

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LEITO FIXO COM REVERSÃO DO AR DE SECAGEM: ESTUDO  
EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA SECAGEM DE ALUMINA

LUANA BOGER GENARO

SÃO CARLOS - SP

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LEITO FIXO COM REVERSÃO DO AR DE SECAGEM: ESTUDO  
EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA SECAGEM DE ALUMINA

LUANA BOGER GENARO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Orientador:** Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

**Coorientador:** Prof. Dr. José Teixeira Freire

SÃO CARLOS - SP

2021



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Luana Boger Genaro, realizada em 26/02/2021.

#### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fabio Bentes Freire (UFSCar)

Prof. Dr. Jose Teixeira Freire (UFSCar)

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira (UFSCar)

Profa. Dra. Geisa Albini (UNESP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Dedico este trabalho aos meus pais Celiria e Alfeu,  
pelo amor genuíno, confiança e ensinamentos.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Fábio Bentes Freire pelos ensinamentos, incentivo e carinho. Muito obrigada pela confiança, pelo exemplo de superação e de pensamento positivo.

Ao Prof. José Teixeira Freire por toda a orientação, ensinamentos. incentivo e carinho. Obrigada pelo exemplo de profissional e humano e pela confiança.

Ao Prof. Marcos Moreira, por todo o incentivo e amizade e exemplo.

À Prof. Maria do Carmo, pela colaboração na elaboração deste projeto e pela contribuição na elaboração do texto.

À Prof. Geisa pelas boas sugestões e contribuições na elaboração do texto.

Ao técnico Edilson Milaré e aos técnicos da oficina, pela ajuda e suporte.

Aos meus pais e a minha família, pelo amor e confiança.

Aos meus amigos Bruna, Felipe, Karine, Natalia, Fabricio, Igor, Gabriel e Laís pela amizade e parceria em São Carlos. Com vocês a vida ficou mais leve.

À Thalyne pela amizade, paciência e convivência diárias.

Aos amigos e colegas do Centro de Secagem e do DEQ/UFSCar, pelo companheirismo.

Ao programa PPGEQ-UFSCar pela oportunidade e aos professores do DEQ. Ao CNPq pela concessão da bolsa processo 132753/2019-7 e à CAPES, código de financiamento 001, pelo apoio financeiro.

À Deus, pela fortaleza e por me manter perseverante nesta jornada.

“Para ser grande, sê inteiro: nada  
Teu exagera ou excluí.  
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.  
Assim em cada lago a lua toda  
Brilha, porque alta vive.”

Ricardo Reis (heterônimo de Fernando Pessoa) – Odes.

## RESUMO

A secagem é um processo industrial que se destaca pela aplicação em diversos segmentos e pelo elevado custo de operação. A demanda por processos eficientes impulsiona o desenvolvimento de sistemas de controle, monitoramento e otimização. Do ponto de vista de engenharia, estas tecnologias são viabilizadas através de modelos matemáticos que possam prever o comportamento do sistema. Este trabalho tem por objetivo avaliar o modelo matemático de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) para a predição da secagem de alumina em leito fixo e camada espessa, no processo com e sem reversão do sentido de escoamento do ar. Para a composição do meio poroso, foram utilizadas esferas de alumina com diâmetro médio de partícula de  $3,2 \pm 0,2$  mm e  $7,1 \pm 0,7$  mm, inicialmente saturadas com água. Foram obtidas as temperaturas e umidades transientes para diferentes posições axiais na secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar, nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Os efeitos dos parâmetros de reversão foram avaliados utilizando o tempo inicial de aplicação da reversão de 10 min com intervalo de duração de 10, 30 e 50 min, indicando a redução da heterogeneidade do leito e o aumento do consumo energético do processo. Além disso, verificou-se que a aplicação da reversão diminuiu os gradientes de umidade e de temperatura do leito, quando comparados à secagem convencional com escoamento ascendente de ar. A avaliação de modelos matemáticos de cinética de secagem em camada fina, mostrou que a taxa de secagem proposta pelo modelo de Lewis (1921) é suficiente para a representação do processo, podendo ser empregada na modelagem da secagem em camada espessa. Os parâmetros de ajuste do modelo difusivo com condição de contorno convectiva, indicaram que os efeitos de resistência à transferência de massa por difusão intra-partícula e da camada limite na superfície são importantes para as condições operacionais avaliadas. Os resultados obtidos para a simulação da secagem da alumina utilizando o modelo de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992), mostraram boa representação qualitativa do comportamento térmico e da umidade do leito na secagem em camada espessa. Foram obtidos erros relativos absolutos médios percentuais entre as temperaturas experimentais e as simuladas de 1,70 a 6,59 % e de 2,38 a 11,87 % para o processo sem e com reversão, respectivamente. Para a umidade em diferentes posições axiais, foram obtidos erros de 11,33 a 28,94 % e de 7,66 a 33,18 % na secagem sem e com reversão, respectivamente. O modelo de Albini (2019) adaptado de Massarani e Silva Telles (1992) foi utilizado para a simulação da secagem de grãos de cevada com reversão do sentido de escoamento do ar, apresentando erros de 1,7 a 7,0 %.

**Palavras-chave:** Secagem. Leito Fixo. Reversão. Modelo matemático. Alumina.

## ABSTRACT

Drying is a high-energy consumption process with applications in several industrial areas. The necessity of efficient processes increases the development of control, monitoring and optimization systems. As an engineering approach, these technologies can be possible using mathematical models to predict the behavior of the system. The aim of this research was to evaluate the two-phase mathematical model proposed by Massarani and Silva Telles (1992) for the prediction of the drying of alumina in a thick layer fixed bed, in the drying with and without the airflow reversal. Were used as porous medium spheres of alumina, initially saturated with water, with an average particle diameter of  $3.2 \pm 0.2$  mm and  $7.1 \pm 0.7$  mm. Transient temperature and moisture content were obtained for different axial positions of the bed during the drying. The experiments were performed using air temperatures of 40, 50 and 60 °C and air velocity of  $2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The effects of the reversal parameters were investigated using an initial time of reversion application of 10 min with intervals ranges of 10, 30 and 50 min. The results showed a reduction in the heterogeneity of the bed and an increase in the specific energy consumption for the process with airflow reversal. It was found that the application of the airflow reversal reduced the bed temperature and moisture gradients, when compared with the conventional drying using an upward airflow. The study of the thin layer mathematical models showed that the drying rate proposed by the Lewis's model was sufficient to represent the phenomena and was used in the mathematical modeling of the thick layer fixed bed drying. The parameters of the diffusive model with convective boundary condition, indicated that the effects of internal and external resistance of mass transfer were important for the operational conditions used. The results obtained from the simulation of the drying of alumina using the two-phase model of Massarani and Silva Telles (1992), showed a good qualitative representation of the thermal and moisture behavior. Relative average absolute errors obtained between the experimental and the simulated temperatures were of 2.38 to 11.87 % and from 1.70 to 6.59 % for the drying with and without air flow reversal, respectively. For the moisture content at different axial positions, the errors were obtained from 7.66 to 33.18 % and 11.33 to 28.94 % for the drying with and without airflow reversal, respectively. The two-phase model of Albini (2019) adapted from Massarani and Silva Telles (1192) was used to predict the temperatures and moisture content for barley grains drying with airflow reversal in a thick layer fixed bed. For this grain, were obtained relative average absolute errors ranging from 1.7 to 7.0 %.

**Keywords:** Drying. Fixed Bed. Airflow reversal. Mathematical model. Alumina.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Imagens da superfície de esferas de alumina com diâmetros de 4,00 mm (a) e 3,35 mm (b) obtidas com microscopia eletrônica de varredura. c) – Esferas de alumina de 3,2mm. ....	25
<b>Figura 2</b> – Ilustração simplificada de um silo secador em leito fixo. ....	26
<b>Figura 3</b> - Comparação ilustrativa dos gradientes umidade e temperatura durante a secagem em leito fixo com e sem reversão do sentido do escoamento do ar. ....	28
<b>Figura 4</b> – Representação esquemática do sistema para a formulação do modelo de parâmetros concentrados utilizado por Ruiz-López et al. (2008). ....	32
<b>Figura 5</b> – Ilustração esquemática da curva de secagem. ....	35
<b>Figura 6</b> - Ilustração esquemática da taxa de secagem ( $dX/dt$ ) em função da umidade do material. ....	36
<b>Figura 7</b> – Representação esquemática da formulação do modelo de Thompson <i>et al.</i> (1968) para a secagem em leito fixo, onde $t$ é o tempo de secagem. ....	44
<b>Figura 8</b> – Desenho ilustrativo, fora de escala, do volume de controle avaliado para a conservação de massa e energia do modelo de duas fases de Brooker et al. (1974) na secagem em leito fixo e camada espessa. ....	49
<b>Figura 9</b> – Representação esquemática do modelo físico de secagem em leito fixo de Dobre <i>et al.</i> (2016): (a) poro tortuoso completamente preenchido; (b) poro tortuoso parcialmente preenchido; (c) vaporização de umidade de um poro esticado; (d) balanço de umidade para um volume de controle de leito fixo passado por uma corrente de ar. ....	51
<b>Figura 10</b> - Desenho ilustrativo, fora de escala, das fases sólida e fluida na secagem em leito fixo e camada espessa. ....	56
<b>Figura 11</b> - Ilustração do módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem (desenho fora de escala). ....	63
<b>Figura 12</b> – Ilustração do sentido do escoamento do ar no secador de leito fixo (desenho fora de escala): a) Escoamento ascendente. b) Escoamento descendente. ....	64
<b>Figura 13</b> – Experimentos para a secagem da alumina em camada espessa. ....	65
<b>Figura 14</b> – Detalhes da célula de secagem para os experimentos térmicos (desenho fora de escala). ....	67
<b>Figura 15</b> – Sentido e direção do movimento realizado durante o empacotamento do leito (desenho fora de escala). ....	68
<b>Figura 16</b> – Etapas seguidas para a realização dos experimentos térmicos de secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar no secador. ....	68
<b>Figura 17</b> – Ilustração da célula de secagem fracionada (desenho fora de escala). ....	69
<b>Figura 18</b> – Procedimento para obtenção da umidade média de cada fração do leito na secagem com e sem reversão do escoamento do ar (desenho fora de escala). ....	70
<b>Figura 19</b> - Ilustração da pá utilizada para a fragmentação do leito (desenho fora de escala). ....	70
<b>Figura 20</b> - Representação da discretização do espaço utilizando o método das linhas ( $L$ -comprimento axial do leito de secagem). ....	81
<b>Figura 21</b> - Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso ( $U = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ): a) $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; b) $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; c) $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . ....	87

<b>Figura 22</b> - Valores de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).....	89
<b>Figura 23</b> - Taxa de aquecimento média em função do tempo para três posições axiais do meio poroso sem a reversão do sentido do escoamento do ar ( $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ): a) $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , b) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; c) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	90
<b>Figura 24</b> – Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso ( $T= 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $D_p = 7,1 \pm 0,7\text{ mm}$ ). ....	91
<b>Figura 25</b> - Taxa de aquecimento média em função do tempo para três posições axiais do meio poroso sem a reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $D_p = 7,1 \pm 0,7\text{ mm}$ ).....	91
<b>Figura 26</b> – a) Tempo inicial da transição entre a temperatura do 1° estágio e a de equilíbrio térmico para diferentes posições do leito. b) Intervalo de tempo para transição entre a temperatura do 1° estágio e a de equilíbrio térmico para diferentes posições do leito. ....	92
<b>Figura 27</b> - Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 30\text{ min}$ ) a) $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; b) $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; c) $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ....	93
<b>Figura 28</b> - Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 10\text{ min}$ ) a) $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; b) $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; c) $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ....	95
<b>Figura 29</b> - Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 50\text{ min}$ ): a) $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; b) $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; c) $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	96
<b>Figura 30</b> - Tempo de equilíbrio para a secagem com e sem reversão do sentido de escoamento do ar nas temperaturas de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $t_0 = 10\text{ min}$ ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). ....	97
<b>Figura 31</b> - Umidade média em base seca em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina sem reversão do sentido de escoamento do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ). ....	98
<b>Figura 32</b> - Umidade média em base seca em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão do sentido de escoamento ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 10\text{ min}$ ).....	99
<b>Figura 33</b> – Umidade média em base seca (b.s.) em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão do sentido de escoamento ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 30\text{ min}$ ).....	100
<b>Figura 34</b> - Umidade média em base seca (b.s.) em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão do sentido de escoamento ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 50\text{ min}$ ).....	100
<b>Figura 35</b> - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).....	102
<b>Figura 36</b> - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito com a reversão do sentido do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 10\text{ min}$ ). ....	102
<b>Figura 37</b> - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito com a reversão do sentido do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 30\text{ min}$ ). ....	103

<b>Figura 38</b> - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito com a reversão do sentido do ar ( $T = 50\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $t_0 = 10\text{ min}$ ; $\Delta t = 50\text{ min}$ ). .....	103
<b>Figura 39</b> - Adimensional de umidade médio do leito em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 40\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ). .....	105
<b>Figura 40</b> - Adimensional de umidade médio do leito em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 50\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ). .....	105
<b>Figura 41</b> - Adimensional de umidade médio do leito em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 60\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ). .....	106
<b>Figura 42</b> – Tempo de secagem necessário para a umidade média do leito atingir a umidade de equilíbrio dinâmico ( $T = 50\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ). .....	107
<b>Figura 43</b> – Coeficiente de variação em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $T = 50\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). .....	108
<b>Figura 44</b> - Eficiência energética média em função do tempo, para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $T = 40\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). .....	109
<b>Figura 45</b> – Eficiência energética média em função do tempo, para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $T = 50\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). .....	110
<b>Figura 46</b> - Eficiência energética média em função do tempo, para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $T = 60\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). .....	110
<b>Figura 47</b> - Consumo específico de energia e eficiência de secagem para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $T = 40\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). .....	112
<b>Figura 48</b> – Consumo específico de energia e eficiência de secagem para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $T = 50\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). .....	112
<b>Figura 49</b> - Consumo específico de energia e eficiência de secagem para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ; $T = 60\text{ °C}$ ; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). .....	113
<b>Figura 50</b> – Adimensional de umidade médio em função do tempo, para a secagem da alumina em camada fina nas temperaturas de $40\text{ °C}$ , $50\text{ °C}$ e $60\text{ °C}$ , velocidade do ar de $2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ . .....	114
<b>Figura 51</b> – Taxa de secagem em função da umidade em base seca, para as temperaturas de $40\text{ °C}$ , $50\text{ °C}$ e $60\text{ °C}$ , velocidade do ar de $2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ . .....	115
<b>Figura 52</b> – Umidade adimensional em função do tempo, predita pelos modelos empíricos e semi-empíricos aos dados médios de secagem em camada fina, para a velocidade do ar de $2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ . A) Modelo de Lewis, B) Modelo de Page, C) Modelo de Overhults, D) Modelo de Henderson e Pabis. .....	117
<b>Figura 53</b> – Constantes de secagem em função da temperatura, obtidas a partir do ajuste do Modelo de Lewis (1921) aos dados experimentais de secagem em camada fina ( $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ). .....	118

<b>Figura 54</b> – Umidade adimensional em função do tempo, predita pelo modelo Difusivo com condição de contorno convectiva. ....	119
<b>Figura 55</b> – Linearização da correlação de Arrhenius aos dados de $D_{ef}$ e de temperatura em escala Kelvin.....	120
<b>Figura 56</b> – Temperatura da mistura experimental média e predita pelo modelo de duas fases em função do tempo, para a secagem de alumina em leito fixo sem reversão do sentido do escoamento em diferentes posições axiais ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{mm}$ e $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; b) $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; c) $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . ....	122
<b>Figura 57</b> – Umidade média em base seca e predita pelo modelo de duas fases em função do tempo (a, b, c) e experimental (b), para a secagem de alumina em leito fixo sem reversão do sentido do escoamento em diferentes posições axiais ( $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ e $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; b) $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; c) $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . ....	124
<b>Figura 58</b> - Simulação dos valores de temperatura em função do tempo para as posições axiais de 0,3 e 10,5 cm utilizando o modelo de duas fases aplicado para a reversão do ar ( $T_{\text{ascendente}} = T_{\text{descendente}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{mm}$ ; $t_0 = 30 \text{ min}$ ; $\Delta t = 30 \text{ min}$ ). ....	126
<b>Figura 59</b> – Temperatura da mistura experimental e estimada pelo modelo de duas fases para a secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $t_0 = 10 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ . ....	127
<b>Figura 60</b> - Temperatura da mistura experimental e estimada pelo modelo de duas fases para a secagem com reversão do sentido do escoamento do ar ( $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $t_0 = 10 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ . ....	127
<b>Figura 61</b> - Temperatura da mistura experimental e estimada pelo modelo de duas fases para a secagem com reversão do sentido do escoamento do ar ( $T_{\text{ascendente}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $t_0 = 10 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ . ....	128
<b>Figura 62</b> – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $t_0 = 10 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ . ....	130
<b>Figura 63</b> – Valores de umidade da alumina experimentais e estimados pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial ( $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ , $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $t_0 = 10\text{min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ . ....	131
<b>Figura 64</b> – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial ( $T_{\text{ascendente}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ , $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $t_0 = 10\text{min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ . ....	132
<b>Figura 65</b> – Adimensional de umidade média do leito em função do tempo, obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b) $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c) $t_0 = 50 \text{ min}$ . ....	135
<b>Figura 66</b> - Adimensional de umidade média do leito em função do tempo, obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b) $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c) $t_0 = 50 \text{ min}$ . ....	135
<b>Figura 67</b> - Adimensional de umidade média do leito em função do tempo, obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{\text{ascendente}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b) $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c) $t_0 = 50 \text{ min}$ ....	136
<b>Figura 68</b> - Coeficientes de variação de umidade em função do tempo obtidos a partir das simulações da secagem da alumina utilizando o modelo de duas fases ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;	

$T_{descendente} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b) $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c) $t_0 = 50 \text{ min}$ .....	137
<b>Figura 69</b> – Coeficientes de variação de umidade em função do tempo obtidos a partir das simulações da secagem da alumina utilizando o modelo de duas fases ( $T_{ascendente} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b) $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c) $t_0 = 50 \text{ min}$ .....	138
<b>Figura 70</b> – Coeficientes de variação de umidade em função do tempo obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{ascendente} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a) $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b) $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c) $t_0 = 50 \text{ min}$ .....	138
<b>Figura 71</b> – Temperatura experimental e estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo para as posições axiais de 1 e 10 cm para a secagem dos grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar ( $t_0 = 10\text{min}$ ; $\Delta t = 10\text{min}$ ): a) $T_{ascendente} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{descendente} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; b) $T_{ascendente} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{descendente} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	139
<b>Figura 72</b> – Umidade experimental e estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo para as posições axiais de 1 e 10 cm para a secagem dos grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar ( $t_0 = 10\text{min}$ ; $\Delta t = 10\text{min}$ ): a) $T_{ascendente} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{descendente} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; b) $T_{ascendente} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{descendente} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	140
<b>Figura 73</b> – Valores de temperatura estimados pelo modelo de duas fases em função do tempo e da posição para a secagem dos grãos de cevada com reversão:.....	141
<b>Figura 74</b> – Umidade em base seca em função do tempo e da posição axial estimada pelo modelo de duas fases para a secagem dos grãos de cevada com reversão:.....	142
<b>Figura 75</b> - Coeficientes de variação de umidade em função do tempo para a secagem dos grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar para diferentes $t_0$ e $\Delta t$ . Valores obtidos a partir das estimativas utilizando o modelo de duas fases ( $T_{ascendente} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ): a) $t_0 = 5 \text{ min}$ ; b) $t_0 = 10 \text{ min}$ ; c) $t_0 = 20 \text{ min}$ ; d) $t_0 = 30 \text{ min}$ .....	143
<b>Figura A 1</b> – Queda de pressão do meio poroso em função da velocidade superficial do ar alimentado no sistema. ....	158
<b>Figura C 1</b> – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{ascendente} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .	160
<b>Figura C 2</b> - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{ascendente} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 50 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .	161
<b>Figura C 3</b> - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{ascendente} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .	162
<b>Figura C 4</b> - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{ascendente} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 50\text{min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .	163
<b>Figura C 5</b> - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{ascendente} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .	164
<b>Figura C 6</b> – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{ascendente} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_{descendente} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 50 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .	165

<b>Figura D 1</b> - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .....	166
<b>Figura D 2</b> - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 50 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .....	167
<b>Figura D 3</b> - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .....	168
<b>Figura D 4</b> - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 50 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .....	169
<b>Figura D 5</b> - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 68,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .....	170
<b>Figura D 6</b> - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $T_{\text{descendente}} = 68,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $t_0 = 50 \text{ min}$ ): a) $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b) $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c) $\Delta t = 50 \text{ min}$ .....	171

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

### TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Condição de operação dos experimentos de secagem da alumina em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar para alumina com $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm. ....	66
<b>Tabela 2</b> – Propriedades do meio poroso.....	86
<b>Tabela 3</b> – Parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos empíricos e semi-empíricos aos dados médios de secagem em camada fina ( $U = 2,7$ m·s <sup>-1</sup> ; $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm). ....	116
<b>Tabela 4</b> – Parâmetros de ajuste e estatísticos do modelo difusivo com condição de contorno convectiva, aos dados experimentais de cinética de secagem em camada fina ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm; $T = 40, 50$ e $60$ °C; $U = 2,7$ m·s <sup>-1</sup> ). ....	119
<b>Tabela 5</b> - Erros relativos absolutos médios percentuais entre as temperaturas médias experimentais e as preditas pelo modelo de duas fases ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm; $T = 40, 50$ e $60$ °C; $U = 2,7$ m·s <sup>-1</sup> ). ....	123
<b>Tabela 6</b> - Erros relativos absolutos médios percentuais entre a umidade média experimental e a predita pelo modelo de duas fases para diferentes posições axiais do leito de secagem ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm; $T = 50$ °C; $U = 2,7$ m·s <sup>-1</sup> ). ....	125
<b>Tabela 7</b> - Erros relativos absolutos médios percentuais entre as umidades médias experimentais e as preditas pelo modelo de duas fases ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm; $T_{\text{ascendente}} = 50$ °C; $U = 2,7$ m·s <sup>-1</sup> ; $t_0 = 10$ min). ....	134
<b>Tabela 8</b> - Erros relativos absolutos médios percentuais entre o adimensional de umidade médio experimental e o predito pelo modelo de duas fases ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm; $U = 2,7$ m·s <sup>-1</sup> ). ...	136
<b>Tabela 9</b> - Erros relativos absolutos médios percentuais entre os valores experimentais de temperatura e umidade dos grãos cevada e os obtidos a partir do modelo de duas fases.....	140
<b>Tabela B 1</b> – Hipótese do teste t para as médias dos tempos de equilíbrio térmico <i>teq</i> .....	159
<b>Tabela B 2</b> – Resultado do teste de hipóteses.....	159

### QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Alguns trabalhos encontrados na literatura utilizando alumina para estudos de transporte de calor, massa e momento.....	24
<b>Quadro 2</b> – Estudos da literatura sobre a secagem com reversão do sentido do escoamento de ar.....	29
<b>Quadro 3</b> – Estudos de cinética de secagem em camada fina. ....	34
<b>Quadro 4</b> – Estudos da literatura que utilizaram o modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles para a simulação da secagem. ....	56
<b>Quadro 6</b> - Propriedades físicas e térmicas da alumina. ....	60
<b>Quadro 7</b> – Modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) discretizado para a utilização do método das linhas.....	82
<b>Quadro 8</b> – Propriedades termodinâmicas. ....	83
<b>Quadro 9</b> - Erros relativos absolutos médios percentuais entre as temperaturas médias experimentais e as preditas pelo modelo de duas fases para a reversão ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm; $U = 2,7$ m·s <sup>-1</sup> ; $t_0 = 10$ min). ....	129

## NOMENCLATURA

### LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
a	Área superficial do sólido por unidade de volume	$[L^2 L^{-3}]$
$A_t$	área de seção transversal da célula de secagem.	$[L^2]$
$Bi_m$	Número de Biot para transferência de massa	$[-]$
b.u.	Umidade em base úmida	$[M \cdot M^{-1}]$
b.s.	Umidade em base seca	$[M \cdot M^{-1}]$
c	Fator c da equação de Forchheimer	$[-]$
CEE	Consumo específico de energia	$[M \cdot L^2 \cdot t^{-2} \cdot M^{-1}]$
$C_{p_f}$	Calor específico do ar seco	$[L^2 \cdot t^{-2} \theta^{-1}]$
$C_{p_l}$	Calor específico da água líquida	$[L^2 \cdot t^{-2} \theta^{-1}]$
$C_{p_s}$	Calor específico da fase sólida	$[L^2 \cdot t^{-2} \theta^{-1}]$
$C_{p_v}$	Calor específico do vapor d'água	$[L^2 \cdot t^{-2} \theta^{-1}]$
CV	Coeficiente de variação de umidade	
$D_{ef}$	Difusividade efetiva	$[L^2 \cdot t^{-1}]$
$D_p$	Diâmetro médio da partícula	$[L]$
E%	Erro relativo absoluto médio percentual	
$E_{mecânica}$	Energia mecânica	$[M \cdot L^2 \cdot t^{-2}]$
EE	Eficiência energética	
ES	Eficiência de secagem	
f	Taxa de secagem	$[M M^{-1} t^{-1}]$
G	Fluxo mássico	$[M L^{-2} t^{-1}]$
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$[M t^{-3} \theta^{-1}]$
k	Constante de secagem	$[t^{-1}]$
$k_{leito}$	Permeabilidade do meio poroso	$[m^2]$
$K_{tm}$	Coeficiente de transferência de massa externo	$[L \cdot t^{-1}]$
$\dot{m}$	Vazão mássica	$[M \cdot t^{-1}]$
$m_u$	Massa úmida	$[M]$
$m_s$	Massa seca	$[M]$



P	Pressão absoluta	$[M \cdot L^{-1} \cdot t^{-2}]$
$P_{ab}$	Pressão do vapor de água na temperatura do ar	$[M \cdot L^{-1} \cdot t^{-2}]$
$P_{sat}$	Pressão do vapor de água saturado	$[M \cdot L^{-1} \cdot t^{-2}]$
q	Velocidade superficial do fluido	$[L \cdot t^{-1}]$
$Q_w$	Energia para evaporação da umidade	$[M \cdot L^2 \cdot t^{-2}]$
$Q_{térmica}$	Energia para o aquecimento do ar de secagem	$[M \cdot L^2 \cdot t^{-2}]$
$Q_{aquecimento}$	Energia para aquecimento do meio poroso	$[M \cdot L^2 \cdot t^{-2}]$
r	Coordenada radial	[L]
R	Raio da partícula	[L]
$R^2$	Coeficiente de determinação	
REQM	Raiz quadrada do erro	
t	Tempo	[t]
$t_{eq}$	Tempo de equilíbrio térmico	[t]
$t_0$	Tempo inicial de aplicação da reversão	[t]
T	Temperatura	[ $\theta$ ]
$T_{ascendente}$	Temperatura do ar em escoamento ascendente alimentado no secador	[ $\theta$ ]
$T_{descendente}$	Temperatura do ar em escoamento descendente alimentado no secador	[ $\theta$ ]
$T_{mis}$	Temperatura da mistura entre as fases sólida e fluida	[ $\theta$ ]
U	Velocidade do ar de secagem na placa de orifício	$[L \cdot t^{-1}]$
UR	Umidade relativa	
X	Umidade em base seca	$[M \cdot M^{-1}]$
$\bar{X}$	Umidade média em base seca	$[M \cdot M^{-1}]$
$X_{eq}$	Umidade de equilíbrio	$[M \cdot M^{-1}]$
$X_0$	Umidade inicial	$[M \cdot M^{-1}]$
W	Fração mássica da umidade na fase fluida	$[M \cdot M^{-1}]$
Y	Umidade absoluta mássica da fase fluida	$[M \cdot M^{-1}]$
$\Delta H_v$	Calor latente de vaporização da umidade no material	$[M \cdot L^2 \cdot t^{-2} \cdot M^{-1}]$
$\Delta P$	Queda de pressão	$[M \cdot L^{-1} \cdot t^{-2}]$
$\Delta t$	Intervalo de reversão do ar de secagem	[t]

## LETRAS GREGAS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha_n$	Parâmetro do modelo difusivo-convectivo	[ - ]
$\chi^2$	Qui-quadrado reduzido	[ - ]
$\varepsilon$	Porosidade do leito	[ - ]
$\varepsilon_{bulk}$	Porosidade <i>bulk</i> do leito	[ - ]
$\lambda$	Calor latente de vaporização	[L <sup>2</sup> ·t <sup>-2</sup> ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido	[M·t <sup>-1</sup> ·L <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Massa específica	[M·L <sup>-3</sup> ]
$\rho_{aparente}$	Massa específica aparente	[M·L <sup>-3</sup> ]
$\rho_{bulk}$	Massa específica bulk	[M·L <sup>-3</sup> ]
<b>Subscrito</b>	<b>Descrição</b>	
f	Fase fluida	
s	Fase sólida	

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Alumina .....	23
2.2 Secagem em Leito Fixo .....	25
2.3 Secagem em Leito Fixo com reversão do sentido do escoamento de ar.....	27
2.4 Secagem em camada fina.....	33
2.4.1 Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos de secagem em camada fina....	37
2.4.2 Modelo difusivo para a secagem em camada fina.....	38
2.5 Modelos matemáticos para a secagem em camada espessa.....	39
2.5.1 Modelos Logarítmicos.....	40
2.5.2 Modelo de Thompson.....	44
2.5.3 Modelo de duas fases .....	48
2.5.4 Modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992).....	54
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
3.1 Material .....	60
3.2 Meio poroso .....	61
3.3 Umidade das partículas .....	61
3.4 Umidificação das partículas .....	62
3.5 Módulo experimental .....	62
3.6 Experimentos de secagem em camada espessa.....	65
3.6.1 Valores da temperatura em função da posição e do tempo .....	66
3.6.2 Valores de umidade de cada fração e umidade média do leito .....	69
3.7 Experimentos de secagem em camada fina .....	71
3.8 Análise energética.....	71
3.9 Modelos matemáticos para a secagem.....	73
3.9.1 Modelos matemáticos de cinética de secagem em camada fina.....	74
3.9.1.1 Modelos empíricos e semi-empíricos de cinética de secagem em camada fina	74
3.9.1.2 Modelo difusivo com condição de contorno convectiva.....	74
3.9.2 Modelo de duas fases para a secagem em leito fixo e camada espessa .....	76
3.9.3 Estudo de caso – Simulação da secagem em camada espessa de grãos de cevada em leito fixo utilizando o modelo de duas fases aplicado à reversão do ar de secagem .....	83
3.9.4 Análise estatística das predições dos modelos .....	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	86
4.1 Caracterização do meio poroso.....	86

4.2.1 Transferência de calor na secagem da alumina em camada espessa com escoamento ascendente de ar .....	86
4.2.2 Transferência de calor na secagem da alumina em camada espessa com reversão do sentido do escoamento de ar.....	93
4.3 Análise energética da secagem em camada espessa .....	108
4.4 Secagem da alumina em camada fina .....	114
4.4.1 Resultados experimentais da secagem em camada fina .....	114
4.4.2 Modelos empíricos e semi-empíricos de secagem em camada fina.....	116
4.4.3 Modelos difusivo com condição de contorno convectiva .....	118
4.5 Avaliação do modelo de duas fases para a secagem de esferas de alumina em leito fixo e camada espessa .....	121
4.5.1 Modelo de duas fases aplicado a secagem de alumina com escoamento ascendente de ar.....	121
4.5.2 Modelo de duas fases aplicado a secagem de alumina com reversão do sentido do escoamento de ar .....	126
4.6 Estudo de Caso - Simulação da secagem de grãos de cevada em leito fixo e camada espessa utilizando o modelo de duas fases no processo com reversão do sentido do escoamento de ar.....	139
5 CONCLUSÕES .....	144
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	147
ANEXO A .....	157
APÊNDICE A .....	158
APÊNDICE B.....	159
APÊNDICE C.....	160
APÊNDICE D .....	166

## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário mundial, as interações, tomadas de decisões e o fluxo de informações são quase instantâneos. A indústria e os seus processos incorporam as tecnologias buscando suprir a demanda pela redução do consumo energético e o aumento da eficiência. Neste contexto, o termo Indústria 4.0 sugere sistemas de produção autônomos com fábricas inteligentes, capazes de prever falhas e se adaptar às mudanças na produção (VUKSANOVIC *et al.*, 2016; ZHONG *et al.*, 2017; ADENUGA *et al.*, 2019; PEÇAS *et al.*, 2020).

Do ponto de vista da engenharia, esses processos são viabilizados através da utilização de sistemas de aquisição de dados em tempo real, algoritmos de tomada de decisão, automação de processos, sistemas de controle, simulação e otimização. O desenvolvimento destas tecnologias possui uma abordagem matemática dos processos e da análise dos dados gerados.

Dentre os diversos processos utilizados pela indústria, pode-se citar a secagem, que está presente na indústria química, têxtil (JOHANN *et al.*, 2014), alimentícia (IGUAZ *et al.*, 2003), farmacêutica (ZIAEE *et al.*, 2019) e de beneficiamento de grãos (SILVA *et al.*, 2012). A secagem consiste em um processo de remoção da umidade de um material através da transferência simultânea de calor e massa (MCCABE *et al.*, 1993). A operação industrial de secagem tem por objetivo fornecer um produto padronizado, facilitando o transporte, o armazenamento e a preservação das características físicas e químicas do material, além de proporcionar o aumento do *shelf life* do produto (BARROZO *et al.* 2014; SOUZA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2019).

A etapa de secagem se destaca pelo elevado consumo energético, na literatura cita-se que em média 12 % da energia empregada nos processos de manufatura é utilizada para a secagem (STRUMILLO *et al.*, 2014). Para a indústria de produtos de madeira este percentual pode chegar a 70%, na indústria de papel a 27% e a aproximadamente 50 % na indústria têxtil (KUDRA, 2004). A manutenção da operação de secagem necessita do fornecimento de calor para o aquecimento do ar e a evaporação da fase líquida. Além disso, no caso da secagem por mecanismo convectivo, energia também é empregada no fornecimento do escoamento do fluido, normalmente o ar atmosférico.

No processo de secagem em leito fixo, partículas com uma dada umidade inicial são empacotadas em uma coluna, geralmente de formato cilíndrico. O fluido de secagem é introduzido no leito, de forma a percolar o meio poroso, que permanece estático (SOUZA, 2013). Neste processo, o fluido quente transfere energia na forma de calor para o material úmido. A fase líquida presente no material evapora e através de mecanismos de transferência

de massa, a umidade é transferida do interior das partículas para o fluido em escoamento (SHERWOOD, 1929a). A secagem em leito fixo proporciona menor impacto mecânico ao material quando comparada, por exemplo, à secagem por fluidização, em jorro ou vibro-fluidização (PRADO e SARTORI, 2011). Por outro lado, acentua os gradientes de temperatura e umidade ao longo do leito de partículas (ALBINI, 2019). Esta configuração é indicada para processos em batelada e pequena escala, materiais sensíveis ao impacto mecânico e para estudos dos fenômenos de transferência associados à secagem.

De forma a reduzir os gradientes de temperatura e umidade, utiliza-se a reversão do sentido do escoamento do ar de secagem. Nesta configuração de secador, o intervalo entre cada reversão pode ser ajustado de forma a otimizar a secagem de acordo com as propriedades do processo e do meio poroso (RATTI e MUJUMDAR, 1995; ALBINI, 2019). Na seção 2 deste trabalho, são descritos os estudos de Ratti e Mujumdar (1995), Berbert *et al.* (1995), Ruiz-López *et al.* (2008) e Albin (2019) que utilizaram esta configuração do equipamento. Em trabalhos de simulação da transferência de calor e massa envolvidos na secagem em leito fixo e camada espessa, tais como os de Ratti e Mujumdar (1995), Prado e Sartori (2008), Souza *et al.* (2015), Dobre *et al.* (2016) e Albin (2019), são utilizados modelos de parâmetros distribuídos, onde as variáveis como temperatura e umidade das fases são função da posição e do tempo. Solucionar estas equações diferenciais parciais depende das simplificações e do método numérico utilizado. Dependendo do nível da complexidade da descrição físico-matemática do processo, a simulação do processo pode gerar um elevado custo computacional (SUN *et al.*, 1995; COLNAGO, 2012; TVEITO *et al.*, 2015).

O leito fixo com escoamento de ar invertido foi tema da tese de doutorado de Albin (2019) no grupo de pesquisa do Centro de Secagem da UFSCar, tornando-se ponto de partida para outras propostas, como a aqui apresentada. O foco deste trabalho será específico na modelagem que apresentou alguns problemas na descrição dos experimentos usando leitos de cevada. A fim de evitar as mesmas dificuldades encontradas, como por exemplo, o encolhimento, variação de forma da partícula e parâmetros variantes no tempo, optou-se por utilizar esferas de alumina visando uma abordagem inicial. Assim, o modelo discretizado no espaço e contínuo no tempo pode ser avaliado e verificado de forma mais efetiva. Uma vez que o modelo esteja implementado e funcionando adequadamente, poderá ser modificado e ampliado para incorporar fenômenos de encolhimento do leito e variação de forma da partícula, na descrição do processo de secagem de sementes.

Tendo em vista os aspectos apresentados, o principal objetivo desta pesquisa é realizar o estudo experimental e numérico da operação de secagem de partículas de alumina em leito

fixo e camada espessa, com reversão do sentido do escoamento do ar de secagem. Para isso, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a secagem de esferas de alumina em camada delgada de forma a obter informações relevantes para a modelagem do processo em camada espessa.
- Realizar experimentos de secagem em leito fixo e camada espessa, com e sem reversão do sentido do escoamento do ar.
- Avaliar a influência da temperatura do ar e dos parâmetros de reversão na secagem em camada espessa.
- Verificar o modelo matemático de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) discretizado no espaço e contínuo no tempo de forma mais efetiva, utilizando esferas de alumina.
- Realizar simulações da secagem de esferas de alumina em leito fixo e camada espessa utilizando o modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992), aplicado ao processo com e sem reversão do sentido do escoamento do ar.
- Obtendo-se boas predições do modelo para a alumina, verificar o seu desempenho para a simulação da secagem de grãos de cevada em camada espessa para o processo com reversão do sentido do escoamento do ar.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção é destinada à abordagem teórica dos assuntos tratados nesta pesquisa, tornando-se base para o desenvolvimento da metodologia experimental e da análise dos resultados obtidos. São apresentadas informações sobre as partículas de alumina e a secagem em leito fixo. Também, é apresentada uma breve revisão sobre os principais estudos encontrados na literatura utilizando a técnica de reversão do sentido do escoamento do ar. Por fim, os principais modelos matemáticos utilizados para a descrição da secagem em camada delgada e espessa são apresentados.

### 2.1 Alumina

Na indústria de minérios, a alumina ou óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), é a matéria prima base para a produção do alumínio (HIND *et al.*, 1999). O processo Bayer é o mais utilizado para a obtenção da alumina a partir da bauxita, uma rocha de cor avermelhada encontrada na natureza, e caracterizada como economicamente aproveitável quando o seu percentual de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  estiver entre 50 a 55% (SAMPAIO *et al.*, 2005).

Além da sua ampla utilização na produção do alumínio, a alumina na sua forma ativada possui propriedades tais como: elevada porosidade, área superficial, estabilidade térmica e propriedades mecânicas; que permitem a sua aplicação como adsorvente de fluoretos nos processos de tratamento de água (ALVARINHO *et al.*, 2000), suporte para catalisadores (ALVARENGA, 2013), dessecante, formação de materiais refratários e na cromatografia (HIND *et al.*, 1999).

A alumina, devido às suas particularidades, vem sendo amplamente utilizada em estudos de transporte de massa, energia e momento. Alguns destes estudos são citados no Quadro 1. Por exemplo, para a avaliação de modelos matemáticos utilizados na simulação de processos, tais como a secagem, o emprego de esferas de alumina se torna um facilitador, uma vez que, sendo um material inorgânico com propriedades físicas que não sofrem variações significativas durante o processo, pode-se reduzir a complexidade matemática da modelagem. Sousa (2017a) descreve as esferas de alumina como um grão modelo, favorecendo a análise dos mecanismos internos e externos de transferência envolvidos na secagem. Calçada *et al.* (2006) citam a alumina como um material inorgânico, que devido a sua estrutura física e alta porosidade, permite a remoção da umidade com baixa resistência à transferência. A morfologia da superfície de partículas esféricas de alumina utilizadas por Perazzini (2014) na secagem em



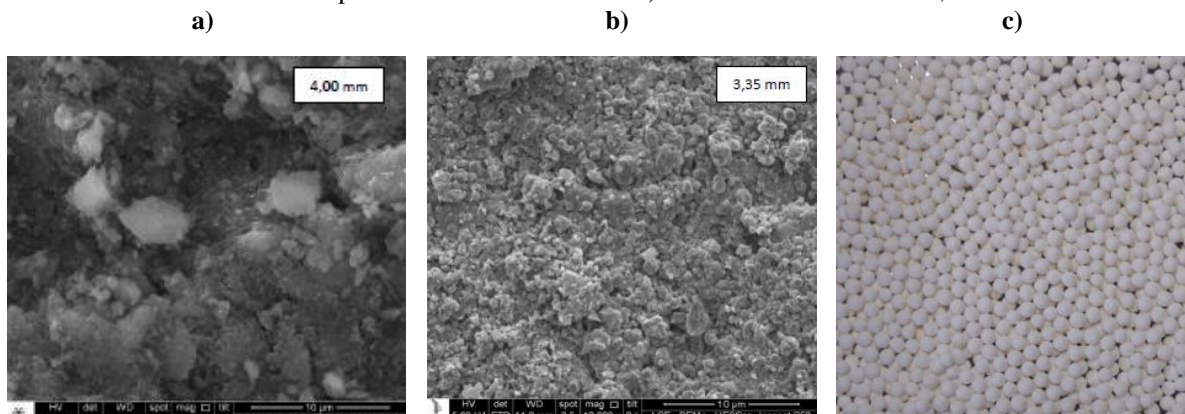
leito fixo, mostra uma superfície rugosa e heterogênea. As imagens obtidas pelo autor a partir da microscopia eletrônica de varredura são apresentadas na Figura 1 - a) e b). Na Figura 1 - c) é apresentada uma imagem das esferas de alumina.

**Quadro 1** – Alguns trabalhos encontrados na literatura utilizando alumina para estudos de transporte de calor, massa e momento.

Referência	Descrição
Altino (2019)	Realizou o estudo fluidodinâmico e de secagem em leito fixo, utilizando materiais particulados (esferas de alumina, soja, lentilha verde, cevada e aveia) com diferentes características internas e externas, a fim de avaliar a sua influência no processo.
Brito <i>et al.</i> (2018)	Utilizaram alumina ativada com diâmetro médio de 3,42 mm na análise energética da secagem intermitente em leito de jorro.
Brito <i>et al.</i> (2017)	Avaliaram um modelo realimentado em cascata na secagem da alumina em leito de jorro.
Sousa (2017a)	Utilizou dolomita e esferas de alumina e vidro como material granular no estudo da secagem em leito de jorro mecânico e convencional.
Reis (2015)	Realizou a secagem de alumina em leito vibrofluidizado, o estudo englobou a secagem em estufa e a secagem em camada fina em leito fixo.
Perazzini (2014)	Utilizou partículas esféricas de alumina no estudo da secagem em camada fina e espessa em leito fixo. O trabalho também contemplou a caracterização das partículas e do meio poroso, e a determinação de isotermas de equilíbrio.
Calçada <i>et al.</i> (2006)	Secaram partículas de alumina com diferentes diâmetros em leito fluidizado para avaliar o efeito da temperatura e vazão de ar na cinética do processo.
Calçada (1994)	Realizou a modelagem e simulação da secagem de esferas de alumina em leito fixo e camada espessa com escoamento ascendente de ar.
Gevaudan <i>et al.</i> (1991)	Utilizaram um secador de disco agitado para a secagem de alumina e a avaliação de um modelo matemático do processo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 1** – Imagens da superfície de esferas de alumina com diâmetros de 4,00 mm (a) e 3,35 mm (b) obtidas com microscopia eletrônica de varredura. c) – Esferas de alumina de 3,2mm.



Fonte: a) e b) Perazzini (2014); c) Acervo pessoal.

## 2.2 Secagem em Leito Fixo

Entre as diversas configurações de secadores, o de leito fixo, é um equipamento convectivo de simples utilização e implementação. Além do baixo custo, esta configuração de secador possui a vantagem de não necessitar de energia para o movimento dos sólidos, tal como nos secadores de leitos móveis. Desta forma, apesar de limitar o aumento de escala do processo, existe a vantagem de redução do impacto mecânico do material particulado (BARROZO *et al.*, 2014; PRADO e SARTORI, 2011).

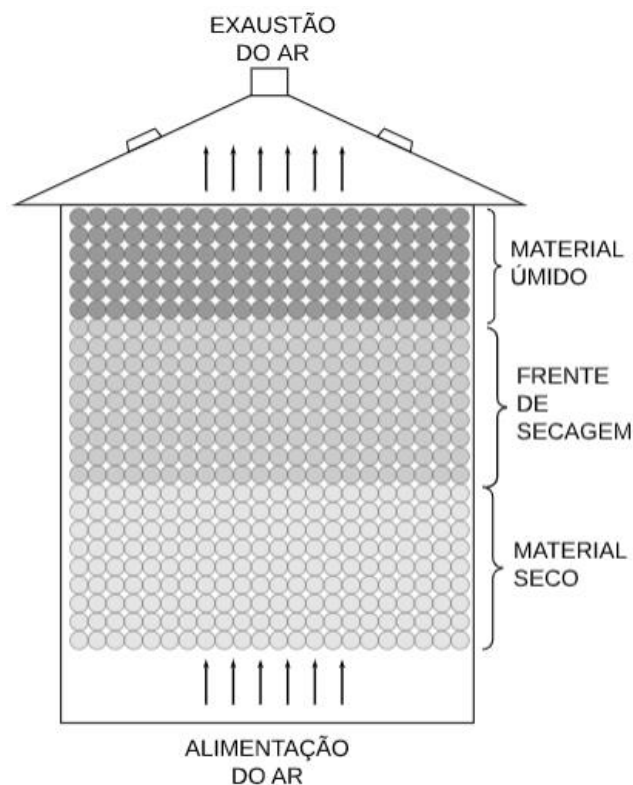
Para a secagem de grãos e sementes o impacto mecânico é um fator importante na manutenção das propriedades físicas e biológicas do material. Trabalhos como os de Souza (2013) e Parde *et al.* (2002) justificam a escolha do secador de leito fixo frente aos secadores de leitos móveis. De acordo com Jasper *et al.* (2006), os silos secadores são exemplos de projetos simplificados que auxiliam o produtor rural no beneficiamento de grãos.

Neste contexto, a importância do beneficiamento de grãos é ilustrada pela representatividade do agronegócio brasileiro, responsável por aproximadamente 20% do Produto Interno Bruto (MAPA, 2019). Ainda que os esforços e investimentos no setor sejam consideráveis, os processos apresentam perdas significativas. Dados da Embrapa indicam que aproximadamente 15% das perdas na produção de grãos estão relacionadas ao armazenamento inadequado, segundo Brito (2015) este percentual pode chegar a 40% em propriedades familiares. Outro fator importante é o déficit na capacidade de armazenamento, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) o Brasil possui capacidade para armazenar 72% da sua produção, representando um déficit de 63 milhões de toneladas nas safras de 2017/2018. Estes dados quantitativos ilustram a importância de investimentos em sistemas de

automação e de melhorias nas etapas de beneficiamento e armazenagem de grãos (ANELLI, 2019).

