetable wastes hydrolyzed by on-site enzyme mixtures through solid state fermentation. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1177-1180, 2018.

DEZAM, A. P. G.; VASCONCELLOS, V. M.; LACAVAL, P. T.; FARINAS, C. S. Microbial production of organic acids by endophytic fungi. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 11, p. 282-287, 2017.

DURAND, A. Bioreactor designs for solid state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, p. 113-125, 2003.

EASTMAN, E. D. Theory of the Soret effect. **Journal of the American Chemical Society**, v. 50, n. 2, p. 283-291, 1928.

EDUARDO, M. P. **Desempenho e Homogeneidade de Cultivos em Meio Sólido de *Monascus* sp. Em Biorreator do Tipo Tambor com Agitação Interna: Efeitos do Padrão de Agitação**. 2010. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2010.

ERGUN, S. O.; UREK, R. O. Production of ligninolytic enzymes by solid state fermentation using *Pleutotus ostreatus*. **Annals of Agrarian Science**, v. 15, p. 273-277, 2017.

FANAEI, M. A.; VAZIRI, B. M. Modeling of temperature gradients in packed-bed solid-state bioreactors. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, p. 446-451, 2009.

FEDKIW, P. S.; NEWMAN, J. Mass-transfer coefficients in packed beds at very low Reynolds number. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 25, p. 935-943, 1982.

FILLIPIN, A. P.; TADA, É. F. R.; THOMÉO, J. C.; MAURO, M. A. Cinética e modelagem de secagem convectiva de fatias de maçã fuji. In: **XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá/PR, 2017.

FIROUZI, S.; ALIZADEH, M. R.; HAGHTALAB, D. Energy consumption and rice milling quality upon drying paddy with a newly-designed horizontal rotary dryer. **Energy**, v. 119- p. 629-636, 2017.

FREIRE, F. B.; ATXUTEGI, A.; FREIRE, J. T.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. An adaptive lumped parameter cascade model for Orange juice solid waste drying in spouted bed. **Drying Technology**, v. 35, n. 5, p. 577-584, 2017.

FUNG, C. J.; MITCHELL, D. A. Baffles increase performance of solid-state fermentation in rotating drum bioreactors. **Biotechnology Techniques**, v. 9, p. 295-298, 1995.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. p.22-26.

GHILDYAL, N. P.; GOWTHAMAN, M. K.; RAGHAVA RAO, K. S. M. S.; KARANTH, N. G. Interaction of transport resistances with biochemical reaction in packed-bed solid-state fermentors: Effect of temperature gradients. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 16, p. 253-257, 1994.

GHOSE, T. K. Measurement of cellulase activities. **Pure and Applied Chemistry**, v. 59, n. 2, p. 257-268, 1987.

GIESE, M. **Strömung in porösen Medien unter Berücksichtigung effektive Viskositäten**. 1998. Dissertação (Mestrado). Technik Universität Munich, Munique, 1998.

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in the turbulent flow in pipes and channels. **NASA STI/Recon Technical Report A**, v. 75, p. 8-16, 1975.

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International Chemical Engineering**, v. 16, n. 2, p. 359-368, 1976.

GOMES, A. C. S. **Cinética de crescimento do fungo termófilo *Myceliophthora thermophila* M.7.7 em cultivo no estado sólido**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado)

em Microbiologia) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2015.

GOODLING, J. S.; VACHON, R. I.; STELPFLUG, W. S.; YING, S. J.; KHADER, M. S. Radial porosity distribution in cylindrical beds packed with spheres. **Powder Technology**, v. 35, n. 1, p. 23-29, 1983.

GRAJALES, L. M. **Desenvolvimento de um biorreator rotativo para produção de enzimas celulolíticas por fermentação em estado sólido**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2014.

GRAJALES, L. M.; XAVIER, N. M.; HENRIQUE, J. P.; THOMÉO, J. C. Mixing and motion of rice particles in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 222, p. 167-175, 2012.

GRAJEK, W.; GERVAIS, P. Influence of water activity on the enzyme biosynthesis and enzyme activities produced by *Trichoderma viride* TS in solid-state fermentation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 9, p. 658-662, 1987.

GRAMINHA, E. B. N.; GONÇALVES, A. Z. L.; PIROTA, R. D. P. B.; BALSALOBRE, M. A. A.; SILVA, R.; GOMES, E. Enzyme production by solid-state fermentation: Application to animal nutrition. **Animal Feed Science and Technology**, v. 144, p. 1-22, 2008.