Na secagem em leito fixo o ar quente é forçado a percolar os espaços vazios do leito de partículas, enquanto a massa de sólidos permanece estática. Durante este processo ocorre a formação de uma frente de secagem, como ilustrado na Figura 2, em que o material úmido localizado próximo a região de alimentação do ar é aquecido e seca mais rapidamente do que o material localizado nas regiões de exaustão do ar (BARROZO *et al.*, 2014).

**Figura 2** – Ilustração simplificada de um silo secador em leito fixo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos aspectos de aplicação da técnica de secagem em leito fixo em camada fina ou espessa, esta configuração de secador é muito utilizada para o entendimento dos fenômenos de transferência de calor e massa e na modelagem e simulação do processo (PRADO e SARTORI, 2008). Entre os diversos trabalhos que utilizam a secagem em leito fixo utilizando diferentes materiais, pode-se citar os de Souza *et al.* (2020) na secagem de minério de ferro, Xu *et al.* (2019) na secagem de lignita, Silva *et al.* (2018) na secagem de resíduos de acerola, Souza *et al.* (2015) na secagem de sementes de soja, Prado e Sartori (2008) na secagem de sementes com revestimento de mucilagem.

Na secagem convencional em leito fixo com escoamento de ar em um único sentido, a frente de secagem promove a formação de gradientes de umidade e de temperatura no sistema, como os observados nos trabalhos de Souza (2013), Albini *et al.* (2018), Perazzini (2014), Ratti e Mujumdar (1995). Estes gradientes não são recomendados para a qualidade e homogeneidade do produto obtido, uma vez que, regiões com exposição excessiva à temperatura e ao ar de secagem podem promover fissuras, diminuir a germinação de sementes, além de proporcionar uma distribuição energética heterogênea ao sistema (RATTI e MUJUMDAR, 1995; PORDAGE e LANGRISH, 2007; BARROZO *et al.* 2014; BALA, 2017; ALBINI, 2019). Barrozo *et al.* (2014) também citam a dificuldade de otimização da secagem devido a formação de um leito heterogêneo.

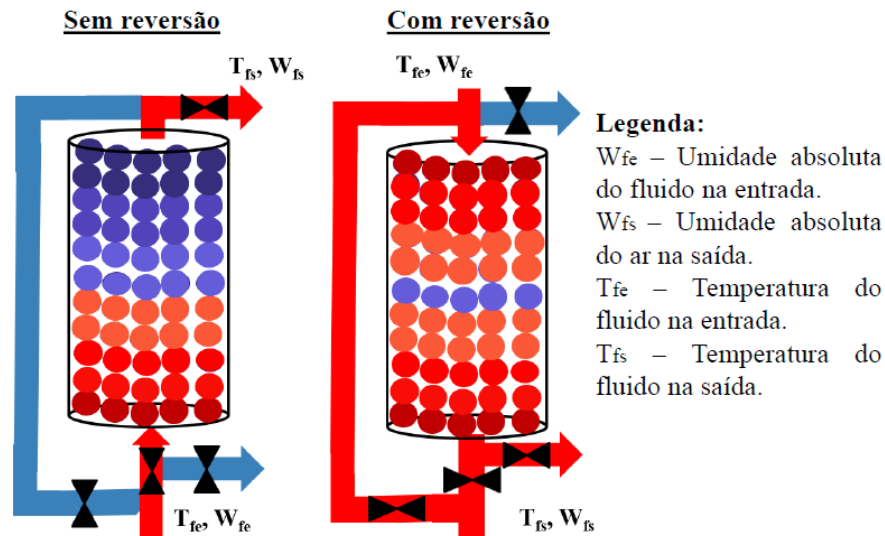
### 2.3 Secagem em Leito Fixo com reversão do sentido do escoamento de ar

Tendo em vista que os gradientes de umidade e temperatura formados na secagem em leito fixo são prejudiciais para a manutenção das características físicas, químicas e biológicas do material de secagem, técnicas de intermitência, tais como a inversão periódica do sentido do escoamento de ar, são utilizadas para a redução destes efeitos (ALBINI, 2019; CHUA *et al.*, 2003; RATTI e MUJUMDAR, 1995).

Entre as vantagens da utilização da reversão do sentido do escoamento de ar frente à instalação de sistemas de agitação usados para promover a mistura do material, ou a utilização de secadores de leitos fluidizados, vibro-fluidizados e de leitos móveis, pode-se citar: a manutenção da configuração de leito fixo, que diminui o impacto mecânico do material sólido; a possibilidade de adaptação do projeto do secador convencional com escoamento ascendente; a economia da energia necessária para a operação de sistemas de agitação e também para a movimentação do material sólido particulado.

Nesta configuração de secador, o sentido do escoamento de ar é invertido em intervalos de tempo periódicos, onde dois parâmetros são importantes em termos de otimização da operação, sendo eles o tempo inicial de aplicação da reversão ( $t_0$ ) e o seu intervalo de duração ( $\Delta t$ ) (DAVILA *et al.*, 1983; RATTI e MUJUMDAR, 1995). A Figura 3 ilustra a comparação entre a secagem em leito fixo com e sem a reversão do sentido do escoamento do ar. Nesta figura, avaliando a redução do gradiente de umidade, observa-se que a secagem com reversão forma uma frente de secagem ascendente e outra descendente que desloca a região de maior umidade, ilustrada pela cor azul, para a região central secador.

**Figura 3** - Comparação ilustrativa dos gradientes umidade e temperatura durante a secagem em leito fixo com e sem reversão do sentido do escoamento do ar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste contexto, estudos envolvendo a reversão do escoamento de ar em secadores de leito fixo são importantes para o entendimento dos fenômenos de transferência entre fases, projetos de secadores, otimização e controle da operação. No Quadro 2 são apresentados trabalhos da literatura que utilizaram a reversão do sentido do escoamento de ar no processo de secagem, a seguir alguns destes estudos serão descritos.

No trabalho desenvolvido por Ratti e Mujumdar (1995), um modelo baseado em balanços de massa e energia para as fases sólida e fluida, foi utilizado para a simulação da secagem em camada espessa com e sem reversão do sentido de escoamento do ar. O modelo que contempla o encolhimento do material, foi avaliado através da comparação dos resultados preditos com os dados de secagem ascendente para um meio poroso formado por cilindros de cenoura, fatias de batata e de maçã. As simulações indicaram que a curva de umidade média do leito em função do tempo de secagem, praticamente não foi influenciada pelas condições de reversão avaliadas. Os perfis de umidade e temperatura do leito foram atenuados pela reversão do ar, indicando um produto seco mais uniforme. Outra observação dos autores é que a aplicação da reversão no início do processo favorece a uniformidade do leito, pois os mecanismos da cinética de secagem são influenciados pelas condições externas. O tempo de duração da reversão é indicado como um dos parâmetros de ajuste para a obtenção de resultados ótimos.

**Quadro 2** – Estudos da literatura sobre a secagem com reversão do sentido do escoamento de ar.

Referência	Descrição
Albini (2019)	Realizou o estudo experimental da secagem de grãos de cevada com e sem reversão do sentido do escoamento do ar. Avaliou um modelo de duas fases para a simulação da transferência de calor e massa na secagem em leito fixo com escoamento ascendente de ar.
Hung <i>et al.</i> (2019)	Realizaram o estudo experimental e de simulação numérica da secagem de arroz em um secador do tipo <i>flatbed</i> com reversão do escoamento do ar de secagem, utilizando o modelo de Thompson <i>et al.</i> (1968).
Jia <i>et al.</i> (2016)	Avaliaram o efeito da reversão do ar na secagem de trigo em leito fixo.
Ibrahim <i>et al.</i> (2013)	Realizaram o estudo experimental e avaliaram o efeito da reversão do ar na secagem de arroz em leito fixo e camada espessa.
Herman-Lara <i>et al.</i> (2010)	Avaliaram experimentalmente e estatisticamente o efeito da reversão do sentido do escoamento do ar na cinética de secagem de cenouras.
Ruiz-López <i>et al.</i> (2008)	Realizou a modelagem e simulação da secagem de cenoura em leito fixo com reversão do sentido do escoamento do ar de secagem. O modelo utilizado pelos autores foi o de parâmetros concentrados.
Pordage e Langrish (2007)	Avaliaram o tempo de duração da reversão do ar para a secagem de madeira.
Ratti e Mujumdar (1995)	Simularam a secagem de cenoura em leito fixo com reversão do sentido do escoamento de ar, utilizando um modelo baseado em balanços de massa e energia para a fase sólida e fluida.
Berbert <i>et al.</i> (1995)	Realizou a simulação numérica da secagem de café com reversão do sentido do escoamento do ar utilizando o modelo de Thompson <i>et al.</i> (1968).
Berbert <i>et al.</i> (1994)	Realizou o estudo experimental da secagem de café simulando o efeito da reversão do sentido do escoamento do ar de secagem, através da troca de posições das células de secagem durante o processo.
Davila <i>et al.</i> (1983)	Simularam a secagem de grãos de arroz em leito fixo com reversão utilizando o modelo matemático de Michigan. Avaliaram os efeitos dos parâmetros de reversão no tempo de secagem, homogeneidade da umidade do leito e consumo energético.
Sabbah <i>et al.</i> (1979)	Utilizando um modelo matemático para a simulação da secagem de sementes de soja em leito fixo com reversão do ar, avaliaram a influência das condições de secagem no consumo energético e na homogeneidade do leito.
Paulsen e Thompson (1973)	Avaliaram o efeito da reversão do ar de secagem em um secador de fluxos cruzados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Berbert *et al.* (1994) estudaram a secagem de grãos de café simulando a reversão do ar de secagem utilizando uma adaptação no equipamento. O secador horizontal de leito fixo, composto por 6 compartimentos removíveis, cada compartimento com capacidade para aproximadamente 12 kg de material, foi utilizado para a obtenção de dados experimentais de umidade e temperatura em diferentes posições no leito ao longo do tempo de secagem. A reversão periódica do ar foi simulada através da troca das posições de cada compartimento durante o processo. Foram avaliadas as temperaturas de 50 °C e 70 °C e intervalos de duração da reversão de 3 e 6 horas. Os autores observaram que a técnica de reversão periódica foi efetiva na redução dos gradientes de umidade ao longo do leito, comparada à secagem convencional. Também, possibilitou prevenir a formação de água líquida proveniente da condensação do vapor no topo das camadas de café. Para a secagem à 70 °C, a redução na diferença entre as umidades foi de 50% comparada ao método convencional, entretanto foi observada elevada não uniformidade da umidade no leito. A temperatura de 50 °C foi indicada como mais apropriada para a secagem de café com intervalos de 3 e 6 horas de reversão.

Para a otimização e comparação da secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar, é importante a definição de um critério quantitativo. Sabbah *et al.* (1979) estudaram através da simulação a secagem de grãos de soja com reversão do sentido do escoamento do ar. Os autores citam que para os grãos de soja, a germinação e as características físicas dos grãos podem ser adotadas como critérios, entretanto estes são de difícil correlação com os parâmetros do processo de secagem. Os autores adotaram apenas critérios energéticos e o grau final de uniformidade da umidade no leito para avaliar a reversão, conforme:

i) Índice de uniformidade: percentual do meio poroso com umidade de  $X \pm \Delta X$ .

ii) Eficiência energética: razão entre a quantidade de água removida pela quantidade teórica que poderia ser removida em condições adiabáticas.

iii) Energia total utilizada no processo de secagem, descrita pelos autores como energia elétrica utilizada para a operação dos equipamentos e a energia de aquecimento.

Para a análise e comparação dos efeitos das condições de secagem de grãos de soja no processo com reversão, adotaram o intervalo de reversão como sendo:

$$\Delta t = b t_x \quad (1)$$

$$t_x = \frac{X_0 - X_{eq}}{T_0 - T_{eq}} \frac{\rho_f \lambda z}{Cp_f G} \quad (2)$$

Onde  $t_x$  é uma relação matemática para o avanço da zona de secagem no leito espesso e representa o tempo mínimo para a zona passar pelo leito,  $b$  é uma constante cujo valor o autor adotou como 0,25 para a secagem da soja,  $X_0$  é a umidade inicial,  $X_{eq}$  a umidade de equilíbrio,  $T_0$  a temperatura inicial,  $T_{eq}$  a temperatura de equilíbrio e  $z$  a profundidade do leito. Os resultados obtidos no trabalho mostraram que a secagem de grãos de soja com reversão do ar apresentou maior uniformidade em umidade, maior consumo energético, menor eficiência energética e maior tempo de secagem. Entretanto, para algumas condições selecionadas no estudo, a secagem com reversão se apresentou virtualmente rápida com alta vazão de ar e baixas temperaturas.

Davila *et al.* (1983) adaptaram o modelo de Michigan apresentado por Bakker-Arkema *et al.* (1974) e Brooker *et al.* (1974), para a avaliação da secagem em camada espessa de arroz em leito fixo com e sem reversão. A modificação no modelo consistiu na utilização de uma equação para a secagem em camada fina de grãos de arroz, a utilização de uma relação de equilíbrio para a obtenção da umidade de equilíbrio e das propriedades dos grãos e do meio poroso tais como: área superficial, calor específico e densidade *bulk*. Para a obtenção de dados experimentais do processo com reversão do ar de secagem, assim como Berbert *et al.* (1994), os autores inverteram as posições dos compartimentos do secador simulando o processo de reversão do sentido do escoamento.

Na avaliação da homogeneidade da umidade do leito, Davila *et al.* (1983) utilizaram um coeficiente de variação de umidade (CV – Equação 3), expresso em termos do desvio padrão da umidade ( $S$  - umidade em base seca) e da média da umidade ( $\bar{X}$ ), aplicado para cada tempo de secagem. Para a otimização do  $\Delta t$ , diversos testes foram realizados e os autores observaram uma reação entre o tempo total de secagem e  $\Delta t$ , encontrando uma constante experimental com valor 0,54 que multiplicada pelo tempo total de secagem fornece o valor de  $\Delta t$  ótimo. No trabalho de Davila *et al.* (1983) foi observado que a reversão promove um leito mais homogêneo em umidade, entretanto o consumo energético aumentou em 10% e a eficiência diminuiu. Para a secagem com reversão do sentido do escoamento os autores recomendam baixas temperaturas (35 °C e 43,3 °C) e altos fluxos de ar (41,4 a 55,2 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup>), indicando a utilização da técnica como uma alternativa para produtores rurais na obtenção de grãos com maior qualidade e um pequeno incremento no custo do processo.

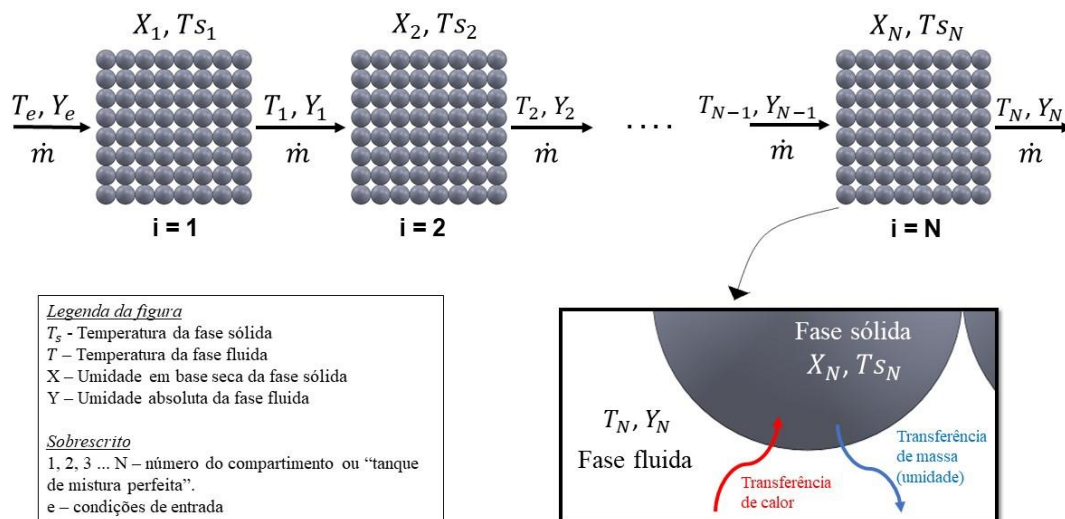
$$CV = \frac{S \times 100}{\bar{X}} \quad (3)$$



Ruiz-López *et al.* (2008) simularam a secagem em leito fixo com reversão do escoamento do ar utilizando um modelo matemático que representa o fenômeno como tanques de mistura perfeita conectados em série. O modelo dinâmico proposto, obtido a partir de balanços de massa e energia foi adaptado do trabalho de Herman-Lara *et al.* (2005) para a operação com reversão. As predições do modelo foram comparadas aos dados de secagem de cenoura em leito fixo com e sem reversão. Os resultados das simulações se mostraram capazes de prever a curva de secagem e as reversões do ar possibilitaram obter um produto com umidade e temperatura mais uniformes.

Na Figura 4 é apresentado um desenho esquemático do modelo utilizado por Ruiz-López *et al.* (2008). O modelo matemático foi formulado a partir de balanços de massa e energia entre as fases, considerando uma mistura perfeita em cada compartimento  $i$  do sistema. Esta última hipótese implica na obtenção de um modelo de parâmetros concentrados, onde as variáveis como temperatura e umidade de cada fase são dependentes apenas do tempo e não da posição espacial.

**Figura 4** – Representação esquemática do sistema para a formulação do modelo de parâmetros concentrados utilizado por Ruiz-López *et al.* (2008).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme citado anteriormente, Herman-Lara *et al.* (2005) simularam a secagem de alimentos em leito fixo assumindo fluxo pistonado e mistura completa do ar utilizando um modelo proposto por Palencia *et al.* (2002). Para a solução das equações do modelo de mistura completa, foi utilizado o método de Runge-Kutta de quarta ordem. O modelo de fluxo pistonado foi resolvido através de um método alternativo, utilizando representação em estado

pseudo-estacionário das equações com derivadas de primeira ordem em relação ao tempo, e utilizando diferenças finitas para as equações com dependência da coordenada espacial. Nesta abordagem, as equações foram resolvidas utilizando o método de Runge-Kutta para a direção axial, mantendo umidade e temperatura constantes. Com os perfis de umidade do ar e de temperatura, o tempo é avançado e o processo repetido até o tempo final de secagem. As simulações foram comparadas aos dados experimentais de secagem de mandioca a 60 e 63 °C. Os autores enfatizam que os resultados não mostraram diferença ao assumir fluxo pistonado ou mistura completa do ar, quando a secagem é controlada pela difusão interna.

Albini (2019) realizou estudos experimentais da secagem de grãos de cevada em camada espessa, utilizando um secador de leito fixo com e sem reversão do ar de secagem. Foram avaliados os efeitos de encolhimento dos grãos, temperatura de operação e umidade inicial do material. A secagem em camada espessa e escoamento ascendente do ar foi simulada utilizando como base o modelo matemático de duas fases proposto por Massarani e Silva Teles (1992). Ao modelo, foi acrescentado o efeito de encolhimento do leito de partículas e as propriedades físicas do grão como função da umidade inicial. As simulações numéricas do processo foram realizadas utilizando o Método das Linhas, em que as equações diferenciais parciais são discretizadas em relação à coordenada espacial e o sistema de equações diferenciais ordinárias foi resolvido em relação ao tempo.

#### **2.4 Secagem em camada fina**

A secagem em camada fina, ou delgada, é geralmente realizada para o entendimento do comportamento do material e a análise da influência das variáveis de operação, tais como a temperatura e a velocidade do ar, no processo de secagem (BUCKLIN *et al.*, 2013). Com a cinética de secagem em camada fina pode-se determinar a temperatura ótima para a manutenção da qualidade do material (BALA, 2017).

De acordo com Kucuk *et al.* (2014), pode-se utilizar modelos de secagem em camada fina quando:

- i) Um único produto ou uma monocamada do produto é exposta as mesmas condições de secagem, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do ar.
- ii) Uma multicamada do material se a temperatura e a umidade do ar de secagem permanecerem no mesmo estado termodinâmico em qualquer momento do processo.

Kucuk *et al.* (2014) enfatizam que a espessura da camada fina pode aumentar se a velocidade do ar aumentar ou se o ar de secagem se aproximar do estado de equilíbrio na transferência de calor e massa com o material seco na camada. Autores como Vieira (2012) e Perazzini (2014), descrevem a condição de camada fina quando a secagem em leito fixo não apresenta gradientes axiais significativos de temperatura e umidade. Experimentalmente a diferença entre a temperatura de alimentação e de exaustão do ar não é expressiva, ou é menor do que erro associado à medida.

No Quadro 3 são apresentados estudos de secagem em camada fina.

**Quadro 3** – Estudos de cinética de secagem em camada fina.

Referência	Descrição
Perazzini <i>et al.</i> (2014)	Utilizaram o conceito de curva característica de secagem, para a secagem de esferas de alumina leito fixo e camada delgada. Avaliaram os efeitos da temperatura e velocidade do ar e do meio poroso no processo. A justificativa da escolha das esferas de alumina como material de secagem foi devido a presença de mecanismos convectivos e difusivos.
Pardeshi <i>et al.</i> (2009)	Realizaram a secagem de ervilhas verdes em camada fina, avaliaram o desempenho de modelos matemáticos de camada fina e determinaram a difusividade efetiva para diferentes temperaturas de secagem.
Hemis <i>et al.</i> (2009)	Realizaram a secagem de trigo em leito fixo e camada fina em diferentes condições do processo. Avaliaram um modelo para a secagem do material em camada espessa em leito fixo com escoamento ascendente de ar.
Derdour <i>et al.</i> (1998)	Determinaram a umidade crítica e a distribuição de umidade interna na secagem de amostras gesso com espessura de 0,5 e 3 cm. Os dados experimentais foram utilizados para a validação de um modelo teórico e a determinação da difusividade efetiva na superfície da mostra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

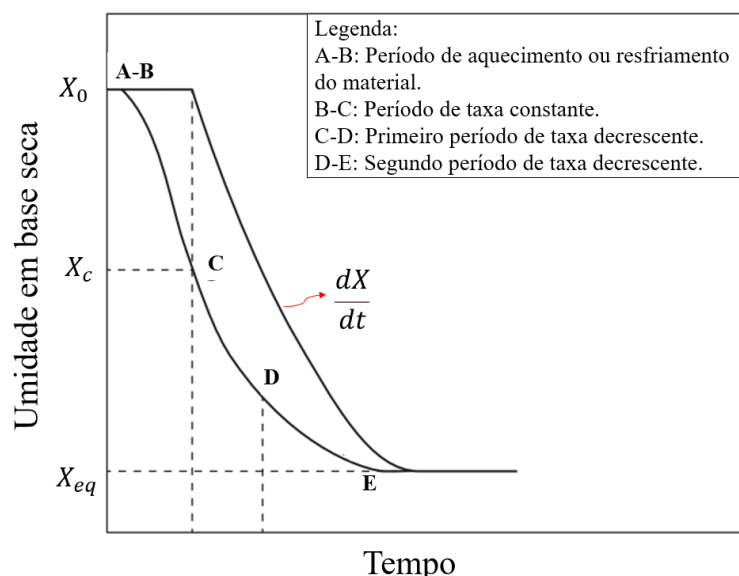
Informações importantes a respeito dos mecanismos de transferência predominantes na secagem de um material, podem ser obtidos a partir da cinética de secagem em camada fina. Nos trabalhos de Sherwood (1929a; 1929b; 1930) e Lewis (1921) são abordadas as principais teorias a respeito dos mecanismos de secagem e as suas relações com a cinética de secagem.

Os três mecanismos gerais citados por Sherwood para descrever como a água é removida do interior de um sólido para a sua superfície e então transferida para o ar de secagem, são:

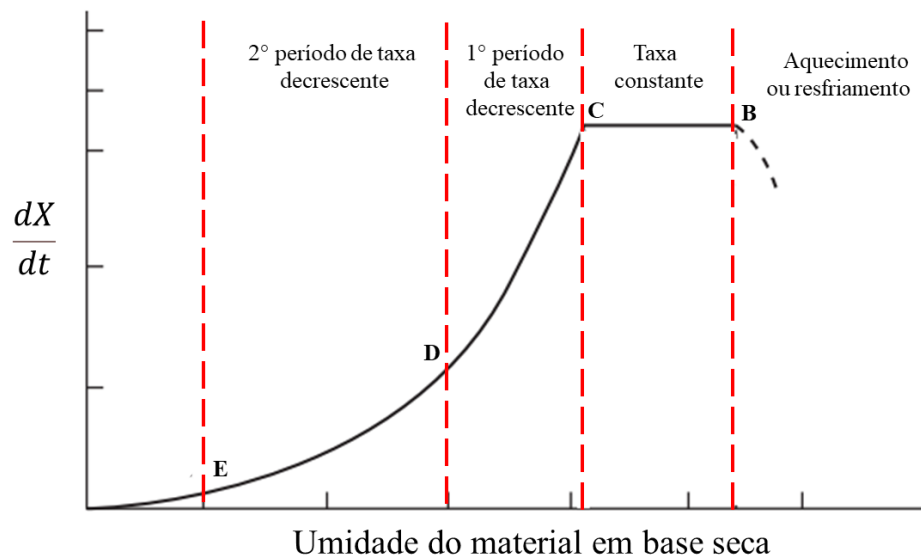
- i) Evaporação do líquido na superfície do sólido: resistência interna a difusão do líquido é pequena quando comparada com a resistência para a remoção do vapor da superfície.
- ii) Evaporação na superfície do sólido: resistência a difusão do líquido intrapartícula é maior quando comparada com a resistência para a remoção do vapor da superfície.
- iii) Evaporação no interior do sólido: resistência a difusão interna do líquido quando comparada com a resistência total para a remoção do vapor.

Durante a secagem, podem existir mais de um mecanismo de transferência entre os citados anteriormente. Sherwood (1929b) enfatiza que em diferentes condições do ar um material com a mesma umidade inicial pode secar por meio de mecanismos diferentes. Por exemplo, para materiais com líquido na superfície a resistência da secagem é semelhante ao item i), evaporação do líquido na superfície, com período de taxa constante ilustrado nos gráficos da Figura 5 e da Figura 6. Com o decorrer do processo, a umidade líquida presente na superfície do sólido diminui e o mecanismo de transferência que passa a predominar é a evaporação na superfície do sólido, item ii), ou a evaporação no interior do sólido, item iii). Nesta etapa, a taxa de secagem, Figura 6, passa do período de taxa constante para o período de taxa decrescente. A umidade do material correspondente ao início do período de taxa decrescente é a umidade crítica do material,  $X_c$  (SHERWOOD, 1929b).

**Figura 5** – Ilustração esquemática da curva de secagem.



Fonte: Adaptado de (BALA, 2017).

**Figura 6** - Ilustração esquemática da taxa de secagem ( $dX/dt$ ) em função da umidade do material.

Fonte: Adaptado de (BALA, 2017).

A taxa de secagem decrescente pode ser dividida em dois estágios: o primeiro período de taxa decrescente, em que a taxa decresce com a diminuição da umidade na superfície molhada; segundo período de taxa decrescente, em que a difusão da umidade no interior do material controla o processo. Estes estágios são indicados na Figura 5 e na Figura 6. Materiais como grãos, geralmente não apresentam período de taxa constante de secagem (BALA, 2017).

Destaca-se a importância da secagem em camada fina principalmente para a modelagem do processo em leitos espessos, uma vez que, modelos como o de Thompson *et al.* (1968), apresentado no item 2.5.2, e os modelos de duas fases, apresentados nos itens 2.5.3 e 2.5.4, são baseados em balanços de massa e energia aplicados a uma camada fina representativa do sistema avaliado. Nos itens 2.4.1 e 2.4.2 são apresentados alguns modelos empíricos, semi-empíricos e baseados na teoria da difusão, para a cinética de secagem em camada fina.

Em Bala (2017) são apresentados modelos matemáticos para a representação da secagem de grãos em camada fina. Neste trabalho, também são descritos alguns métodos de análise de dados experimentais e de ajuste dos parâmetros dos modelos. Na revisão proposta por Kucuk *et al.* (2014), foram selecionados e classificados 67 modelos de cinética de secagem em camada fina disponíveis na literatura. Modelos utilizados para a representação da cinética de secagem de frutas e vegetais podem ser encontrados no trabalho de revisão bibliográfica de Onwude *et al.* (2016).

### 2.4.1 Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos de secagem em camada fina

O modelo de Lewis (1921) também conhecido como modelo de Newton, faz uma analogia entre a transferência de massa e a Lei de Resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção. Este modelo considera que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre a umidade do material em um certo instante e a umidade de equilíbrio (Equação 4).

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = k(\bar{X} - X_{eq}) \quad (4)$$

Integrando a Equação 4 e aplicando a função exponencial de ambos os lados da equação, obtêm-se o modelo de Lewis (1921):

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k t) \quad (5)$$

Os modelos de Page (1949) e Overhults (ou Page Modificado) são modelos empíricos resultantes de adaptações do modelo de Lewis, cujos parâmetros  $k$  e  $n$  perdem significado físico (ERBAY e ICIER, 2010). Estes modelos são apresentados nas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k t^n) \quad (6)$$

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp[-(k t)^n] \quad (7)$$

O modelo de Henderson e Pabis (1961) apresentado pela Equação 8, foi utilizado inicialmente para a secagem de milho. Este modelo é derivado da segunda Lei de Fick da Difusão, com o truncamento da série no primeiro termo (Equação 15). Para tempos de secagem grandes, o primeiro termo da série pode ser utilizado com um pequeno erro associado (ERBAY e ICIER, 2010).

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = a \exp(-k t) \quad (8)$$

Nestes modelos de cinética de secagem,  $k$  é a constante de secagem que representa parâmetros do processo intrínsecos aos fenômenos de transferência de massa externos e internos. A dependência deste parâmetro com a temperatura pode ser representada pela correlação do tipo Arrhenius apresentada na Equação 9, para os modelos de Lewis (1921), Page (1949) e Page e Henderson Pabis (1961). Já para o modelo de Overhults a correlação é a apresentada na Equação 10 (ALBINI, 2015).

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (9)$$

$$k = \exp\left(k_0 + \frac{Ea}{RT}\right) \quad (10)$$

#### 2.4.2 Modelo difusivo para a secagem em camada fina

O modelo difusivo descreve a secagem de um material utilizando a segunda Lei de Fick da difusão. Nesta abordagem, o balanço de massa intra-partícula é representado principalmente pelo fenômeno da difusão efetiva da umidade. A equação diferencial parcial em coordenadas esféricas do modelo difusivo é apresentada pela Equação 11, válida para  $0 < r < R$ . Esta equação é amplamente utilizada pela literatura na modelagem da secagem, podendo-se citar: Arrieche (2007) na modelagem matemática da secagem de sistemas simuladores de alimentos de geometria esférica e deformáveis; Barrozo *et al.*, (2006) na utilização do método de colocação ortogonal para o estudo da secagem de soja em camada fina; Gastón *et al.*, (2002) no estudo da secagem de trigo utilizando o método dos elementos finitos aplicado a esferas e elipsoides e por Giner e Mascheroni (2001) na análise do modelo difusivo para a secagem de trigo.

Para a formulação do modelo difusivo tradicional, que prediz o conteúdo médio de umidade de uma partícula ao longo do tempo, são utilizadas as seguintes considerações: formato esférico da partícula, encolhimento desprezível, difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) constante, transporte de massa unidirecional. Este modelo é uma solução analítica proposta por Crank (1975) para a Equação 11, aplicando a condição inicial e de contorno apresentadas pelas Equações 12, 13 e 14. Nesta abordagem, considera-se que a resistência interna à transferência de massa é predominante, ou seja, para números de  $Bi_m > 0,1$  (SANDER *et al.*, 2001) pode-se considerar que a umidade na superfície é a de equilíbrio durante a secagem (condição de contorno 1).

Utilizando esta informação como uma condição de contorno, e também a condição de simetria em  $r=0$  e a umidade inicial uniforme da partícula, Equação 12, obtêm-se a solução proposta por Crank (1975) para a umidade média que é apresentada pela Equação 15.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{ef} r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \quad (11)$$

**Condição inicial (t = 0):**

$$X(r, 0) = X_0 \quad (12)$$

**Condição de contorno 1 (r = R):**

$$X(R, t) = X_{eq} \quad (13)$$

**Condição de contorno 2 (r = 0):**

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right) \quad (15)$$

## 2.5 Modelos matemáticos para a secagem em camada espessa

A partir dos estudos dos fenômenos de transferência de calor, massa e momento, é possível desenvolver modelos matemáticos capazes de prever o comportamento do sistema e então utilizá-los no projeto de secadores, simulação e otimização, sistemas de controle e no desenvolvimento de *softwares* (RUIZ-LÓPEZ *et al.*, 2008; FREIRE *et al.*, 2017).

No caso específico da secagem em leito fixo com reversão do sentido de escoamento do ar, observa-se que os modelos empregados por Ratti e Mujumdar (1995), Berbert *et al.* (1995), Ruiz-López *et al.* (2008) e Davila *et al.* (1983), apresentam as mesmas equações de conservação de massa e energia para a secagem com e sem reversão. A diferença entre as simulações está na utilização das condições de contorno empregadas na modelagem e na forma como os algoritmos de resolução do sistema de equações foram programados para a descrição da reversão periódica.



A modelagem matemática da secagem é resultado de uma avaliação criteriosa dos mecanismos de transporte envolvidos. Na literatura diversos modelos matemáticos são apresentados para diferentes configurações de secadores, materiais e condições de operação (MASSARANI e SILVA TELLES, 1992; CENKOWSKI *et al.*, 1993). Dentre estes modelos, encontram-se os baseados na abordagem teórica dos fenômenos, os modelos empíricos resultantes de ajustes dos dados experimentais e os modelos híbridos, que englobam as abordagens teóricas e empíricas. Pode-se destacar, que o nível da descrição matemática depende da precisão necessária e da finalidade do processo. No caso específico da secagem, é interessante que os modelos matemáticos utilizados nos sistemas de controle, simulação e otimização sejam apresentados de forma simplificada, facilitando a implementação e reduzindo o custo computacional da operação (SUN *et al.* 1995; FREIRE *et al.*; 2014; FREIRE *et al.*, 2017).

Nos próximos itens são apresentados alguns modelos apresentados pela literatura para a modelagem, simulação e otimização da secagem em leito fixo e camada espessa. Os modelos logarítmicos como o de Hukill (1954), apresentados no item 2.5.1, propõem soluções simples, sendo indicados para a representação da secagem em condições de baixa temperatura e vazões de ar. Os modelos de equilíbrio como o de Thompson *et al.* (1968), apresentado no item 2.5.2, originalmente obtido a partir da modelagem dos fenômenos de transferência envolvidos na secagem em camada delgada, considera o equilíbrio entre as fases, resultando em um sistema de equações algébricas que dependem principalmente da cinética de secagem em camada fina e das relações de equilíbrio entre as fases. Os modelos de duas fases são resultantes de balanços de massa e energia aplicados a um volume de controle representativo do sistema, são apresentados no item 2.5.3. O modelo de Massarani e Silva Telles (1992), utilizado neste trabalho para a modelagem da secagem das esferas de alumina, é apresentado separadamente no item 2.5.4.

Para maiores informações sobre modelos matemáticos de cinética de secagem em camada espessa, recomenda-se a revisão de Cenkowski *et al.* (1989). Em Bala (2017) também são apresentados os modelos logarítmicos, de equilíbrio e os baseados em balanços de massa e energia com o foco na secagem de grãos.

### **2.5.1 Modelos Logarítmicos**

Segundo Parry (1985), Hukill em 1954 foi o primeiro a propor um modelo logarítmico com solução analítica para a secagem em camada espessa, em que a temperatura do ar e a

umidade do material podem ser estimadas em função da posição e tempo de secagem, ou seja,  $T_f(y,t)$  e  $X(y,t)$ . Neste modelo, a principal suposição assumida é que o calor sensível perdido pelo ar aquecido que percola o meio poroso é equivalente ao calor latente de vaporização da umidade contida no material, desprezando o calor fornecido para o aquecimento das partículas (PARRY, 1985).

$$G_m C_{p_f} \frac{\partial T_f}{\partial y} = \rho_b h_{ag} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (16)$$

onde:  $G_m$  é o fluxo mássico do ar de secagem,  $C_{p_f}$  é o calor específico do fluido,  $\rho_b$  é a densidade *bulk*,  $h_{ag}$  o calor latente de vaporização da água presente no sólido,  $T_f$  a temperatura do fluido e  $X$  a umidade do material em base seca. Como condições iniciais e de contorno para a equação, Hukill (1954) utilizou:

- Condição inicial para a temperatura ( $t=0$ ).

$$\frac{T_f(y, 0) - T_{eq}}{T_{f0} - T_{eq}} = \exp(-R y) \quad (17)$$

- Condição de contorno para a temperatura ( $y=0$ ).

$$T_f(0, t) = T_{f0} \text{ (temperatura de alimentação do ar de secagem)} \quad (18)$$

- Condição de contorno para a umidade ( $y=0$ ).

$$\frac{X(0, t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k t) \quad (19)$$

- Condição inicial para a umidade ( $t=0$ ).

$$X(y, 0) = X_0 \text{ (umidade inicial do produto)} \quad (20)$$

Para a umidade, a solução proposta pelo autor é apresentada em termos do fator de profundidade  $D$  e do adimensional de tempo  $Y$ , que são apresentados pelas Equações 21 e 22,

respectivamente. Ressaltando que  $T_e$  e  $X_{eq}$  são as temperaturas e umidade de equilíbrio e  $H$  o tempo de meia resposta.

$$\frac{X(y, t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1} \quad (21)$$

$$D(y) = y \frac{\rho h_{ag} (X_0 - X_{eq})}{H C p_f G_m (T_0 - T_{eq})} \quad (22)$$

$$Y(t) = \frac{t}{H} \quad (23)$$

O modelo de Hukill (1954) subestima o tempo de secagem necessário para o material atingir uma determinada umidade, sugerindo incoerências na condição de contorno utilizada para o adimensional de umidade (PARRY, 1985). Autores como Baughman *et al.* (1971) e Barre *et al.* (1971) sugeriram uma relação semelhante a apresentada pela Equação 16, em termos da taxa de avanço da frente de secagem ( $Q$ ), Equação 24. Barre *et al.* (1971) obtiveram como solução para o adimensional de umidade e de temperatura as Equações 25 e 26, os autores aplicaram o modelo logarítmico para a secagem em camada espessa em um secador de fluxos cruzados, enfatizando que o modelo log ou exponencial é simples, menos sofisticado e exige menor custo computacional, podendo ser utilizado para análises e projetos.

$$G_m C p_f \frac{\partial T_f}{\partial y} = Q h_{ag} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (24)$$

$$\frac{X(y, t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{e^D}{e^D + e^Y - 1} \quad (25)$$

$$\frac{T_f(y, t) - T_{eq}}{T_{f0} - T_{eq}} = \frac{e^Y}{e^D + e^Y - 1} \quad (26)$$

Estes modelos vêm sendo utilizados em diversos trabalhos que envolvem a simulação do processo de secagem em camada espessa, principalmente pela simplicidade, sendo indicados

para processos de secagem operados em baixas temperaturas e vazões de ar (CENKOWSKI *et al.*, 1993).

No trabalho desenvolvido por Aregba *et al.* (2006), a secagem em leito fixo foi simulada utilizando o modelo logarítmico, chamado pelos autores de modelo de equilíbrio, e por um modelo constituído por equações diferenciais parciais resultantes de balanços de massa e energia para as fases fluida e sólida. O modelo logarítmico foi obtido da proposta de Hukill (1954) e as suas variáveis relacionadas ao número de unidades de transferência (NUT). Os resultados mostraram que o tempo de transferência influenciou na acurácia do modelo log, para tempos de transferência inferiores a 0,1 segundos as predições dos dois modelos coincidiram. Os autores destacaram que por se tratar de um modelo de menor complexidade, a abordagem logarítmica pode ser útil na simulação dos fenômenos de transferência envolvidos na secagem e no desempenho de secadores.

Lopes *et al.* (2005) utilizaram o modelo de Hukill (1954) no desenvolvimento de um programa computacional para a simulação da secagem para baixas temperaturas. O programa possibilita a simulação da secagem de diferentes grãos, sendo programado em linguagem *Object Pascal* e fazendo o uso da plataforma de programação Delphi 5<sup>®</sup>. Os resultados dos tempos de secagem fornecidos pelas simulações foram comparados com dados experimentais da secagem de milho e com as predições utilizando o modelo de Thompson *et al.* (1968). Lopes *et al.* (2005) destacam que os desvios obtidos foram considerados aceitáveis, e os recursos gráficos empregados na apresentação dos resultados na interface de usuário se mostraram de fácil interpretação.

Outro programa computacional desenvolvido para a secagem de grãos baseado no modelo de Hukill (1954) é o proposto por Mata *et al.* (1999). As simulações podem ser realizadas para secadores de fluxo cruzado e fluxo concorrente, aplicadas para grãos de arroz, feijão, milho, soja e trigo, o modelo logarítmico foi empregado na simulação da secagem de milho.

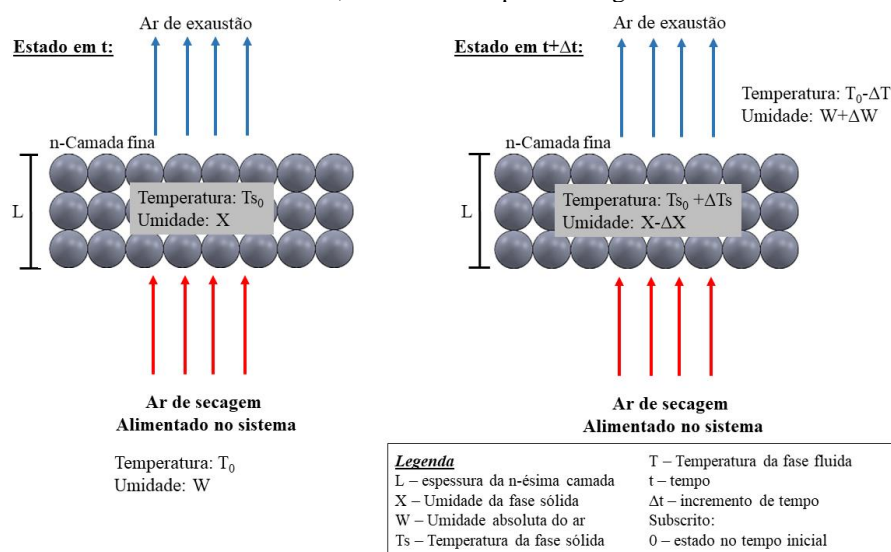
Montovanni *et al.* (1977) estudaram a secagem de milho em um secador de leito fixo de formato cilíndrico, com 60 cm de diâmetro e alturas de leito estático de 110 e 140 cm, para temperaturas de secagem de 30 °C e 35 °C e vazões de ar de 9,4 e 12,2 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>. Durante o processo de secagem, amostras de até 17 gramas foram retiradas de diferentes posições do secador para a determinação da umidade do material. A temperatura foi coletada para diferentes posições durante o processo, por meio da inserção de termopares. O modelo de Hukill (1954) foi utilizado para a simulação do processo de secagem.

Em termos de análise dos custos envolvidos no processo de secagem, pode-se citar o trabalho apresentado por Young e Dickens (1975), que estudaram os custos fixos, de combustível, de operação e totais da secagem de milho utilizando o modelo de Hukill (1954) para a simulação da secagem em camada espessa. Como conclusão do estudo, os autores observaram através das simulações que embora as altas temperaturas de secagem e baixas vazões de ar reduzissem os custos do processo, estas condições de operação podem influenciar na qualidade do grão, proporcionando gradientes de temperatura e umidade que podem danificar os grãos através da exposição excessiva à temperatura de secagem.

### 2.5.2 Modelo de Thompson

Thompson *et al.* (1968) propuseram um modelo para a secagem de milho subdividindo o processo em n-subprocessos. O modelo é baseado em balanços de massa e energia para uma camada representativa do sistema, de acordo com a representação apresentada na Figura 7. Este modelo pode ser aplicado em secadores de leito fixo em camada espessa, secadores de leitos móveis com fluxos cruzados, leitos móveis com fluxos concorrente e contracorrente (THOMPSON *et al.*, 1968). A abordagem do modelo simula a secagem para uma camada fina e então combina n-camadas finas para a representação da secagem em camada espessa. Para a simulação da secagem em camada espessa, o leito foi considerado como n-camadas sobrepostas, onde em cada camada a variação na umidade e temperatura do material e do ar de secagem é determinada para pequenos incrementos de tempo.

**Figura 7** – Representação esquemática da formulação do modelo de Thompson *et al.* (1968) para a secagem em leito fixo, onde  $t$  é o tempo de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo considera as seguintes suposições para a secagem de milho:

- 1° - Secagem em camada fina é representada pela equação empírica:

$$t = A \ln (RU) + [B \ln (RU)]^2 \quad (27)$$

$$RU = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (28)$$

Onde:

t - tempo de secagem em horas.

A e B – constantes da equação de secagem em camada fina que dependem do produto e da temperatura.

RU – razão de umidade adimensional.

- 2° - Existe equilíbrio térmico entre o ar de secagem e as partículas, logo, a temperatura do grão é igual à do ar que o envolve.
- 3° - A umidade de equilíbrio entre o grão de milho e o ar é dada por:

$$1 - UR = \exp (-k(T + c)X_{eq}^n) \quad (29)$$

Em que:

UR – umidade relativa do ar ambiente.

K, c e n – constantes que dependem do produto.

T – temperatura do ar [°C].

- 4° - O calor latente de vaporização da água no milho é dado por:

$$h_v = (2502,2 - 2,39T)(1 + E \exp (fX)) \quad (30)$$

Onde:

E, F – constantes que dependem do sólido.

$h_v$  – calor latente de vaporização [kJ kg<sup>-1</sup>].

- 5ª - Calor específico do produto:

$$Cp_s = (M + N X) \quad (31)$$

Onde:

M, N – constantes que dependem do produto.

Cp<sub>s</sub> – calor específico do produto [kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>].

Para a simulação da secagem, a primeira etapa é a determinação da temperatura de equilíbrio (T<sub>eq</sub>), desta consideração sugere o nome de modelo de equilíbrio. Thompson *et al.* (1968) a partir de um balanço de energia entre as fases obtiveram a Equação 32 para a determinação de T<sub>eq</sub>:

$$T_{eq} = \frac{(0,24 + 0,45 W_0)T_0 + Cp_s Ts_0}{0,24 + 0,45 W_0 + Cp_s} \quad (32)$$

Nesta equação W<sub>0</sub> é a umidade absoluta do ar antes da secagem em Δt, T<sub>0</sub> é a temperatura inicial do ar de secagem e Ts<sub>0</sub> é a temperatura inicial da fase sólida em °C. Após a determinação da temperatura de equilíbrio, foram calculadas a umidade relativa do ar nas condições de equilíbrio (UR<sub>eq</sub>) com T<sub>eq</sub>. A umidade de equilíbrio do grão foi determinada utilizando T<sub>eq</sub> e UR<sub>eq</sub>.

Com estes dados, foram determinados o tempo equivalente (t<sub>e</sub>), definido como o tempo em que a fase sólida deve ficar exposta as condições de secagem (T<sub>eq</sub> e W<sub>0</sub>) para que a umidade seja reduzida do seu valor inicial (X<sub>0</sub>) para o valor atual (X).

$$t_e = A \ln \left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) + \left[ B \ln \left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) \right]^2 \quad (33)$$

Em seguida, a razão de umidade adimensional (RU<sub>f</sub>) foi determinada para as condições do ar de secagem (T<sub>eq</sub> e W<sub>0</sub>), durante a secagem em Δt, utilizando a equação de secagem de camada fina.

$$RU_f = \exp \left( \frac{\left[ -A (A^2 + 4 B (t_e + \Delta t))^{0,5} \right]}{2 B} \right) \quad (34)$$

Com a razão adimensional de umidade, a umidade do material foi determinada no tempo  $t+\Delta t$ , pela Equação 35. Com a umidade do material, foi determinada a umidade do ar após a secagem ( $W_f$ ) utilizando o balanço de massa apresentado pela Equação 36, nesta equação  $R$  é a razão entre as massas do material seco e do ar seco.

$$X_f = R U_f (X_0 - X_{eq}) + X_{eq} \quad (35)$$

$$W_f = W_0 + R(X - X_f) \quad (36)$$

Um balanço de energia é realizado para a determinação da temperatura do fluido após a secagem em  $(t+\Delta t)$ :

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45 W_0)T_{eq} - (W_f - W_0)(588 + \Delta L - T_{eq}) + Cp_s R(1 + X_f)T_{eq}}{0,24 + 0,45 W_f + Cp_s R(1 + X_f)} \quad (37)$$

Todas estas etapas de cálculo podem gerar valores de umidade relativa do ar superiores a 100%, o que caracteriza um estado impossível. Desta forma, a consistência da resposta é verificada determinando a umidade relativa do ar após a secagem com  $T_f$  e  $W_f$ . Se a umidade relativa for superior a 100%, Thompson *et al.* (1968) sugerem um novo balanço para correção apresentado pela Equação 38, onde se assume que a umidade relativa do ar é de 100% e a diferença da umidade é condensada no produto, este novo estado é dado pela  $T_f^*$  e  $W_f^*$ . A nova umidade do material é calculada pela Equação 39 após a condensação do excedente de umidade no ar.

$$\begin{aligned} 0,24 T_f + W_f(588 + 0,45 W_f) + (W_f^* - W_f)T_f + Cp_s R(1 + X_f) T_f = \\ = 0,24 T_f^* + W_f^*(588 + 0,45 T_f^*) + Cp_s R(1 + X_f)T_f^* \end{aligned} \quad (38)$$

$$X_f^* = X_f - (W_f^* - W_f)/R \quad (39)$$

Aghbashlo *et al.* (2015), desenvolveram um modelo para a simulação da secagem de camomila em camada espessa, integrando o modelo de equilíbrio de Thompson à secagem em camada fina. Os autores utilizaram o *software* TRNSYS® para a implementação do modelo.



Como resultado da validação, o modelo que pode ser utilizado para a simulação da performance de secadores solares em diferentes condições climáticas e de operação.

Berbert *et al.* (1995) utilizaram uma adaptação do modelo de Thompson *et al.* (1968) para a modelagem e simulação da secagem de café em leito fixo com reversão periódica do ar de secagem. As simulações também foram realizadas para a secagem convencional. Os autores utilizaram dados experimentais para a validação do modelo, que apresentou previsões aceitáveis da umidade do café e da temperatura do ar. O modelo foi utilizado para a avaliação da temperatura e do intervalo de reversão, no consumo específico de energia e na umidade final do material. As simplificações assumidas na modelagem, tais como: encolhimento desprezível e temperatura de equilíbrio entre o ar e os grãos, foram consideradas como as maiores fontes dos erros entre os valores preditos e os obtidos experimentalmente.

No trabalho desenvolvido por Sousa (2017b), o modelo de Thompson *et al.* (1968) foi utilizado para o desenvolvimento de um *software* de simulação da secagem de arroz vermelho. Para isso, o autor realizou estudos de isotermas de equilíbrio e de secagem em camada fina e espessa.

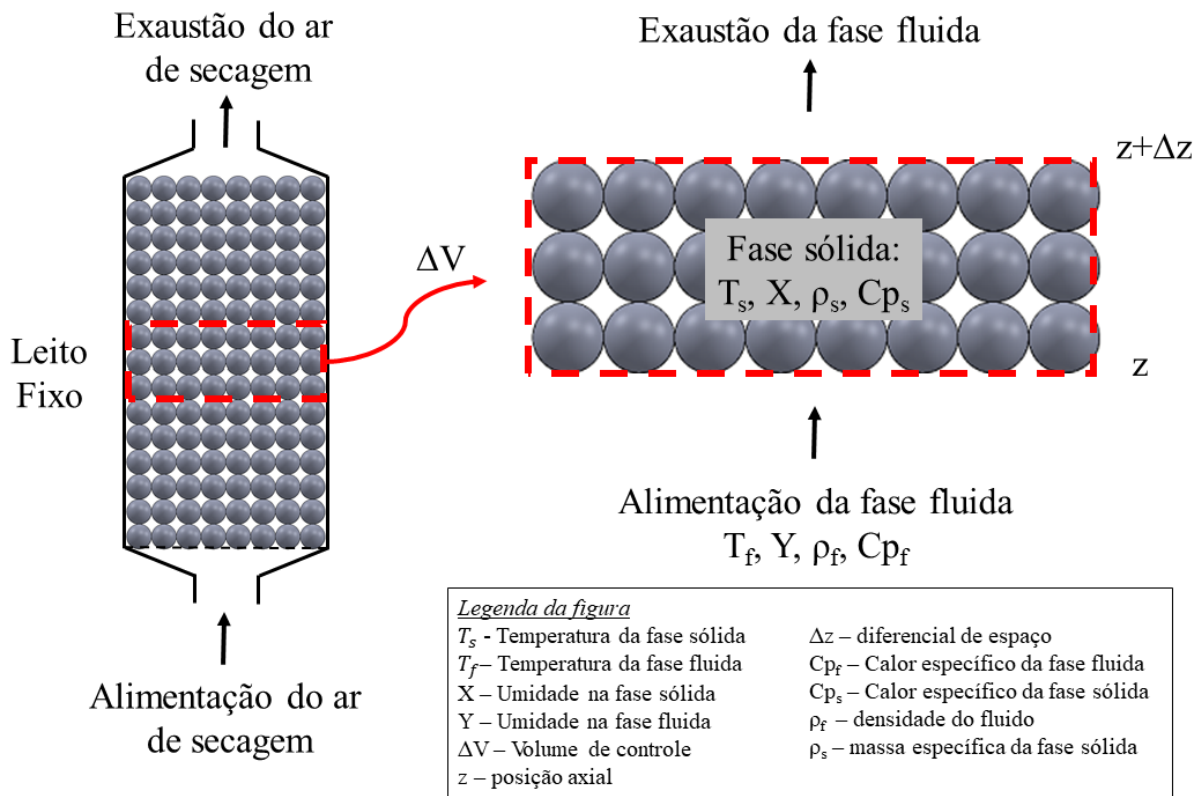
### 2.5.3 Modelo de duas fases

Os modelos de duas fases são mais rigorosos que os modelos logarítmicos e os de equilíbrio na descrição da transferência de calor e massa que ocorrem entre a fase sólida e fluida em um volume de controle, durante a secagem em um leito empacotado. Também são conhecidos como modelos de não equilíbrio. Estes são baseados em equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento entre as fases, relações de equilíbrio termodinâmico e equações constitutivas, que podem gerar um sistema de equações diferenciais parciais em que variáveis como a temperatura e a umidade de cada fase, são funções da posição espacial e do tempo (MASSARANI e SILVA TELLES, 1992; CENKOWSKI *et al.*, 1993; PRADO e SARTORI, 2011).

Na literatura, os diversos modelos se diferenciam principalmente pela forma como descrevem os mecanismos de transferência de calor e massa entre as fases (MASSARANI e SILVA TELLES, 1992).

O modelo proposto por Bakker-Arkema *et al.* (1967) e simplificado por Brooker *et al.* (1974) é derivado de balanços de massa e energia em um volume de controle do leito fixo, como o representado na Figura 8.

**Figura 8** – Desenho ilustrativo, fora de escala, do volume de controle avaliado para a conservação de massa e energia do modelo de duas fases de Brooker *et al.* (1974) na secagem em leito fixo e camada espessa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O detalhamento dos balanços de massa e energia com as simplificações assumidas podem ser encontrados na revisão de Cenkowski *et al.* (1993). No modelo de Brooker *et al.* (1974), as variáveis como temperatura da fase fluida  $T_f(z,t)$ , temperatura da fase sólida  $T_s(z,t)$ , umidade da fase fluida  $Y(z,t)$  e umidade da fase sólida  $X(z,t)$  são funções da posição espacial,  $z$ , e do tempo,  $t$ .

As hipóteses do modelo de Brooker *et al.* (1974), são:

- i. Encolhimento do leito de partículas é desprezível;
- ii. Gradientes de temperatura internos de cada grão é desprezível;
- iii. Condução de calor e transferência de massa entre os grãos é desprezível;
- iv. Fluxo pistonado do ar de secagem;
- v. Variações na temperatura da fase fluida com o tempo,  $(\partial T_f / \partial t)$ , e variações da umidade da fase fluida com o tempo,  $(\partial Y / \partial t)$ , são desprezíveis quando comparadas com as variações de temperatura da fase fluida com a posição axial,  $(\partial T_f / \partial z)$ , e variações da umidade da fase fluida com a posição axial,  $(\partial Y / \partial z)$ , do leito fixo na direção do escoamento da fase fluida.

- vi. Transferência de calor pelas paredes do secador é desprezível;
- vii.  $C_{ps}$ ,  $C_{pv}$  e  $C_{pl}$  constantes considerando curtos intervalos de tempo;
- viii. Equação de cinética de secagem em camada fina e isotermas para umidade de equilíbrio conhecidas.

A seguir, são apresentadas as equações de conservação do modelo de Brooker *et al.* (1974).

- Balanço de massa para a fase sólida:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \text{Equação de taxa de secagem de camada fina} \quad (40)$$

- Balanço de massa para a fase fluida:

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = - \frac{\rho_s}{G_f} \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} \quad (41)$$

- Balanço de energia para a fase sólida:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{h a (T_f - T_s)}{\rho_s (Cp_s + Cp_l \bar{X})} + G_f \frac{\partial Y}{\partial z} \left[ \frac{\lambda + Cp_v (T_f - T_s)}{\rho_s (Cp_s + Cp_l \bar{X})} \right] \quad (42)$$

- Balanço de energia para a fase fluida:

$$\frac{\partial T_f}{\partial y} = - \frac{h a (T_f - T_s)}{G_f (Cp_f + Cp_l Y)} \quad (43)$$

Na sequência, são descritos estudos literatura que utilizaram modelos de duas fases para a simulação do processo de secagem em leito fixo.

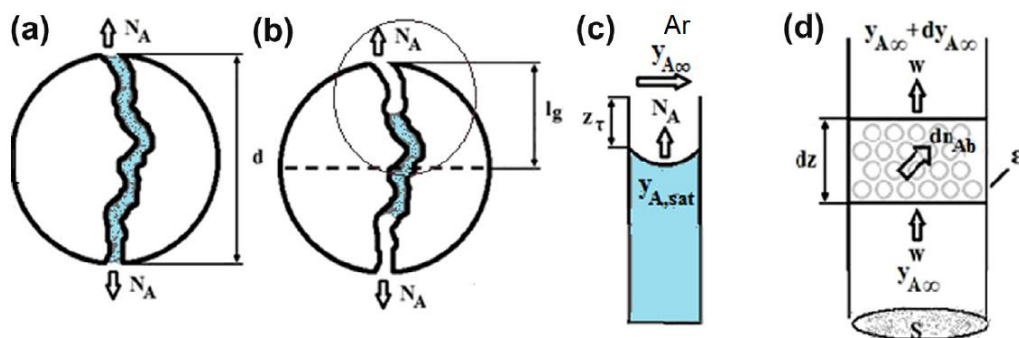
O trabalho de Prado e Sartori (2008) traz para a modelagem da secagem em camada espessa em leito fixo, a influência do encolhimento do leito. Neste trabalho, o modelo de duas fases foi aplicado para a simulação da secagem de sementes com recobrimento de mucilagem. O encolhimento foi descrito em coordenadas móveis, assim como no trabalho de Ratti e Mujumdar (1995) e Albin (2019). Para a descrição do encolhimento do leito em função da umidade do material, Prado e Sartori (2008) utilizaram equações provenientes de dados experimentais de secagem em camada espessa. Para a da taxa de secagem em camada fina, foram utilizadas duas equações, uma para o período de taxa constante e outra para o período de taxa decrescente, o modelo de Lewis (1921) apresentado pela Equação 4. A avaliação da influência do parâmetro  $h$  nas simulações se mostrou relevante nas respostas obtidas.

Ainda sobre o trabalho de Prado e Sartori (2008), os autores avaliaram três correlações da literatura para a determinação do coeficiente de transferência de calor,  $h$ , entre as fases sólida

e fluida nas simulações da secagem em leito fixo. A partir das predições do modelo e do estudo experimental da secagem de sementes de mamão, os autores concluíram que o encolhimento e a mudança das propriedades não podem ser desconsiderados no processo.

Dobre *et al.* (2016) realizaram a modelagem e simulação numérica da secagem de partículas porosas esféricas não deformáveis, em leito fixo e camada espessa. O modelo baseado em balanços de massa e energia, representou o fluxo molar de umidade evaporada dos poros da partícula pela teoria da difusão em um filme estagnado, como o ilustrado na Figura 9. As considerações do modelo foram: i) partículas esféricas com poroso idênticos e uniformes, cada partícula possui um número de poros idênticos e completamente cheios de umidade; ii) os poros tortuosos atravessam a partícula, Figura 9 - a); iii) a transferência de massa nos poros ocorre pela difusão do vapor de umidade através de uma camada de gás estagnado; iv) o fluxo ascendente da fase fluida se aproxima de um fluxo pistonado; v) queda de pressão devido ao escoamento do fluido no meio poroso, dispersões axiais e radiais de calor e massa, gradiente de temperatura dentro da partícula e transferência de calor para o ambiente externo foram considerados desprezíveis; vi) parâmetros de secagem variam na direção do escoamento do ar, em uma única dimensão; vii) umidade é a água.

**Figura 9** – Representação esquemática do modelo físico de secagem em leito fixo de Dobre *et al.* (2016): (a) poro tortuoso completamente preenchido; (b) poro tortuoso parcialmente preenchido; (c) vaporização de umidade de um poro esticado; (d) balanço de umidade para um volume de controle de leito fixo passado por uma corrente de ar.



Fonte: Dobre *et al.* (2016).

Na Figura 9,  $N_A$  é o fluxo molar de vapor d'água,  $y_{A,sat}$  é a fração molar de vapor d'água em equilíbrio com a água líquida dos poros,  $y_{A,\infty}$  é a fração molar do vapor de água do ar úmido,  $dn_{Ab}$  é a taxa de água vaporizada do volume de controle do leito,  $\epsilon$  é a porosidade do leito,  $z_r$  é o comprimento do caminho de difusão instantâneo,  $w$  é a velocidade superficial do ar,  $S$  a área de seção transversal do leito,  $l_g$  é o comprimento geométrico associado a difusão do vapor e  $dz$  é a espessura do volume de controle.

Dobre *et al.* (2016) incluíram propriedades como o diâmetro da partícula, porosidade da partícula, tortuosidade dos poros da partícula, porosidade do leito, altura do leito estático no modelo matemático. A porosidade e a tortuosidade dos poros, foram utilizadas como parâmetros de ajuste do modelo. Dados experimentais de secagem de carvão ativado foram utilizados para o ajuste dos parâmetros. As respostas obtidas pela simulação apresentaram boa concordância com os resultados experimentais em diferentes condições do processo, sendo o modelo recomendado por Dobre *et al.* (2016) para o projeto e otimização da secagem de partículas porosas em leito fixo.

Souza *et al.* (2015) realizaram a simulação da secagem de sementes de soja em leito fixo com escoamento ascendente de ar, utilizando um modelo de duas fases com as seguintes considerações: o mecanismo predominante na transferência de calor é a convecção na superfície do sólido; difusão intrapartícula é o mecanismo predominante na transferência de massa; respiração da semente foi negligenciada; gradientes radiais de temperatura, umidade e velocidade do ar foram negligenciados; gradientes radiais de umidade e temperatura da fase sólida foram negligenciados; transferência de calor pelas paredes do secador foi desprezada; propriedades físicas e químicas do leito constantes.

Ainda sobre o trabalho de Souza *et al.* (2015), foram utilizadas as isotermas de Halsey para a estimativa da umidade de equilíbrio das sementes de soja. A equação de cinética de secagem em camada fina, Equação 44, foi utilizada para determinação da taxa de secagem,  $f$ , empregada no modelo de secagem em camada espessa e apresentada pela Equação 45. Para a estimativa do coeficiente de transferência de calor,  $h$ , em leito fixo utilizaram o número de Nusselt (Nu) determinado pela correlação apresentada na Equação 46. Esta correlação é válida para  $0,67 < Pr < 1$  e  $15 < Re < 8500$ , onde  $Pr$  e  $Re$  são os números de Prandtl e de Reynolds, respectivamente. O modelo foi resolvido numericamente utilizando o método das linhas, as respostas obtidas foram comparadas com dados experimentais de umidade da fase sólida e da temperatura do ar, apresentado boa representação da heterogeneidade da secagem em camada espessa.

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp [-(k t)^{0,54}] \quad (44)$$

$$f = \frac{0,54 (X_0 - X_{eq}) k e^{-(k t)^{0,54}}}{(k t)^{0,46}} (1 - \varepsilon) \rho_s \quad (45)$$

$$Nu = 2 + 1,1 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{0,6} \quad (46)$$

Sun *et al.* (1995) incluíram o efeito de condensação do vapor de água na modelagem e simulação numérica da secagem de grãos em leito fixo e camada espessa. Sun *et al.* (1995) descrevem que o efeito de condensação pode ocorrer quando uma grande quantidade de umidade é transferida para o ar quente, e então é transferida do ar para o sólido conforme a fase fluida é resfriada ao passar pelas regiões não secas e com as menores temperaturas do leito. A proposta dos autores consistiu em considerar a condensação como uma reumidificação do material sólido. Esta consideração não representa a realidade física, uma vez que a umidade condensada permanece próxima a superfície do sólido e com a chegada da frente de secagem esperasse que a taxa inicial de secagem seja maior do que a predita pela Equação 47. O modelo de Sun *et al.* (1995) é composto pelas equações de conservação de massa e energia para cada fase. Para representar o termo de transferência de massa foram feitas as seguintes considerações:

- i) Se o ar de secagem estiver insaturado de umidade, a taxa de secagem é descrita pela Equação 47.
- ii) Se o ar de secagem estiver em estado de saturação, é realizado um balanço psicrométrico entre o ar e a água livre disponível. Neste caso a umidade do ar,  $Y$ , é descrita pela Equação 48, obtida de uma relação de equilíbrio fazendo a substituição da umidade relativa do ar pelo valor de 100%.

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = -k(\bar{X} - X_{eq}) \quad (47)$$

$$Y = \frac{0,622 P_v}{P - P_v} \quad (48)$$

Nestas equações,  $P_v$  é a pressão de vapor da água na temperatura do ar de secagem. De acordo com Sun *et al.* (1995), a Equação 48 pode trazer diversos problemas numéricos para a resolução do modelo por relacionar duas variáveis diferenciais, temperatura e umidade, que não são independentes. Para resolver este problema, os autores substituíram a Equação 48, pela sua derivada em relação ao tempo. O modelo proposto também considerou o encolhimento do leito de partículas. O método numérico utilizado para a resolução do sistema de equações empregou técnicas heurísticas de controle, o método de colocação ortogonal em elementos finitos e

método finito atrasado. As respostas dos métodos foram comparadas e as soluções apresentaram concordância com os resultados experimentais de secagem.

#### 2.5.4 Modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992)

O modelo de Massarani e Silva Telles (1992), trouxe para a descrição físico-matemática da secagem a Termodinâmica de Misturas da Mecânica do Contínuo, baseando-se na Teoria de Misturas de Truesdell (1957) e na proposição de Gurtin e Vargas (1971). Este modelo associa a cada posição do sistema uma fase sólida e outra gasosa com temperatura, umidade e velocidades próprias. De forma geral, considera-se as fases como:

- Fase fluida: ar + vapor de água.
- Fase sólida: matriz seca + água líquida.

O modelo é composto por equações de conservação de quantidade de movimento, massa e energia para cada fase mais as isotermas de secagem e as equações constitutivas. No equacionamento original, o modelo considera além da convecção os fenômenos difusivos e dispersivos para a transferência de massa e a condução na transferência de calor.

Por se tratar de uma abordagem geral, as equações de conservação do modelo de duas fases podem ser simplificadas para a utilização na modelagem de configurações específicas de secadores. Em Massarani e Silva Telles (1992), pode-se encontrar uma tabela com as equações de conservação do modelo de duas fases adaptadas para as seguintes configurações de secadores: leito fixo, transporte pneumático, leito deslizante, secador rotativo, leito deslizante com fluxos contracorrentes, leito deslizantes com fluxos cruzados e secador de esteira.

A seguir, são apresentadas as equações de conservação do modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) com as seguintes considerações: escoamento unidirecional do ar de secagem, gradientes de pressão desprezível no meio poroso, comportamento ideal da fase fluida, transporte convectivo de massa e calor entre as fases, transporte de calor e massa por condução e difusão desprezível, capacidades caloríficas constantes, transferência de calor pelas paredes do secador é desprezível; temperatura, velocidade e umidade uniformes na seção de alimentação do ar; ausência de interação de movimento entre a fase fluida e sólida.

- Balanço de massa para a fase fluida:

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Y}{1+Y} \right) + G_f \nabla Y = f \quad (49)$$

- Balanço de massa para a fase sólida:

$$(1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{X}{1 + X} \right) + G_s \nabla X = -f \quad (50)$$

- Balanço de energia para a fase fluida:

$$\varepsilon C_{p_f} \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + C_{p_f} G_f (1 + Y) \nabla T_f = -h a (T_f + T_s) - C_{p_f} (T_f - T_s) f \quad (51)$$

- Balanço de energia para a fase sólida:

$$(1 - \varepsilon) C_{p_s} \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + C_{p_s} G_s (1 + X) \nabla T_s = h a (T_f - T_s) - f \lambda \quad (52)$$

A transferência de massa entre as fases é expressa pela equação constitutiva apresentada pela Equação 53. O coeficiente de transferência de calor,  $h$ , pela analogia de Lewis apresentada na Equação 54 (MASSARANI e SILVA TELLES, 1992).

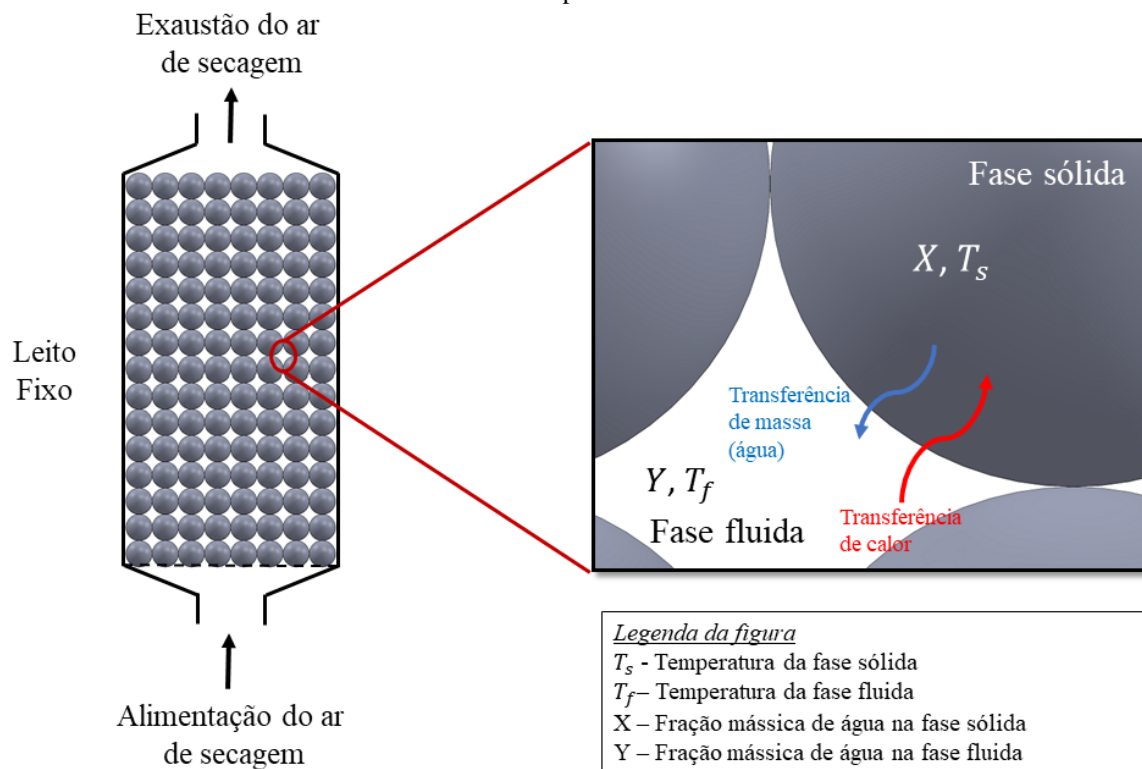
$$f = k_y a (Y_{f,e} - Y_f) \quad (53)$$

$$k_y = \frac{h}{C_{p_f}} \quad (54)$$

Nestas equações, os sobrescritos  $s$  e  $f$  representam as fases sólida e fluida respectivamente,  $T$  é a temperatura,  $X$  é a fração de água na fase sólida,  $Y$  é a fração de água na fase fluida,  $Y_{e,f}$  é a umidade da fase fluida em equilíbrio com a fase sólida que é obtida a partir das isotermas de secagem,  $h$  o coeficiente de transferência de calor entre as fases,  $k_y$  o coeficiente de transferência de massa,  $C_p$  o calor específico,  $\lambda$  o calor latente de evaporação da água na temperatura da fase sólida,  $a$  é a superfície específica do sólido por unidade de volume do meio poroso,  $G$  é a velocidade mássica e  $\varepsilon$  a porosidade do leito. Na Figura 10 são ilustradas as variáveis do modelo de duas fases na secagem em leito fixo e camada espessa.



**Figura 10** - Desenho ilustrativo, fora de escala, das fases sólida e fluida na secagem em leito fixo e camada espessa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 4 são apresentados trabalhos da literatura que utilizaram o modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) para a simulação da secagem.

**Quadro 4** – Estudos da literatura que utilizaram o modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles para a simulação da secagem.

Referência	Material de secagem	Configuração de secador
Massarani e Silva Telles (1992)	Soja	Secador de fluxos cruzados
Massarani e Silva Telles (1992)	Milho	Secador de fluxos cruzados com recirculação contínua de sólidos
Calçada <i>et al.</i> (1994)	Esferas de alumina	Leito fixo com escoamento ascendente de ar
Defendi (2015)	Grãos de soja	Leito fixo com escoamento ascendente de ar
Albini (2019)	Grãos de cevada	Leito fixo com escoamento ascendente de ar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que as diferenças nas modelagens dos estudos citados no Quadro 4, que serão descritos a seguir, encontram-se na configuração do secador, na descrição do termo de transferência de massa e calor entre as fases, incorporação do fenômeno de encolhimento do leito, isotermas de equilíbrio, a consideração de temperatura de mistura (sólido-fluido), propriedades da partícula e do meio poroso.

Massarani e Silva Telles (1992) utilizaram dados experimentais de vazão e temperatura inicial e final e cada fase na secagem em leito deslizante e fluxos cruzados, para comparar com as estimativas do modelo. Para as simulações foram utilizadas duas abordagens para os parâmetros de transferência entre as fases. A primeira abordagem consistiu na estimativa do coeficiente de transferência de calor,  $h$ , utilizando correlações da literatura. Na segunda abordagem, a abordagem otimizada, o parâmetro  $h$  e o parâmetro  $k$  de transferência de massa, foram calculados de forma que a resposta do modelo de duas fases conduzisse ao valor experimental de umidade da fase sólida. Os resultados apresentaram desvios médios inferiores a 20 % entre os valores experimentais e os simulados.

Calçada *et al.* (1994) realizaram um estudo preliminar da secagem de materiais porosos em leito fixo, utilizando o modelo de Massarani e Silva Telles para o escoamento ascendente de ar. Os autores avaliaram a secagem de partículas esféricas de alumina com diâmetro de 4,3 mm, na secagem em leito fixo em camada delgada e espessa. A secagem em camada espessa foi realizada com o objetivo de coletar informações referentes à operação em secadores industriais, para isso foi utilizada uma unidade com geometria cilíndrica, de 40 cm de diâmetro e 50 cm de altura. O estudo da secagem em camada delgada possibilitou a avaliação das variáveis como temperatura e vazão do gás na cinética de secagem. Os autores concluíram que a influência da vazão de ar foi mais pronunciada do que a temperatura, na cinética de secagem em camada fina.

Ainda sobre o estudo de Calçada *et al.* (1994), para a solução numérica do modelo de duas fases, os autores utilizaram o método das linhas. O parâmetro de transferência de massa entre as fases foi estimado pelo método da máxima verossimilhança, ajustando a umidade média de todo o leito em vários tempos de operação. O modelo de duas fases não apresentou boa concordância com os dados experimentais, observação que segundo os autores está relacionada ao fenômeno de capilaridade que foi desconsiderado na modelagem do processo. Na caracterização das partículas de alumina em relação a distribuição do tamanho dos poros, utilizando adsorção física com  $N_2$ , foi observado que 100% dos poros da amostra apresentaram diâmetros inferiores a 1000 Å, possibilitando o fenômeno da capilaridade.

Defendi (2015) realizou a otimização da secagem periódica de soja em leito fixo com escoamento ascendente de ar. Para isso, avaliou a secagem em camada fina com o objetivo de obter estimativas dos coeficientes de transferência de massa do processo. Comparou a secagem convencional com a periódica em termos de desempenho. O modelo de duas fases utilizado na modelagem do processo de secagem convencional e periódico foi o de Massarani e Silva Telles. O autor utilizou o método de diferenças finitas para frente, como solução numérica do sistema de equações. O modelo de duas fases foi ajustado aos dados experimentais de quantidade de água evaporada, umidade e temperatura, de forma predizer os parâmetros das equações de balanço de massa e energia para as fases. Para a secagem periódica, foi utilizada uma função de modulação da temperatura do ar alimentado. As predições do modelo apresentaram boas estimativas de temperatura e umidade do processo, obtendo um desvio global inferior a 20%. A partir deste resultado, o modelo matemático foi utilizado na análise do consumo energético da operação indicando a redução de 21% no gasto energético com a realização da secagem com modulação contínua da temperatura do ar.

Conforme apresentado no item 2.3, Albini (2019) adaptou o modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) para a simulação da transferência de calor e massa na secagem de grãos de cevada em leito fixo e camada espessa com escoamento ascendente de ar. Para a representação do termo de transferência de massa entre as fases, o autor utilizou o modelo de Page com os parâmetros de ajuste determinados pelo ajuste de dados experimentais de cinética de secagem em camada fina. Esta última consideração descartou a necessidade da utilização da Equação 53. O fenômeno de encolhimento e a consideração de temperatura de mistura (sólido-fluido), foram incorporados a modelagem do sistema. Com a utilização da consideração de temperatura da mistura, não foi necessária a estimativa do coeficiente de transferência de calor,  $h$ , para a simulação do processo. Para a resolução numérica do modelo, foi utilizado o método das linhas. As respostas obtidas a partir das simulações apresentaram erros médios relativos entre 1,0 % e 13,6 %, mostrando potencial para a utilização do modelo para a simulação do processo.

Calçada *et al.* (2002) segundo Defendi (2015), propôs um modelo de três fases para a secagem em leito fixo. Este modelo considera a presença de água líquida condensada, além das fases sólida e fluida. O modelo proposto é uma adaptação do modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992), incorporando relações psicrométricas aos balanços de massa e energia. A principal alteração desta abordagem matemática foi a da variável umidade do gás, que passou a ser a resultante da soma de uma parcela de umidade líquida e outra na fase vapor. Para umidades relativas abaixo de 100%, a presença da umidade na forma líquida foi negligenciada,

já para umidades relativas de 100% o estado de saturação foi considerado para a temperatura e umidade da fase gás.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas as metodologias experimentais empregadas para a obtenção da temperatura e umidade em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso, durante a secagem da alumina em leito fixo e camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar. Também, é apresentada a metodologia utilizada na análise energética do processo e da secagem em camada fina. Por fim, são apresentados os modelos matemáticos e os métodos numéricos utilizados para a obtenção das soluções numéricas.

#### 3.1 Material

Os experimentos de secagem foram realizados utilizando partículas esféricas de alumina com diâmetro médio de  $3,2 \pm 0,2$  mm e de  $7,1 \pm 0,7$  mm. A determinação do diâmetro médio de partícula  $D_p$ , foi realizada através do processamento digital de imagens. A metodologia experimental utilizada baseou-se na proposta por Guedes *et al.* (2011). O procedimento consistiu em determinar a dimensão do diâmetro da alumina, considerando o seu formato como esférico. Para isso, foram analisadas imagens do diâmetro de 30 partículas, selecionadas por amostragem, com auxílio do *software* de domínio público ImageJ.

Na literatura estão disponíveis propriedades físicas e térmicas para a alumina e algumas destas propriedades são apresentadas no Quadro 5.

**Quadro 5** - Propriedades físicas e térmicas da alumina.

Referência	Propriedade
Calçada <i>et al.</i> (1994)	Massa específica da alumina [ $\text{kg m}^{-3}$ ]: $\rho_s = 1690$
Perazzini (2014)	Área específica [ $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ]: 294,81
Perazzini (2014)	Volume específico dos poros da partícula [ $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ]: 0,40
Perazzini (2014)	Diâmetro médio dos poros da partícula [nm]: 5,43
Perazzini (2014)	Condutividade térmica efetiva na estagnação [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]: $k_{ef} = 4,6 \pm 0,14$
Calçada <i>et al.</i> (2006)	Calor específico da partícula em função da temperatura ( $T_s$ ): $Cp_s = 41,04 (22,08 + 8,97 \cdot 10^{-3} T_s - 5,23 \cdot 10^{-5} T_s^2)$

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Meio poroso

Para a caracterização do meio poroso, foram determinadas as seguintes propriedades: densidade *bulk* ( $\rho_{bulk}$ ), porosidade *bulk* ( $\varepsilon_{bulk}$ ), permeabilidade ( $k_{leito}$ ) e o fator  $c$ .

A densidade *bulk* foi determinada pela razão entre a massa das partículas saturadas de água e o volume do recipiente ocupado, utilizado o método de proveta. Esta técnica também foi empregada por Altino (2019) e Felizardo (2018) para a determinação de  $\rho_{bulk}$  de sementes de cevada, aveia, lentilha e soja e de esferas de alumina. A porosidade *bulk* foi estimada utilizando a Equação 55, onde  $\rho_{aparente}$  é a massa específica aparente.

$$\varepsilon_{bulk} = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{aparente}} \quad (55)$$

Para a determinação da permeabilidade do leito e do fator  $c$ , foram realizados experimentos fluidodinâmicos para a obtenção de dados experimentais de queda de pressão do meio poroso em função da vazão de ar alimentado no sistema. Com estes resultados, foram construídas as curvas fluidodinâmicas apresentadas no APÊNDICE A. Nestes experimentos, foram utilizadas esferas de alumina com  $D_p$  de  $3,2 \pm 0,2$  mm e  $7,1 \pm 0,7$  mm, e altura de leito estático de 10,5 cm. Para a determinação da permeabilidade do meio poroso ( $k_{leito}$ ) e do fator  $c$ , foi realizado ajuste da Equação 56 aos dados experimentais. Nesta equação, conhecida como Equação de Forchheimer, a força resistiva depende do quadrático da velocidade superficial do ar  $q$ ,  $\Delta P$  é a queda de pressão no leito,  $L$  é o comprimento do meio poroso,  $\mu$  e  $\rho_f$  são a viscosidade dinâmica e a massa específica do fluido, respectivamente (CREMASCO, 2018).

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_{leito}} q + \frac{c \rho_f}{\sqrt{k_{leito}}} q^2 \quad (56)$$

### 3.3 Umidade das partículas

Para a determinação da umidade da alumina, foi utilizado o método gravimétrico de estufa. Neste método, as amostras com massas previamente aferidas, foram colocadas em uma estufa à temperatura de 105 °C por um período de 24 horas para a determinação da massa seca. A umidade em base seca ( $X_{bs}$ ) e base úmida ( $X_{bu}$ ) foram determinadas através das Equações 57 e 58, respectivamente. Nestas equações,  $m_u$  é a massa úmida e  $m_s$  é a massa seca da amostra.

$$X_{bs} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad (57)$$

$$X_{bu} = \frac{m_u - m_s}{m_u} \quad (58)$$

Para a determinação do adimensional de umidade média do leito ( $W$ ) em função do tempo de secagem, foi utilizada a Equação 59, onde  $\overline{X(t)}$  é a umidade média do leito em um dado tempo de secagem,  $X_{eq}$  a umidade de equilíbrio dinâmico e  $X_0$  a umidade média inicial.

$$W(t) = \frac{\overline{X(t)} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (59)$$

### 3.4 Umidificação das partículas

Todos os experimentos de secagem utilizando a alumina foram realizados com o material saturado com água. A metodologia experimental empregada para a obtenção de partículas saturadas, foi baseada na utilizada por Perazzini (2014). A mesma consistiu na submersão da alumina em água por um período de 48 horas. Após a saturação e antes de cada experimento de secagem, a água líquida excedente das partículas esféricas de alumina foi drenada com o auxílio de uma peneira.

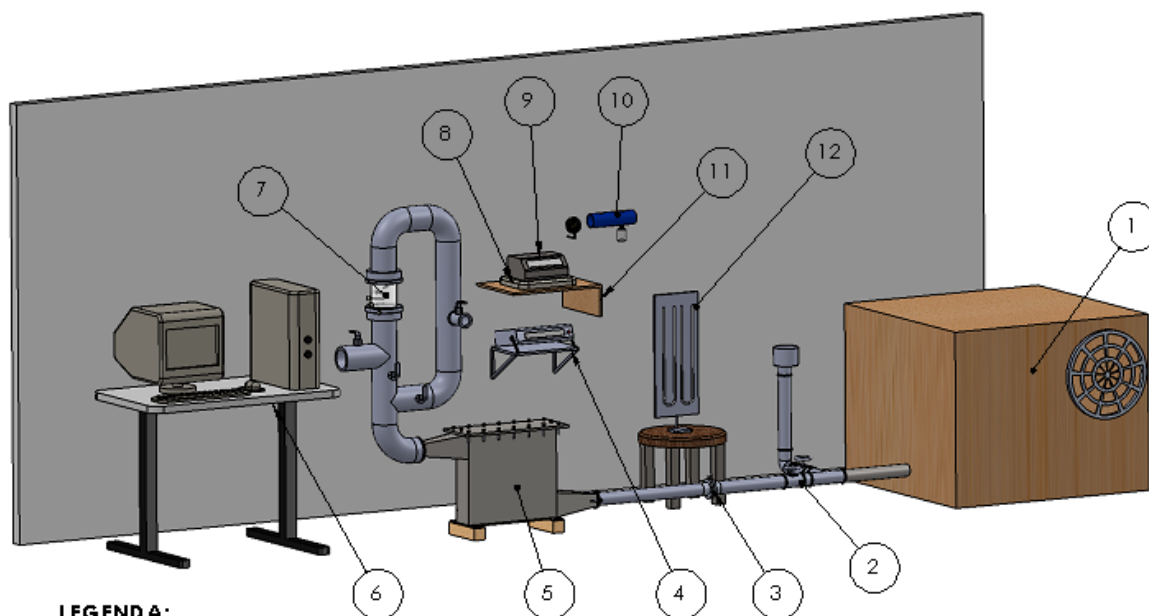
### 3.5 Módulo experimental

Os experimentos de secagem foram realizados no módulo experimental ilustrado pela Figura 11, instalado no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. O módulo é composto pelos equipamentos e periféricos especificados na legenda da figura.

A célula de secagem (7), possui dimensões de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura, fabricada em acrílico, podendo ser retirada e acoplada ao módulo experimental. Para os experimentos térmicos e de umidade média de todo o leito, foi utilizada a célula descrita no item 3.6.1, já para os experimentos de umidade em cada fração foi utilizada a célula apresentada no item 3.6.2. Neste equipamento, o ar aquecido foi utilizado como fluido de secagem, alimentado ao sistema por um soprador radial IBRAM de 3,5 HP de potência (1), sendo a vazão ajustada por um sistema de válvulas com by-pass (2). Para a determinação da vazão de ar, a

linha é equipada com uma placa de orifício (3), onde a queda de pressão é adquirida por um transdutor de pressão da marca Auto Tran Incorporated, com faixa operacional de 0-10 inH<sub>2</sub>O e 1-5 V. O ar é direcionado para o aquecedor (5), composto por duas resistências elétricas de 1000 W e um controlador de temperatura Flyever FE50S (4).

**Figura 11** - Ilustração do módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem (desenho fora de escala).



**LEGENDA:**

1	ISOLAMENTO ACÚSTICO DO SOPRADOR	7	CÉLULA DE SECAGEM
2	BY-PASS	8	PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS
3	PLACA DE ORIFÍCIO	9	DIGI-SENSE
4	CONTROLADOR DE TEMPERATURA	10	PSICRÔMETRO
5	AQUECEDOR DE AR	11	TRANSDUTOR DE PRESSÃO
6	COMPUTADOR	12	MANÔMETRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

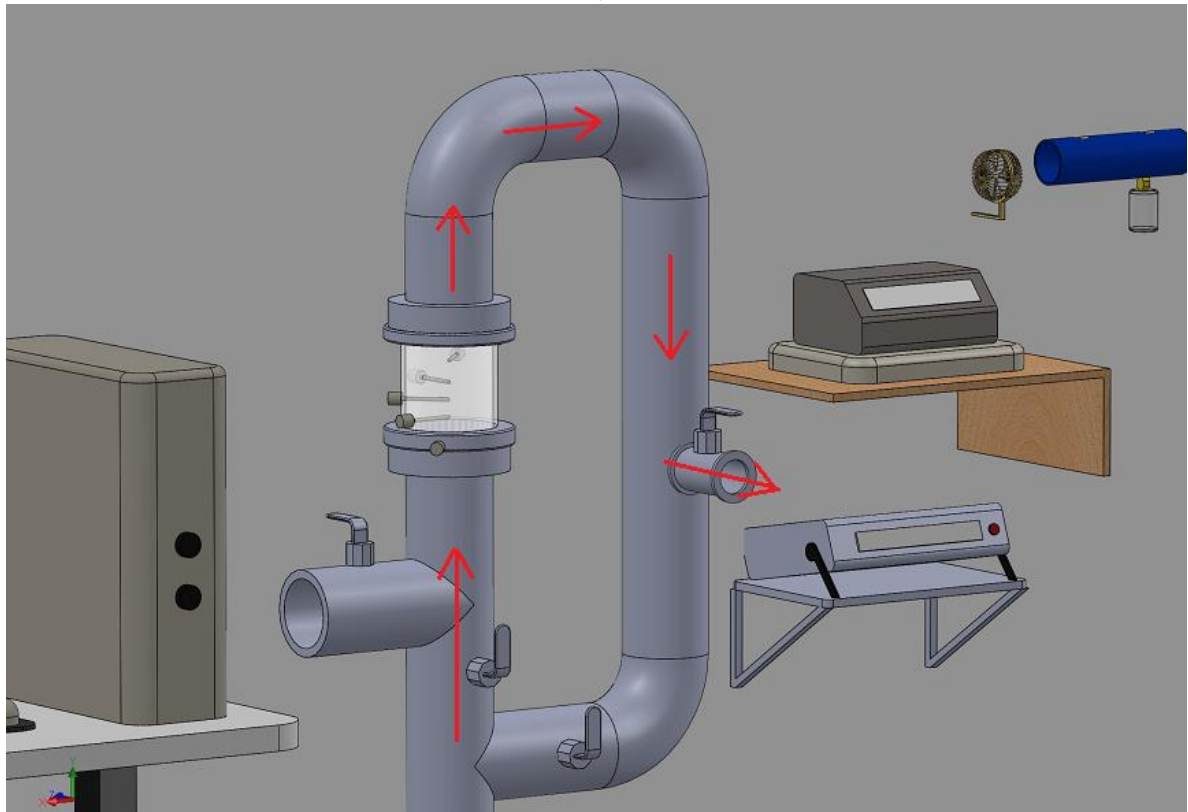
Para a aquisição e armazenamento dos valores de temperatura e de pressão, medidos pelos termopares e transdutores de pressão, foi utilizada uma placa de aquisição Lynx ADS0500 (8) e um microcomputador (6). Uma interface em LabVIEW foi utilizada para leitura e armazenamento dos dados. As temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente foram obtidas com um psicrômetro (10), sendo utilizadas para a determinação da umidade absoluta e relativa do ar de secagem.

O equipamento possui um sistema de válvulas que permite direcionar o escoamento do ar aquecido no sentido ascendente ou descendente, conforme ilustrado pela Figura 12. As regiões de alimentação de ar ascendente e descendente possuem uma seção de 3 cm de altura e 10 cm de diâmetro com recheio de esferas de vidro com Dp de 2,80 mm. A tubulação do equipamento possui isolamento térmico composto de silicato de cálcio e alumínio.