GU, C.; ZHANG, X.; LI, B.; YUAN, Z. Study on heat and mass transfer of flexible filamentous particles in a rotary dryer. **Powder Technology**, v. 267, p. 234-239, 2014.

HASSOUNI, H.; ISMAILI-ALAOUI, M.; GAIME-PERRAUD, I.; AUGUR, C.; ROUSSOS, S. Effect of culture media and fermentation parameters on phytase production by the thermophilic fungus *Myceliophthora thermophila* in solid state fermentation. **Micologia Aplicada International**, v. 18, n. 2, p. 29-36, 2006.

HENEIN, H.; BRIMACOMBE, J. K.; WATKINSON, A. P. Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. **Metallurgical Transactions B**, v. 14B, n. 2, p.191-205,1983.

HERZ, F.; MITOV, I.; SPECHT, E.; STANEV. Experimental study of the contact heat transfer coefficient between the covered wall and solid bed in rotary drums. **Chemical Engineering Science**, v. 82, p. 312-318, 2012a.

HERZ, F.; MITOV, I.; SPECHT, E.; STANEV. R. Influence of operational parameters and material properties on the contact heat transfer in rotary kilns. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, p. 7941-7948, 2012b.

HIMMELBLAU, D. M. **Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982.

HÖLKER, U.; HÖFER, M.; LENZ, J. Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 64, p. 175-186, 2004.

HÖLKER, U.; LENZ, J. Solid-state fermentation – are there any biotechnological advantages? **Current Opinion in Microbiology**, v. 8, p. 301-306, 2005.

IDRIS, A. S. O.; PANDEY, A.; RAO, S. S.; SUKUMARAN, R. K. Cellulase production through solid-state tray fermentation and its use for bioethanol from sorghum stover. **Bioresource Technology**, v. 242, p. 265-271, 2017.

IGUAZ, A.; SAN MARTÍN, M. B.; MATE, J. I.; FERNANDEZ, T.; VIRSEDA, P. Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (*Lido cultivar*) at low drying temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 2-3, p. 253-258, 2003.

INAGAKI, S.; FUKUSHIMA, Y.; KURODA, K.; KURODA, K. Adsorption isotherm of water vapor and its large hysteresis of highly ordered mesoporous silica. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 180, p. 623-624, 1996.

KARABELAS, A. J.; WEGNER, T. H.; HANRATTY, T. J. Use of asymptotic relations to correlate mass transfer data in packed beds. **Chemical Engineering Science**, v. 26, n. 10, p. 1581-1589, 1971.

KARNAOURI, A. C.; TOPAKAS, E.; CHRISTAKOPOULOS, P. Cloning, expression and characterization of a thermostable GH7 endoglucanase from *Myceliophthora thermophila* capable of high-consistency enzymatic liquefaction. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 98, p. 231-242, 2014.

KAST, W.; KLAN, H. **Heat transfer by free convection: external flows**. In: VDI Heat Atlas, Abschnitt M7, Auflage. Springer Verlag: Berlin, 2010.

KOUTINAS, A. A.; WANG, R.; WEBB, C. Estimation of fungal growth in complex, heterogeneous culture. **Biochemical Engineering Journal**, v. 14, p. 93-100, 2003.

KRISCHER, O.; ESDORN, H. **Die Wärmeübertragung in feuchten, porigen Stoffen verschiedener Struktur**. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A, v. 22, n. 1, p. 1-8, 1956.

KWAPINSKA, M.; SAAGE, G.; TSOTSAS, E. Continuous versus discrete modelling of heat transfer to agitated beds. **Powder Technology**, v. 181, p. 331-342, 2008.

LAN, X. K.; KHODADADI, J. M. Fluid-Flow and Heat-Transfer through a Porous-Medium Channel with Permeable Walls. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 36, n. 8, p. 2242-2245, 1993.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LEBEDEFF, A. F. **The movement of ground and soil waters**. 1927.

LU, W.; LI, D.; WU, Y. Influence of water activity and temperature on xylanase biosynthesis in pilot-scale solid-state fermentation by *Aspergillus sulphureus*. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 32, p. 305-311, 2003.

LUIKOV, A. V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 18, n. 1, p. 1-14, 1975.

LYBAERT, P. Wall-particles heat transfer in rotating heat exchanges. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 30, p. 1663-1672, 1987.