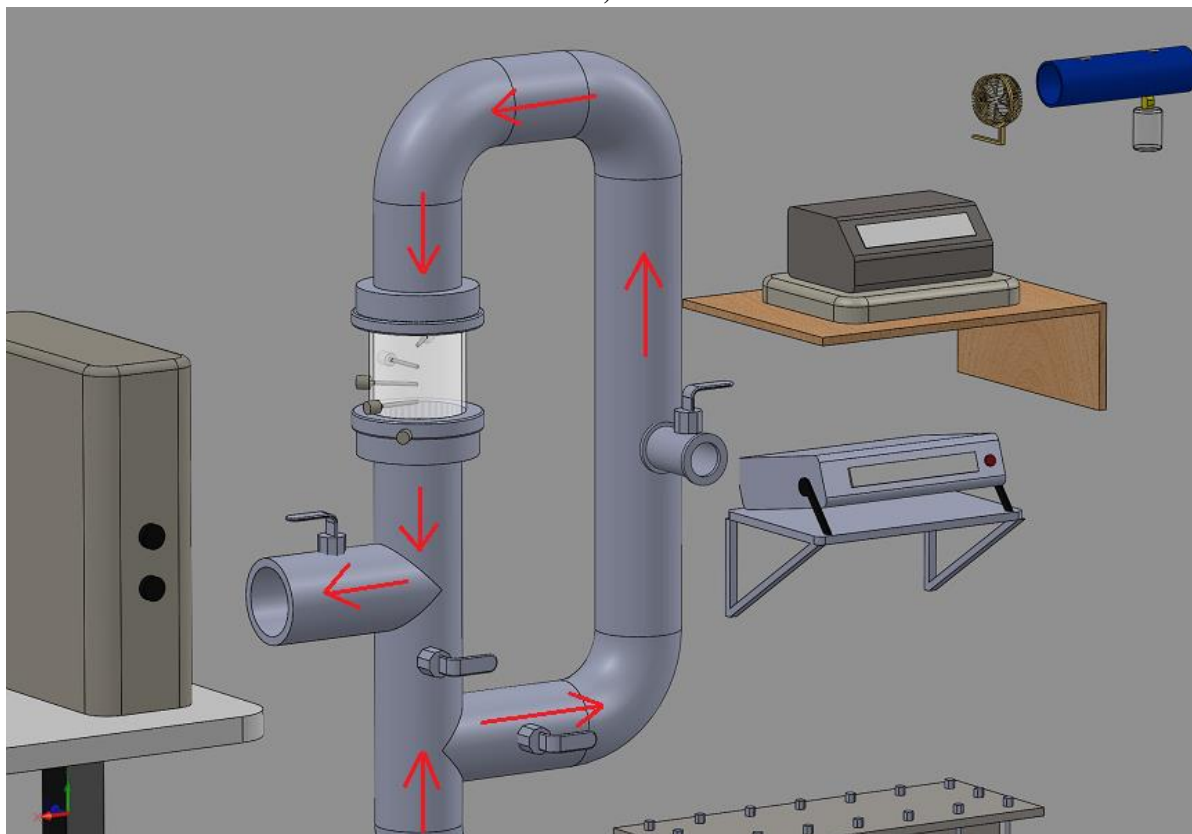


**Figura 12** – Ilustração do sentido do escoamento do ar no secador de leito fixo (desenho fora de escala):  
a) Escoamento ascendente. b) Escoamento descendente.

a)



b)

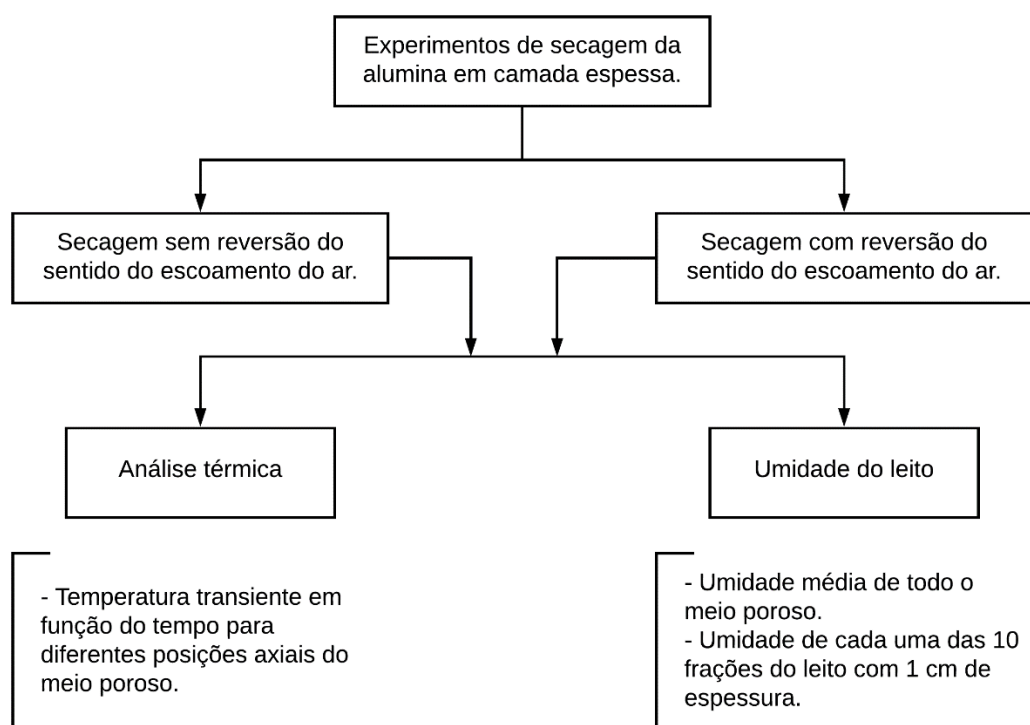


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6 Experimentos de secagem em camada espessa

Os experimentos de secagem da alumina consistiram na obtenção da temperatura em função da posição e do tempo, assim como a umidade média em cada camada de 1,0 cm e a umidade média de todo o leito, para a secagem em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar. A Figura 13 apresenta um esquema dos experimentos envolvidos na análise térmica e de massa realizadas durante a secagem. Nos próximos itens serão descritas as metodologias utilizadas nos experimentos.

**Figura 13** – Experimentos para a secagem da alumina em camada espessa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram avaliadas as temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C, escolhidas devido às limitações térmicas do equipamento de secagem. Para a escolha da velocidade do ar empregada ao processo, foram realizados experimentos prévios em que a velocidade mínima de fluidização das partículas foi considerada. Desta forma, a maior velocidade utilizada ( $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) garantiu que não ocorresse movimentação das partículas durante o processo de secagem.

A reversão do sentido do escoamento do ar de secagem foi avaliada para diferentes tempos iniciais de aplicação da reversão ( $t_0$ ) e para diferentes tempos de duração da reversão

do ar de secagem ( $\Delta t$ ). Na Tabela 1 são apresentadas as condições de secagem utilizadas nos experimentos.

**Tabela 1** - Condição de operação dos experimentos de secagem da alumina em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar para alumina com  $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm.

Condição de operação	Valores utilizados
Temperatura de secagem – T [°C]	40, 50 e 60
Velocidade do ar - U [m·s <sup>-1</sup> ]	2,7
t <sub>0</sub> [min]	10
$\Delta t$ [min]	10, 30 e 50
Umidade inicial da alumina - X <sub>0</sub> [kg água · kg sólido seco <sup>-1</sup> ]	0,45
Umidade relativa do ar de secagem - UR (%)	19,3 – 71,2%
Altura de leito estático [cm]	10,5 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a estabilização das condições de secagem (vazão e temperatura do ar), o equipamento foi ligado com aproximadamente 1 h de antecedência ao início da secagem. O meio poroso foi empacotado na célula de secagem (o empacotamento do leito será detalhado nos 3.6.1 e 3.6.2) e então iniciava-se o experimento. Os experimentos térmicos sem reversão e de massa foram realizados em triplicata. Os experimentos térmicos com reversão foram realizados em duplicata.

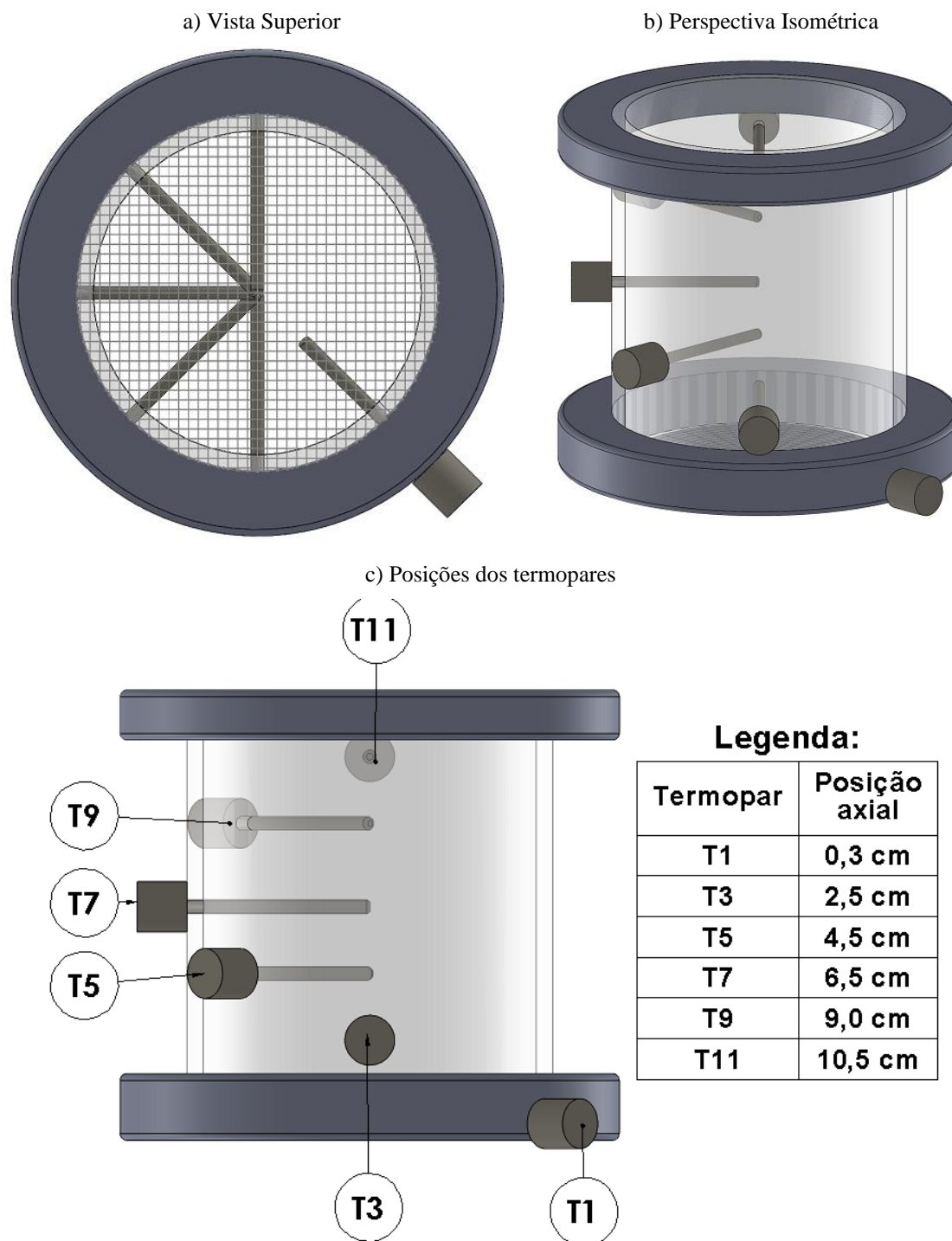
### 3.6.1 Valores da temperatura em função da posição e do tempo

Os experimentos térmicos consistiram na determinação dos valores da temperatura para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem com e sem reversão do escoamento do ar. Para estes experimentos foi utilizada a célula de secagem apresentada na Figura 14, que possui orifícios para a inserção dos termopares. Observa-se que os termopares foram posicionados de forma helicoidal minimizando uma possível interferência no escoamento do ar e leitura das temperaturas. Foram inseridos 6 termopares do tipo J (ferro-constantan) que forneceram as temperaturas das posições axiais indicadas pela Figura 14 - c), durante a secagem. Os termopares foram calibrados utilizando o Block Calibrator DB-35L.

O empacotamento do leito para os experimentos térmicos foi realizado primeiramente com a retirada do excesso de água líquida da alumina saturada (metodologia apresentada no item 3.4). Em seguida o termopar da base T1 (posição axial de 0,3 cm) foi inserido no leito. Camadas de alumina foram adicionadas até a posição do termopar T3. O empacotamento foi ajustado com o movimento horizontal do leito realizado manualmente, como indicado pelas

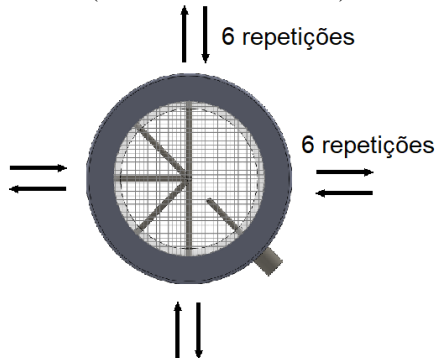
setas da Figura 15, seguido da inserção do termopar T3. Estas etapas foram repetidas até a altura de leito estático estabelecida para a secagem e o posicionamento de todos os termopares do leito.

**Figura 14** – Detalhes da célula de secagem para os experimentos térmicos (desenho fora de escala).



Fonte: Elaborado pelo autor.

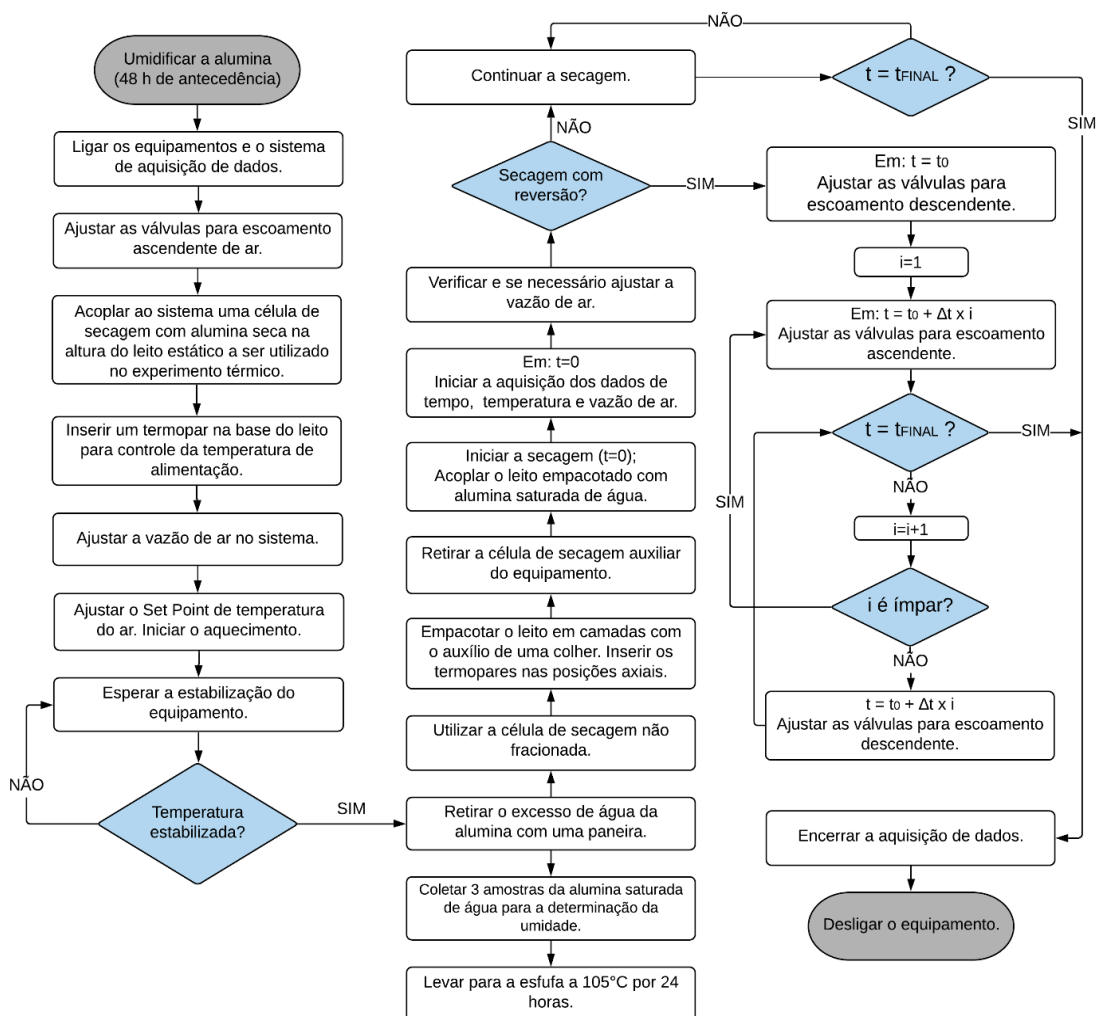
**Figura 15** – Sentido e direção do movimento realizado durante o empacotamento do leito (desenho fora de escala).



Fonte: Elaborado pelo autor.

No fluxograma apresentado pela Figura 16 são apresentadas as etapas seguidas para a realização dos experimentos térmicos de secagem em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar de secagem.

**Figura 16** – Etapas seguidas para a realização dos experimentos térmicos de secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar no secador.

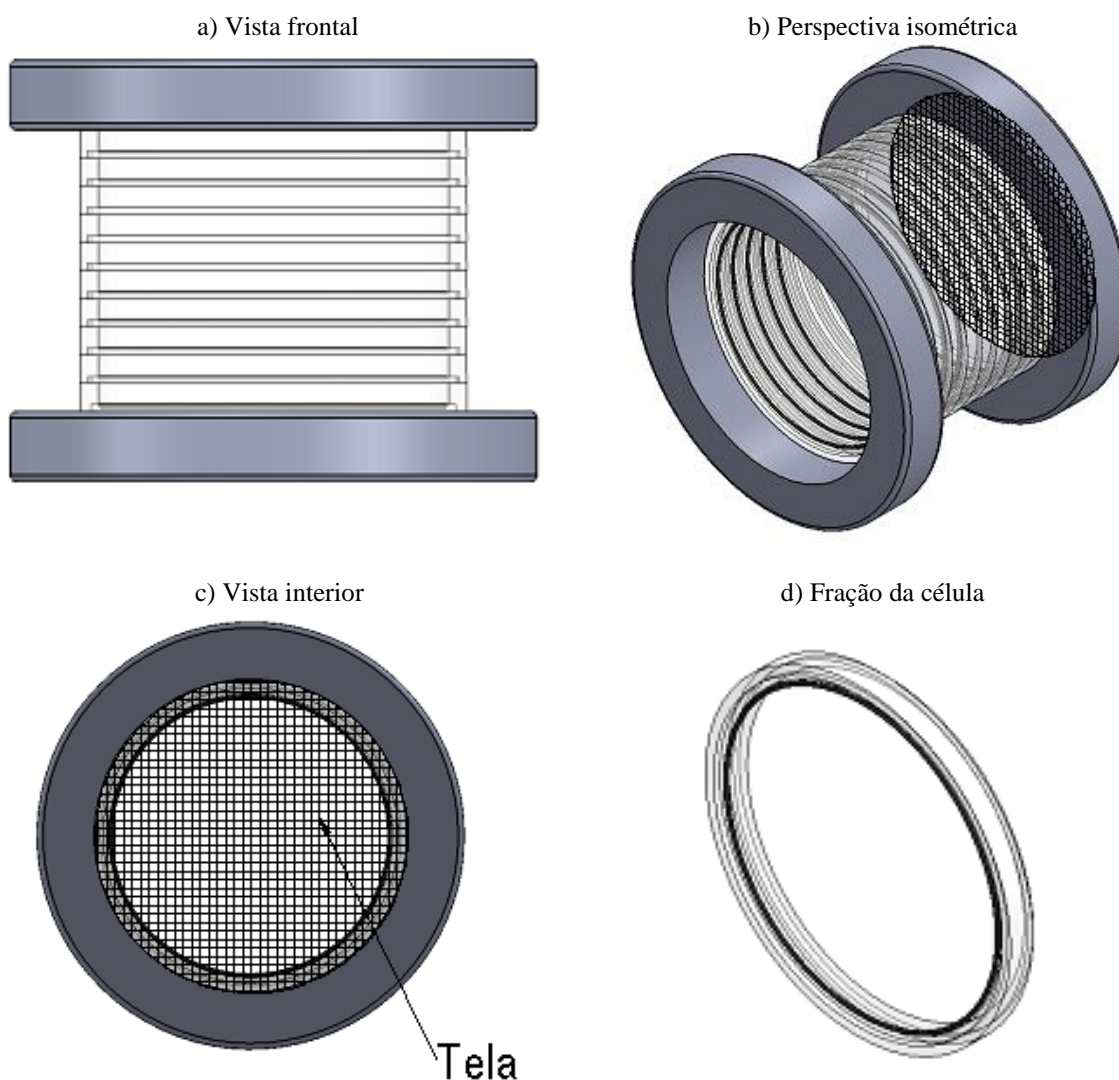


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6.2 Valores de umidade de cada fração e umidade média do leito

A célula fracionada apresentada na Figura 17, composta por 10 frações de acrílico com 1 cm de altura cada, foi utilizada para a determinação da umidade média de cada fração do leito na secagem com e sem reversão. Desta forma, para um determinado tempo de avaliação da umidade do material em cada fração do leito, um novo meio poroso composto por alumina saturada foi empacotado e a secagem realizada até o tempo pré-estabelecido. Após este procedimento, o leito foi particionado e as frações do material correspondentes a cada seção foram levadas à estufa com temperatura de 105 °C por 24 horas, para a determinação da massa seca.

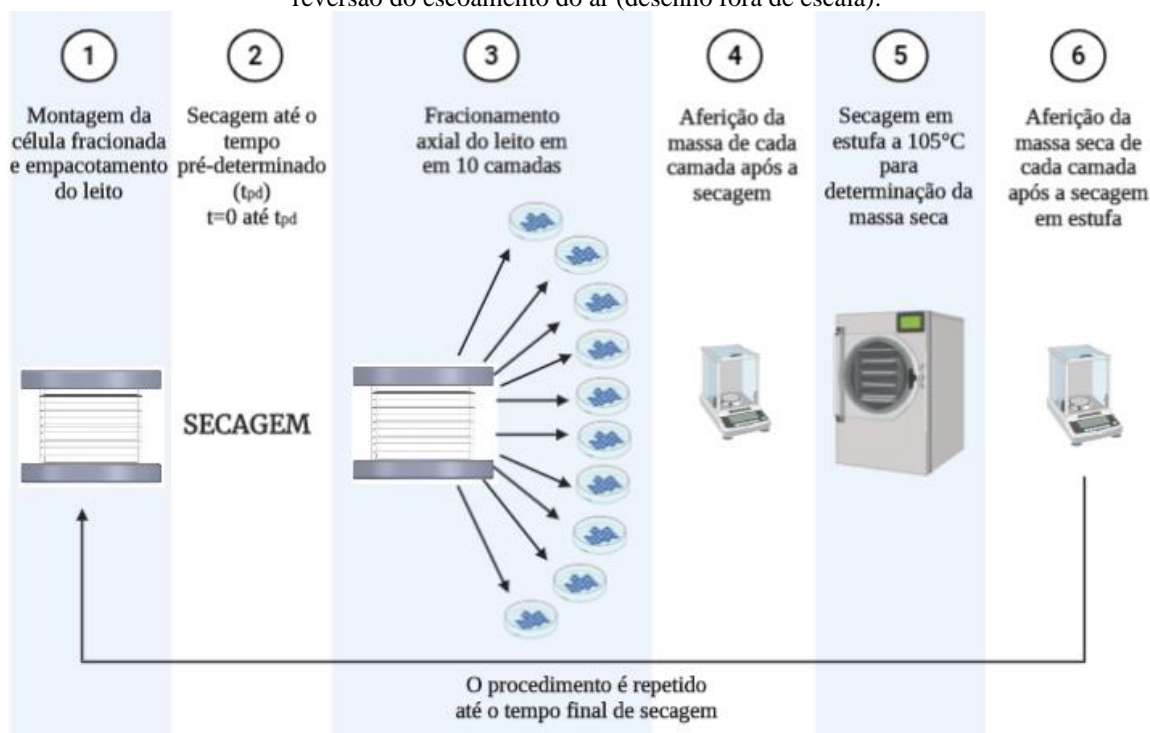
**Figura 17** – Ilustração da célula de secagem fracionada (desenho fora de escala).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 18 é apresentado um esquema do procedimento na secagem utilizando esta metodologia de fracionamento do leito.

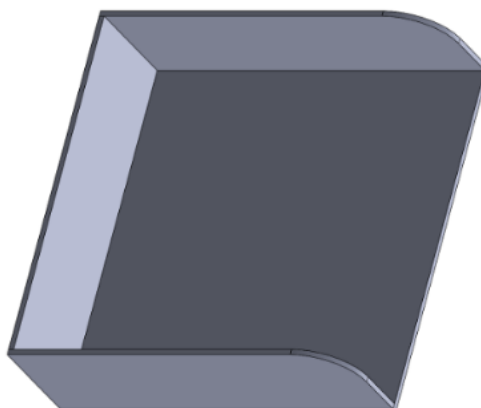
**Figura 18** – Procedimento para obtenção da umidade média de cada fração do leito na secagem com e sem reversão do escoamento do ar (desenho fora de escala).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O empacotamento da alumina saturada no leito fracionado foi realizado com a adição de camadas de até 1 cm de alumina, seguidos da movimentação horizontal do leito (Figura 15). O procedimento foi realizado até a altura de leito estático apresentada na Tabela 1. Após cada tempo de secagem pré-determinado em 5, 10 e 30 min, para o particionamento do leito e a separação das 10 frações do meio poroso, foi utilizada uma pá fabricada com uma chapa de aço galvanizado (1 mm), como a ilustrada pela Figura 19. A pá foi inserida entre cada fração de acrílico para a separação das camadas

**Figura 19** - Ilustração da pá utilizada para a fragmentação do leito (desenho fora de escala).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foram realizados experimentos de secagem em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento, em que a umidade média de todo o leito foi determinada em cada tempo de secagem. As condições experimentais utilizadas foram as apresentadas na Tabela 1. Estes experimentos foram realizados com a célula de secagem não fracionada, e a massa do leito foi aferida em intervalos de 30 minutos durante o processo de secagem. Os experimentos foram conduzidos até a umidade de equilíbrio dinâmico, para cada condição de secagem utilizada.

### 3.7 Experimentos de secagem em camada fina

A secagem em camada fina foi realizada nas temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C e velocidade do ar de 2,7 m·s<sup>-1</sup>, para o processo com escoamento de ar ascendente. Os experimentos foram realizados em triplicata, utilizando a célula de secagem não fracionada (Figura 14) e uma camada com espessura de 1 cm de esferas de alumina com diâmetro médio de 3,2 ± 0,2 mm, inicialmente saturadas com água. A escolha da espessura da camada fina de 1 cm foi baseada no estudo realizado por Perazzini (2014), que avaliou a condição de camada fina para a secagem de alumina. A secagem foi conduzida até a umidade média do leito atingir a umidade de equilíbrio dinâmico. Durante o processo, a redução da massa do meio poroso foi monitorada em diferentes tempos e a umidade média determinada a partir da metodologia apresentada em no item 3.3.

### 3.8 Análise energética

A análise energética foi realizada para a secagem em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar, para os experimentos de umidade média do leito. Foram avaliadas as eficiências energéticas (EE) em função do tempo de secagem, o consumo específico de energia (CEE) e a eficiência de secagem (ES), parâmetros usualmente empregados na literatura (SABBAH *et al.*, 1979; DAVILA *et al.*, 1983; KUDRA, 2012; BRITO *et al.*, 2018; ALBINI, 2019). Para a determinação do CEE e ES, foram utilizados os tempos de processos necessários para que a umidade média do leito atingisse a umidade de equilíbrio dinâmico em cada condição operacional da secagem.

A eficiência energética foi determinada a partir da razão entre a energia utilizada para evaporar a umidade do material ( $Q_w$ ) e a energia total empregada no processo, conforme apresentado pela Equação 60.



$$EE = \frac{Q_w}{(Q_{t\acute{e}rmica} + E_{mec\acute{a}nica})t} \quad (60)$$

A energia utilizada para evaporar a umidade presente no material foi determinada a partir do calor latente de vaporização ( $\Delta H_v$ ) determinado pela Equação 62 (VIEIRA *et al.*, 2007) e a massa de água removida até o tempo de secagem avaliado. Na Equação 61,  $m_{seca}$  é a massa seca do leite,  $\bar{X}_0$  a umidade média inicial e  $\bar{X}(t)$  a umidade no tempo avaliado.

$$Q_w = \Delta H_v m_{seca} (\bar{X}_0 - \bar{X}(t)) \quad (61)$$

$$\Delta H_v = [7329155,98 - 15,9959641 (T + 273,15)^2]^2 \quad (62)$$

Para a secagem em leito fixo, a energia total fornecida ao sistema foi considerada como a soma entre a energia térmica ( $Q_{t\acute{e}rmica}$ ) necessária para o aquecimento do ar de secagem da temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) até a temperatura de operação ( $T$ ) e a energia mecânica empregada devido à perda de carga resultante do escoamento do ar no meio poroso.

$$Q_{t\acute{e}rmica} = \dot{m} Cp_f (T - T_{amb}) \quad (63)$$

Na Equação 63,  $\dot{m}$  é a vazão mássica de ar empregada na secagem e  $Cp_f$  o calor específico do ar. Este último foi determinado a partir da mistura entre ar seco e vapor de água, Equação 64, de acordo com a umidade absoluta do ar ( $Y$ ) alimentado no sistema. O calor específico do ar seco e do vapor de água foram obtidos a partir das Equações 65 e 66 (BORGNAKKE e SONNTAG, 2013), onde  $T$  é temperatura de operação na escala Kelvin.

$$Cp_f = Cp_{ar\ seco} + Y Cp_v \quad (64)$$

$$Cp_{ar\ seco} = 1,05 - 0,365 \left(\frac{T}{1000}\right) + 0,85 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 0,39 \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (65)$$

$$Cp_v = 1,79 + 0,107 \left(\frac{T}{1000}\right) + 0,586 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 0,20 \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (66)$$

A energia mecânica empregada para a manutenção da operação de secagem foi determinada a partir do balanço de energia, considerando como termo mais expressivo a perda

de carga resultante do escoamento do ar no meio poroso, conforme apresentado pela Equação 67, em que  $\Delta P$  é a queda de pressão experimental relacionada a vazão de ar empregada na secagem e  $\rho_f$  a massa específica do ar.

$$E_{mecânica} = \dot{m} \left( \frac{\Delta P}{\rho_f} \right) \quad (67)$$

O consumo específico de energia (CEE) foi avaliado como sendo a razão entre a energia total alimentada no sistema e a quantidade de umidade removida do material até o tempo (t) de secagem avaliado (Equação 68).

$$CEE = \frac{(Q_{térmica} + E_{mecânica})t}{m_{seca} (\bar{X}_0 - \bar{X}(t))} \quad (68)$$

Para a eficiência de secagem, determinada a partir da Equação 69, além da energia necessária para a evaporação da umidade também foi avaliada a energia necessária para o aquecimento do material úmido a partir da sua temperatura inicial ( $T_0$ ) até a temperatura de operação. A energia de aquecimento ( $Q_{aquecimento}$ ) foi determinada a partir da Equação 70, onde  $\bar{c}_{p_m}$  é o calor específico do leito úmido,  $m_{úmida}$  a massa úmida do leito no início da secagem e  $m_{H_2O}$  a massa de água presente no leito no tempo t.

$$ES = \frac{Q_w + Q_{aquecimento}}{(Q_{térmica} + E_{mecânica})t} \quad (69)$$

$$Q_{aquecimento} = m_{úmida} \bar{c}_{p_m} (T - T_0) \quad (70)$$

$$\bar{c}_{p_m} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{seca}} c_{p_{H_2O,l}} + \frac{m_{seca}}{m_{H_2O} + m_{seca}} c_{p_{alumina}} \quad (71)$$

### 3.9 Modelos matemáticos para a secagem

Nos próximos itens são apresentados os modelos matemáticos para a secagem em camada fina e espessa utilizados para a representação dos fenômenos de transferência de calor e massa em leito fixo.

### 3.9.1 Modelos matemáticos de cinética de secagem em camada fina

A cinética de secagem em camada fina pode ser descrita matematicamente utilizando modelos matemáticos, conforme a revisão bibliográfica apresentada no item 2.4. Neste item, são apresentados os modelos avaliados para a representação da secagem da alumina em camada fina.

#### 3.9.1.1 Modelos empíricos e semi-empíricos de cinética de secagem em camada fina

Aos dados de cinética de secagem em cada fina obtidos através do procedimento experimental descrito no item 3.7, foram ajustados os modelos empíricos e semi-empíricos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson e Pabis (1961) e Overhults, apresentados na Seção 2.4.1. Estes modelos foram selecionados por apresentarem baixa complexidade para utilização e a boa representação da cinética de secagem em camada fina, com apenas 1 ou 2 parâmetros de ajuste.

#### 3.9.1.2 Modelo difusivo com condição de contorno convectiva

Considerando que a condição de camada fina foi satisfeita, o comportamento cinético da secagem em camada fina foi aproximado ao da secagem de uma única partícula esférica de alumina. Este modelo também foi utilizado por Genaro *et al.* (2017) na secagem de grãos de soja em leito de jorro. Para a representação matemática da variação da umidade da partícula com o tempo, foram feitas as seguintes considerações:

- Formato esférico da alumina.
- Desprezou-se o encolhimento da partícula.
- A difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) constante, ou seja, independente da umidade da partícula e da temperatura de secagem.
- Transporte unidimensional de massa.

Para a formulação do problema foi utilizada a equação diferencial parcial apresentada pela Equação 11. Utilizando a umidade média inicial da alumina ( $X_0$ ) como condição inicial, Equação 72. Como condição de contorno 1, Equação 73, um balanço para a umidade é realizado, onde se iguala o fluxo de umidade que chega à superfície da alumina por difusão (em  $r = R$ ), ao transferido da superfície para o fluido por convecção mássica. Essa condição de contorno considera que existe transferência da massa por convecção na superfície. Como

condição de contorno 2, Equação 74, utiliza-se a condição de simetria, admitindo-se que no centro da alumina não existe gradiente de umidade.

**Condição inicial ( $t = 0$ ):**

$$X(0, r) = X_0 \quad (72)$$

**Condição de contorno 1 ( $r = R$ ):**

$$-D_{ef} \left. \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = K_{tm} (X(r, t)|_{r=R} - X_{eq}) \quad (73)$$

**Condição de contorno 2 ( $r = 0$ ):**

$$\left. \frac{\partial X(t, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (74)$$

Adimensionalizando a Equação 11, substituindo variáveis e resolvendo pelo método de separação de variáveis, obtêm-se a solução para a equação diferencial parcial, que é apresentada na Equação 75.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{2 \cdot Bi_m}{(1 - Bi_m)} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{\cos(\alpha_n)}{\alpha_n - \text{sen}(\alpha_n) \cos(\alpha_n)} \right] \exp \left[ \frac{-\alpha_n^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{R^2} \right] \left[ \frac{\text{sen}(\alpha_n \varepsilon)}{\varepsilon} \right] \right\} \quad (75)$$

onde:

$$Bi_m = \frac{K_{tm} R}{D_{ef}} \quad (76)$$

$$\frac{\alpha_n}{1 - Bi_m} = \tan(\alpha_n) \quad (77)$$

Nestas equações,  $Bi_m$  é o número de Biot mássico,  $R$  representa o raio da esfera de alumina,  $D_{ef}$  a difusividade efetiva,  $t$  o tempo de secagem,  $X_{eq}$  a umidade de equilíbrio,  $K_{tm}$  o coeficiente de transferência de massa externo.

Como solução do modelo em série, a umidade ( $X$ ) é descrita em um dado instante de tempo ( $t$ ) para uma certa posição radial da partícula ( $\varepsilon = r/R$ ). Para obter a umidade média  $\bar{X}$ , a

Equação 75 explícita em  $X(r,t)$  é substituída na integral da Equação 78, obtendo-se a solução para o modelo matemático que é apresentada pela Equação 79.

$$\bar{X}(t) = \left( \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^{\infty} X \cdot \Delta V \right) \frac{1}{V} = \frac{1}{V} \int_0^V X \, dV = \frac{3}{R^3} \int_0^R X(t) r^2 \, dr \quad (78)$$

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6 \cdot Bi^2}{(1 - Bi)} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos(\alpha_n) \sin(\alpha_n \varepsilon)}{\alpha_n^2 [\alpha_n - \sin(\alpha_n) \cos(\alpha_n)]} \exp\left(\frac{-\alpha_n^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{R^2}\right) \right\} \quad (79)$$

Para o ajuste do modelo difusivo que considera a resistência externa à transferência de massa (Equação 79) aos dados experimentais, foram utilizados os 100 primeiros termos da série ( $n = 100$ ). Para a determinação dos parâmetros  $D_{ef}$  e  $Bi_m$ , sendo que este último depende de valores desconhecidos da  $D_{ef}$ , foi desenvolvida uma rotina em MatLab® R2016a, utilizando uma função de otimização para a minimização da função objetivo apresentada a seguir:

$$f_{obj} = \sum (X_{experimental}^* - X_{calculado}^*)^2 \quad (80)$$

Para cada valor de chute inicial de  $D_{ef}$  e  $Bi_m$ , a função de otimização procurava dentro do intervalo de busca estipulado os valores que minimizassem  $f_{obj}$ . Os valores de  $Bi_m$  testados, foram utilizados para a determinação do conjunto de soluções  $\lambda_n$  que satisfazem a Equação 77. Com estes valores, foram estimadas as razões de umidade adimensionais em função do tempo.

### 3.9.2 Modelo de duas fases para a secagem em leito fixo e camada espessa

Para a representação da secagem da alumina em leito fixo e camada espessa, com e sem a reversão do sentido do escoamento do ar, foi utilizado o modelo de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992). Para a formulação do problema foi utilizado o sistema de coordenadas cilíndricas, em que os gradientes radiais de temperatura e umidade das fases foram desprezados. As principais considerações do modelo são:

- O encolhimento das partículas alumina é desprezível;
- A transferência de calor entre as fases é descrita pelo mecanismo convectivo.
- Escoamento unidirecional do fluido (ar de secagem).
- Transporte de massa e energia unidirecional (eixo coordenado  $z$ ).

- Transferência de calor da parede do secador para o ambiente externo é desprezível.
- Fase fluida comporta-se como um gás ideal;
- Ausência do transporte de momento entre as fases fluida e sólida.

O modelo descreve matematicamente os fenômenos de transferência de calor e massa entre a fase fluida (ar de secagem) e a fase sólida (alumina), sendo originalmente composto por quatro equações diferenciais parciais não lineares e as equações algébricas que representam as condições de contorno e iniciais e as relações de equilíbrio entre as fases. A seguir são apresentadas as equações que compõem o modelo.

- **Balço de massa para a fase sólida**

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = \frac{-f}{(1 - \varepsilon) \rho_s} \quad (81)$$

- **Balço de massa para a fase fluida**

$$\frac{\partial Y(z, t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon \rho_f} \left( f - G_f \frac{\partial Y(z, t)}{\partial z} \right) \quad (82)$$

- **Balço de energia para a fase sólida**

$$\frac{\partial T_s(z, t)}{\partial t} = \frac{ha [T_f(z, t) - T_s(z, t)] - \lambda f}{(1 - \varepsilon) \rho_s Cp_s} \quad (83)$$

- **Balço de energia para a fase fluida**

$$\varepsilon \rho_f Cp_f \frac{\partial T_f(z, t)}{\partial t} + \rho_f Cp_f \frac{\partial T_f(z, t)}{\partial z} = -ha [T_f(z, t) - T_s(z, t)] - f Cp_f [T_f(z, t) - T_s(z, t)] \quad (84)$$

Tendo em vista a dificuldade experimental de se obter a temperatura da fase fluida e sólida separadamente ao longo da posição axial do leito, a consideração de temperatura de mistura foi adotada, onde:  $T_f(z, t) = T_s(z, t) = T_{\text{mis}}(z, t)$ . Esta consideração também foi utilizada por Albin (2019) na simulação da secagem de grãos de cevada em leito fixo utilizando o Modelo de Massarani e Silva Telles (1992). Desta forma, as Equações 83 e 84 foram substituídas por uma única equação que representa o balanço de energia para a mistura entre as fases fluida e sólida, apresentada pela Equação 85.

- **Balanco de energia para a mistura das fases fluida e sólida**

$$\frac{\partial T_{mis}(z, t)}{\partial t} = \frac{-\lambda f - G_f [Cp_f + Y(z, t) Cp_v] \frac{\partial T_{mis}(z, t)}{\partial z}}{(1 - \varepsilon) \rho_s [Cp_s + X(z, t) Cp_l] + \varepsilon \rho_f [Cp_f + Y(z, t) Cp_v]} \quad (85)$$

- **Condições de contorno e iniciais**

Nas Equações 86, 87, 88 e 89 são apresentadas as condições iniciais e de contorno do modelo matemático, onde:  $X_0$  é a umidade inicial da fase sólida em base seca,  $Y_0$  a umidade absoluta mássica de alimentação do ar de secagem no leito,  $T_{m0}$  a temperatura inicial do leito (mistura das fases fluida e sólida),  $T_0$  a temperatura de alimentação ar de secagem (fase fluida).

$$X(z, 0) = X_0 \quad (86)$$

$$Y(0, t) = Y_0 \quad (87)$$

$$T_{mis}(z, 0) = T_{m0} \quad (88)$$

$$T_{mis}(0, t > 0) = T_0 \quad (89)$$

- **Taxa de secagem**

Foi utilizado o modelo de Lewis (1921) para a descrição da taxa de secagem em camada fina. Este modelo foi escolhido pela sua simplicidade quando comparado ao modelo difusivo-convectivo e pela boa representação da cinética de secagem, que será apresentada na seção 4.4.2.

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = -k (X - X_{eq}) \quad (90)$$

A dependência da constante de secagem  $k$  com a temperatura, foi descrita pela correlação de Arrhenius apresentada na Equação 91. Sendo os parâmetros  $k_0$  e  $E_a/R$  foram determinados a partir da linearização da equação. Os valores de  $k_0$  e  $E_a/R$  utilizados foram de  $1,124 \text{ s}^{-1}$  e  $2129,529 \text{ K}$ , respectivamente.

$$k = k_0 \exp \left( -\frac{Ea}{R} \frac{1}{(T_{mis}(z, t) + 273,15)} \right) \quad (91)$$

- **Umidade de equilíbrio**

Para a temperatura de 40 °C, foi utilizada a isoterma de GAB para a estimativa da umidade de equilíbrio da alumina ( $X_{eq}$ ) utilizando a Equação 92. Os parâmetros da isoterma foram ajustados utilizando os dados de equilíbrio de dessecamento apresentados por Perazzini (2014).

$$X_{eq} = \frac{0,240588 UR}{(1 - 0,149827 UR)(1 - 0,149827 UR + 0,209454 UR)} \quad (92)$$

Para a temperatura de 60 °C, foi utilizada a isoterma de equilíbrio fornecida por Calçada *et al.* (2006) e apresentada pela Equação 93. A umidade de equilíbrio utilizada nas simulações para a temperatura de secagem de 50 °C foi estimada como sendo a média entre as respostas das isotermas de 40 e 60 °C. Nestas equações UR é a umidade relativa do ar de secagem.

$$X_{eq} = \frac{3,58 \cdot 10^{-2} UR}{[(1 - 8,53 \cdot 10^{-2})UR]^2} \quad (93)$$

- **Condições do ar de secagem**

A umidade absoluta mássica e relativa do ar alimentado no secador foi determinada através da temperatura de bulbo úmido e seco do ar ambiente, cujo equacionamento é apresentado no ANEXO A.

Para as simulações utilizando o modelo de duas fases, UR foi determinada utilizando a seguinte relação psicrométrica:

$$UR = \frac{P_{ab}}{P_{sat}} \quad (94)$$

Na Equação 94,  $P_{ab}$  é a pressão do vapor de água na temperatura do ar, determinada pela Equação 95 e  $P_{sat}$  é a pressão do vapor saturado determinado pela equação de Antoine (Equação 96) (STRUMILLO e KUDRA, 1986).



$$P_{ab} = \exp \left( \frac{1,6055 Y}{1 + 1,6055 Y} \right) \quad (95)$$

$$P_{sat} = \exp \left( 18,3036 - \frac{3816,44}{T + 273,15 - 46,13} \right) \quad (96)$$

- **Método numérico de resolução do modelo de duas fases**

Para a solução do sistema de equações, foi utilizado o Método das Linhas, em que as equações diferenciais parciais foram transformadas em um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO's) contínuas no tempo (PAMUK e ERDEM, 2007). Desta forma, o sistema resultante semi-discreto, contínuo no tempo e discreto no espaço, em que as EDO's são integradas no tempo (WOUWER *et al.*, 2001). Para isso, o espaço foi discretizado (eixo axial - coordenada  $z$ ) e as diferenciais de espaço aproximadas utilizando as fórmulas de diferenças finitas atrasadas conforme apresentado pelas Equações 98 e 99. As diferenciais de tempo são apresentadas pelas Equações 100, 101, 102 e 103.

$$\Delta z = \frac{L}{n_p - 1} \quad (97)$$

$$\frac{\partial Y(z, t)}{\partial z} = \frac{Y_i(t) - T_{i-1}(t)}{\Delta z} \quad (98)$$

$$\frac{\partial T_{mis}(z, t)}{\partial z} = \frac{T_{mis,i}(t) - T_{mis,i-1}(t)}{\Delta z} \quad (99)$$

$$\frac{\partial T_s(z, t)}{\partial t} = \frac{dT_{s,i}(t)}{dt} \quad (100)$$

$$\frac{\partial T_{mis}(z, t)}{\partial t} = \frac{dT_{mis,i}(t)}{dt} \quad (101)$$

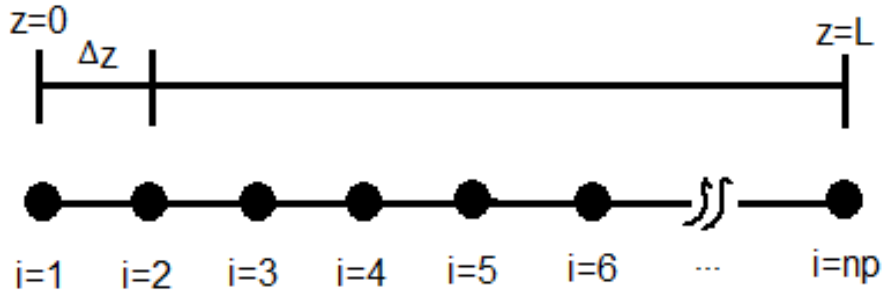
$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = \frac{dX_i(t)}{dt} \quad (102)$$

$$\frac{\partial Y(z, t)}{\partial t} = \frac{dY_i(t)}{dt} \quad (103)$$

Nestas equações, conforme ilustra a Figura 20,  $i$  representa o ponto do domínio do espaço e  $n_p$  o número de pontos de discretização e  $L$  o comprimento axial do leito. Para as

simulações da secagem da alumina em camada espessa, foram utilizados 22 pontos  $i$  do espaço discretizado com  $\Delta z$  de 0,5 cm, para uma altura de leito de secagem de 10,5 cm.

**Figura 20** - Representação da discretização do espaço utilizando o método das linhas (L-comprimento axial do leito de secagem).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Substituindo estas equações no modelo, obtém-se a formulação matemática em termos de um sistema de equações algébricas e EDO's correspondentes a cada ponto do domínio do espaço. O modelo discretizado é apresentado no Quadro 6. Estas equações foram utilizadas para representação da secagem em leito fixo e camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento. Para o processo com reversão, os contornos foram alterados e aplicados para a posição  $z = L$  ( $i = np$ ) nos intervalos de tempo correspondentes ao escoamento descendente de ar.

Condições de contorno para o escoamento ascendente do ar:

$$T_{mis}|_{i=1} = T_0 \text{ para } (0 < t \leq t_0) \cup (t_0 + i \cdot \Delta t) < t \leq [t_0 + (i + 1) \cdot \Delta t] \quad \forall i = 1, 3, 5, \dots \quad (104)$$

$$Y|_{i=1} = Y_0 \text{ para } (0 < t \leq t_0) \cup (t_0 + i \cdot \Delta t) < t \leq [t_0 + (i + 1) \cdot \Delta t] \quad \forall i = 1, 3, 5, \dots \quad (105)$$

Condições de contorno para o descendente do ar:

$$T_{mis}|_{i=np} = T_0 \text{ para } \{t_0 < t \leq (t_0 + \Delta t)\} \cup (t_0 + i \cdot \Delta t) < t \leq [t_0 + (i + 1) \cdot \Delta t] \quad \forall i = 2, 4, 6, \dots \quad (106)$$

$$Y|_{i=np} = Y_0 \text{ para } \{t_0 < t \leq (t_0 + \Delta t)\} \cup (t_0 + i \cdot \Delta t) < t \leq [t_0 + (i + 1) \cdot \Delta t] \quad \forall i = 2, 4, 6, \dots \quad (107)$$

**Quadro 6** – Modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) discretizado para a utilização do método das linhas.

Balanco de massa para a fase sólida (equação válida:  $t > 0$ ;  $\forall i$ )

$$f = -(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{dX_i(t)}{dt} \quad (108)$$

Balanco de massa para a fase fluida (equação válida:  $t > 0$ ;  $i = 2, \dots, n_p$ )

$$\frac{dY_i(t)}{dt} = \frac{1}{\varepsilon \rho_f} \left( f - G_f \frac{Y_i(t) - Y_{i-1}(t)}{\Delta z} \right) \quad (109)$$

Balanco de massa para a fase sólida (equação válida:  $t > 0$ ;  $i = 1$ )

$$\frac{dY_1(t)}{dt} = \frac{1}{\varepsilon \rho_f} \left( f - G_f \frac{Y_1(t) - Y_0}{\Delta z} \right) \quad (110)$$

Balanco de energia para a mistura (equação válida:  $t > 0$ ;  $i = 2, \dots, n_p$ )

$$\frac{dT_{mis,i}(t)}{dt} = \frac{-\lambda f - G_f [Cp_f + Y_i(t) Cp_v] \left[ \frac{T_{mis,i}(t) - T_{mis,i-1}(t)}{\Delta z} \right]}{(1 - \varepsilon) \rho_s [Cp_s + X_i(t) Cp_l] + \varepsilon \rho_f [Cp_f + Y_i(t) Cp_v]} \quad (111)$$

Balanco de energia para a mistura (equação válida:  $t > 0$ ;  $i = 1$ )

$$\frac{dT_{mis,1}(t)}{dt} = \frac{-\lambda f - G_f [Cp_f + Y_1(t) Cp_v] \left[ \frac{T_{mis,1}(t) - T_0}{\Delta z} \right]}{(1 - \varepsilon) \rho_s [Cp_s + X_1(t) Cp_l] + \varepsilon \rho_f [Cp_f + Y_1(t) Cp_v]} \quad (112)$$

Taxa de secagem (equação válida:  $t > 0$  e  $\forall i$ ):

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = -k (X_i(t) - X_{eq}) \quad (113)$$

$$k = k_0 \exp \left( -\frac{Ea}{R} \frac{1}{(T_{mis,i}(t) + 273,15)} \right) \quad (114)$$

Condição inicial para a temperatura da mistura (equação válida:  $t = 0$  e  $\forall i$ )

$$T_{mis,i}(0) = T_{m0} \quad (115)$$

Condição inicial para a umidade da fase sólida (equação válida:  $t = 0$  e  $\forall i$ )

$$X_i(0) = X_0 \quad (116)$$

Condição inicial para a umidade da fase fluida (equação válida:  $t = 0$  e  $\forall i$ )

$$Y_i(0) = Y_0 \quad (117)$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a resolução do sistema de equações diferenciais ordinárias, foi utilizado o *software* MatLab® R2016a com o solver ode23s. Este método de resolução também foi empregado por Albini (2019) na simulação da secagem de grãos de cevada para o escoamento ascendente de ar.

Para a obtenção da umidade média do leito de secagem, foi realizada a integral numérica das umidades obtidas para cada ponto  $i$  do espaço discretizado, conforme apresentado pela Equação 118. Nesta equação  $A_t$  é a área de seção transversal ao escoamento do ar na célula de secagem.

$$\overline{X(t)} = \frac{\int_0^L X_i(t) A_t dz}{\int_0^L A_t dz} = \frac{\sum_{i=1}^{np} X_i(t) \Delta z}{L} \quad (118)$$

As propriedades termodinâmicas da alumina, do ar seco e do vapor d'água utilizadas na formulação do modelo matemático e na metodologia da análise energética apresentada no item 3.8, são apresentadas no Quadro 7.

**Quadro 7** – Propriedades termodinâmicas.

Propriedade	Valor	Referência
$C_{ps}$ - calor específico da alumina	0,837 kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	Narimatsu <i>et al.</i> (2007)
$C_{pf}$ – calor específico do ar seco	1,004 kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	Borgnakke e Sonntag (2018)
$C_{pv}$ – calor específico do vapor de água	1,872 kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	Borgnakke e Sonntag (2018)
$C_{pl}$ – calor específico da água líquida	4,18 kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	Borgnakke e Sonntag (2018)
$\lambda$ – calor latente de vaporização da água	2.397,4 kJ·kg <sup>-1</sup>	Borgnakke e Sonntag (2018)

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.9.3 Estudo de caso – Simulação da secagem em camada espessa de grãos de cevada em leito fixo utilizando o modelo de duas fases aplicado à reversão do ar de secagem

Este estudo de caso foi realizado utilizando o modelo de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) e que foi adaptado por Albini (2019), para a secagem de grãos

de cevada em leito fixo em camada espessa. Neste trabalho, o modelo de Albini (2019) foi aplicado a secagem com reversão do sentido do escoamento do escoamento do ar para as temperaturas de secagem de 40 e 50 °C e velocidade do ar de 4 m·s<sup>-1</sup>.

Foram utilizadas as propriedades dos grãos cevada, meio poroso, cinética de secagem em camada fina e as isotermas de equilíbrio apresentadas por Albini (2019). Ressalta-se que para estas simulações, o encolhimento do meio poroso foi considerado no modelo matemático, assim como o utilizado por Albini (2019). Os dados experimentais de temperatura e umidade transientes do meio poroso para diferentes posições axiais, utilizados para a verificação das simulações foram os obtidos por Albini (2019).

Para as simulações, foram utilizados 11 pontos  $i$  do espaço discretizado com  $\Delta z$  de 1,0 cm, para uma altura de leito de secagem de 10 cm.

### 3.9.4 Análise estatística das predições dos modelos

Como critérios estatísticos de análise dos ajustes dos modelos, foram utilizados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (REQM), o qui-quadrado reduzido ( $\chi^2$ ), e erro relativo absoluto médio percentual (E%), cujas equações para determinação são apresentadas a seguir:

$$\chi^2 = \frac{1}{N - z} \sum_{i=1}^N (X_{i,modelo}^* - X_{i,experimental}^*)^2 \quad (119)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{i,modelo}^* - X_{i,experimental}^*)^2} \quad (120)$$

$$E\% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{i,modelo}^* - X_{i,experimental}^*}{X_{i,experimental}^*} \right| \quad (121)$$

$$R^2 = \sum_{i=1}^N \left[ 1 - \frac{(X_{i,modelo}^* - X_{i,experimental}^*)^2}{(X_{i,modelo}^* - \bar{X}_{experimental}^*)^2} \right] \quad (122)$$

Estes critérios de análise foram baseados nos utilizados nos trabalhos desenvolvidos por Darvishi *et al.* (2014), Albini (2015) e Defendi (2015) onde  $z$  é o número de constantes do modelo e  $N$  o número de pares  $X_i^*$  (dados).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção é destinada a apresentação dos resultados experimentais obtidos para a secagem de alumina com e sem reversão do sentido do escoamento do ar de secagem, abordando a transferência de calor e massa durante o processo. Também é apresentada a análise energética avaliada para a umidade média do meio poroso em diferentes condições de operação. O desempenho dos modelos de secagem em camada fina, foram avaliados quanto a sua capacidade de predição do processo. Por fim, o modelo de duas fases foi avaliado para a simulação da secagem de alumina em leito fixo e camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento de ar.

### 4.1 Caracterização do meio poroso

Na Tabela 2 são apresentadas a densidade *bulk* ( $\rho_{bulk}$ ), porosidade *bulk* ( $\epsilon_{bulk}$ ), permeabilidade do leito ( $k_{leito}$ ) e o fator *c*, para os dois diâmetros das esferas de alumina. Os valores de permeabilidade apresentados, mostram que o meio poroso composto por esferas de alumina com diâmetro médio de  $3,2 \pm 0,2$  mm, impõe uma maior resistência ao escoamento do ar quando comparado ao leito de partículas com  $D_p$  de  $7,1 \pm 0,7$  mm.

**Tabela 2** – Propriedades do meio poroso.

$D_p$ (mm)	$\rho_{bulk}$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )*	$\epsilon_{bulk}$ *	$c$ [-]**	$k_{leito}$ [ $m^2$ ]**
$3,2 \pm 0,2$	$1,127 \pm 0,017$	0,333	0,218	$3,369 \cdot 10^{-9}$
$7,1 \pm 0,7$	$1,062 \pm 0,021$	0,371	0,321	$1,527 \cdot 10^{-8}$

Fonte: Elaborado pelo autor; \* Alumina saturada de água; \*\* Alumina insaturada

### 4.2 Secagem da alumina em camada espessa

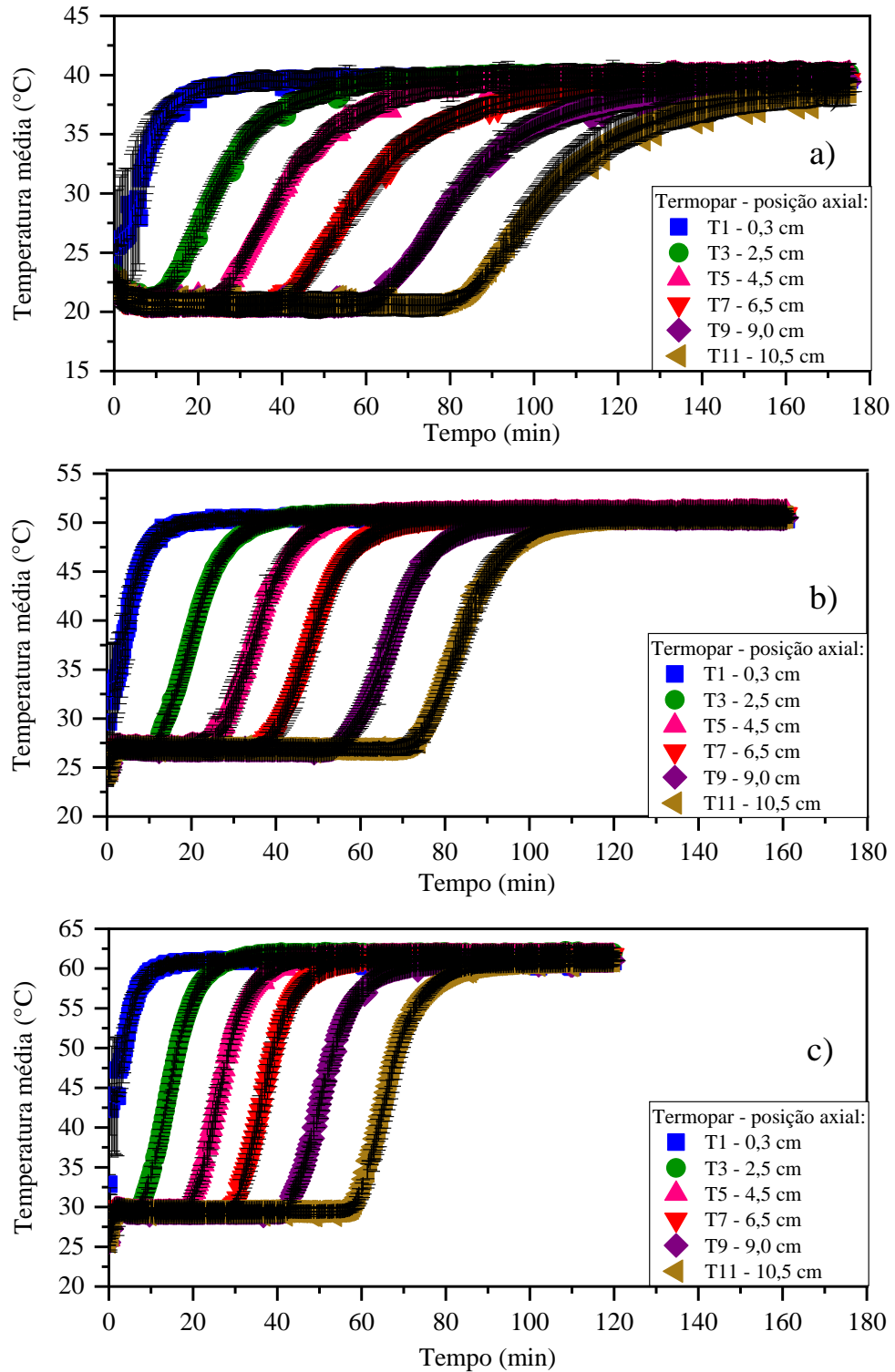
Neste item são apresentados os resultados experimentais da secagem das esferas de alumina com e sem reversão do sentido do escoamento do ar, abrangendo o comportamento térmico e da umidade do leito durante o processo.

#### 4.2.1 Transferência de calor na secagem da alumina em camada espessa com escoamento ascendente de ar

Na Figura 15 são apresentados os gráficos da média da temperatura das repetições dos experimentos, para diferentes posições axiais do meio poroso em função do tempo. O meio

composto por esferas de alumina com diâmetro de  $3,2 \pm 0,2$  mm, na secagem à temperatura de 40, 50 e 60 °C com escoamento de ar ascendente.

**Figura 21** - Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso ( $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm): a) 40 °C; b) 50 °C; c) 60 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

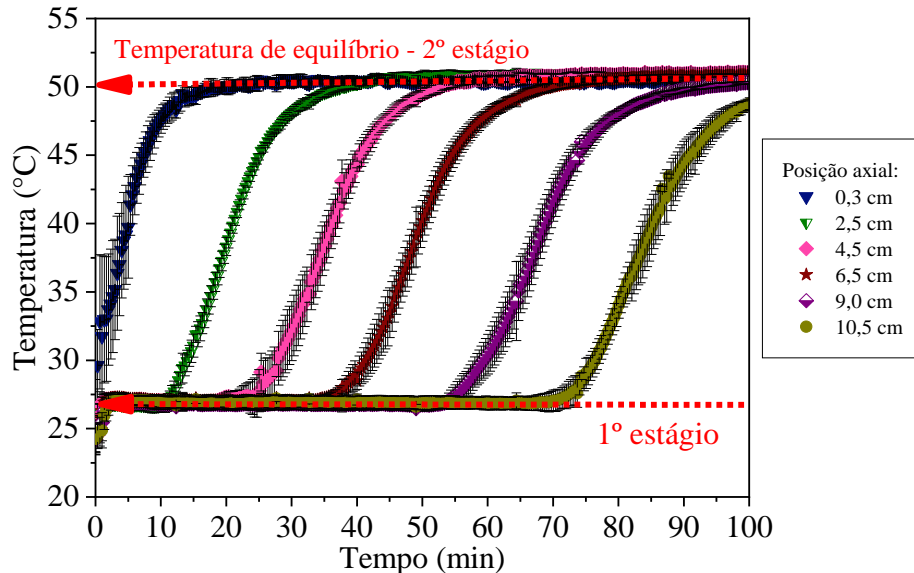


Avaliando os resultados da Figura 21, pode-se observar uma boa reprodutibilidade dos experimentos, pelos baixos valores de desvio padrão apresentados graficamente. Os gráficos ilustram o comportamento térmico característico da secagem convencional em leito fixo, com a formação de gradientes de temperatura ao longo da posição axial. Este comportamento também foi observado por Perazzini (2014) na secagem de alumina em leito fixo, por Albini *et al.* (2018) na secagem de grãos cevada, Souza *et al.* (2015) na secagem de grãos de soja e Altino (2019) na secagem de soja, lentilha, aveia, cevada e alumina, Prado e Sartori (2008) na secagem de sementes com revestimento, Liu *et al.* (2015) na secagem de milho. Observa-se que a região do leito próxima a seção de alimentação do ar da Figura 21 (posição axial de 0,3 cm) alcança a temperatura de equilíbrio térmico, também chamado de estado estacionário em relação à temperatura, após  $30,8 \pm 1,3$  min,  $19,9 \pm 4,1$  min e  $15,8 \pm 1,8$  min para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Para a região de descarga do ar (posição axial de 10,5 cm), este tempo foi de  $166,1 \pm 4,7$  min,  $121,2 \pm 7,8$  min e  $101,0 \pm 3,1$  min para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Este resultado mostra que o aquecimento e a secagem em leito fixo ocorreram em camadas. Além disso, verifica-se que para a temperatura de 40 °C as regiões de exaustão do ar alcançam uma temperatura de estado estacionário inferior as observadas para a região de alimentação, ou seja, este é um indicativo de que a energia fornecida nesta condição de operação pode não ter sido suficiente para suprir a demanda energética de aquecimento e transferência de massa para todo o leito.

Ao percolar a região de alimentação, o ar quente fornece a energia necessária para o aquecimento do material e a evaporação da umidade presente, como resultado, a energia disponível para as camadas posteriores é menor, resultando no gradiente de temperatura observado nos gráficos. Perazzini (2014) comenta que para a alumina inicialmente saturada de água, ocorrem dois fenômenos durante o processo de transferência de calor e massa na secagem: o difusivo e o convectivo. No início da secagem a interação entre a estrutura da alumina e a água não é tão forte, sendo a energia fornecida pelo fluido aquecido utilizada para a evaporação da água de fácil acesso, ou seja, a umidade presente na superfície do sólido ou nas regiões próximas à superfície e que não se encontra ligada fortemente à estrutura da alumina. Neste estágio à resistência a transferência de calor externa é predominante, e a temperatura do meio poroso é constante em todas as posições ao atingir o primeiro patamar de temperatura, nesta fase da secagem ocorre a saturação do ar (PERAZZINI, 2014). Ao longo da secagem a umidade do material é reduzida a baixos níveis, e o calor antes utilizado majoritariamente na evaporação, passa também a ser empregado para o aquecimento do material, sendo o mecanismo difusivo o responsável pelo aquecimento até a temperatura de equilíbrio, chamado por Perazzini (2014)

de segundo estágio de temperatura. Na Figura 22 são destacados os primeiros 100 min de secagem a 50 °C e os estágio de temperatura comentados anteriormente.

**Figura 22** - Valores de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso ( $T = 50\text{ °C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

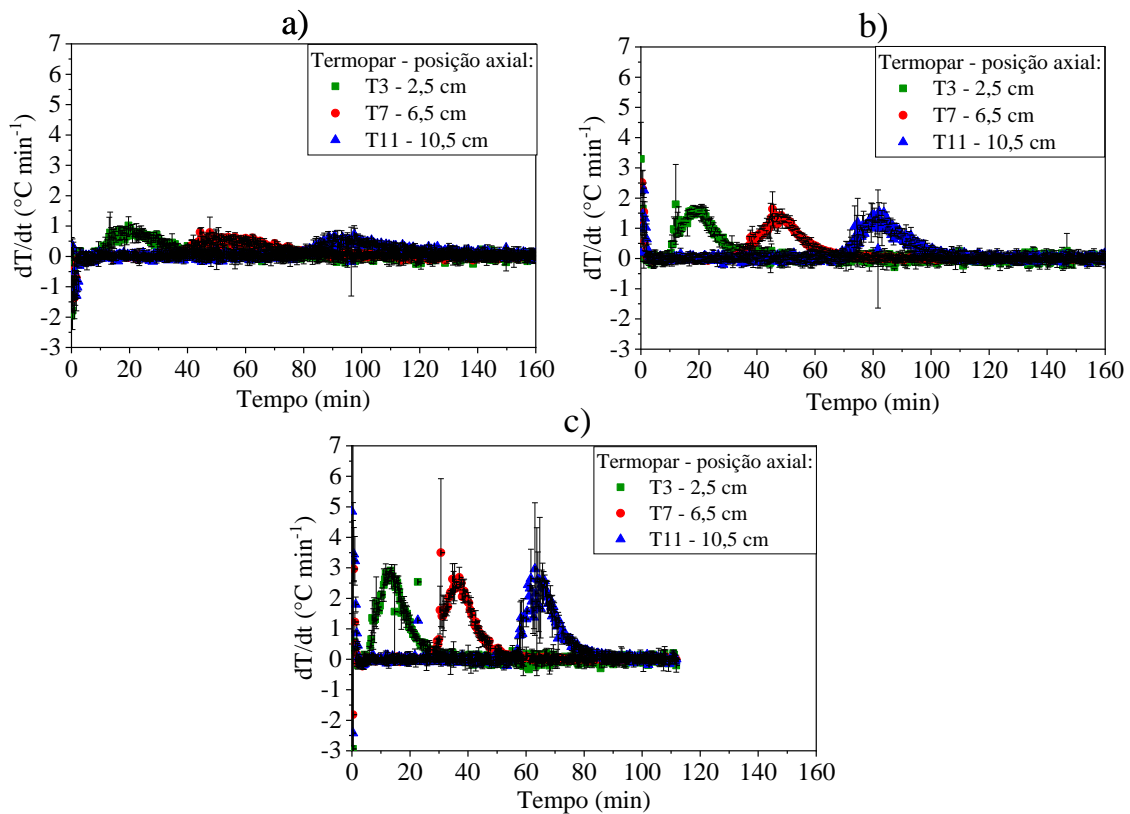
Observa-se que para a temperatura de 40 °C, Figura 21 - a), o comportamento do primeiro estágio de temperatura difere do observado para a secagem à 50 e 60 °C. Para esta condição de operação, o primeiro estágio de temperatura é estabelecido em uma temperatura inferior à temperatura inicial do leito de partículas, ou seja, para as posições de 2,5 cm, 4,5 cm, 6,5 cm, 9,5 cm e 10,5 cm, a temperatura inicial de aproximadamente 22,5 °C é reduzida à 20,5 °C antes de iniciar o período transiente de aquecimento. Avaliando o fenômeno de transferência de calor e massa que ocorrem simultaneamente, o calor fornecido pelo ar de secagem é utilizado para o aquecimento do sólido e da umidade para a transferência de massa. No caso da temperatura de 40 °C, a energia fornecida pelo fluido não é suficiente para o aquecimento inicial do meio poroso e a transferência de massa da umidade de fácil acesso. Desta forma, o calor necessário para a transferência de massa também é fornecido pelo material, o que pode resultar na redução da sua temperatura.

Este comportamento bem definido da temperatura para as diferentes posições axiais durante a secagem da alumina, se deve principalmente a interação entre a umidade e a partícula. Altino (2019) também obteve o comportamento térmico descrito por Perazzini (2014) na secagem em camada espessa de alumina e o comparou ao observado na secagem de grãos de

soja, lentilha, cevada e aveia. O autor relata que para alumina, a umidade não está ligada quimicamente a estrutura do material, tornando-a mais facilmente removível durante a secagem.

As taxas de aquecimento apresentadas na Figura 23 também evidenciam que o aquecimento do leito ocorre em camadas. Por exemplo, para a posição axial de 2,5 cm, a transição entre a temperatura do primeiro estágio de temperatura e o estado estacionário ocorre antes da transição entre estas temperaturas para a posição axial de 6,5 cm. Além disso, o efeito da temperatura de operação é evidenciado nas taxas de aquecimento. Observa-se que a temperatura de operação de 60 °C, Figura 23 – c), apresentou a maior taxa de aquecimento e o menor tempo de processo necessário para o equilíbrio térmico.

**Figura 23** - Taxa de aquecimento média em função do tempo para três posições axiais do meio poroso sem a reversão do sentido do escoamento do ar ( $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ): a) 40 °C, b) 50 °C; c) 60 °C.

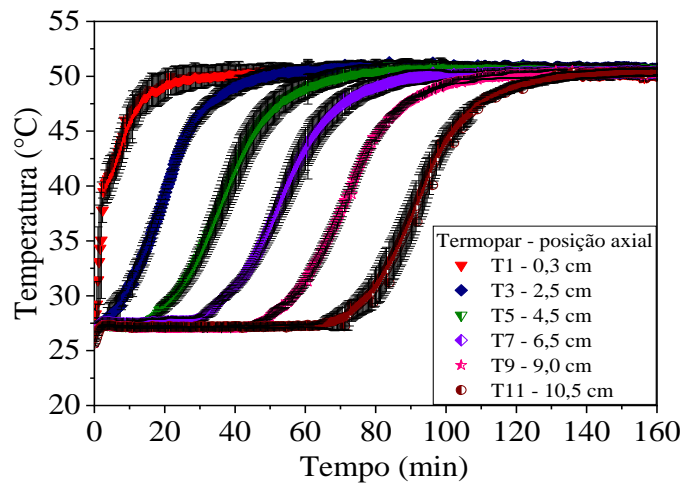


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar estatisticamente a influência da temperatura de secagem no tempo necessário para o equilíbrio térmico do leito foi realizado um teste t a um nível de 95% de confiança, que é apresentado no APÊNDICE B. Os resultados do teste mostraram a influência da temperatura na média do tempo de equilíbrio térmico ( $t_{eq}$ ), com a tendência do aumento do  $t_{eq}$  com a diminuição da temperatura.

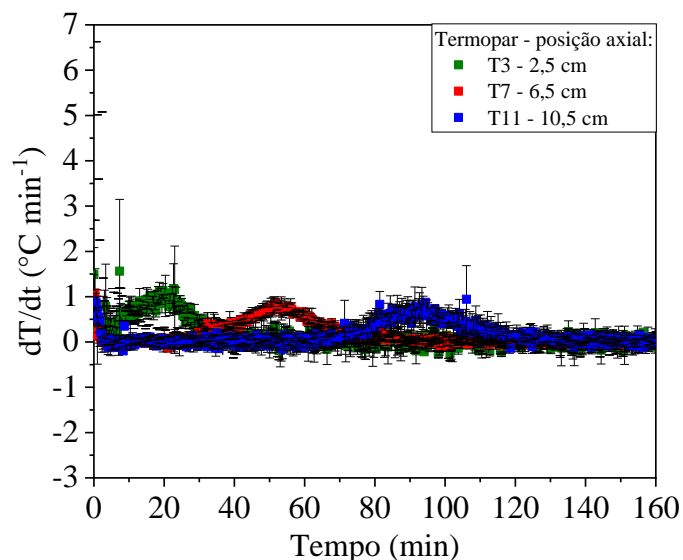
O meio poroso constituído de esferas de alumina com  $D_p$  de  $7,1 \pm 0,7$  mm apresentou inclinação menos acentuada nas curvas de temperatura apresentadas na Figura 24, quando comparado ao das partículas de  $3,2 \pm 0,2$  mm (Figura 21 – b). Esta observação também fica evidenciada na menor taxa de aquecimento apresentada na Figura 25. Isso deve-se ao fato de que quanto maior a partícula, mais energia é necessária para o aquecimento do material pelos mecanismos convectivos e condutivos de transferência de calor e para a retirada da umidade pelos mecanismos de transferência de massa.

**Figura 24** – Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso ( $T = 50$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup> e  $D_p = 7,1 \pm 0,7$  mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

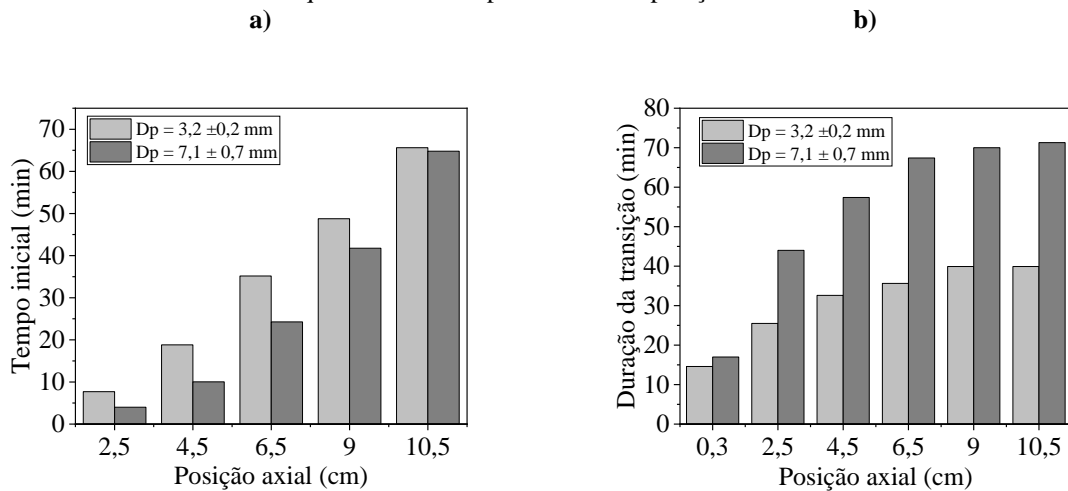
**Figura 25** - Taxa de aquecimento média em função do tempo para três posições axiais do meio poroso sem a reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 50$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup> e  $D_p = 7,1 \pm 0,7$  mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de início da transição entre o 1º patamar de temperatura e a temperatura de equilíbrio para as diferentes posições axiais do leito apresentou menor valor para o maior diâmetro de partícula, ou seja, o tempo de saturação do ar de secagem foi menor para a maior partícula, Figura 26 – a), vale destacar que nesta etapa inicial o aquecimento é dependente das resistências externas à transferência de calor (PERAZZINI, 2014). Já o tempo de duração entre as transições entre o 1º estágio e a temperatura de equilíbrio foi maior para o maior diâmetro, Figura 26 – b), e as taxas de aquecimento da Figura 25 quando comparadas às da Figura 23-b), são menores. Perazzini (2014) descreve este aquecimento transiente como influenciado pela resistência interna à transferência de calor, uma vez que o diâmetro da partícula é maior, o esperado é que ocorra o aumento da resistência interna à transferência de calor realizada pelo mecanismo condutivo. Os tempos apresentados pela Figura 26 foram determinados através das taxas de aquecimento médias dos experimentos a 50 °C apresentados na Figura 23 – b) e Figura 25 a partir do ajuste de uma reta, obtendo-se o tempo correspondente a taxa nula.

**Figura 26** – a) Tempo inicial da transição entre a temperatura do 1º estágio e a de equilíbrio térmico para diferentes posições do leito. b) Intervalo de duração da transição entre a temperatura do 1º estágio e a de equilíbrio térmico para diferentes posições do leito.



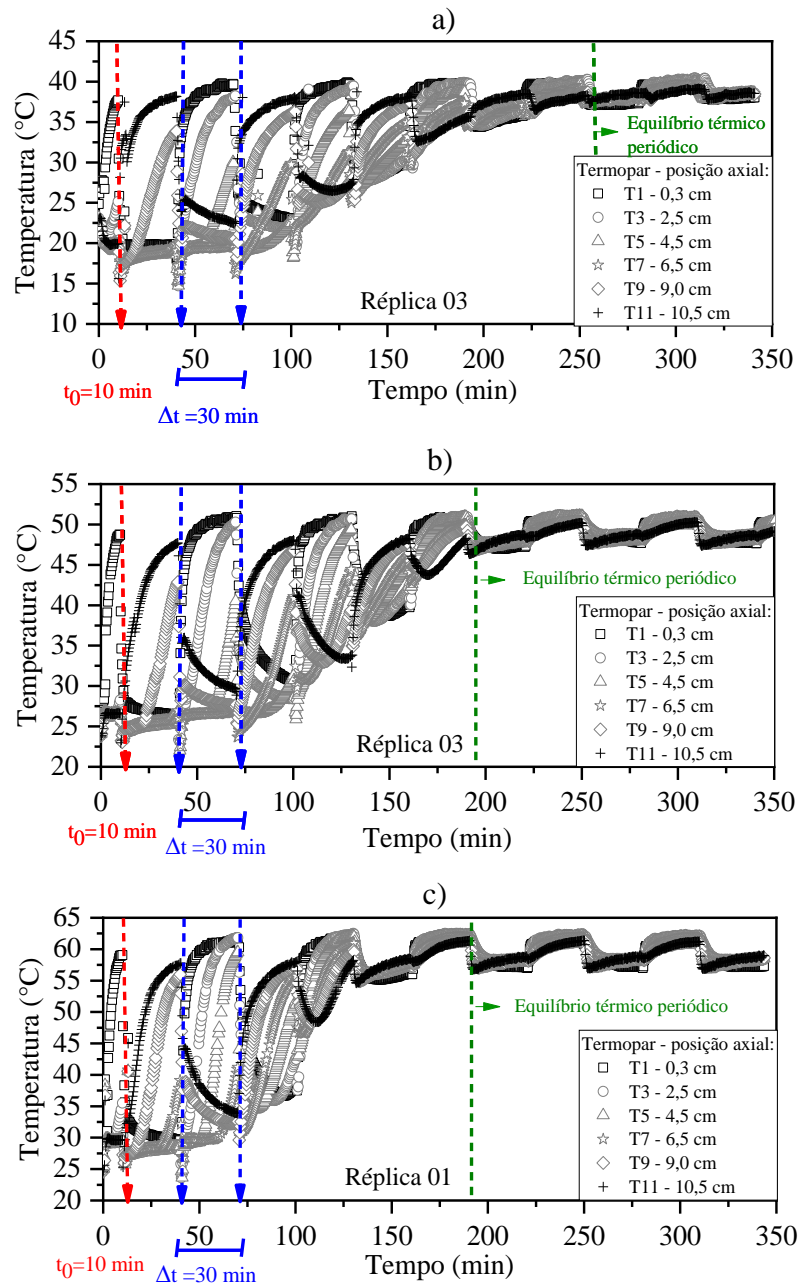
Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento térmico apresentado pelo leito sem a aplicação da reversão durante a secagem, forneceu informações importantes, tais como: o tempo necessário para que uma determinada região do leito atinja a temperatura de estado estacionário. Avaliando esta informação e os mecanismos predominantes na secagem da alumina (convectivo e difusivo), foram escolhidos os tempos iniciais de aplicação da reversão e o seu tempo de duração. No próximo tópico é apresentado o estudo térmico do leito durante a secagem da alumina em leito fixo com a reversão do sentido do escoamento do ar.

4.2.2 Transferência de calor na secagem da alumina em camada espessa com reversão do sentido do escoamento de ar

Os gráficos da Figura 27 mostram os valores de temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do leito na secagem com reversão do sentido do escoamento do ar, na temperatura ascendente de 40 °C, 50 °C e 60 °C e velocidade de 2,7 m·s<sup>-1</sup>, utilizando como parâmetros de reversão t<sub>0</sub> e Δt de 10 e 30 minutos, respectivamente.

Figura 27 - Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar (D<sub>p</sub> = 3,2 ± 0,2 mm; U = 2,7 m·s<sup>-1</sup>; t<sub>0</sub> = 10 min; Δt = 30 min) a) T = 40 °C; b) T = 50 °C; c) T = 60 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

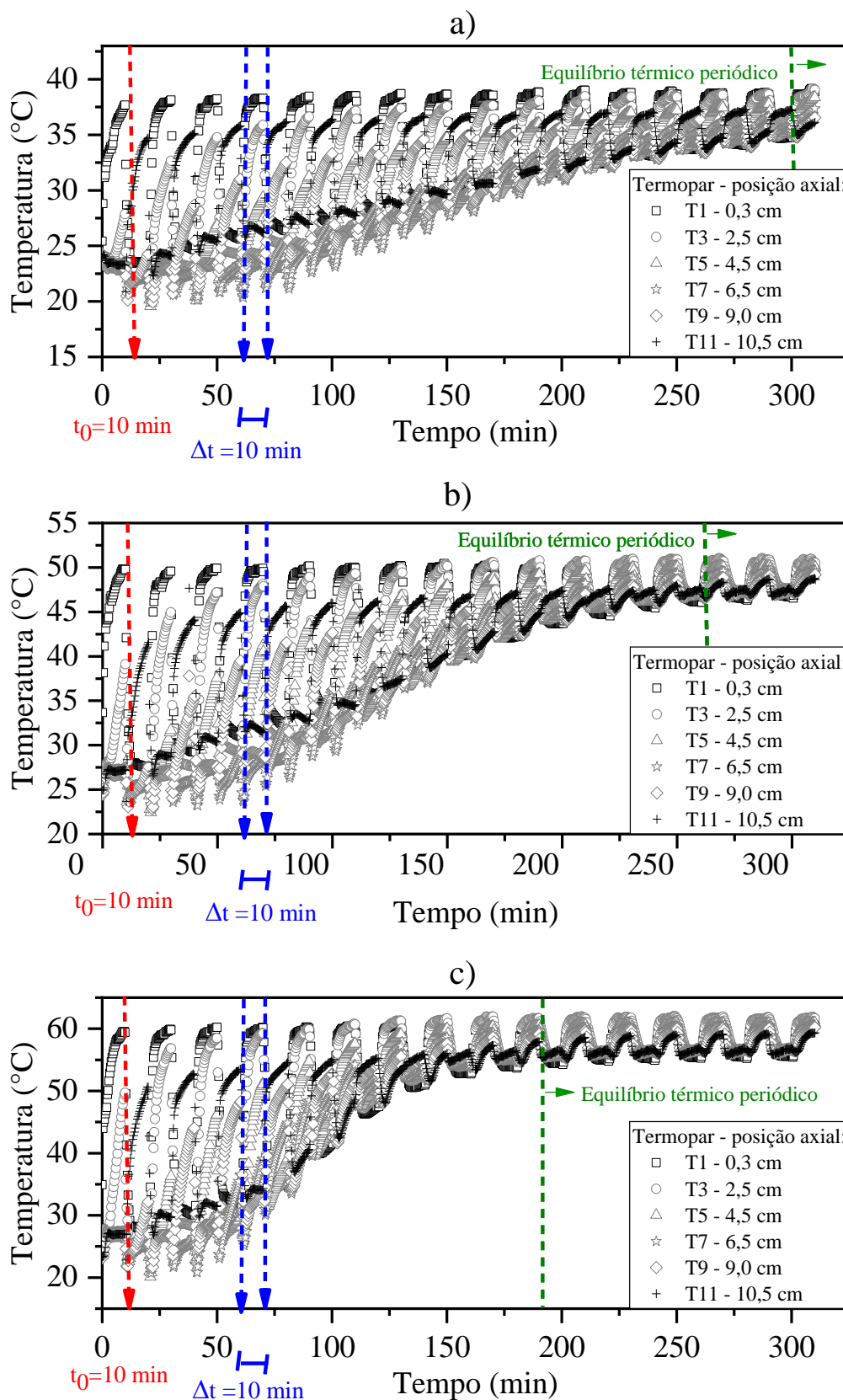
Na Figura 27, para a região de alimentação do ar ascendente (posição axial de 0,3 cm), observa-se que a temperatura se aproximou da temperatura de estado estacionário entre  $0 \leq t \leq t_0$ . Com a aplicação da primeira reversão, em  $t=t_0$ , os valores de temperatura da região de alimentação reduzem bruscamente, acompanhados pelo aumento repentino da temperatura da região de descarga do ar (posição axial de 10,5 cm), que é utilizada como seção de alimentação do escoamento descendente. A reversão do sentido do escoamento é realizada de forma periódica em intervalos de tempo ( $\Delta t$ ), sendo que as temperaturas registradas pelos termopares T3, T5, T7 e T9 variaram entre as máximas e mínimas temperaturas registradas pelos termopares das extremidades T1 e T11. Conforme o tempo de secagem se estende, todo o sistema tende ao equilíbrio térmico periódico, onde a temperatura de estado estacionário oscila entre a temperatura de alimentação ascendente e descendente. Essas temperaturas são diferentes, pois existe a perda de energia para o ambiente devido ao sistema de válvulas e a tubulação utilizados para a mudança do sentido do escoamento. Vale ressaltar que esta perda energética é reduzida pelo isolamento térmico do equipamento.

Para avaliar o efeito do tempo de duração da reversão ( $\Delta t$ ) no comportamento térmico do leito, são apresentadas na Figura 28 e Figura 29 os gráficos de temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais na secagem utilizando  $\Delta t$  de 10 min e 50 min, respectivamente. Estes experimentos foram avaliados para a secagem com temperatura de alimentação do ar de 40, 50 e 60 °C e  $t_0$  de 10 min.

O comportamento térmico do leito utilizando  $\Delta t$  de 10 min e 50 min, Figura 28 e Figura 29 respectivamente, é similar ao descrito para a secagem com  $\Delta t$  de 30 minutos (Figura 27), se diferenciando principalmente pelo número de perturbações térmicas ocasionadas pelas reversões e pelo tempo necessário para o equilíbrio térmico de todo o sistema.

Entre as principais observações fornecidas por estes gráficos, está a heterogeneidade do leito em relação a temperatura. Com a aplicação da reversão do ar o gradiente de temperatura no leito é atenuado quando comparado ao processo sem reversão, mas ainda se mostra presente. É importante destacar que uma distribuição de temperatura homogênea facilita a utilização da energia nas diferentes regiões do leito, favorecendo a transferência do calor utilizado nas frentes de secagem formadas durante o processo (ALBINI, 2019). Ratti e Mujumdar (1995) verificaram experimentalmente e através da simulação da secagem de cenoura, Berbert *et al.* (1995) utilizando a reversão para a secagem de café, Ruiz-López *et al.* (2008) avaliando um modelo matemático para a secagem de alimentos em leito fixo e Albini (2019) na secagem de grãos de cevada, observaram a redução dos gradientes de temperatura do leito com a utilização da técnica de reversão do sentido do escoamento do ar.

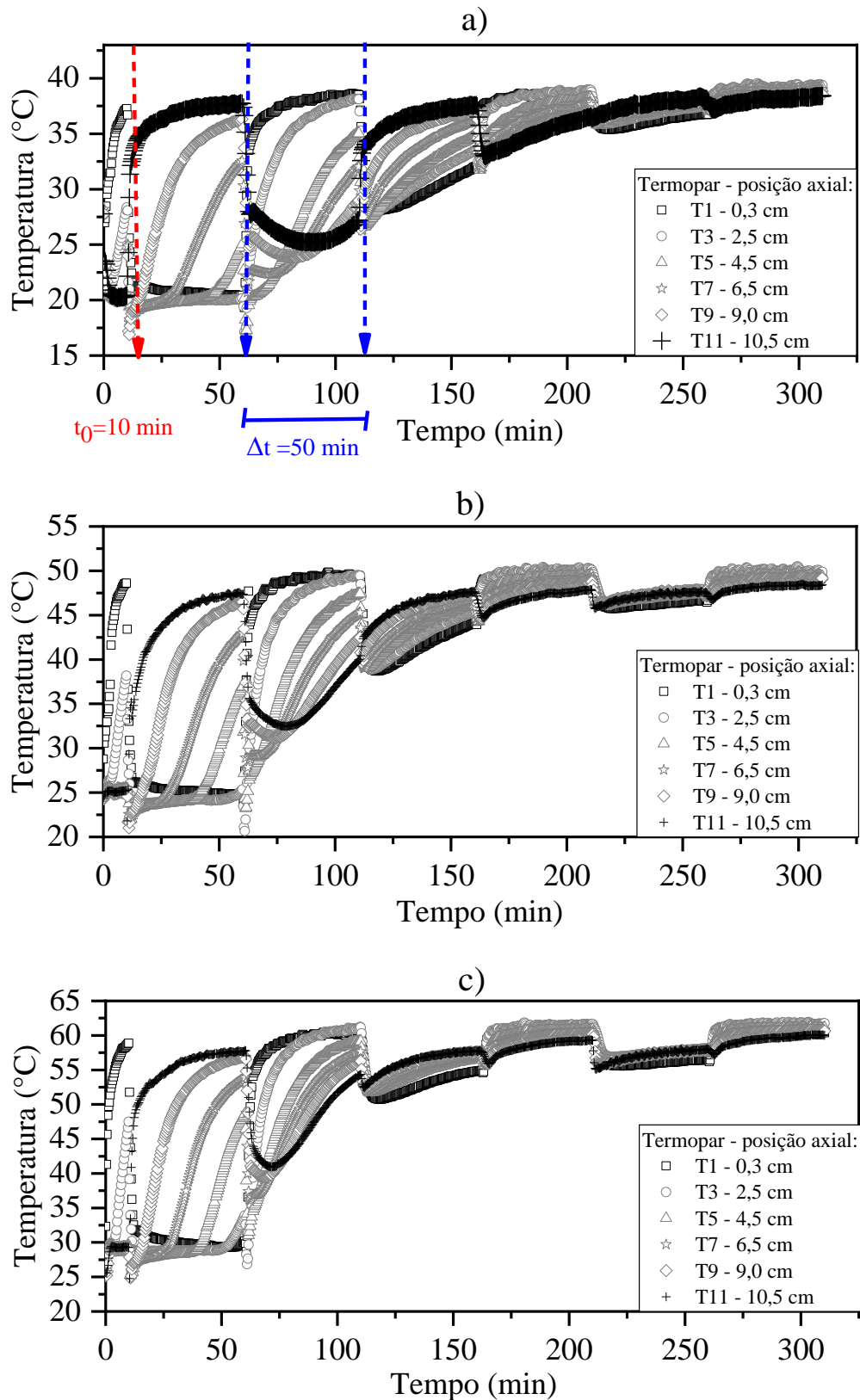
**Figura 28** - Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>;  $t_0 = 10$  min;  $\Delta t = 10$  min) a)  $T = 40$  °C; b)  $T = 50$  °C; c)  $T = 60$  °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.



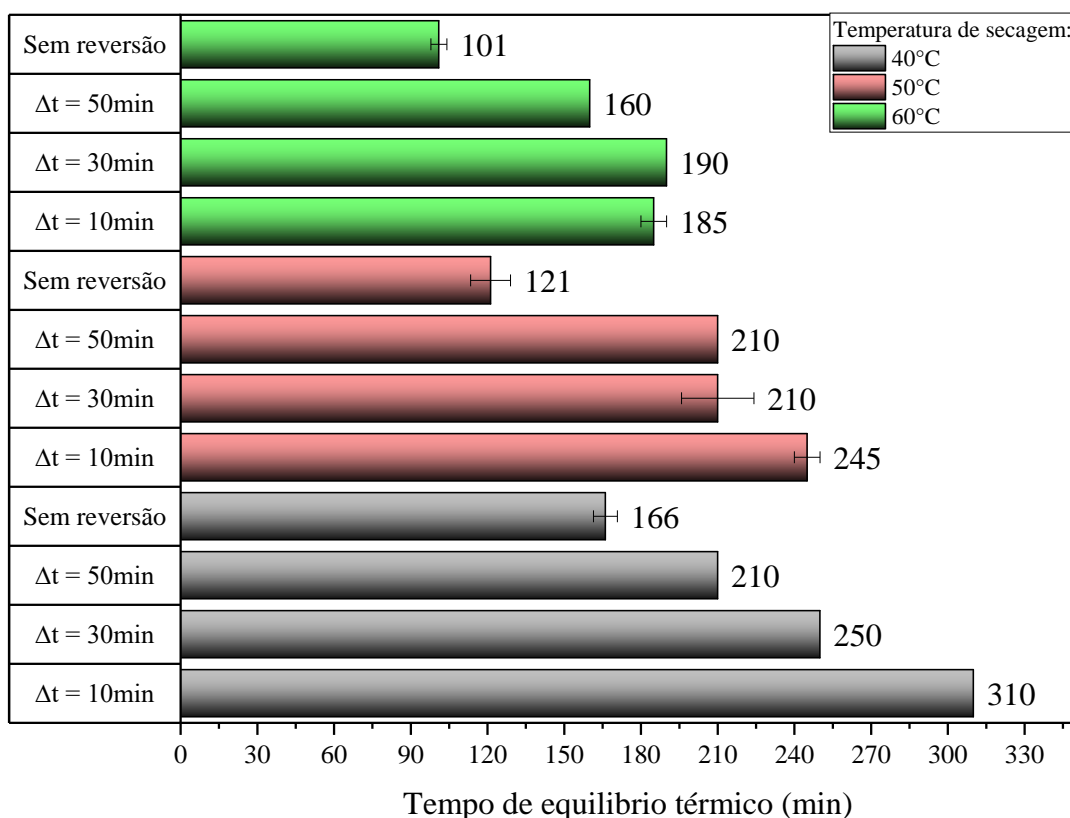
**Figura 29** - Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>;  $t_0 = 10$  min;  $\Delta t = 50$  min): a)  $T = 40$  °C; b)  $T = 50$  °C; c)  $T = 60$  °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação ao tempo necessário para todo o sistema entrar no equilíbrio térmico, observa-se que a operação com reversão conforme indicado na Figura 27, atinge o equilíbrio térmico periódico após os 250 min, 190 min e 190 min do início do processo para as temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C, respectivamente. Comparando os tempos de equilíbrio térmico para diferentes condições de aplicação da reversão com os da secagem sem reversão do ar, pode-se verificar através da Figura 30, que a reversão resultou no aumento do tempo necessário para o equilíbrio em todas as condições avaliadas para as três temperaturas de secagem. Esta observação relaciona-se a perda de energia que ocorre em cada inversão do sentido do escoamento, combinado a perda e ganho de umidade da alumina que será explicada no item 4.2.3. Esta perda de energia ocorre, por exemplo, quando o material próximo a seção de alimentação do ar é aquecido e após a reversão do sentido do escoamento passa a entrar em contato com o ar de secagem que percolou outras regiões do leito, passando a apresentar temperaturas inferiores. Davila *et al.* (1983) também observaram que a utilização de várias reversões durante a secagem pode resultar no aumento da perda da energia armazenada nos grãos.