MARQUES, N. P.; PEREIRA, J. C.; GOMES, E.; SILVA, R.; ARAÚJO, A. R.; FERREIRA, H.; RODRIGUES, A.; DUSSÁN, K. J.; BOCCHINI, D. A. Cellulases and xylanases production by endophytic fungi by solid state fermentation using lignocellulosic substrates and enzymatic saccharification of pretreated sugarcane bagasse. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 66-75, 2018.

MARTIN, H. Low Peclet number particle-to-fluid heat and mass transfer in packed beds. **Chemical Engineering Science**, v. 33, n. 7, p. 913-919, 1978.

MARTINI, W. R.; CHURCHILL, S. W. Natural Convection Inside a Horizontal Cylinder. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v. 6, n. 2, p. 251-257, 1960.

MELIKOGLU, M.; LIN, C. S. K.; WEBB, C. Solid state fermentation of waste bread pieces by *Aspergillus awamori*: Analyzing the effects of airflow rate on enzyme production in packed bed bioreactors. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 63-75, 2015.

MENDES, F. B.; CHAUX, A. M.; THOMÉO, J. C. Efeito da umidade nas propriedades físicas e estruturais do bagaço de cana. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 6401-6408, 2015.

MIKKOLA, V.; PUUPPONEN, S.; GRANBOHM, H.; SAARI, K.; ALA-NISSILA, T.; SEPPÄLÄ, A. Influence of particle properties on convective heat transfer of nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 124, p. 187-195, 2018.

MILLER, G. L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, p. 426-428, 1959.

MIRANDA, M. N. N. **Difusividade efetiva de água em misturas de sólidos porosos**. 2007. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MITCHELL, D. A.; LUZ, L. F. L.; KRIEGER, N.; BEROVIČ, M. **Bioreactors for Solid-State Fermentation**. In: Comprehensive Biotechnology (Second Edition). Academic Press, p. 347-360. 2011.

MITCHELL, D. A.; PANDEY, A.; SANGSURASAK, P.; KRIEGER, N. Scale-up strategies for packed-bed bioreactors for solid-state fermentation. **Process Biochemistry**, v. 35, p. 167-178, 1999.

MITCHELL, D. A.; TONGTA, A.; STUART, D. M.; KRIEGER, N. The potential for establishment of axial temperature profiles during solid-state fermentation in rotating drum bioreactors. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 80, n. 1, p. 113-122, 2002.

MITCHELL, D. A.; VON MEIEN, O. F.; KRIEGER, N. Recent developments in modeling of solid-state fermentation: heat and mass transfer in bioreactors. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, n. 2-3, p. 137-147, 2003.

MITCHELL, D. A.; VON MEIEN, O. F.; KRIEGER, N.; DALSENTER, F. D. H. A review of recent developments in modeling of microbial growth kinetics and intraparticle

phenomena in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 17, p. 15-26, 2004.

MOHSENI, M.; PETERS, B. Effects of particle size distribution on drying characteristics in a drum by XDEM: A case study. **Chemical Engineering Science**, v. 152, p. 689-698, 2016.

MORTIMER, R. G.; EYRING, H. Elementary transition state theory of the Soret and Dufour effects. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 77, n. 4, p. 1728-1731, 1980.

MUELLER, G. E. Radial porosity in packed beds of spheres. **Powder Technology**, v. 203, n. 3, p. 626-633, 2010.

NAFSUN, A. I.; HERZ, F. Experiments on the temperature distribution in the solid bed pf rotary drums. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 1039-1047, 2016.

NAGEL, F. J. I. **Process control of solid-state fermentation: Simultaneous control of temperature and moisture content**. 2002. 191 f. PhD. Thesis – Wageningen Universiteit, 2002.

NAGEL, F. J. J. I.; TRAMPER, J.; BAKKER, M. S. N.; RINZEMA, A. Model for On-Line Moisture-Content Control During Solid-State Fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 72, n. 2, p. 231-243, 2001.

ORIOLE, E.; RAIMBAULT, M.; ROUSSOS, S.; VINIEGRA-GONZALES, G. Water and water activity in the solid state fermentation of cassava starch by *Aspergillus niger*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 27, p. 498-503, 1988.

PANDEY, A. Solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, p. 81-84, 2003.

PANDEY, A.; ASHAKUMARY, D.; SELVAKUMAR, P.; VIJAYALAKSHMI, K. S. Influence of water activity on growth and activity of *Aspergillus niger* for glycoamylase production in solid-state fermentation. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 10, n. 4, p. 485-486, 1994.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; SOCCOL, V. T. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 74, p. 69-80, 2000.

PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217, 1988.

PENGNOI, P.; MAHAWAN, R.; KHANONGNUCH, C.; LUMYONG, S. Antioxidant properties and production on Monacolin K, citrinin, and red pigments during solid state fermentation of purple rice (*Oryza sativa*) varieties by *Monascus purpureus*. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 35, p. 32-39, 2017.

PEREZ, C. L. **Avaliação da viabilidade técnica da ampliação de escala da produção de enzimas celulolíticas e hemicelulolíticas por FES em biorreatores de leite empacotado**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de

Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2017.

PEREZ, C. L.; CASCIATORI, F. P.; THOMÉO, J. C. Strategies for scaling-up packed-bed bioreactors for solid-state fermentation: The case of cellulolytic enzymes production by a thermophilic fungus. **Chemical Engineering Journal**, v. 361, p. 1142-1151, 2019.

PERRY, R. H.; CHITON, C. H. **Chemical Engineer's Handbook**, McGraw-Hill, 1973

PESARAN, A. A.; MILLS, A. F. Moisture Transport in Silica Gel Packed Beds: Experimental Study. II. **Solar Energy Research Institute**, 1986.

PHILLIP, J. R.; DE VRIES, D. A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 2, p. 222-232, 1957.

PIA, G.; CASNEDI, L. Heat transfer in high porous alumina: Experimental data interpretation by different modelling approaches. **Ceramics International**, v. 43, n. 12, p. 9184-9190, 2017.

PIETSCH, W. B. **Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment**. John Wiley & Sons, 2008.

PRIETO, M. G. S. **Alternativas de cogeração na indústria sucro-alcooleira: estudo de caso**. 2003. 282 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RAGHAVARAO, K. S. M. S.; RANGANATHAN, T. V.; KARANTH, N. G. Some engineering aspects of solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, p. 127-135, 2003.

RAHARDJO, Y. S. P.; SIE, S.; WEBER, F. J.; TRAMPER, J.; RINZEMA, A. Effect of low oxygen concentrations on growth and α -amylase production of *Aspergillus oryzae* in model solid-state fermentation systems. **Biomolecular Engineering**, v. 21, p. 163-172, 2005.

RAITHBY, G. D.; HOLLANDS, K. G. T. **A general method of obtaining approximate solutions to laminar and turbulent free convection problems**. In: Advances in heat transfer. Elsevier, 1975. p. 265-315, 1975.

RAJAGOPALAN, S.; MODAK, J. M. Heat and mass transfer simulation studies for solid-state fermentation processes. **Chemical Engineering Science**, v. 49, n. 13, p. 2187-2193, 1994.

RAJAGOPALAN, S.; MODAK, J. M. Modeling of heat and mass transfer for solid state fermentation process in tray bioreactor. **Bioprocess Engineering**, v. 13, p. 161-169, 1995.

REU, J. C.; ZWIETERING, M. H.; ROMBOUTS, F. M.; NOUT, M. J. R. Temperature control in solid substrate fermentation through discontinuous rotation. **Applied Microbiology and Technology**, v. 40, p. 261-265, 1993.

RICKEN, T. **Transport of fluids in capillary porous solids**. PAMM, v. 2, n. 1, p. 384-385, 2003.

ROBLEE, L. H. S.; BAIRD, R. M.; TIERNEY, J. W. Radial porosity variations in packed beds. **AIChE Journal**, v. 4, n. 4, p. 460-464, 1958.

ROCHA, G.J.M.; MARTIN, C.; SOARES, I.B.; SOUTOMAIOR, A. M.; BAUDEL, H. M.; de ABREU, C. A. M. Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production, **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 663–670, 2011.

ROCHA, G. J. M.; NASCIMENTO, V. M.; GONÇALVES, A. R.; SILVA, V. F. N.; MARTÍN, C. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 52-58, 2015.

RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U. F.; FARINAS, C. S.; BERTUCCI NETO, V.; COURI, S.; CRESTANA, S. Produção de celulases por *Aspergillus niger* por fermentação em estado sólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 8, p. 912-919, 2011.

SAITHI, S.; BORG, J.; NOPHARATANA, M.; TONGTA, A. Mathematical modeling of biomass and enzyme production kinetics by *Aspergillus niger* in solid-state fermentation at various temperatures and moisture contents. **Journal of Microbial & Biochemical Technology**, v. 8, p. 123-130, 2016.

SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. Incorporation of death kinetics into a 2-dimensional dynamic heat transfer model for solid state fermentation. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 64, n. 3, p. 253-260, 1995b.

SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. The investigation of transient multidimensional heat transfer in solid state fermentation. **The Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal**, v. 60, p. 199-204, 1995a.

SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. Validation of a model describing two-dimensional heat transfer during solid-state fermentation in packed bed bioreactors. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 60, n. 6, p. 739-749, 1998.

SAUCEDO-CASTAÑEDA, G.; GUTIÉRREZ-ROJAS, M.; BACQUET, G.; RAIMBAULT, M.; VINIEGRA-GONZÁLEZ, G. Heat transfer simulation in solid substrate fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 35, n. 8, p. 802-808, 1990.

SAXTON, R. L.; DOUGHERTY, E. L.; DRICKAMER, H. G. Thermal diffusion in binary liquid mixtures of molecules of simple symmetry. **The Journal of Chemical Physics**, v. 22, n. 7, p. 1166-1168, 1954.

SCHLÜNDER, E. U. **Einführung in die Wärme-und Stoffübertragung**, 2nd Edn. p. 74, Vieweg, Braunschweig, 1975.

SCHLÜNDER, E. U. Wärme- und Stoffübertragung zwischen durchströmten Schüttungen und darin eingebetteten Einzelkörpern. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 38, n. 9, p. 967-979, 1966.

SCHUTYSER, M. A. I.; PADDING, J. T.; WEBER, F. J.; BRIELS, W. J.; RINZEMA, A.; BOOM, B. Discrete particle simulations predicting mixing behavior of solid substrate particles in a rotating drum fermenter. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 75, n. 6, p. 666-675, 2001.

SCHUTYSER, M. A. I.; WEBER, F. J.; BRIELS, W. J.; RINZEMA, A.; BOOM, R. M. Heat and water transfer in a rotating drum containing solid substrate particles. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 82, n. 5, p. 553-563, 2003.

SILVA, G. F. A. **Influência dos macronutrientes no crescimento de *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em cultivo submerso**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2017.

SIMAL, S.; DEYA, E.; FRAU, M.; ROSSELLO, C. Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 33, n. 1-2, p. 139-150, 1997.

SINGHANIA, R. R.; PATEL, A. K.; SOCCOL, C. R.; PANDEY, A. Recent advances in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 44, p. 13-18, 2009.

SMITS, J. P.; RINZEMA, A.; TRAMPER, J.; CAN SONSBECK, H. M.; HAGE, J. C.; KAYNAK, A.; KNOL, W. The influence of temperature on kinetics in solid-state fermentation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 22, p. 50-57, 1998.

SOARES, L. C. S. R. **Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

SOCCOL, C. R.; COSTA, E. S. F.; LETTI, L. A. J.; KARP, S. G.; WOICIECHOWSKI, A. L.; WANDENBERGHE, L. P. S. Recent developments and innovations in solid state fermentation. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 1, p. 52-71, 2017.

SRIANTA, I.; ZUBAIDAH, E.; ESTIASIH, T.; YAMADA, M.; HARIJONO. Comparison of *Monascus purpureus* growth, pigment production and composition on different cereal substrates with solid state fermentation. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 7, p. 181-186, 2016.

STUART, D. M.; MITCHELL, D. A. Mathematical model of heat transfer during solid-state fermentation in well-mixed rotating drum bioreactors. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 78, p. 1180-1192, 2003.

STUART, D. M.; MITCHELL, D. A.; JOHNS, M. R.; LITSTER, J. D. Solid-state fermentation In rotating drum bioreactors: Operating variables affect performance through their effects on transport phenomena. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 63, n. 4, p. 382-391, 1999.

SZEWCZYK, K. W.; MYSZKA, L. The effect of temperature on the growth of *A. niger* in solid state fermentation. **Bioprocess Engineering**, v. 30, p. 123-126, 1994.

TADA, E. F. R.; BÜCK, A.; CASCIATORI, F. P.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Investigation of heat transfer in partially filled horizontal drums. **Chemical Engineering Journal**, v. 316, p. 988-1003, 2017a.

TADA, É. F. R.; BÜCK, A.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Mass transport in a partially filled horizontal drum: Modelling and experiments. **Chemical Engineering Science**, v. 214, p. 1-18, 2020.