**Figura 30** - Tempo de equilíbrio para a secagem com e sem reversão do sentido de escoamento do ar nas temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C e  $t_0 = 10\text{min}$  ( $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

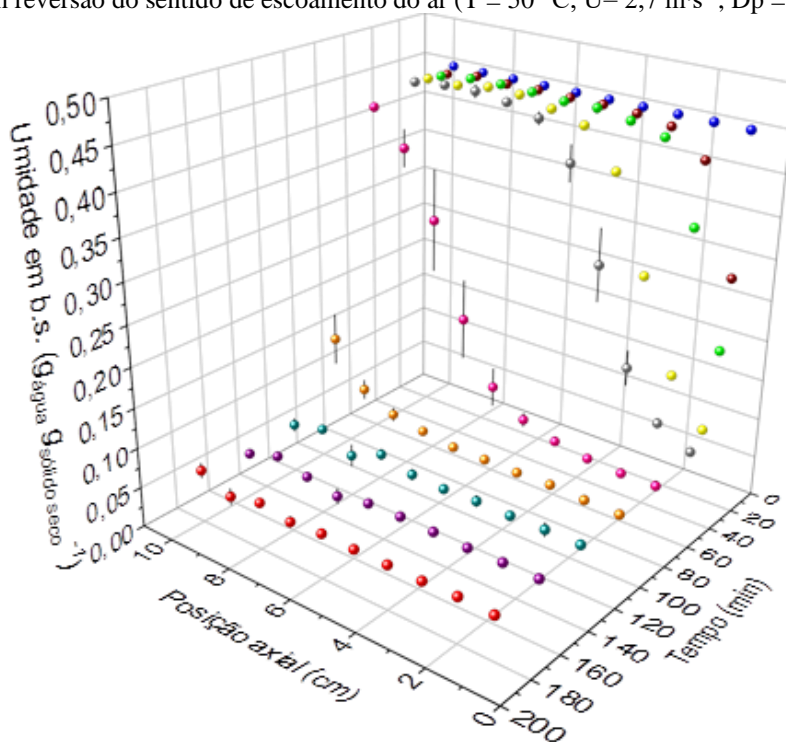
O aumento do tempo para o equilíbrio térmico na secagem com inversão do sentido do escoamento, implica no maior consumo energético para a manutenção do processo. Sendo importante destacar que a utilização da reversão diminui a exposição contínua do material às condições de secagem, podendo ser de interessante para processos com meios porosos sensíveis à temperatura (RATTI e MUJUMDAR, 1995; BERBERT *et al.*, 1995; RUIZ-LÓPEZ *et al.* 2008). Desta forma, a análise de consumo energético deve ser empregada juntamente com uma avaliação dos benefícios que a utilização da técnica traz para a qualidade do material.

#### 4.2.3 Transferência de massa na secagem da alumina em camada espessa

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a secagem utilizando a metodologia do leito fracionado e de umidade média, na operação com e sem reversão do sentido do escoamento.

Na Figura 31 são apresentadas as umidades médias de cada camada, em função do tempo e da posição axial para a secagem sem reversão do sentido do escoamento do ar. Os resultados foram obtidos para a temperatura de operação de 50 °C e 2,7 m·s<sup>-1</sup>. Este gráfico ilustra a heterogeneidade da umidade no leito ao longo da secagem com a formação das frente de secagem ascendente.

**Figura 31** - Umidade média em base seca em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina sem reversão do sentido de escoamento do ar (T = 50 °C; U = 2,7 m·s<sup>-1</sup>; D<sub>p</sub> = 3,2 ± 0,2 mm).

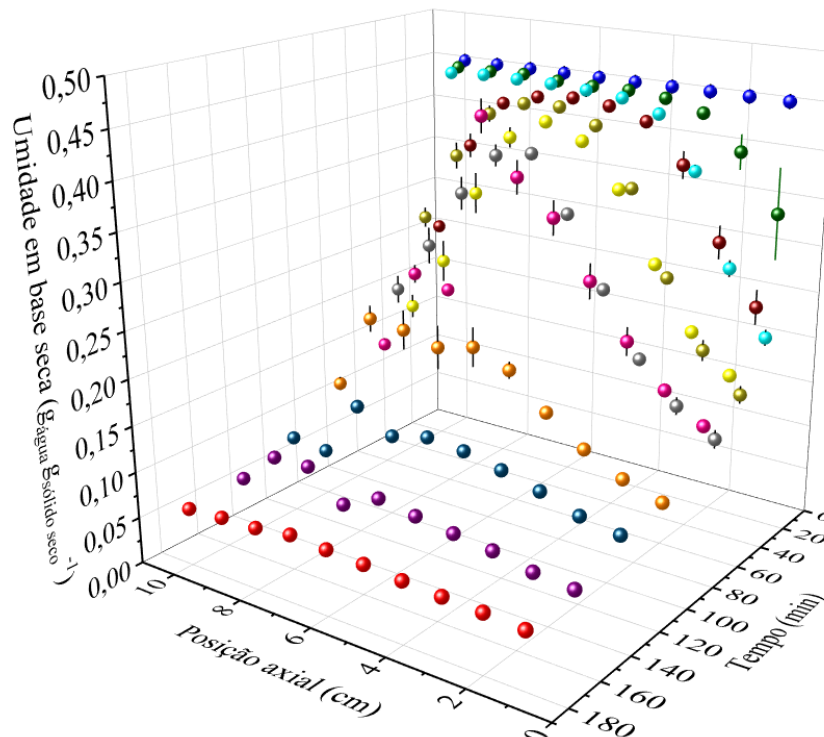


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 31, observa-se que no início da secagem em  $t = 0$ , todas as posições axiais do leito apresentam a mesma umidade. Após decorridos os instantes iniciais, com o escoamento de ar ascendente, observa-se que a região localizada na base do leito sofre redução da sua umidade, enquanto a região de descarga do ar não apresentou alteração significativa no seu conteúdo de umidade. No decorrer do tempo, a frente de secagem se desloca no sentido ascendente, onde a umidade de cada camada foi reduzida gradualmente em cada tempo de secagem de acordo com a proximidade da região de alimentação do ar de secagem. A região de alimentação é a primeira a atingir a umidade de equilíbrio, no tempo de tempo de 60 min. A região de exaustão do ar manteve a maior umidade do leito e apenas após os 120 min do início do processo, o material alcançou a umidade de equilíbrio.

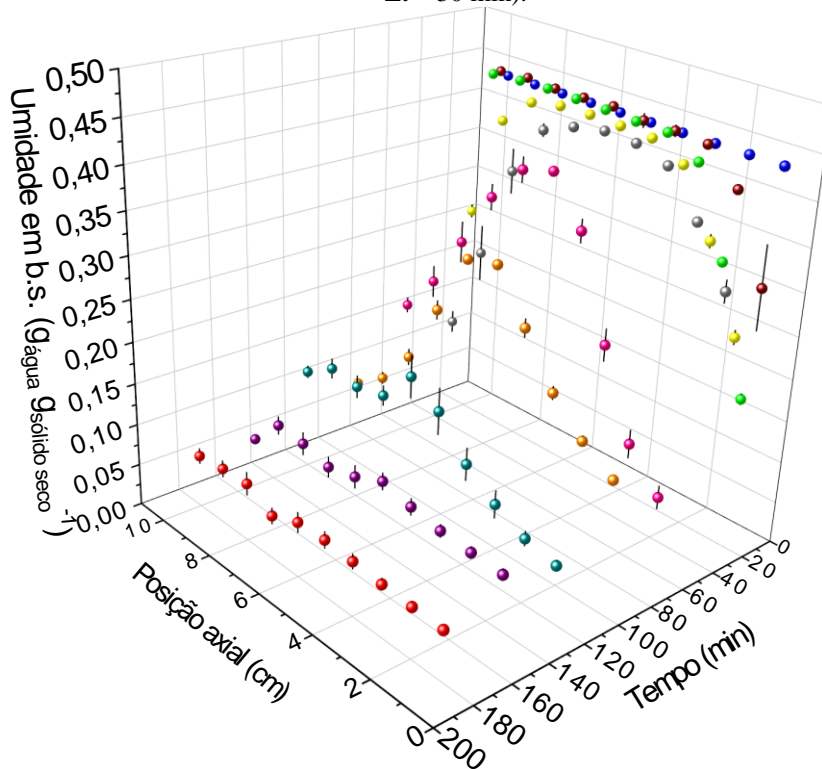
Na Figura 32, Figura 33 e Figura 34 são apresentadas as umidades médias de cada camada em função do tempo e da posição axial, para a secagem com reversão e  $t_0$  de 10 e  $\Delta t$  de 10 min, 30 min e 50 min, respectivamente. A temperatura do ar alimentado no sistema foi de 50 °C com velocidade de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Estes gráficos mostram o comportamento da umidade no leito ao longo da secagem e a influência da aplicação da reversão, com a formação das frentes de secagem ascendentes e descendentes.

**Figura 32** - Umidade média em base seca em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão do sentido de escoamento ( $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ;  $t_0 = 10 \text{ min}$ ;  $\Delta t = 10 \text{ min}$ ).



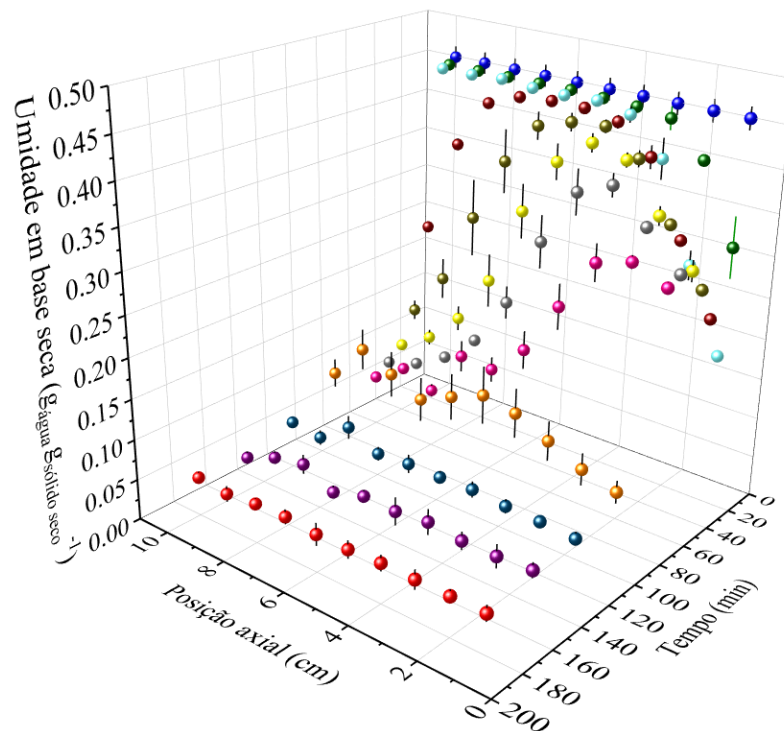
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 33** – Umidade média em base seca (b.s.) em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão do sentido de escoamento ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ;  $\Delta t = 30\text{ min}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 34** - Umidade média em base seca (b.s.) em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão do sentido de escoamento ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ;  $\Delta t = 50\text{ min}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se pelas Figura 32, Figura 33 e Figura 34, que a aplicação da reversão alterou a distribuição da umidade no leito quando comparada ao processo convencional descrito pela Figura 31, com o deslocamento das regiões de maior umidade para diferentes posições axiais ao longo do tempo, de acordo com o  $\Delta t$  empregado na secagem.

Na secagem com reversão, Figura 32, Figura 33 e Figura 34, todo o leito apresenta a mesma umidade em  $t = 0$ . O processo é iniciado com escoamento de ar ascendente até  $t = t_0$ , e durante este intervalo de tempo a região da base do leito tem a sua umidade reduzida enquanto a de exaustão não apresenta alterações significativas. Em  $t = t_0$ , com a inversão do sentido do escoamento, a região de exaustão passa a ter contato direto com o ar aquecido em escoamento descendente, e a umidade dessa região (posição axial de 8 a 10 cm) sofre a redução. Durante a secagem, o sentido do escoamento do ar é invertido de forma periódica, favorecendo a redução dos gradientes de umidade no leito.

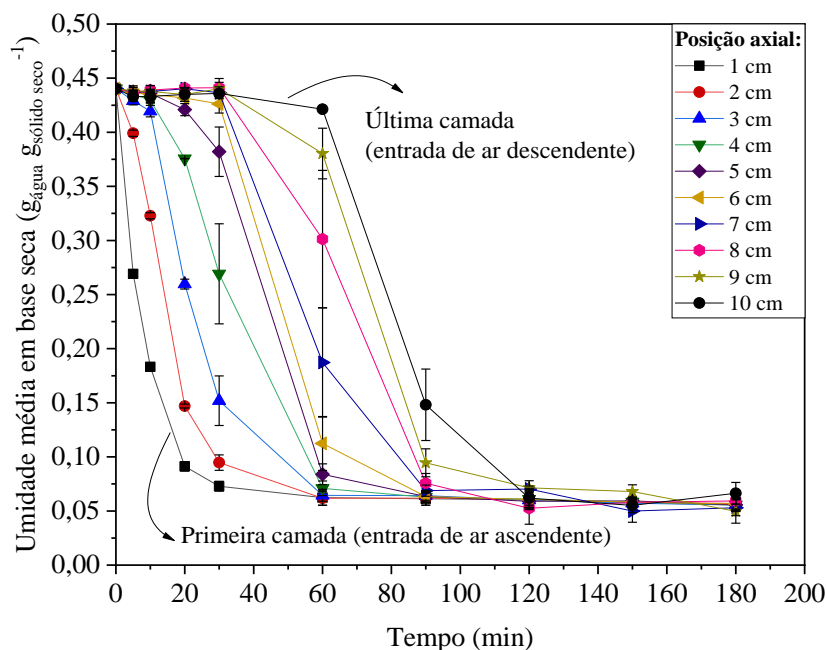
Para a secagem com  $t_0$  de 10 min e  $\Delta t$  de 10 min, Figura 32, observa-se que formato dos dados se assemelha a uma parábola quando se avalia a umidade em função da posição, mantendo-se o tempo fixo. Este formato mostra a formação de duas frentes de secagem, uma ascendente e a outra descendente, com ordens de influência similares, deslocando a região de maior umidade do leito para o centro do meio poroso, com uma leve tendência para a região de exaustão superior, posições axiais de 4 a 9 cm.

Para a Figura 33, com  $\Delta t$  de 30 min, também são observadas a formação das frentes de secagem ascendente e descendente e o deslocamento da região de maior umidade do leito para a posição central, posições axiais de 4 a 8 cm, apresentando comportamento similar ao obtido para a secagem com  $\Delta t$  de 10 minutos.

A aplicação do  $\Delta t$  de 50 minutos, Figura 34, concentrou a região mais úmida do leito próxima à região de alimentação de ar inferior nas posições axiais de 1 a 5 cm. Esta observação relaciona-se com aplicação do primeiro  $\Delta t$ , tempo de secagem de 10 a 60 minutos, em que o escoamento de ar descendente do ar promoveu uma frente de secagem descendente mais expressiva no processo.

Na Figura 35 são apresentados os gráficos de umidade em função do tempo para 10 posições axiais do leito de secagem, na operação sem reversão do sentido de escoamento a  $50\text{ }^\circ\text{C}$  e  $2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na figura estão indicadas as camadas do leito fracionado localizadas nas regiões de alimentação e exaustão do ar de secagem.

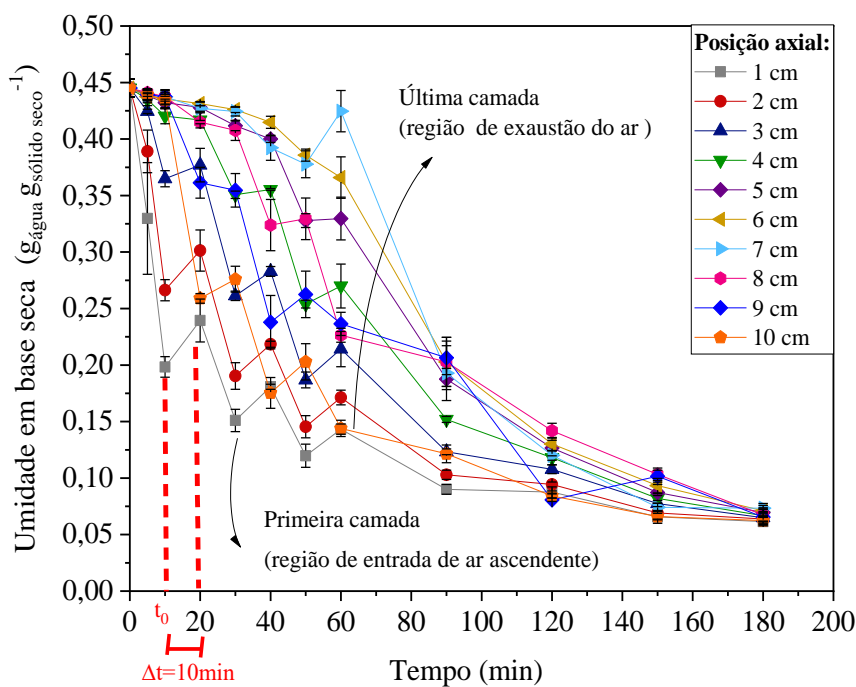
**Figura 35** - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

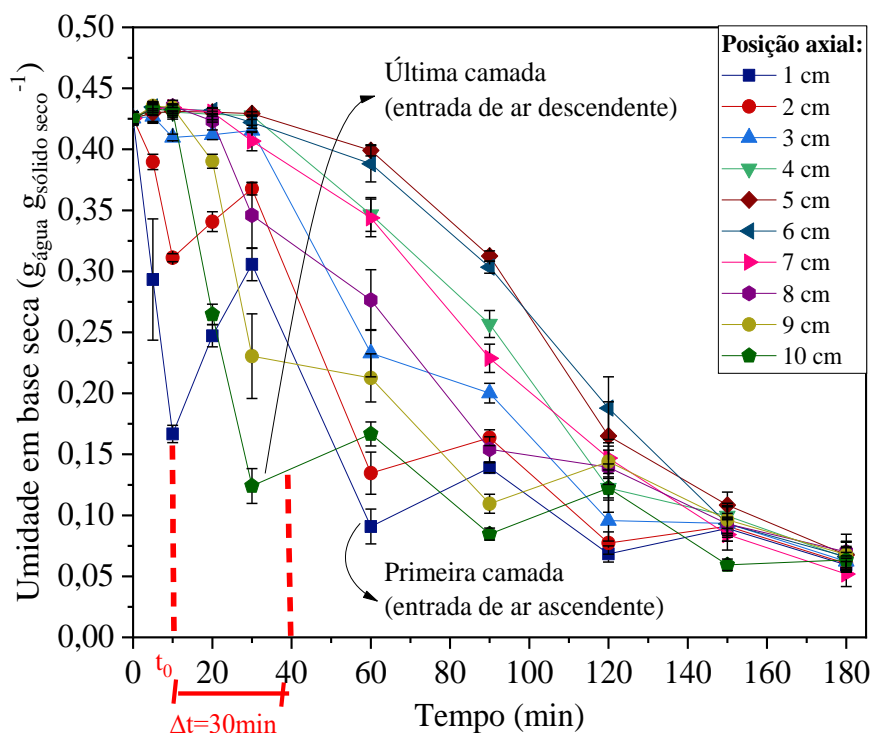
Na Figura 36, Figura 37 e Figura 38 são apresentados os gráficos de umidade em função de função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , com  $\Delta t$  de 10 min,  $\Delta t$  de 30min e  $\Delta t$  de 50min, respectivamente. Os  $\Delta t$  e  $t_0$  são indicados nos gráficos.

**Figura 36** - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito com a reversão do sentido do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ;  $\Delta t = 10\text{ min}$ ).



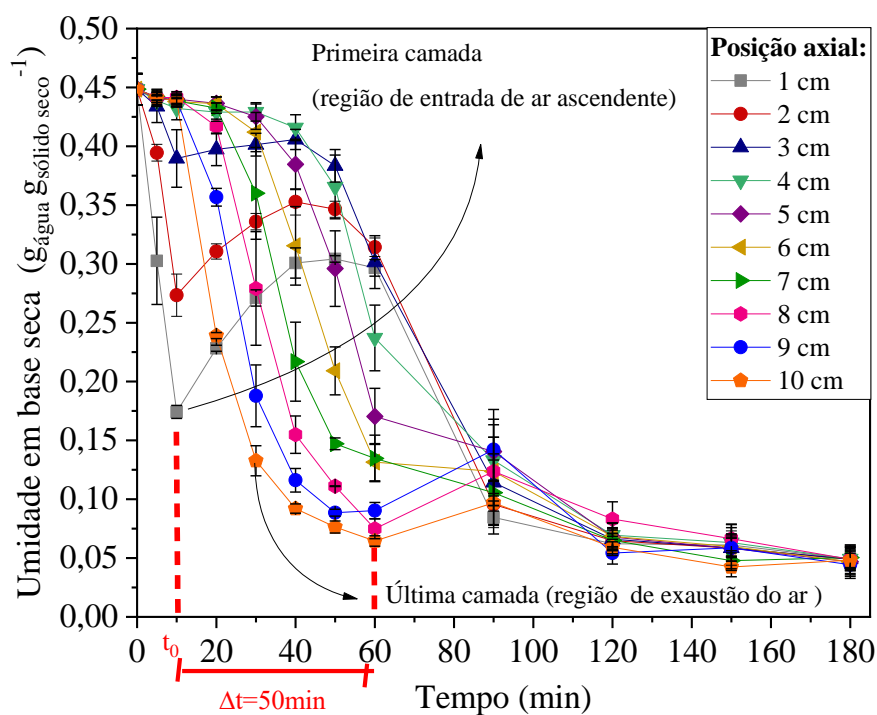
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 37** - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito com a reversão do sentido do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ;  $\Delta t = 30\text{ min}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 38** - Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito com a reversão do sentido do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ;  $\Delta t = 50\text{ min}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.



Avaliando os resultados obtidos a partir da metodologia do leito fracionado, pode-se observar pela Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38, uma boa reprodutibilidade dos experimentos de massa, principalmente considerando que para a obtenção da curva da Figura 36, foram empacotados onze leitos em cada repetição do experimento. Apesar de alguns desvios padrões sobreporem pontos experimentais, as tendências de redução e aumento da umidade e do comportamento das frentes de secagem podem ser identificadas para todas as condições de processo avaliadas.

Para a secagem com reversão, verifica-se pelos gráficos da Figura 36, Figura 37 e Figura 38 que durante o processo a alumina perde e ganha umidade, o que não ocorre na secagem convencional sem reversão conforme ilustrado pela Figura 35.

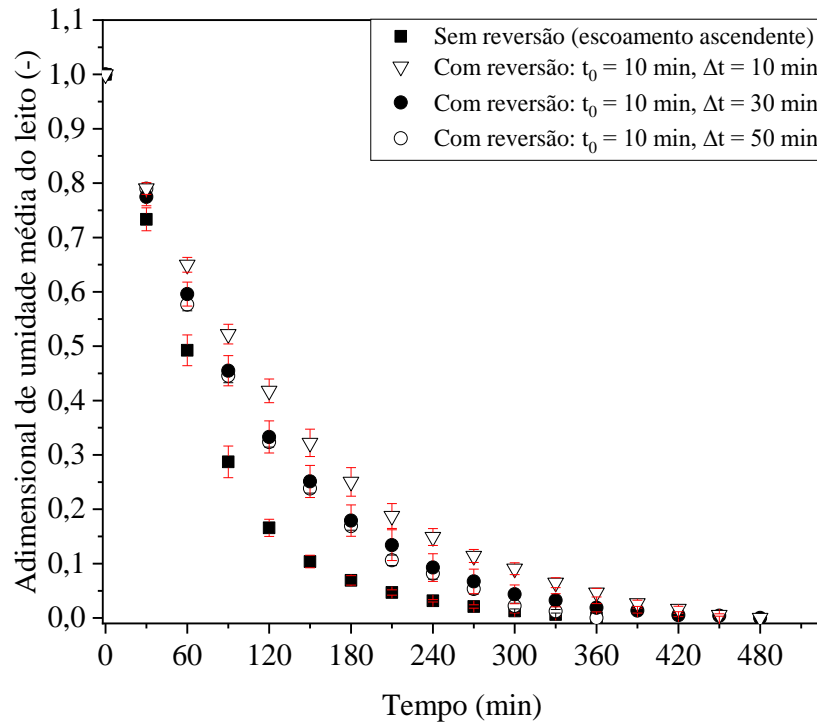
O ganho de umidade pode ser visualizado na Figura 36, Figura 37 e Figura 38 avaliando a secagem do leito na região da base da célula, posição axial de 1 cm. Nesta região, durante os 10 min iniciais do processo com escoamento ascendente do ar, a umidade do material é reduzida até um determinado valor e então o escoamento é invertido. A partir deste ponto, a alumina entra em contato com o ar em escoamento descendente, que passou pela região superior da célula de secagem e realizou a secagem desta região, aumentando a sua umidade absoluta. Desta forma, a região de entrada (posição axial de 1 cm) por apresentar menor umidade do que a de equilíbrio com o ar em escoamento descendente, acaba recebendo a umidade do ar. Esse processo periódico pode ser observado de forma mais expressiva, nas regiões de alimentação e exaustão do ar. O ganho de umidade durante a secagem com reversão também foi observado por Berbert *et al.* (1994) na secagem de café e nos resultados apresentados por Sabbah *et al.* (1979) na secagem de soja.

Outra forma de avaliar o efeito da reversão é através da análise do adimensional de umidade médio do leito apresentado pela Figura 39, Figura 40 e Figura 41 para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Nestes gráficos, pode-se observar que a secagem com reversão necessitou de maior tempo para todo o sistema atingir a umidade de equilíbrio dinâmico nas três temperaturas de processo, para  $t_0$  de 10 min e  $\Delta t$  de 10, 30 e 50 min, quando comparada a secagem convencional. Além disso, para cada tempo avaliado, uma menor quantidade de umidade é removida do material quando comparada à secagem convencional.

Ratti e Mujumdar (1995) não verificaram no adimensional de umidade médio do leito simulado, a influência da secagem com e sem a reversão do ar. Por outro lado, Ruiz-López *et al.* (2008) verificaram experimentalmente e através da simulação matemática da secagem de cenoura, a influência da reversão no adimensional de umidade médio do leito. Ruiz-López *et al.* (2008) relacionaram a dependência do efeito da reversão com fatores como:

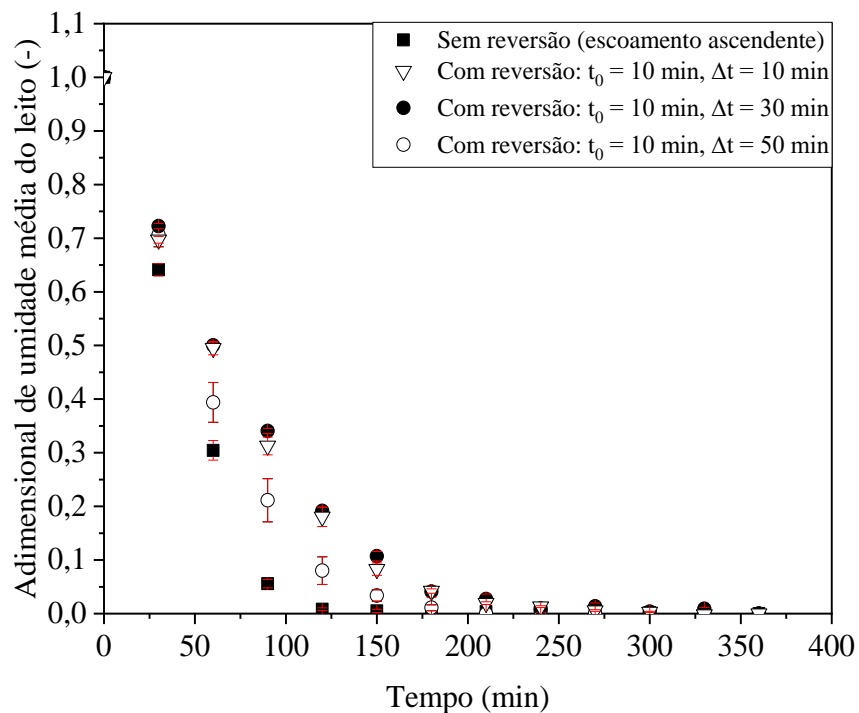
espessura da partícula, altura do leito fixo, velocidade e temperatura do ar e a frequência de das reversões.

**Figura 39** - Adimensional de umidade médio do leito em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).



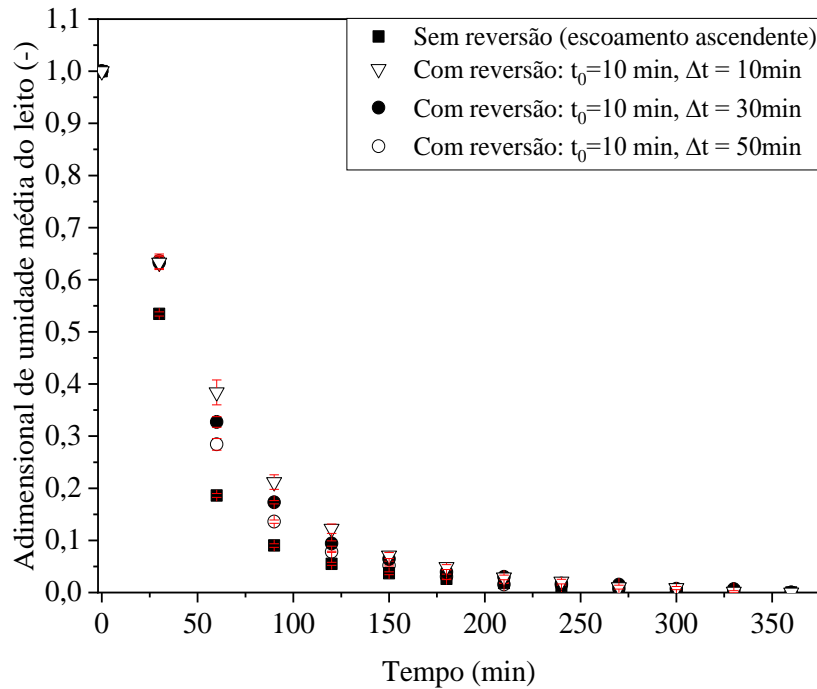
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 40** - Adimensional de umidade médio do leito em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 41** - Adimensional de umidade médio do leito em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).



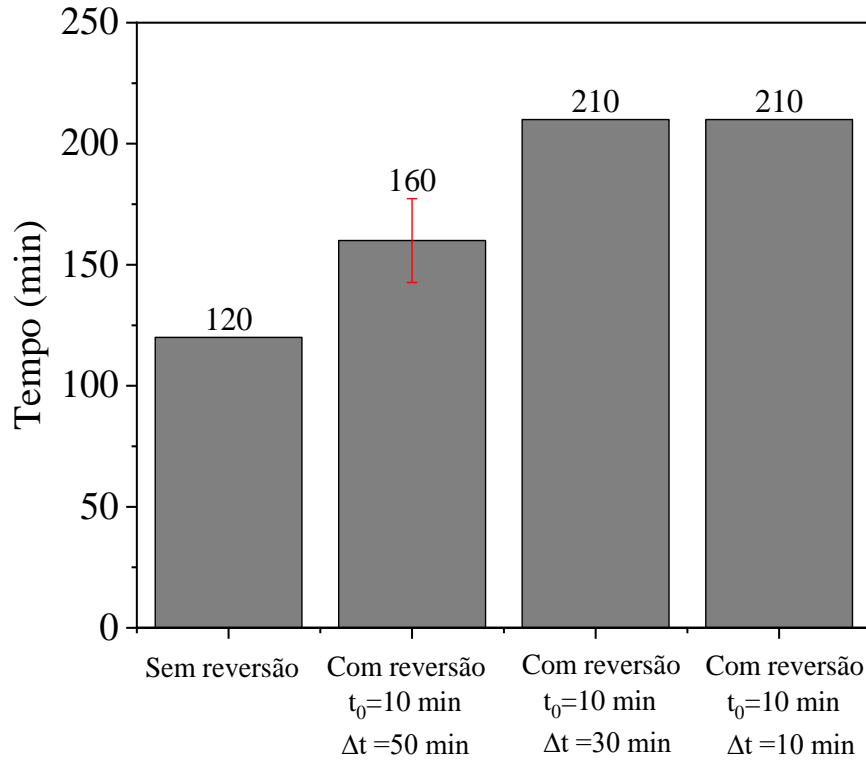
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 39, Figura 40 e Figura 41, observa-se que o  $\Delta t$  de 10 min proporcionou uma redução mais lenta do adimensional de umidade quando comparado ao processo com  $\Delta t$  de 50 min e sem reversão. O aumento do intervalo de duração da reversão proporcionou a formação de frentes de secagem mais expressivas, reduzindo os efeitos de perda energética que ocorrem em cada reversão e aproximando o comportamento da secagem ao processo convencional. Avaliando o efeito da reversão na secagem com diferentes temperaturas, observa-se que para a temperatura de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figura 39, a reversão promoveu maior influência no adimensional de umidade médio quando comparada à secagem na temperatura de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Figura 40 e Figura 41, respectivamente.

Com a aplicação das reversões existe a perda da energia armazenada no sistema, conforme citado no item 4.2.2 e também verificado por Davila *et al.* (1983). Além da perda energética, o ganho de umidade do material particulado evidenciado na Figura 36, Figura 37 e Figura 38, são fatores que se relacionam com o aumento do tempo de processo necessário para a redução da umidade média do leito aos níveis da umidade de equilíbrio dinâmico. Na Figura 42 são apresentados os tempos necessários para que a umidade média do leito atingisse a umidade de equilíbrio dinâmico, em cada condição de secagem para a temperatura de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os resultados mostram que o processo sem reversão apresentou o menor tempo, seguido da secagem com reversão e  $\Delta t$  de 50 minutos e por fim, a secagem com reversão e  $\Delta t$  de 10 e 30

minutos com tempos iguais de secagem. Davila *et al.* (1983) também observaram o aumento do tempo total de secagem com a aplicação da reversão.

**Figura 42** – Tempo de secagem necessário para a umidade média do leito atingir a umidade de equilíbrio dinâmico ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ).



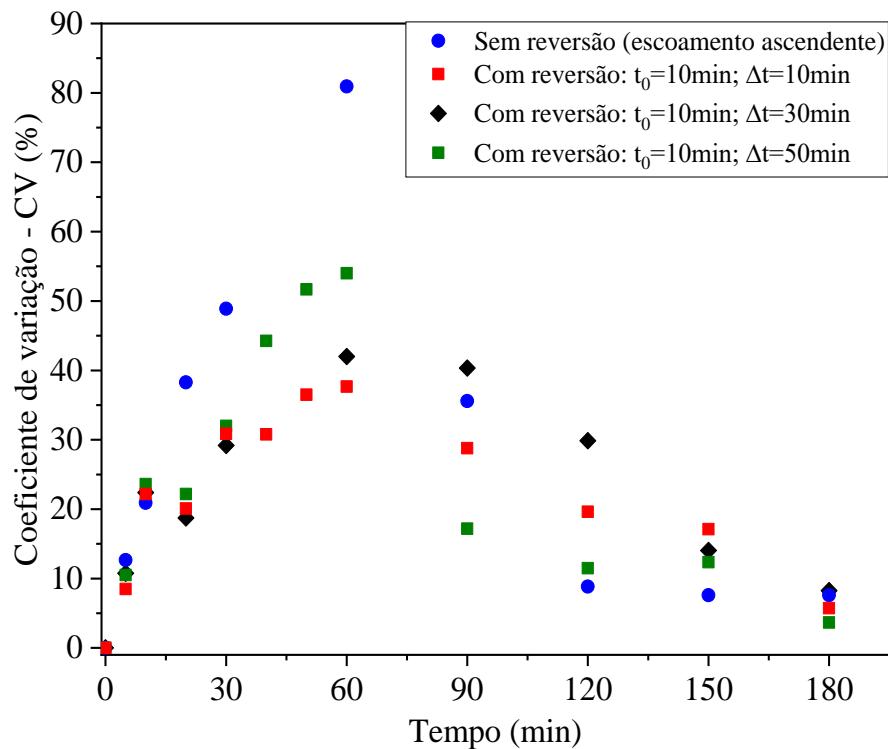
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tempos totais da secagem obtidos para as diferentes condições operacionais são importantes na avaliação macroscópica da secagem em leito fixo, por exemplo, na análise energética que será apresentada na seção 4.3, onde a umidade média do leito é considerada. Entretanto, pode-se observar que o gradiente de umidade entre as diferentes posições axiais observado na Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38, é significativo. Desta forma, torna-se necessária a avaliação da homogeneidade da umidade do leito durante os diferentes tempos de secagem. Esta avaliação foi realizada utilizando o coeficiente da variação CV, Equação 3, em função do tempo apresentado na Figura 43.

Na Figura 43, observa-se a tendência de suavização do pico da curva para o processo com reversão do ar de secagem, indicando a maior homogeneidade da umidade no leito. Para o tempo de secagem de 60 minutos, o processo convencional com escoamento ascendente apresenta o valor máximo de CV de 80,9 %, já para a secagem com reversão os máximos valores de CV foram de 36,5 %, 42,0 % e 54,0 % para  $\Delta t$  de 10, 30 e 50 minutos, respectivamente. Assim como o observado na Figura 40, verifica-se que o leito com escoamento ascendente se

aproxima da umidade de equilíbrio mais rapidamente (tempo de 120 minutos) do que a secagem com reversão do sentido de escoamento. Segundo Davila *et al.* (1983), o valor ótimo de  $\Delta t$  está relacionado ao menor valor do coeficiente de variação. Desta forma, para as condições de secagem avaliadas o  $\Delta t$  de 10 minutos foi o que proporcionou as melhores condições para a obtenção de um leito com maior homogeneidade de umidade do material.

**Figura 43** – Coeficiente de variação em função do tempo para a secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 50$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).



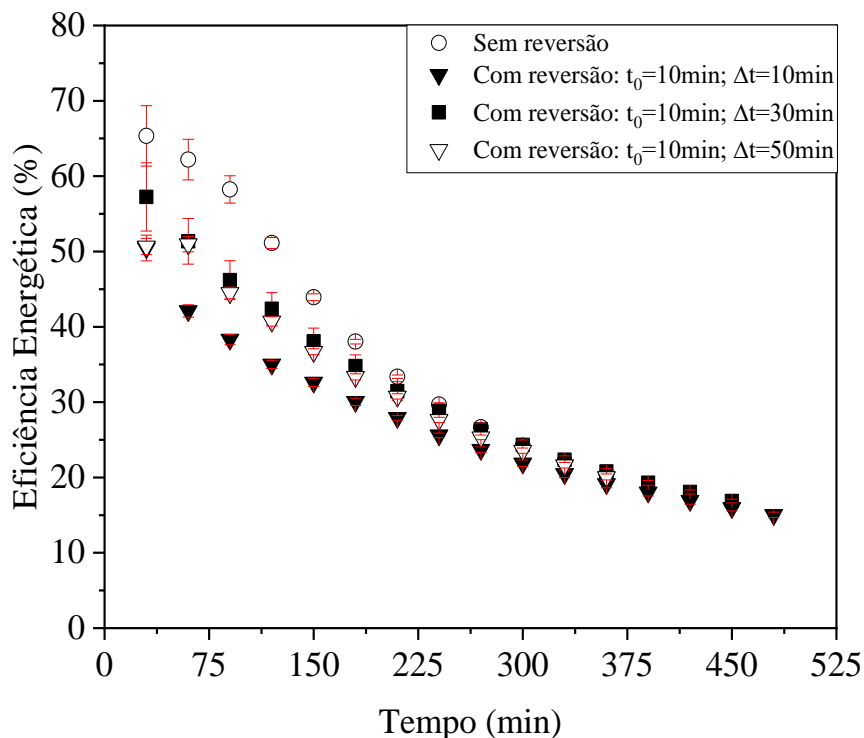
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Análise energética da secagem em camada espessa

A eficiência energética em função do tempo de secagem para o processo com e sem reversão do ar à 40 °C, 50 °C e 60 °C é apresentado na Figura 44, Figura 45 e Figura 46, respectivamente. Pode-se observar que ao longo do tempo a eficiência diminui para todas as condições avaliadas, e que as curvas tendem ao mesmo comportamento no período final do processo. A redução da eficiência energética ao longo do tempo também foi observada por Nazghelichi *et al.* (2010) na secagem de cenoura em leito fluidizado, Brito *et al.* (2017) na secagem de sorgo em leito de jorro, Albini *et al.* (2018) na secagem de grãos de cevada em leito fixo e Brito *et al.* (2018) na secagem de leite e de esferas de alumina.

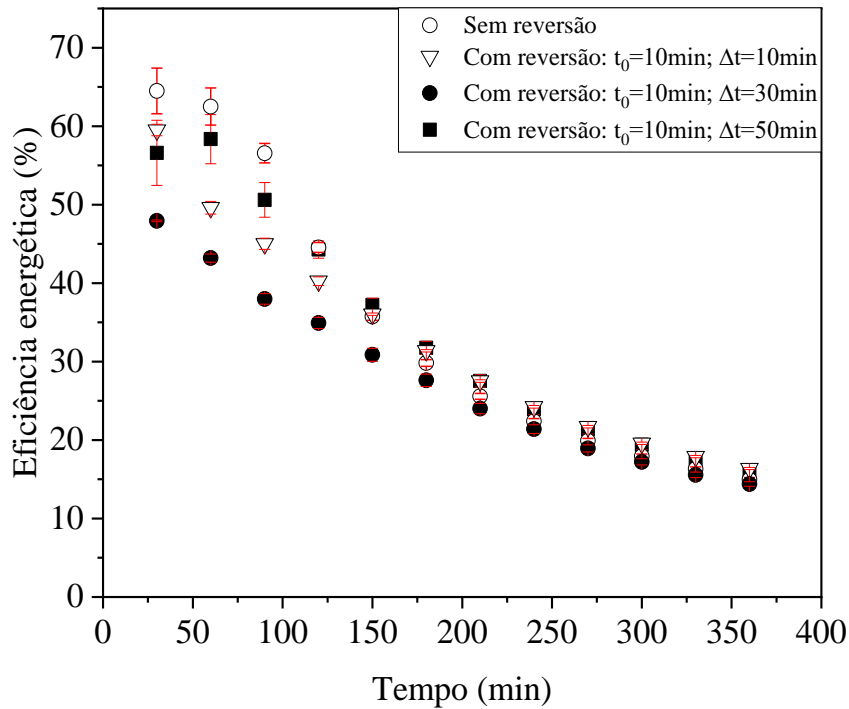
A redução da eficiência energética ao longo do tempo, Figura 44, Figura 45 e Figura 46, está diretamente relacionada a quantidade da umidade presente nas esferas de alumina, uma vez que no início do processo, a umidade de fácil acesso, ou seja, a umidade que não está ligada fortemente a estrutura do material é removida com maior facilidade e em maior quantidade. Além disso, é importante destacar que as esferas de alumina utilizadas nos experimentos foram umidificadas até a sua saturação, com a presença de água líquida na superfície, o que também favorece a transferência de massa pelos mecânicos convectivos no início do processo. Com o aumento do tempo de secagem, a mesma quantidade de energia térmica e mecânica é fornecida ao sistema, entretanto uma menor quantidade de umidade encontra-se disponível para ser transferida à fase fluida, o que explica a redução da eficiência energética. Estas observações estão de acordo com as verificadas nos trabalhos de Brito *et al.* (2017), Nazghelichi *et al.* (2010) e Albini *et al.* (2018).

**Figura 44** - Eficiência energética média em função do tempo, para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 40$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).



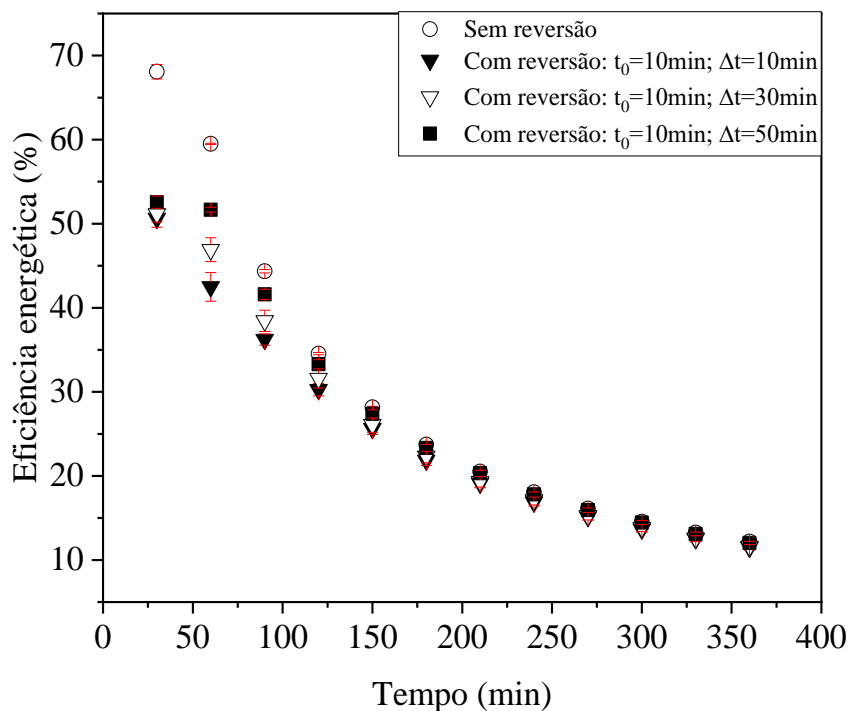
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 45** – Eficiência energética média em função do tempo, para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 50$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 46** - Eficiência energética média em função do tempo, para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 60$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).



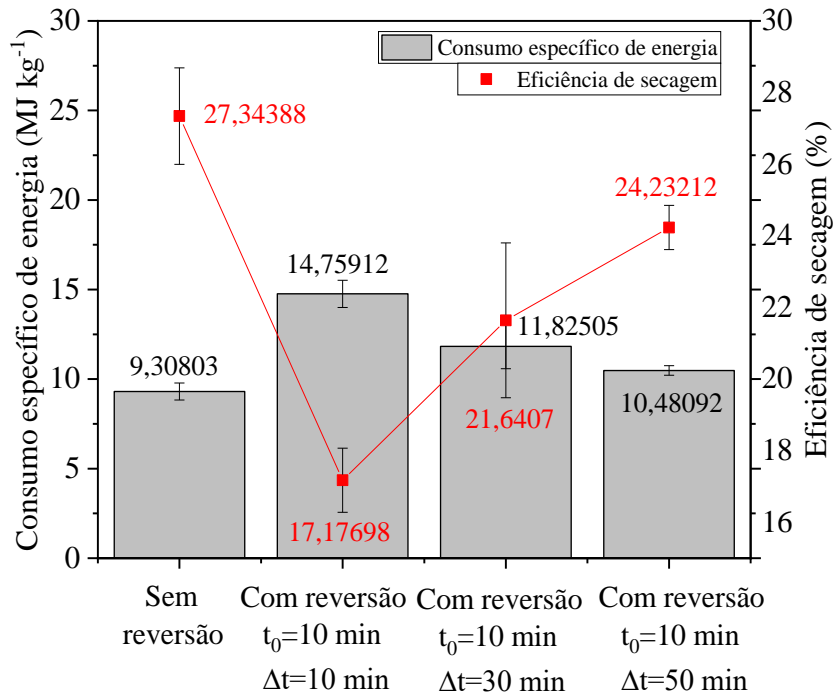
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda sobre a Figura 44, Figura 45 e Figura 46, observa-se que os efeitos da reversão e do  $\Delta t$  na eficiência energética são mais expressivos no início do processo. Para a temperatura de 40 °C, Figura 44, observa-se que a secagem sem reversão apresentou as maiores eficiências energéticas iniciais, seguida da secagem com reversão e  $\Delta t$  de 30, 50 e 10 min. Para a temperatura de 50 °C, Figura 45, as eficiências energéticas médias iniciais para a secagem sem reversão e com reversão e  $\Delta t$  de 50 min, 30 min 10 min, foram de 64,5 %, 56,6 %, 47,9 % e 59,5 %, respectivamente. O segundo maior valor da eficiência energética inicial foi para o processo com reversão e  $\Delta t$  de 10 min, indicando o aumento das taxas de transferência de massa iniciais da secagem. Pela Figura 46, para o processo a 60 °C as maiores eficiências foram obtidas na seguinte ordem: sem reversão,  $\Delta t$  de 50 min,  $\Delta t$  de 30 min e  $\Delta t$  de 10 min. Estes resultados indicam que a aplicação da reversão reduziu a eficiência energética inicial, principalmente devido aos efeitos de ganho de umidade nas regiões do leito previamente secas e da dissipação energética que ocorre com a aplicação de cada reversão, conforme comentado na seção 4.2.3.

Na Figura 47, Figura 48 e Figura 49 são apresentados os consumos específicos de energia e a eficiência de secagem para processo com e sem reversão do ar de secagem à 40 °C, 50 °C e 60 °C e velocidade do ar de 2,7 m·s<sup>-1</sup>. Ressalta-se, que estes parâmetros de desempenho energético foram determinados para o tempo de processo necessário para que a umidade média do leito atingisse a umidade de equilíbrio dinâmico em cada condição de operação. Pode-se observar que a secagem convencional, sem a reversão, apresentou o menor consumo específico de energia para as três temperaturas. A secagem convencional também apresentou a maior eficiência do processo para as temperaturas de 40 e 50 °C, para a temperatura de 60 °C apresentou valor semelhante ao da secagem com  $\Delta t$  de 50 considerando o desvio padrão dos resultados. A aplicação da reversão resultou no aumento da energia empregada ao processo, principalmente devido ao aumento do tempo de secagem necessário para a umidade média do leito atingir a umidade de equilíbrio dinâmico. Davila *et al.* (1983) e Sabbah *et al.* (1979) também observaram o aumento do consumo energético e do tempo de secagem com a utilização da técnica reversão.

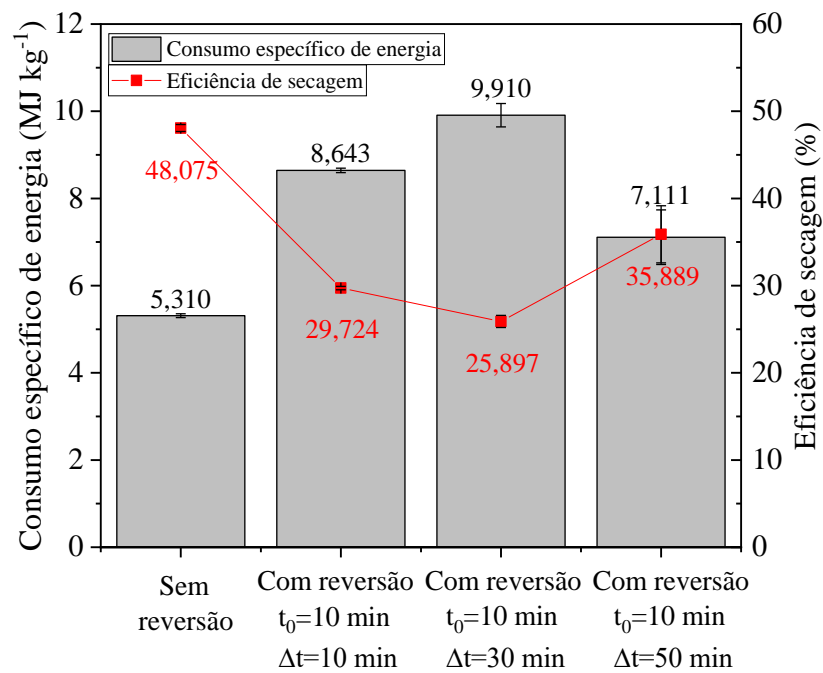


**Figura 47** - Consumo específico de energia e eficiência de secagem para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 40$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).



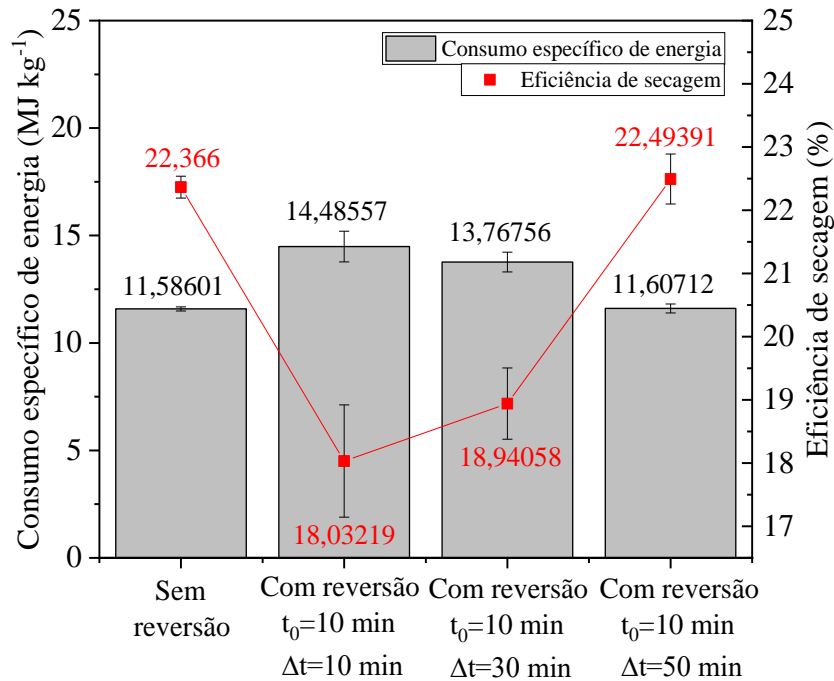
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 48** – Consumo específico de energia e eficiência de secagem para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 50$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 49** - Consumo específico de energia e eficiência de secagem para diferentes condições de operação na secagem em camada espessa avaliando-se a umidade média do leito ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 60$  °C;  $U = 2,7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando o efeito do  $\Delta t$  nos parâmetros energéticos, observa-se pela Figura 47 e Figura 49 que o  $\Delta t$  de 10 min apresentou a menor eficiência de secagem e a maior média do consumo específico de energia, podendo-se relacionar ao maior número de perturbações submetidas ao sistema. Para a temperatura de 50 °C, Figura 48, observa-se que o consumo específico de energia aumentou para os valores de  $\Delta t$  na seguinte ordem: 50 min, 10 min e 30 min. Para a eficiência de secagem, o aumento foi na seguinte ordem de  $\Delta t$ : 30 min, 10 min e 50 min. A partir destes resultados, observa-se que o maior intervalo de duração da reversão do sentido do escoamento,  $\Delta t$  de 50 min, favoreceu o aumento da eficiência de secagem e reduziu o consumo energético. Esta observação se relaciona ao menor número de reversões aplicadas durante o processo, o que resultou na formação das frentes ascendente e descendente de secagem. Para os valores de  $\Delta t$  de 10 e 30 minutos a reversão foi aplicada com mais frequência, e como consequência observa-se o aumento do consumo específico e a diminuição da eficiência da secagem.

Ressalta-se que do ponto de vista energético, o melhor processo é associado ao menor consumo energético e a maior eficiência, ou seja, a aplicação da reversão aumentou o custo da operação. Entretanto, deve-se observar que a homogeneidade da umidade no leito, conforme apresentado pela Figura 43, foi favorecida com a redução do intervalo de aplicação da reversão.

Esta observação indica que a análise energética e de homogeneidade da umidade devem ser avaliadas em conjunto, ponderando-se os benefícios do emprego da técnica na qualidade do produto e o seu valor de mercado. Por se tratar de um material modelo, a alumina não apresenta uma umidade ideal para armazenamento e não necessita de cuidados em relação à sensibilidade térmica, como ocorre em processos que utilizam grãos, sementes, produtos orgânicos e biológicos (GHALY e SUTHERLAND, 1984; JANGAM e MUJUMDAR, 2010; BUCKLIN *et al.*, 2013; BALA, 2017). Para essas operações, o emprego da reversão pode agregar valor e qualidade ao produto, podendo ser indicada mesmo com o aumento do consumo energético.

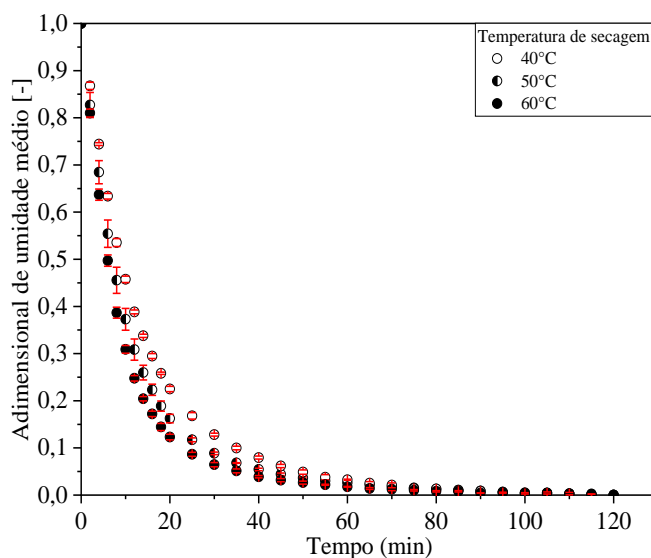
#### 4.4 Secagem da alumina em camada fina

Neste item são apresentados os resultados experimentais e da avaliação de modelos matemáticos para a cinética de secagem da alumina em camada fina.

##### 4.4.1 Resultados experimentais da secagem em camada fina

As curvas cinéticas da secagem da alumina em camada fina para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  são apresentadas na Figura 50. Este estudo teve por objetivo verificar a influência das condições de operação e fornecer os dados experimentais necessários para o ajuste dos modelos de secagem em camada fina, uma vez que estes são empregados na formulação matemática da secagem em camada espessa.

**Figura 50** – Adimensional de umidade médio em função do tempo, para a secagem da alumina em camada fina nas temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C, velocidade do ar de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ .

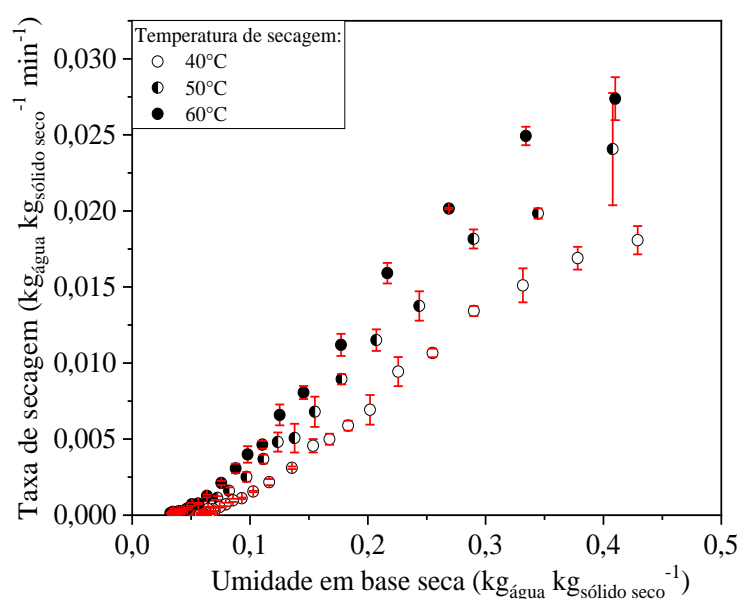


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se a boa reprodutibilidade dos experimentos para as condições experimentais avaliadas, pelos valores de desvio padrão apresentados graficamente. Com relação ao comportamento típico da cinética de secagem, observa-se a redução da umidade do meio poroso até os valores de umidade de equilíbrio dinâmico.

Avaliando o efeito da temperatura de alimentação do ar na cinética do processo, Figura 50, os resultados experimentais indicam que o adimensional de umidade é reduzido mais rapidamente com o aumento da temperatura. Este resultado é esperado, uma vez que o aumento da temperatura disponibiliza uma maior quantidade de energia ao sistema, favorecendo a agitação das moléculas de água presentes no meio poroso, que quebram as suas ligações e são transferidas para a fase fluida (PERAZZINI, 2014). Como consequência, as taxas de secagem apresentadas pela Figura 51 aumentam com o aumento da temperatura de operação.

**Figura 51** – Taxa de secagem em função da umidade em base seca, para as temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C, velocidade do ar de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

Perazzini (2014) também observou a influência da temperatura na secagem em camada fina de partículas de alumina com diâmetro de 2,8 mm à 40 °C e 70 °C e velocidade do ar de 0,5 e  $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Como resultado, a influência da velocidade do ar de secagem foi mais significativa do que a temperatura do processo. Evidenciando a presença do mecanismo de transferência de massa convectivo de forma mais expressiva para a menor velocidade.

O período de taxa constante não foi identificado para a velocidade de secagem de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , nas temperaturas avaliadas, apresentadas na Figura 51. Este resultado indica que a

camada limite de transferência de massa não exerceu influência significativa, ou seja, o coeficiente de transferência de massa convectivo foi grande o suficiente para que a resistência interna de transferência de massa controlasse o processo. Perazzini (2014) observou estes mesmos resultados para a secagem de alumina na velocidade do ar de  $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

#### 4.4.2 Modelos empíricos e semi-empíricos de secagem em camada fina

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos empíricos e semi-empíricos aos dados de cinética de secagem em camada fina, para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Tabela 3** – Parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos empíricos e semi-empíricos aos dados médios de secagem em camada fina ( $U= 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ).

Temperatura	Lewis	Page	Overhults	Henderson e Pabis
40 °C	$k = 7,458 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ $R^2=0,997$ $\chi^2 = 2,199 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,015$ $E\% = 40,354$	$k = 9,063 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-n}$ $n = 0,925$ $R^2 = 0,998$ $\chi^2 = 1,342 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,011$ $E\% = 26,236$	$k=7,462 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ $n=0,925$ $R^2=0,998$ $\chi^2 = 1,342 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,011$ $E\% = 26,260$	$k=7,370 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ $A=0,990$ $R^2=0,997$ $\chi^2 = 2,138 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,014$ $E\% = 39,569$
50 °C	$k=9,405 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ $R^2=0,996$ $\chi^2 = 2,793 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,016$ $E\% = 51,688$	$k=1,171 \cdot 10^{-1} \text{ min}^{-n}$ $n=0,909$ $R^2=0,997$ $\chi^2 = 1,779 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,013$ $E\% = 43,267$	$k=9,454 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ $n=0,909$ $R^2=0,997$ $\chi^2 = 1,778 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,013$ $E\% = 43,275$	$k=9,263 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ $A=0,987$ $R^2=0,996$ $\chi^2 = 2,694 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,016$ $E\% = 51,095$
60 °C	$k=1,121 \cdot 10^{-1} \text{ min}^{-1}$ $R^2=0,996$ $\chi^2 = 2,199 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,015$ $E\% = 40,354$	$k=1,312 \cdot 10^{-1} \text{ min}^{-n}$ $n=0,931$ $R^2=0,997$ $\chi^2 = 1,975 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,014$ $E\% = 51,567$	$k=1,129 \cdot 10^{-1} \text{ min}^{-1}$ $n=0,931$ $R^2=0,997$ $\chi^2 = 1,778 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,013$ $E\% = 51,589$	$k=1,114 \cdot 10^{-1} \text{ min}^{-1}$ $A=0,994$ $R^2=0,996$ $\chi^2 = 2,466 \cdot 10^{-4}$ $REQM = 0,015$ $E\% = 56,175$

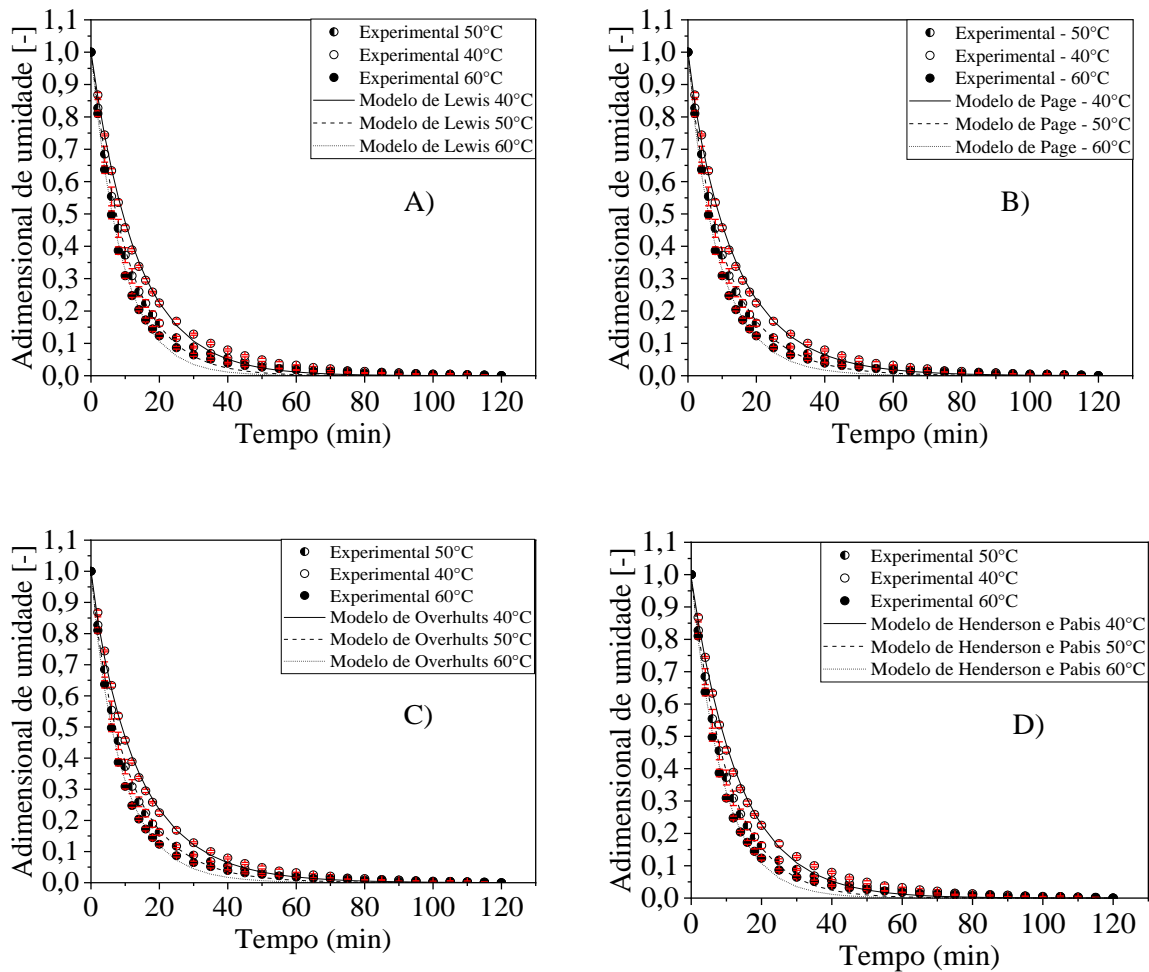
Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo os critérios dos parâmetros estatísticos, melhor é o ajuste para o maior valor do  $R^2$ , e menores os valores de  $\chi^2$ , REQM e E%. Comparando os resultados das estimativas frente aos dados experimentais, observa-se o bom desempenho dos modelos para as condições experimentais avaliadas. Com coeficientes de determinação acima de 0,99, baixos valores de  $\chi^2$  e de REQM. Além disso, observa-se que os modelos de Page e de Overhults (também chamado na literatura de modelo de Page Modificado) apresentaram os mesmos valores de  $R^2$ ,

$\chi^2$ , REQM e do parâmetro de ajuste  $n$  para cada temperatura de secagem. Albini (2015) e Vieira (2012) observaram estes mesmos resultados no ajuste de dados cinéticos da secagem de grãos de cevada e de linhaça. Segundo estes autores, a igualdade é esperada uma vez que o rearranjo das equações e a parametrização permitem verificar que as equações são equivalentes.

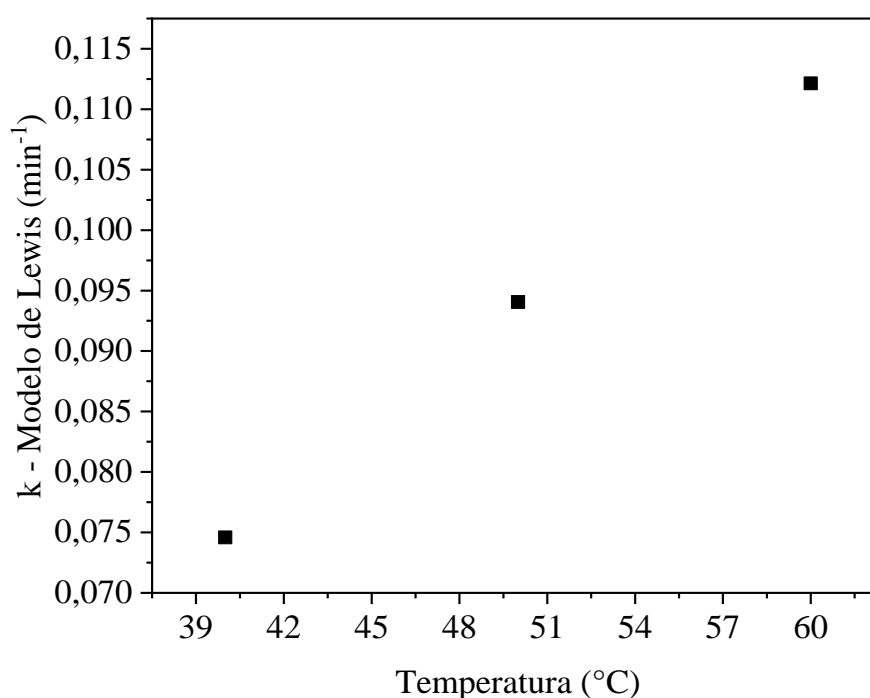
Na Figura 52 estão apresentados os valores preditos pelos modelos e os dados experimentais de cinética de secagem. O modelo de Lewis, que apresenta um único parâmetro de ajuste, superestimou a redução do adimensional de umidade entre os tempos de 10 e 40 minutos de secagem. Entretanto, este modelo apresenta boa representação da cinética de secagem em camada fina para a alumina, e baixa complexidade quando comparado ao modelo difusivo com condição de contorno convectiva, cujas estimativas serão apresentadas no próximo item. Com este resultado, pode-se avaliar a constante de secagem do modelo de Lewis em função da temperatura do processo.

**Figura 52** – Umidade adimensional em função do tempo, predita pelos modelos empíricos e semi-empíricos aos dados médios de secagem em camada fina, para a velocidade do ar de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ . A) Modelo de Lewis, B) Modelo de Page, C) Modelo de Overhults, D) Modelo de Henderson e Pabis.



Pelos dados da Tabela 3 que são apresentados graficamente na Figura 53, observa-se a tendência linear do aumento de  $k$  com a temperatura. Os valores dos parâmetros obtidos a partir da linearização da correlação de Arrhenius (Equação 9) para  $k_0$ ,  $E_a/R$  e do  $R^2$  foram de  $1,124 \text{ s}^{-1}$ ,  $2129,529 \text{ K}$  e  $0,996$ , respectivamente.

**Figura 53** – Constantes de secagem em função da temperatura, obtidas a partir do ajuste do Modelo de Lewis (1921) aos dados experimentais de secagem em camada fina ( $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.3 Modelo difusivo com condição de contorno convectiva

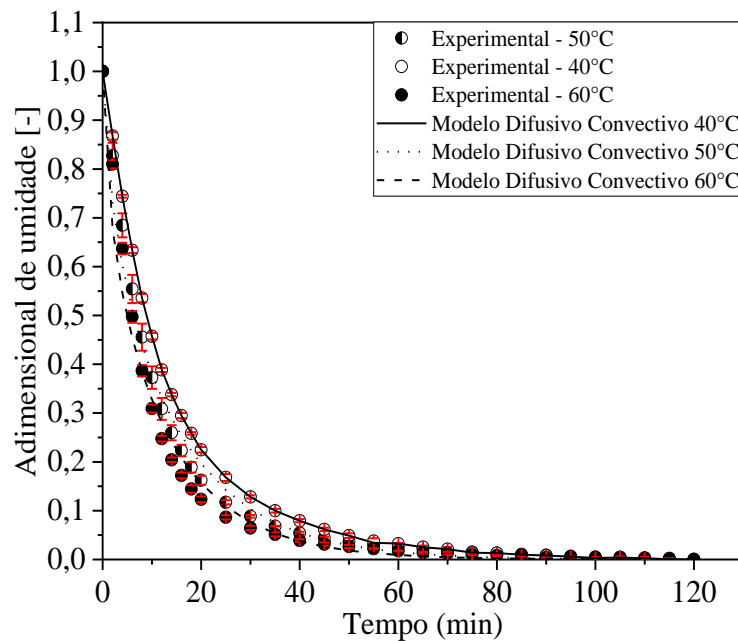
Na Figura 54 são apresentadas as estimativas do modelo difusivo com condição de contorno convectiva, para o adimensional de umidade em função do tempo de secagem. Os parâmetros de ajuste do modelo ( $Bi_m$ ,  $D_{ef}$ ), o coeficiente de transferência de massa externo  $K_{tm}$ , e o erro relativo absoluto médio percentual dos ajustes para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Parâmetros de ajuste e estatísticos do modelo difusivo com condição de contorno convectiva, aos dados experimentais de cinética de secagem em camada fina ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 40, 50$  e  $60$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).

Parâmetro	40 °C	50 °C	60 °C
$Bi_m$ (-)	24,860	19,950	39,940
$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$2,256 \cdot 10^{-10}$	$3,031 \cdot 10^{-10}$	$3,264 \cdot 10^{-10}$
$K_{tm}$ (m·s <sup>-1</sup> )	$3,505 \cdot 10^{-6}$	$3,779 \cdot 10^{-6}$	$8,1485 \cdot 10^{-6}$
E%	4,503%	5,871%	7,397%

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 54** – Umidade adimensional em função do tempo, predita pelo modelo Difusivo com condição de contorno convectiva.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando os valores preditos, observa-se o bom desempenho do modelo difusivo com condição de contorno convectiva utilizando 100 termos da série, com erros relativos absolutos médios percentuais de 4,503, 5,871 e 7,397 %. O número de Biot mássico para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C foi de 24,860, 19,950 e 39,940, respectivamente. Ressalta-se que  $Bi_m$  representa a razão entre a resistência interna e a resistência externa à transferência de massa. De acordo com Strumillo e Kudra (1986) para  $0,2 < Bi_m < 50$ , faixa numérica em que se encontram os valores de Biot obtidos a partir do ajuste do modelo, as resistências internas e externas são da mesma ordem de grandeza, indicando que os efeitos de resistência à transferência de massa por difusão intrapartícula e da camada limite na superfície são importantes no processo. Perazzini (2014) avaliou o modelo difusivo com condição de contorno

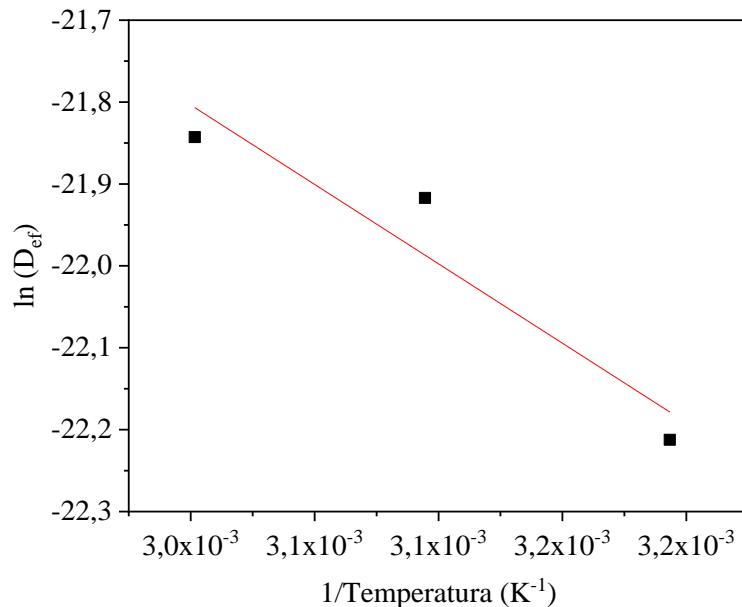


convectiva na secagem de partículas de alumina em camada fina, aplicado à geometria de uma placa plana, não utilizando a geometria esférica como a empregada neste trabalho. Para a maior velocidade de secagem avaliada ( $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), o autor obteve valores de  $Bi_m$  de aproximadamente 2, indicando que a difusão e a convecção foram importantes no processo. O autor relata que este resultado se mostrou surpreendente por se tratar da maior velocidade de ar utilizada, situação na qual a resistência externa pode ser desconsiderada.

Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam a tendência do aumento da difusividade mássica efetiva com o aumento da temperatura do processo. A partir deste resultado, foi avaliada a dependência deste parâmetro com a temperatura, utilizando uma correlação do tipo Arrhenius, Equação 123, onde  $E_a$  é a energia de ativação,  $D_0$  a difusividade em uma temperatura infinitamente alta e  $R$  a constante dos gases ( $8,314 \text{ kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) (KASHANINEJAD *et al.*, 2007). A linearização da equação é apresentada na Figura 55, obtendo-se um valor de  $R^2$  de 0,904,  $E_a$  de  $16,122 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  e  $D_0$  de  $1,141\cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R T}\right) \quad (123)$$

**Figura 55** – Linearização da correlação de Arrhenius aos dados de  $D_{ef}$  e de temperatura em escala Kelvin.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar da dependência da  $D_{ef}$  com a temperatura, observa-se pelo valor do  $R^2$ , que o ajuste linear não representou adequadamente a comportamento dos dados. Do ponto de vista

termodinâmico, a energia de ativação representa a barreira energética que necessita ser superada para que ocorra a difusão da umidade intrapartícula até a superfície do sólido (KASHANINEJAD *et al.*, 2007; ALBINI, 2015). Comparando o valor de  $E_a$  com os obtidos por Albin (2015) para a secagem de cevada em diferentes umidades iniciais (31,81 kJ·mol<sup>-1</sup>, 40,21 kJ·mol<sup>-1</sup> e 45,04 kJ·mol<sup>-1</sup>), Kashaninejad *et al.* (2007) para a secagem de pistache (30,79 kJ·mol<sup>-1</sup>), Bon *et al.* (1997) para a secagem de batatas (20,0 kJ·mol<sup>-1</sup>) e Tolaba *et al.* (1988) para a secagem de milho (27,61 kJ·mol<sup>-1</sup>), observa-se um menor valor da energia de ativação para a alumina. Este resultado indica uma maior facilidade da difusão da umidade neste material, quando comparado aos materiais biológicos tais como os grãos, cuja morfologia, presença de cascas e a própria natureza a ligação da umidade com a estrutura interna, podem possibilitar uma barreira maior para transferência de massa (ALTINO, 2019).

#### **4.5 Avaliação do modelo de duas fases para a secagem de esferas de alumina em leito fixo e camada espessa**

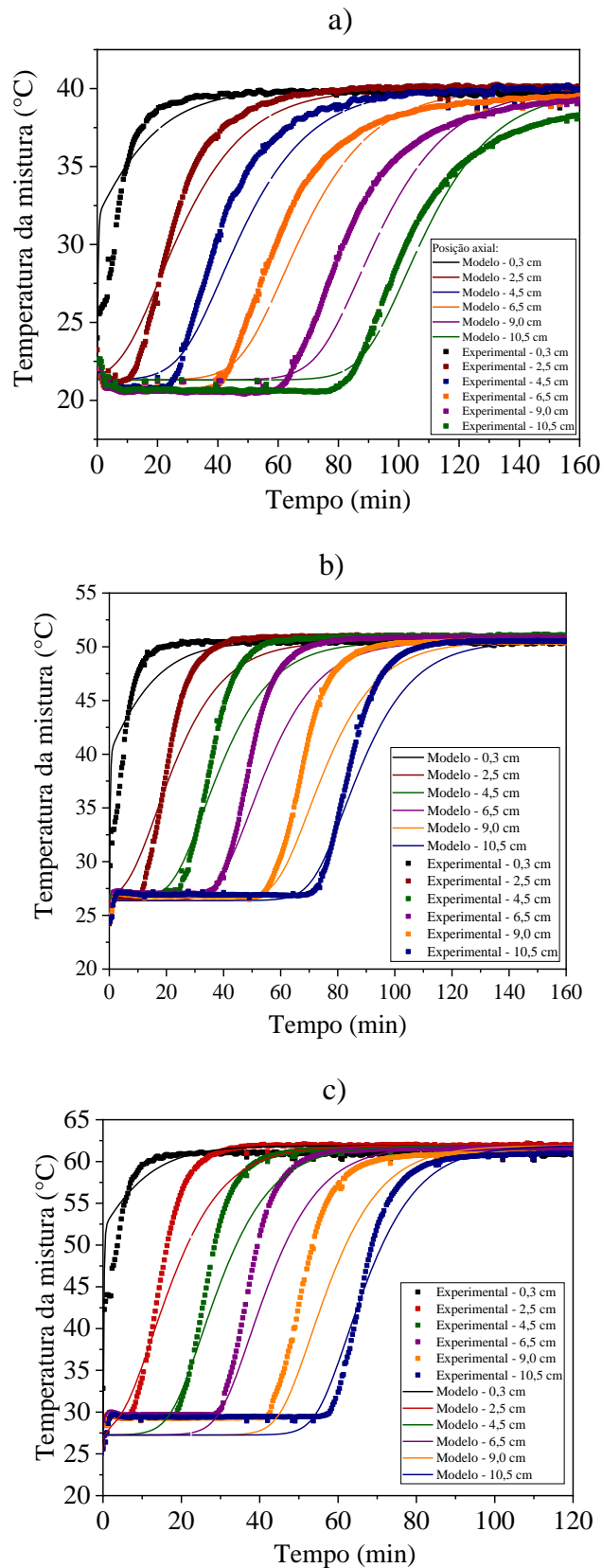
Os resultados do desempenho do modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) é apresentado primeiro para a secagem da alumina em camada espessa com escoamento ascendente de ar no item 4.5.1 e no item 4.5.2 o modelo é avaliado para a secagem com reversão do sentido do escoamento de ar.

##### **4.5.1 Modelo de duas fases aplicado a secagem de alumina com escoamento ascendente de ar**

Os resultados experimentais e os obtidos a partir da simulação do comportamento térmico do leito durante a secagem à 40 °C, 50 °C e 60 °C e velocidade do ar de 2,7 m·s<sup>-1</sup> utilizando Massarani e Silva Telles (1992), são apresentados na Figura 56.

Avaliando a Figura 56, observa-se que as simulações conseguiram prever o comportamento qualitativo da temperatura da mistura em função do tempo para as diferentes posições axiais, com o aquecimento do leito ocorrendo em camadas. Os dois estágios de temperatura experimentais discutidos no item 4.2.1 foram reproduzidos pelas simulações, apesar do valor da temperatura do primeiro estágio apresentar desvios do valor experimental principalmente para as temperaturas de alimentação do ar de 40 °C e 60 °C. Além disso, observa-se que o modelo subestimou as temperaturas de cada posição nas regiões próximas ao equilíbrio térmico para as três temperaturas avaliadas.

**Figura 56** – Temperatura da mistura experimental média e predita pelo modelo de duas fases em função do tempo, para a secagem de alumina em leito fixo sem reversão do sentido do escoamento em diferentes posições axiais ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{mm}$  e  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a)  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; b)  $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; c)  $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 5 são apresentados os erros relativos absolutos médios percentuais entre as temperaturas simuladas e as previstas pelo modelo, os valores obtidos variaram entre 1,39 % e 6,59 %.

**Tabela 5** - Erros relativos absolutos médios percentuais entre as temperaturas médias experimentais e as previstas pelo modelo de duas fases ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 40, 50$  e  $60$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).

Posição axial (cm)	Erros relativos absolutos médios percentuais (E%)		
	T = 40 °C	T = 50 °C	T = 60 °C
0,3	1,70	1,39	2,06
2,5	2,01	3,06	2,88
4,5	2,50	2,95	3,39
6,5	3,00	3,14	4,99
9,0	4,09	3,07	6,59
10,5	3,11	2,64	4,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

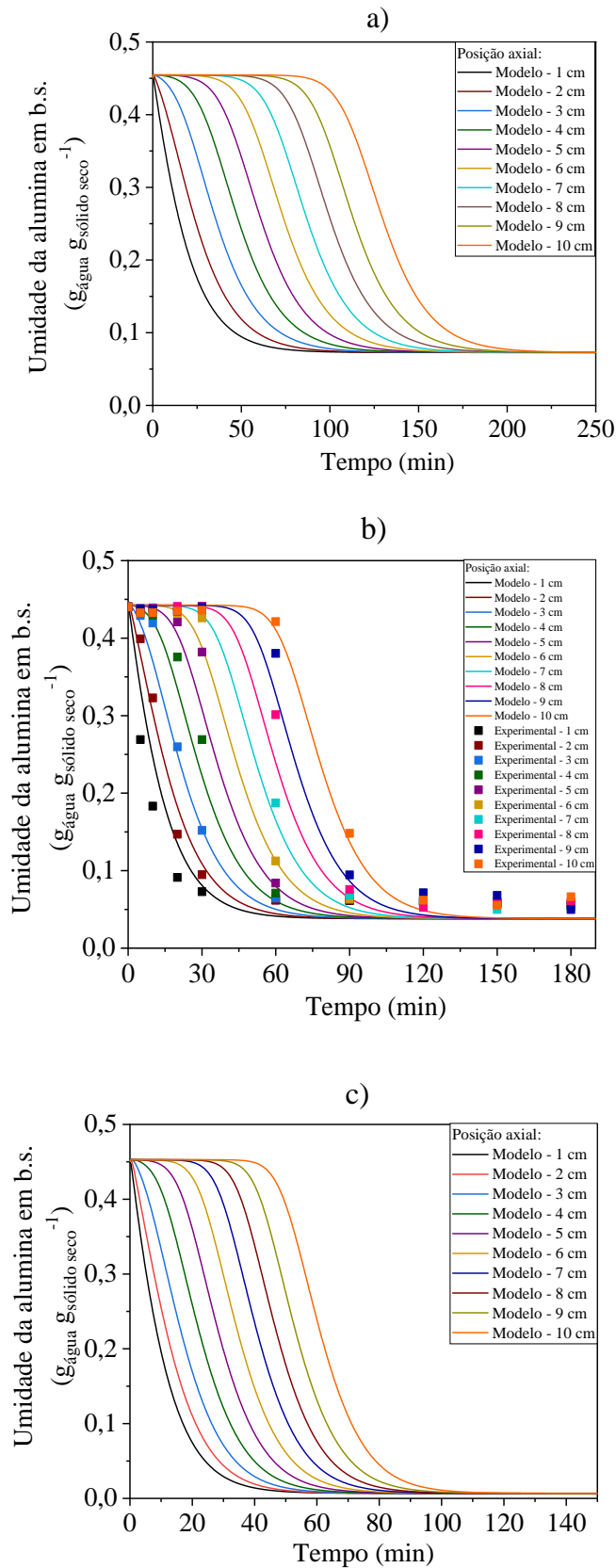
Destaca-se que a principal simplificação do modelo matemático utilizada para descrever a transferência de calor entre as fases durante a secagem, o equilíbrio térmico entre a fase sólida e fluida, se mostrou coerente para a simulação do processo. Desta forma, a comparação entre os resultados experimentais e os simulados foi facilitada, uma vez que existe uma dificuldade experimental em se obter a temperatura do sólido e do fluido separadamente no interior do leito.

As predições do modelo de duas fases para a umidade da alumina em função do tempo e da posição axial, para as temperaturas de secagem de 40 °C, 50 °C e 60 °C e velocidade do ar de 2,7 m·s<sup>-1</sup>, são apresentadas na Figura 57.

Observa-se que o comportamento da umidade do leito ao longo da secagem, Figura 57, é condizente com o esperado fisicamente para a secagem em leito fixo em camada espessa, com a formação de um leito heterogêneo e da frente de secagem ascendente. O modelo mostra o gradiente de umidade no leito para as três temperaturas avaliadas, sendo a região do leito próxima à exaustão do ar, posição axial de 10 cm, a última a atingir a umidade de equilíbrio dinâmico.

Para a comparação entre as predições e os resultados experimentais, foram utilizadas as médias dos resultados da secagem em leito fracionado à 50 °C e velocidade do ar de 2,7 m·s<sup>-1</sup>, apresentados na Figura 35. Pela Figura 57 – b), observa-se que o modelo conseguiu reproduzir a tendência experimental da redução da umidade em cada camada.

**Figura 57** – Umidade média em base seca e predita pelo modelo de duas fases em função do tempo (a, b, c) e experimental (b), para a secagem de alumina em leito fixo sem reversão do sentido do escoamento em diferentes posições axiais ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm e  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>): a) T = 40 °C; b) T = 50 °C; c) T = 60 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 6 são apresentados os erros relativos absolutos médios percentuais de cada posição axial, com valores na faixa de 11,33 a 28,9 %. Verifica-se que os maiores erros foram os obtidos para as posições axiais próximas a região de alimentação do ar de secagem de 1 a 4 cm. Entre os fatores que podem estar associados na obtenção de maiores erros na simulação da transferência de massa entre as fases fluida e sólida descrita pelo modelo de duas fases, pode-se destacar a utilização da equação de taxa de secagem em camada fina, Equação 90, e a umidade de equilíbrio estimada por equações da literatura. Inclusive observa-se que para a temperatura de 50 °C, a umidade de equilíbrio dinâmico estimada pelo modelo foi inferior à obtida experimentalmente.

**Tabela 6** - Erros relativos absolutos médios percentuais entre a umidade média experimental e a predita pelo modelo de duas fases para diferentes posições axiais do leito de secagem ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T = 50$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>).

Posição axial (cm)	Erros relativos absolutos médios percentuais (E%)
1	28,94
2	21,84
3	18,37
4	18,98
5	17,13
6	14,97
7	14,06
8	13,46
9	13,76
10	11,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

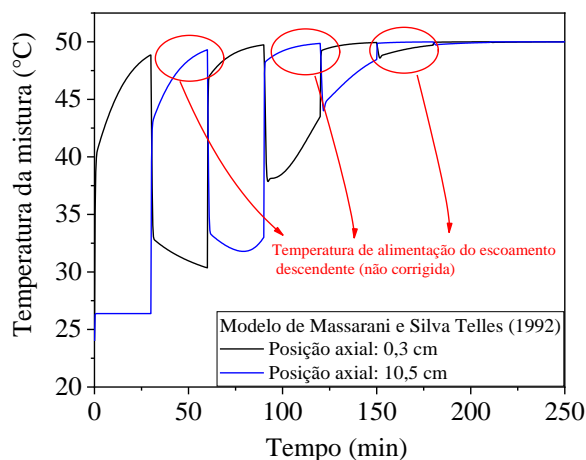
Além disso, não foram consideradas na modelagem do sistema a possibilidade da existência do fenômeno de capilaridade citado Calçada *et al.* (1994) e a condensação do vapor d'água que originou o modelo de três fases empregado por Calçada *et al.* (2002) na simulação da secagem de alumina e por Sun *et al.* (1995) e na simulação da secagem de grãos. Logo, estes fenômenos podem estar relacionados aos desvios entre as predições do modelo e os resultados experimentais.

De forma geral, apesar dos erros relativos absolutos médios percentuais obtidos para a simulação da umidade do material serem superiores aos de temperatura, o modelo conseguiu descrever o comportamento experimental, podendo ser utilizado para a simulação do processo de secagem em camada espessa com escoamento do ar ascendente. A partir deste resultado, no próximo item é avaliada a capacidade do modelo de duas fases na estimativa da secagem da alumina com a aplicação da reversão do sentido do escoamento do ar.

#### 4.5.2 Modelo de duas fases aplicado a secagem de alumina com reversão do sentido do escoamento de ar

As primeiras simulações da secagem utilizando o modelo de Massarani e Silva Telles (1992) aplicado à reversão, mostraram a necessidade da adequação da temperatura de alimentação superior do secador. Conforme observado experimentalmente e apresentado pela Figura 27, observa-se que as temperaturas de alimentação do ar de secagem no escoamento ascendente e descendente são diferentes. Dessa forma, as simulações para o processo com reversão foram realizadas com temperaturas de alimentação superior ( $T_{\text{ascendente}}$ ) e inferior ( $T_{\text{descendente}}$ ) distintas. Na Figura 58 são apresentados os valores de temperatura da mistura em função tempo para as posições axiais de 0,3 e 10,5 cm, estimados pelo modelo sem a correção da temperatura, essa simulação ilustra a operação utilizando um equipamento idealizado.