TADA, É. F. R.; GRAJALES, L. M.; LEMOS, Y. P.; THOMÉO, J. C. Mixture and motion of sugar cane bagasse in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 317, p. 30-309, 2017b.

TADA, É. F. R.; GRAJALES, L. M.; THOMÉO, J. C. Water holding capacity and heat transfer aspects of a mixture of sugar cane bagasse and wheat bran in a partially filled rotating drum. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 36, p. 1131-1141, 2019.

TADA, É. F. R.; LUCAS, G. T.; ONOFRE, L. A. G. C.; PEREZ, C. L.; THOMÉO, J. C. Influence of scale up on endoglucanase production in solid cultivation in horizontal drum bioreactor. In: **XXI Simpósio Nacional de Bioprocessos e XII Simpósio de Hidrólise Enzimática de Biomassas**, 2017, Aracaju. Anais do XXI Simpósio Nacional de Bioprocessos e XII Simpósio de Hidrólise Enzimática de Biomassas, 2017c, disponível on-line.

TARHAN, S.; TELCI, I.; TUNCAY, M. T.; POLATCI, H. Product quality and energy consumption when drying peppermint by rotary drum dryer. **Industrial Crops and Products**, v. 32, p. 420-427, 2010.

THOMÉO, J. C. **Análise experimental dos efeitos de entrada térmicos sobre os coeficientes de transferência de calor em leito fixo**. 1990. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1990.

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.

VAFI, K.; KHALED, A. R. A. Analysis of flexible microchannel heat sink systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 9, p. 1739-1746, 2005.

VAN DER HELD, E. F. M.; VAN DRUNEN, F. G. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. **Physica**, 1949, v. 15, p. 865.

VICINI, G.; MITCHELL, D. A.; BOIT, S. D.; GERN, J. C.; ROSA, A. S. da; COSTA, R. M.; DALSENTER, F. D. H.; VON MEIEN, O. F.; KRIEGER, N. Analysis of growth kinetic profiles in solid-state fermentation. **Food Technology and Biotechnology**, v. 39, p. 271-294, 2001.

VON MEIEN, O. F.; MITCHELL, D. A. A two-phase model for water and heat transfer within an intermittently-mixed solid-state fermentation bioreactor with forced aeration. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 79, p. 416-428, 2002.

WANG, E. Q., LI, S., TAO, L., GENG, X., LI, T. Modeling of rotating drum bioreactor for anaerobic solid-state fermentation. **Applied Energy**, v. 87, n. 9, p. 2839-2845, 2010.

WES, G. W. J., DRINKENBURG, A. A. H., STEMERDING, S. Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor. **Powder Technology**, v. 13, p. 185-192, 1976.

WIEGNANT, W. M. Growth characteristics of the thermophilic fungus *Scytalidium thermophilum* in relation to production of mushroom compost. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 58, n. 4, p. 1301-1307, 1992.

WIEGNANT, W. M.; WERY, J.; BUI THENHUIS, E. T.; BONT, J. A. M. Growth-promoting effect of thermophilic fungi on the mycelium of the edible mushroom *Agaricus bisporus*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 58, n. 8, p. 2654-2659, 1992.

WINTERBERG, M.; TSOTSAS, E. Correlations for effective heat transport coefficients in beds packed with cylindrical particles. **Chemical Engineering Science**, v. 55, p. 5937-5943, 2000.

WINTERBERG, M.; TSOTSAS, E.; KRISCHKE, A.; VORTMEYER, D. A simple and coherent set of coefficients for modelling of heat and mass transport with and without chemical reaction in tubes filled with spheres. **Chemical Engineering Science**, v. 55, p. 967-979, 2000.

WOLF, C.; GUILLARD, V.; ANGELLIER-COUSSY, H.; SILVA, G. G. D.; GONTARD, N. Water vapor sorption and diffusion in wheat straw particles and their impact on the mass transfer properties of biocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 16, 2016.

YAGI, S.; WAKAO, N. Heat and mass transfer from wall to fluid in packed beds. **AIChE Journal**, v. 5, n. 1, p. 79-85, 1959.

ZANELATO, A. I.; SHIOTA, V. M.; GOMES, E.; SILVA, R.; THOMÉO, J. C. Endoglucanase production with the newly isolated *Myceliophthora* sp. I-1D3b in a packed bed solid state fermentor. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 43, p. 1536-1544, 2012.

ZEHNER, P.; SCHLÜNDER, E. U. Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen bei mäßigen Temperaturen. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 45, n. 14, p. 933-941, 1970.