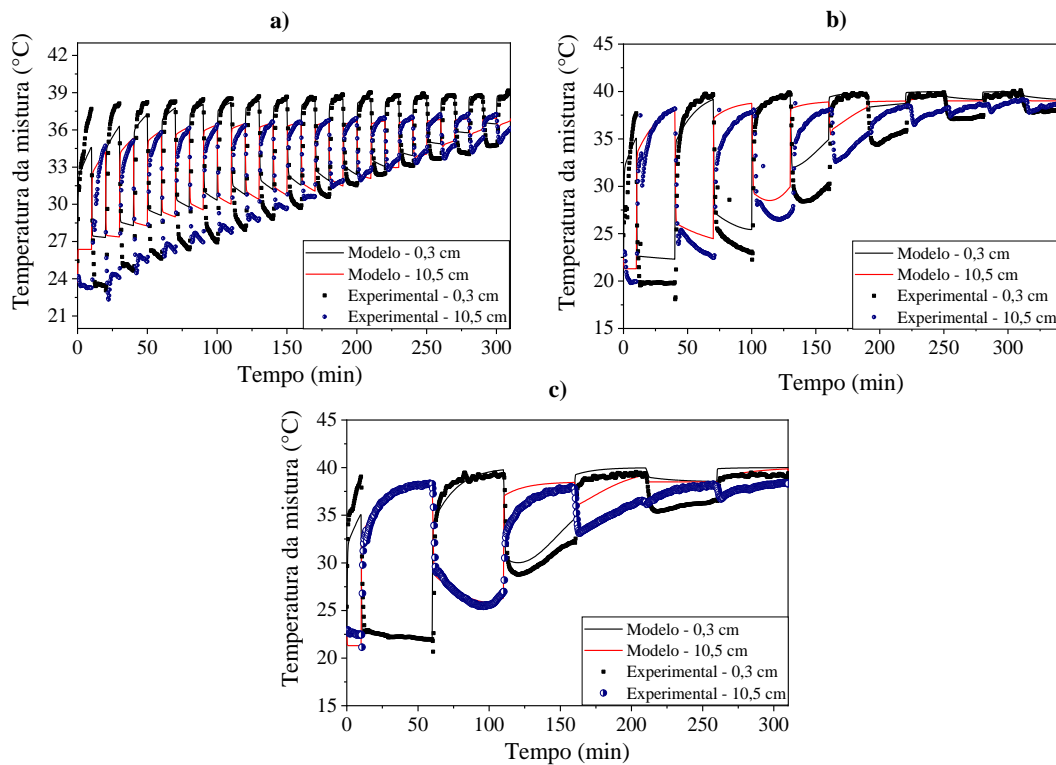
**Figura 58** - Simulação dos valores de temperatura em função do tempo para as posições axiais de 0,3 e 10,5 cm utilizando o modelo de duas fases aplicado para a reversão do ar ( $T_{\text{ascendente}} = T_{\text{descendente}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 30\text{ min}$ ;  $\Delta t = 30\text{ min}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

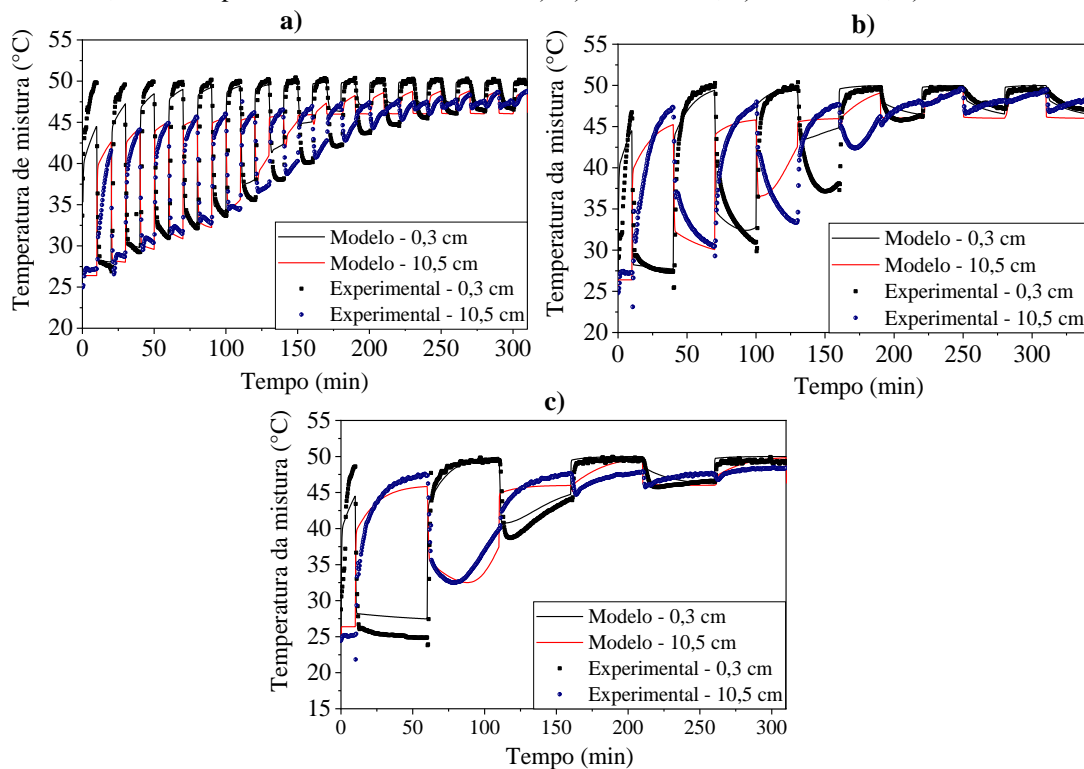
Na Figura 59, Figura 60 e Figura 61 são apresentados os gráficos de temperatura da mistura experimental e predita pelo modelo de duas fases, para a secagem com reversão e temperatura ascendente do ar de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. As respostas obtidas pelo modelo foram avaliadas para a reversão do ar aplicada em  $t_0$  de 10 min e  $\Delta t$  de 10, 30 e 50 min, para as três condições de secagem utilizadas. Nestes gráficos as simulações foram apresentadas para as posições axiais de 0,3 cm e 10,5 cm de forma a facilitar a visualização do comportamento térmico. Além disso, pode-se observar que a correção da temperatura descendente do ar se mostrou coerente com os resultados experimentais.

**Figura 59** – Temperatura da mistura experimental e estimada pelo modelo de duas fases para a secagem da alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ( $T_{\text{ascendente}} = 40\text{ °C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5\text{ °C}$ ,  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

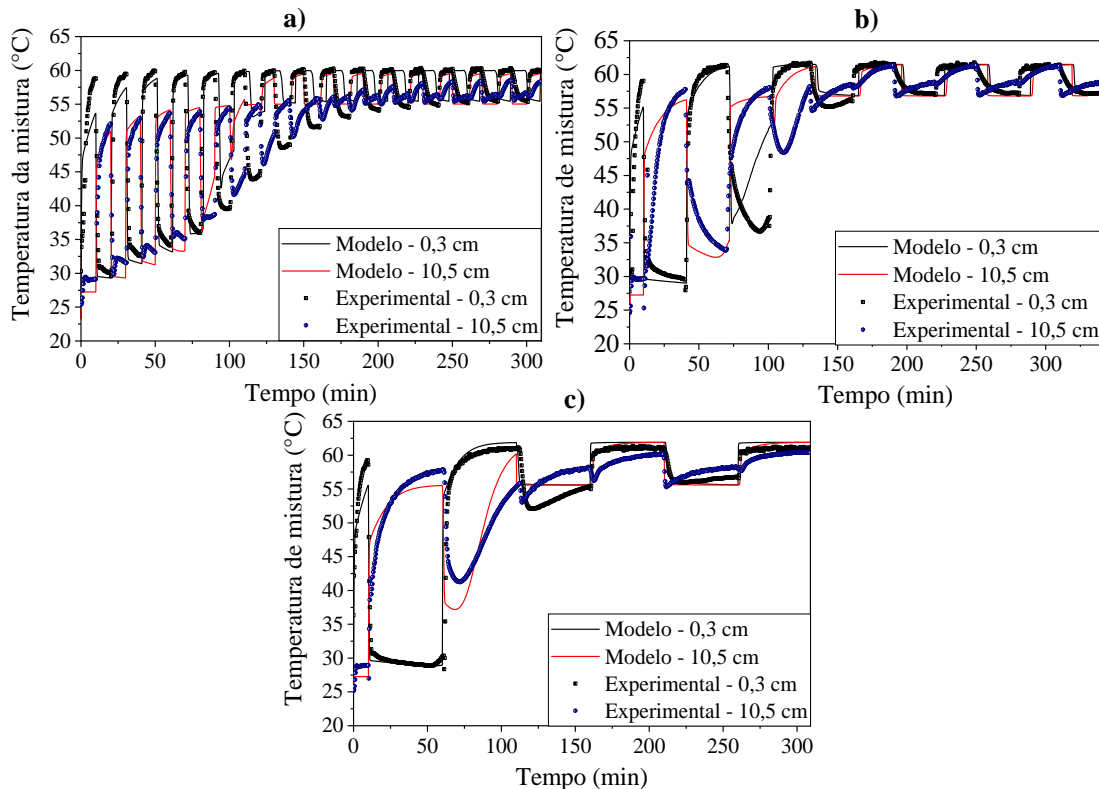
**Figura 60** - Temperatura da mistura experimental e estimada pelo modelo de duas fases para a secagem com reversão do sentido do escoamento do ar ( $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ °C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ °C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.



**Figura 61** - Temperatura da mistura experimental e estimada pelo modelo de duas fases para a secagem com reversão do sentido do escoamento do ar ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de duas fases conseguiu prever adequadamente o comportamento térmico qualitativo do leito durante a secagem com a aplicação da reversão. Pode-se observar que os gradientes de temperatura foram reproduzidos nas simulações para os três intervalos de duração de 10, 30 e 50 minutos. Os erros relativos absolutos médios percentuais apresentados no Quadro 8, para as diferentes posições axiais e condições de secagem, variaram de 2,38 a 11,87 %. A condição com os menores erros foi a secagem a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $\Delta t$  de 50 min, e os maiores erros foram obtidos na secagem a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $\Delta t$  de 10 min. Observa-se uma tendência na diminuição de E% com o aumento do  $\Delta t$  para todas as posições axiais e temperaturas de alimentação do ar, fator que pode estar relacionado ao menor número de perturbações no sistema. É importante observar que a reversão do sentido do escoamento durante os experimentos demanda do ajuste manual de válvulas conforme descrito no item 3.6.1. Por outro lado, as simulações são uma idealização das condições de operação, que não reproduzem os instantes de tempo necessários para reversão e estabilização do sistema.

**Quadro 8** - Erros relativos absolutos médios percentuais entre as temperaturas médias experimentais e as previstas pelo modelo de duas fases para a reversão ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>;  $t_0 = 10$  min).

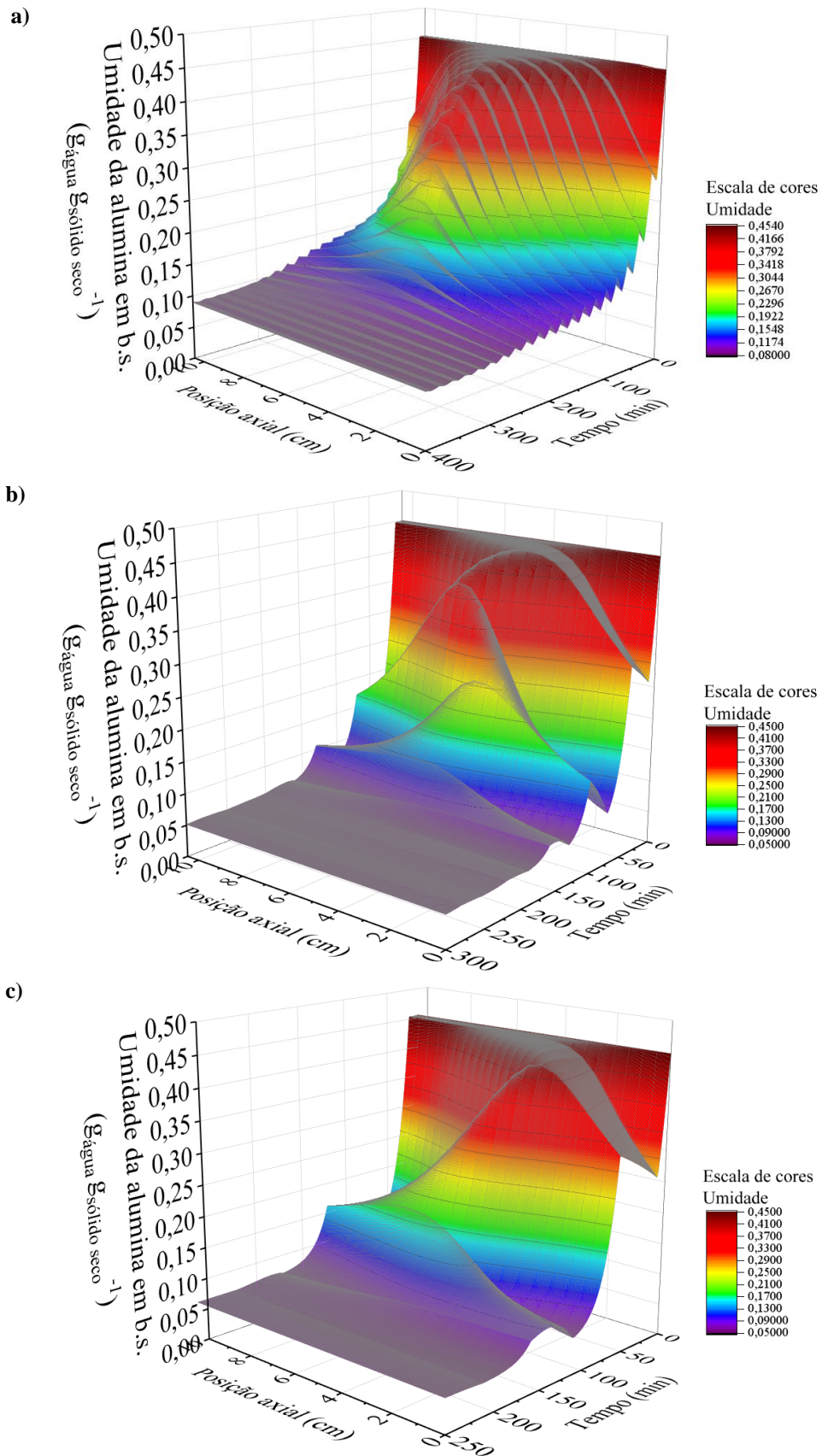
Condição de operação	Erros relativos absolutos médios percentuais (E%)					
	Posição 0,3 cm	Posição 2,5 cm	Posição 4,5 cm	Posição 6,5 cm	Posição 9,0 cm	Posição 10,5 cm
T <sub>ascendente</sub> =40°C $\Delta t = 10$ min	11,87	11,45	9,52	8,29	9,77	9,51
T <sub>ascendente</sub> =40°C $\Delta t = 30$ min	7,144	7,53	7,71	8,31	7,68	4,97
T <sub>ascendente</sub> =40°C $\Delta t = 50$ min	3,42	4,17	4,85	4,59	3,71	3,70
T <sub>ascendente</sub> =50°C $\Delta t = 10$ min	9,52	9,94	8,08	5,12	6,63	6,47
T <sub>ascendente</sub> =50°C $\Delta t = 30$ min	3,90	4,64	5,05	6,19	6,20	5,60
T <sub>ascendente</sub> =50°C $\Delta t = 50$ min	3,57	4,54	4,96	4,59	3,92	3,16
T <sub>ascendente</sub> =60°C $\Delta t = 10$ min	8,49	5,76	5,26	6,45	7,07	5,41
T <sub>ascendente</sub> =60°C $\Delta t = 30$ min	6,30	6,25	6,15	5,44	5,85	6,56
T <sub>ascendente</sub> =60°C $\Delta t = 50$ min	2,38	3,40	3,57	3,36	3,94	4,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo experimental da secagem da alumina, apresentado no item 4.2.3, mostrou que as regiões de maior umidade são deslocadas para diferentes posições axiais, de acordo com o  $t_0$  e  $\Delta t$  empregados. Para a análise da capacidade do modelo de duas fases na estimativa do comportamento do sistema, é importante que este descreva as diferentes frentes de secagem formadas ao longo do processo.

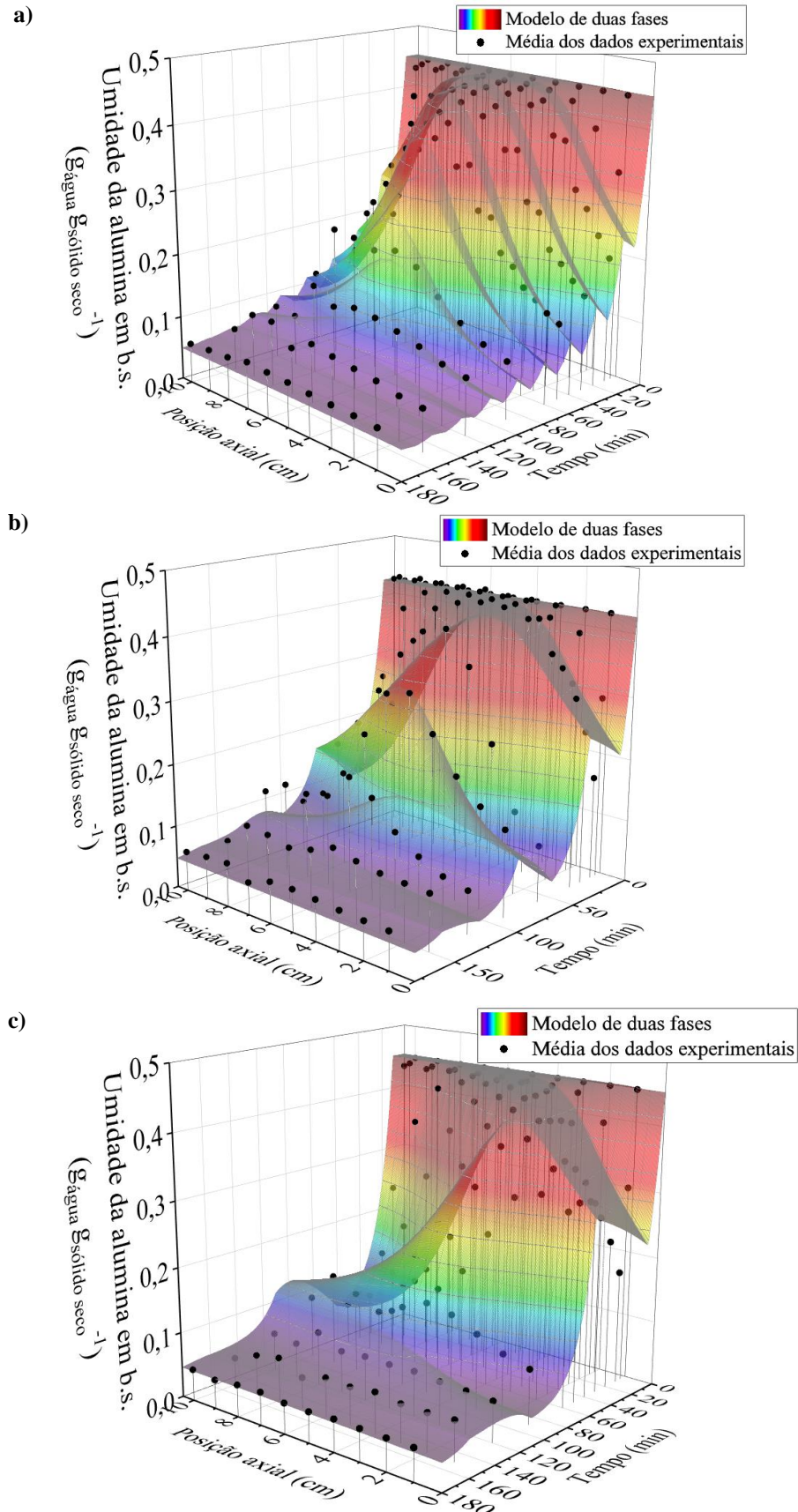
Na Figura 62, Figura 63 e Figura 64 são apresentados os gráficos de umidade da alumina em função da posição espacial e do tempo, obtidas a partir das respostas do modelo de duas fases. As simulações foram realizadas para as temperaturas ascendentes do ar de 40, 50 e 60 °C e velocidade de 2,7 m·s<sup>-1</sup>. Para cada temperatura de alimentação do ar, foram avaliadas as umidades para a reversão aplicada em  $t_0$  de 10 min e  $\Delta t$  de 10, 20 e 30 min.

**Figura 62** – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial  
 ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $t_0 = 10 \text{ min}$ ):  
 a)  $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50 \text{ min}$ .



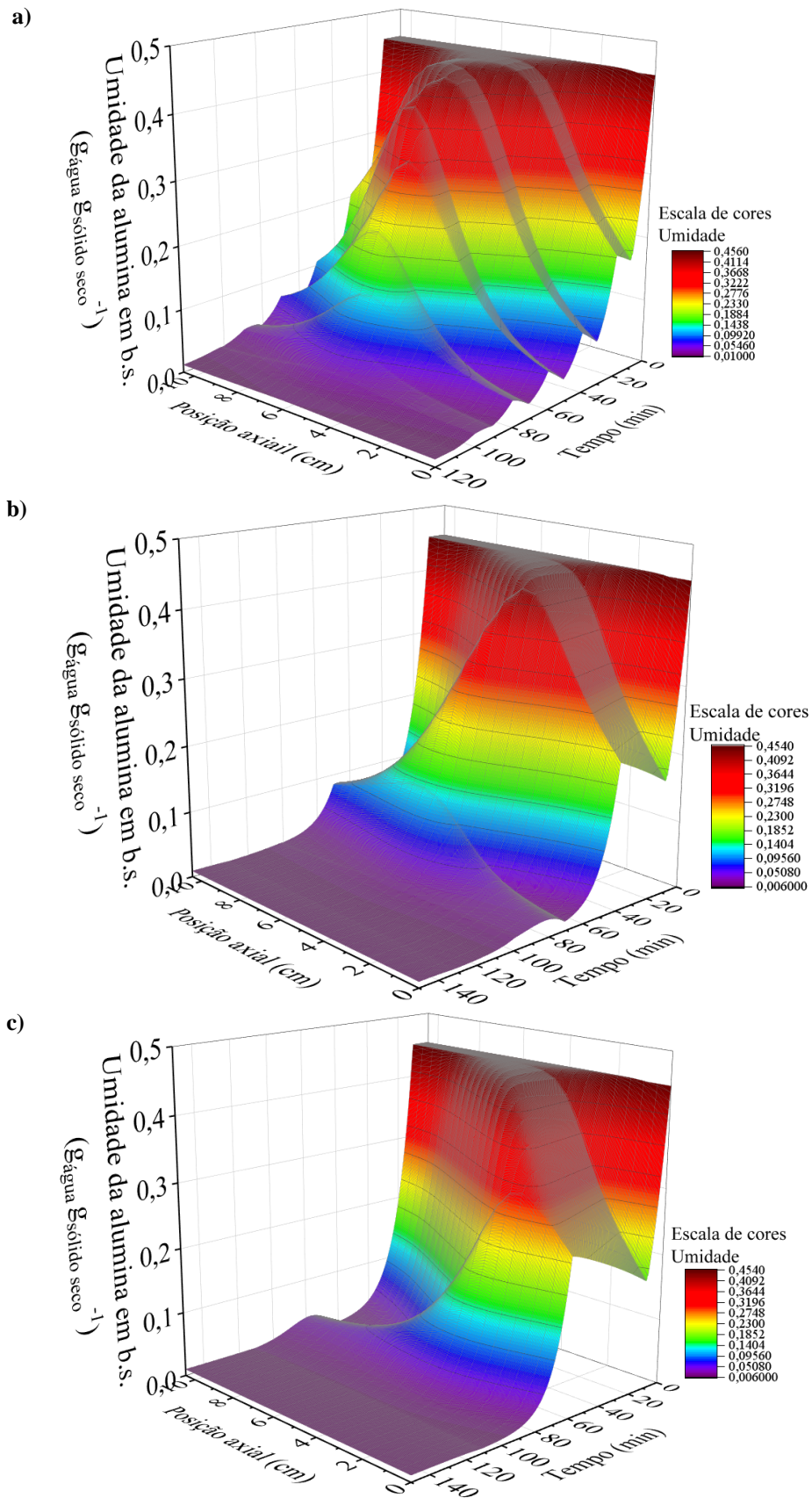
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 63** – Valores de umidade da alumina experimentais e estimados pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial ( $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $t_0 = 10\text{ min}$ ):  
 a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 64** – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $t_0 = 10\text{ min}$ ):  
a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelos gráficos gerados a partir das simulações, Figura 62, Figura 63 e Figura 64, verifica-se que o modelo descreveu o comportamento qualitativo da umidade do material durante a secagem. O efeito do  $\Delta t$  na homogeneidade da umidade do leito pode ser observado nos gráficos, com a redução gradientes de umidade. O  $\Delta t$  de 10 minutos, Figura 62 - a), Figura 63 - a) e Figura 64 - a), deslocou a região de maior umidade para a região central. Para o  $\Delta t$  de 30 minutos, Figura 62 - b), Figura 63 - b) e Figura 64 - b), a maior umidade também foi deslocada para o centro do secador, mas com maiores variações quando comparadas as reversões com  $\Delta t$  de 10 minutos. Com o  $\Delta t$  de 50 minutos, Figura 62 - c), Figura 63 - c) e Figura 64 - c), a região de alimentação inferior do ar (posição de 1 a 4 cm) concentrou a maior umidade do leito.

Na Figura 63 são apresentados os gráficos de umidade média experimental e as preditas pelo modelo para a temperatura ascendente do ar de 50 °C. Verifica-se que existe uma concordância entre o comportamento qualitativo da umidade experimental e a simulada, para os  $\Delta t$  de 10, 30 e 50 minutos. Também, é possível observar que embora ocorra a superestimativa ou subestimativa da umidade da alumina em algumas posições e tempos de operação, o modelo de duas fases conseguiu reproduzir qualitativamente o ganho de umidade do material observado experimentalmente e discutido no item 4.2.3.

Os erros relativos absolutos médios percentuais entre os dados experimentais e os simulados da Figura 63, são apresentados na Tabela 7. Para o  $\Delta t$  de 10 minutos, o E% variou de 7,66 % a 14,54 %, para o  $\Delta t$  de 30 e 50 minutos foram obtidos erros relativos absolutos médios percentuais de 11,80 a 19,40 % e de 15,96 a 33,18 %, respectivamente. Assim como na secagem sem reversão do sentido do escoamento, item 4.5.1, os valores de E% entre as predições da umidade foram maiores do que os de temperatura da mistura. Entre os fatores que podem estar relacionados aos desvios, pode-se destacar que além da existência dos possíveis fenômenos de capilaridade e de condensação do vapor de água comentados anteriormente, existe o ganho de umidade do material durante o processo com a reversão. Para o ganho de umidade, as isotermas de adsorção são utilizadas para a estimativa da umidade de equilíbrio, e que não foram empregadas na modelagem matemática neste trabalho. Além disso, a equação de taxa de secagem de camada fina, que representa o termo de transferência de massa entre as fases foi a mesma empregada tanto na secagem com como na secagem sem reversão do sentido do escoamento. Com a existência do ganho e perda de umidade durante o processo, existe a possibilidade desta equação não descrever adequadamente os dois fenômenos.

**Tabela 7** - Erros relativos absolutos médios percentuais entre as umidades médias experimentais e as previstas pelo modelo de duas fases ( $D_p = 3,2 \pm 0,2$  mm;  $T_{\text{ascendente}} = 50$  °C;  $U = 2,7$  m·s<sup>-1</sup>;  $t_0 = 10$  min).

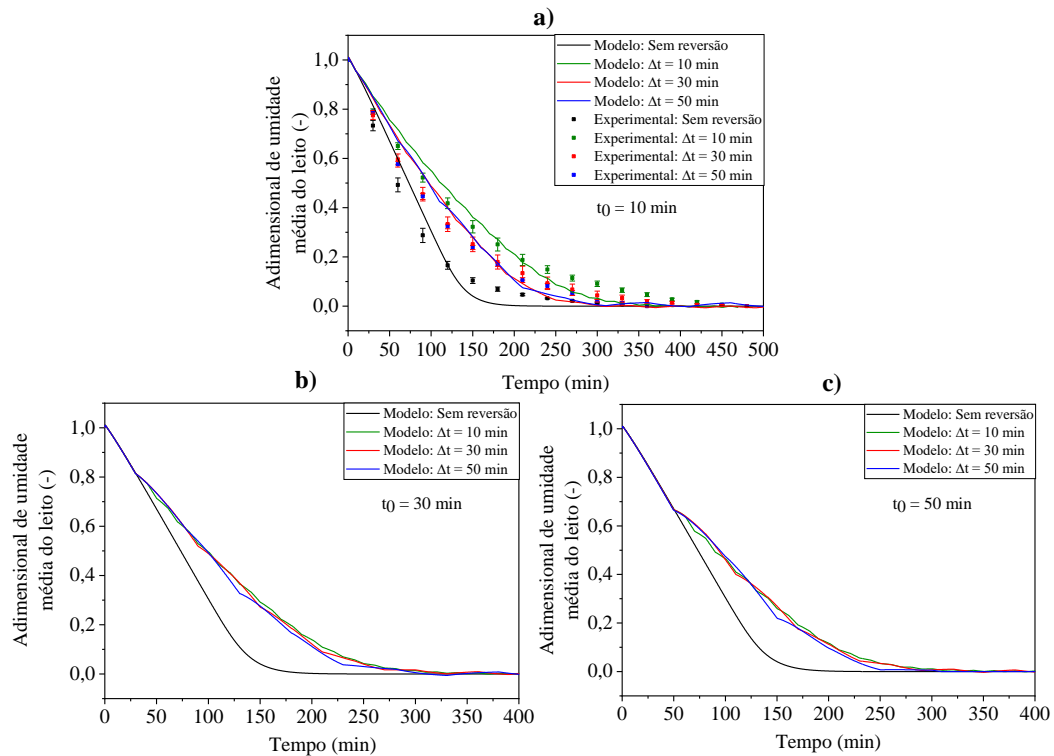
Posição axial (cm)	Erros relativos absolutos médios percentuais (E%)		
	$\Delta t = 10$ min	$\Delta t = 30$ min	$\Delta t = 50$ min
1	14,54	18,33	33,18
2	11,76	15,70	29,10
3	10,09	19,34	26,14
4	10,27	19,36	27,49
5	10,79	19,40	27,36
6	11,99	16,86	26,77
7	11,59	11,68	24,28
8	13,69	13,45	19,44
9	12,69	13,83	20,50
10	7,66	11,80	15,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de duas fases aplicado a reversão, possibilitou simular a secagem da alumina em diferentes condições de  $t_0$  e  $\Delta t$  e avaliar o efeito destes parâmetros na homogeneidade da umidade no leito. As simulações foram realizadas para as temperaturas ascendentes de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar de 2,7 m·s<sup>-1</sup>, utilizando  $t_0$  de 30 e 50 minutos e  $\Delta t$  de 10, 30 e 50 minutos. As respostas obtidas para a umidade da alumina e temperatura da mistura em função do tempo e da posição axial, são apresentadas graficamente no APÊNDICE C e no APÊNDICE D, respectivamente.

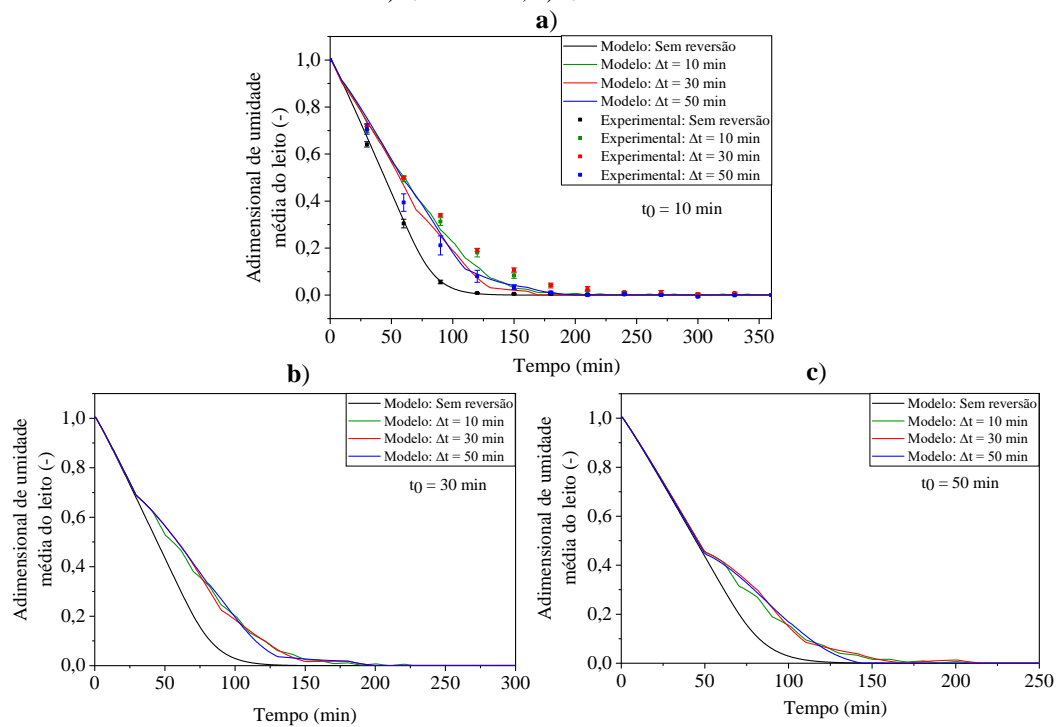
Na Figura 65, Figura 66 e Figura 67, são apresentados os gráficos de adimensional de umidade média do leito em função do tempo, para cada condição experimental utilizada nas simulações. O comportamento qualitativo descrito pelo adimensional de umidade médio em função do simulado, está coerente com o esperado fisicamente com o processo. Verifica-se que para todas as condições avaliadas de reversão, a umidade adimensional do leito tende ao equilíbrio em um tempo maior do que o processo de secagem com escoamento ascendente de ar. Por outro lado, observa-se um comportamento similar entre as curvas do adimensional de umidade para um mesmo  $t_0$  e  $\Delta t$  de 10, 30 e 50 minutos.

**Figura 65** – Adimensional de umidade média do leito em função do tempo, obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a)  $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b)  $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c)  $t_0 = 50 \text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

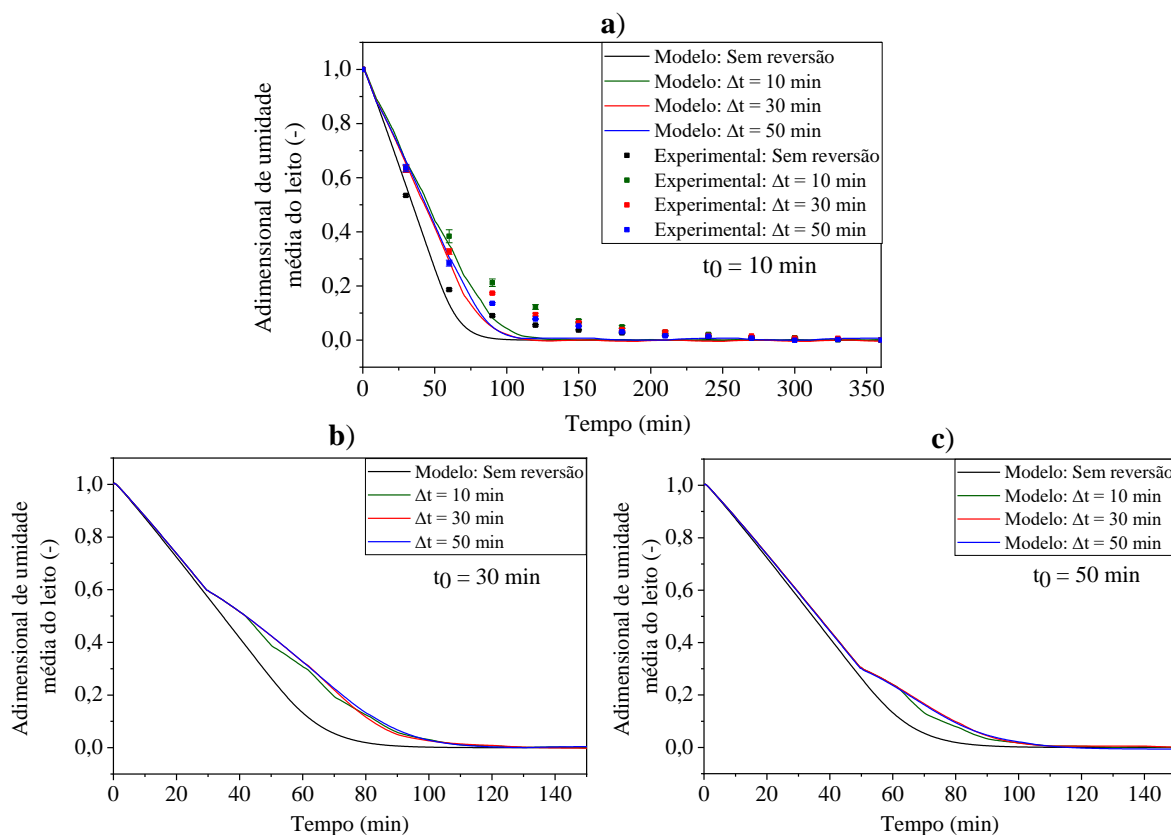
**Figura 66** - Adimensional de umidade média do leito em função do tempo, obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a)  $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b)  $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c)  $t_0 = 50 \text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.



**Figura 67** - Adimensional de umidade média do leito em função do tempo, obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a)  $t_0 = 10\text{ min}$ ; b)  $t_0 = 30\text{ min}$ ; c)  $t_0 = 50\text{ min}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 65 - a), Figura 66 - a) e Figura 67 - a), os valores experimentais de umidade média do leito podem ser comparados com os preditos pelo modelo de duas fases. Os erros relativos absolutos médios percentuais apresentados na Tabela 8 variaram entre 7,17 % a 76,37 %. Observa-se que para a temperatura de 60 °C foram obtidos os maiores valores de E%. Para a temperatura de 50 °C, sem a reversão do sentido do escoamento, foi obtido o menor valor do erro relativo absoluto médio percentual.

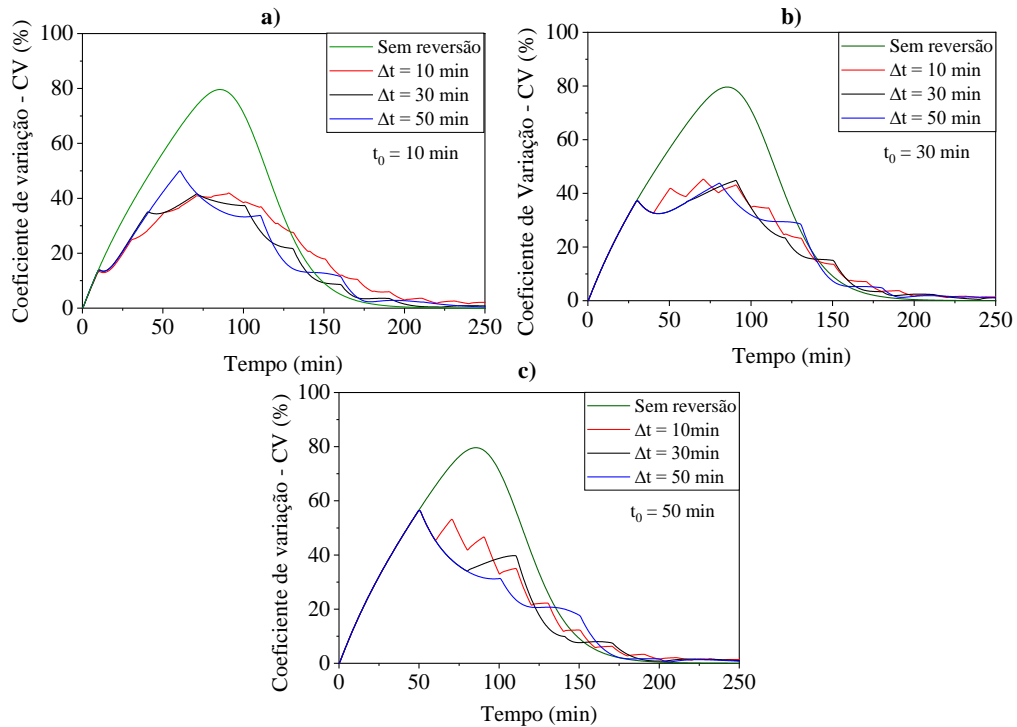
**Tabela 8** - Erros relativos absolutos médios percentuais entre o adimensional de umidade médio experimental e o predito pelo modelo de duas fases ( $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

$T_{\text{ascendente}}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	Erros relativos absolutos médios percentuais (E%)			
	Sem reversão	$t_0 = 10\text{ min}$ $\Delta t = 10\text{ min}$	$t_0 = 10\text{ min}$ $\Delta t = 30\text{ min}$	$t_0 = 10\text{ min}$ $\Delta t = 50\text{ min}$
40	54,61	35,10	31,71	25,73
50	7,17	33,14	41,17	38,17
60	76,37	48,51	47,46	50,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as predições da umidade transiente da alumina para cada ponto do espaço discretizado, foram determinados os coeficientes de variação de umidade (CV) em função do tempo apresentados na Figura 68, Figura 69, Figura 70.

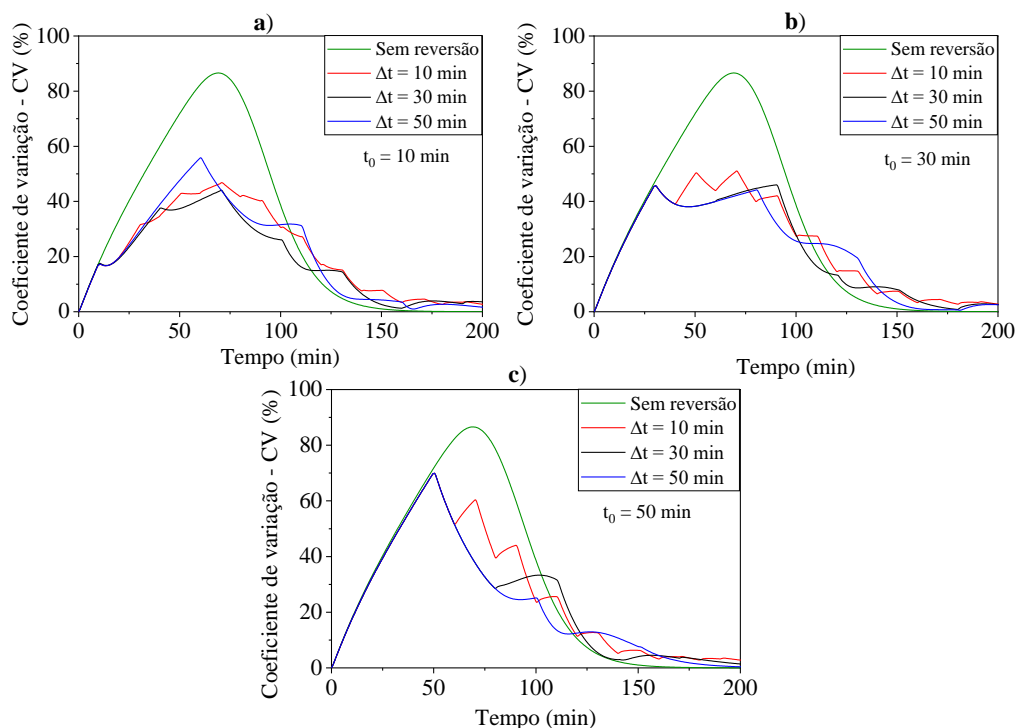
**Figura 68** - Coeficientes de variação de umidade em função do tempo obtidos a partir das simulações da secagem da alumina utilizando o modelo de duas fases ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a)  $t_0 = 10 \text{ min}$ ; b)  $t_0 = 30 \text{ min}$ ; c)  $t_0 = 50 \text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

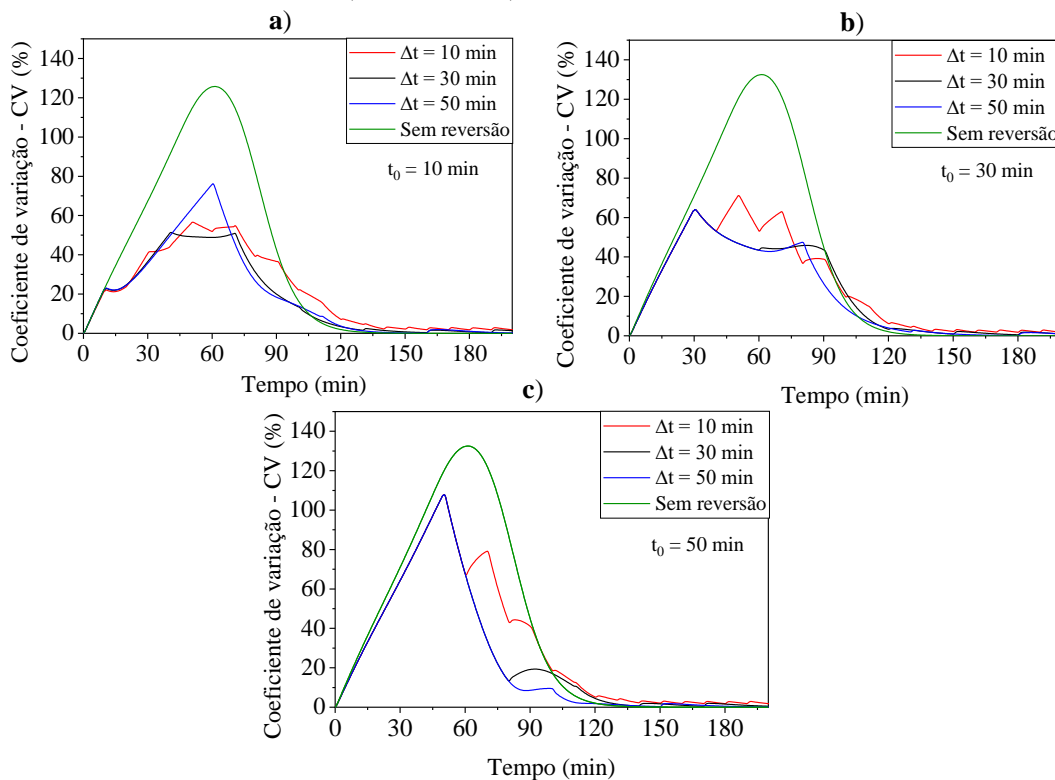
Este coeficiente, CV, está relacionado a homogeneidade da umidade no leito. Para todas as condições avaliadas, observa-se que a aplicação da reversão proporcionou um menor CV quando comparado a secagem com escoamento ascendente de ar, indicando um leito mais homogêneo. Por outro lado, o comportamento não suavizado das superfícies respostas de umidade em função do tempo e da posição axial, torna difícil a identificação utilizando o CV da melhor condição de reversão relacionada ao leito mais homogêneo em umidade. Para a condição de  $t_0$  de 10 min (Figura 68 - a, Figura 69 - a, Figura 70 - a) observa-se uma leve tendência de uma maior heterogeneidade do leito no tempo de secagem próximo aos 60 minutos para  $\Delta t$  de 50 min. Para  $t_0$  de 30 min (Figura 68 - b, Figura 69 - b, Figura 70 - b) os valores de  $\Delta t$  avaliados forneceram CV similares ao longo da secagem. A condição de  $t_0$  de 50 min (Figura 68 - c, Figura 69 - c, Figura 70 - c) mostra que para os instantes iniciais de secagem a heterogeneidade da umidade segue o comportamento da secagem ascendente, e após a aplicação da primeira reversão o  $\Delta t$  de 30 minutos tende a fornecer um leito mais homogêneo.

**Figura 69** – Coeficientes de variação de umidade em função do tempo obtidos a partir das simulações da secagem da alumina utilizando o modelo de duas fases ( $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a)  $t_0 = 10\text{ min}$ ; b)  $t_0 = 30\text{ min}$ ; c)  $t_0 = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 70** – Coeficientes de variação de umidade em função do tempo obtidos a partir das simulações da secagem da alumina ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $D_p = 3,2 \pm 0,2\text{ mm}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): a)  $t_0 = 10\text{ min}$ ; b)  $t_0 = 30\text{ min}$ ; c)  $t_0 = 50\text{ min}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

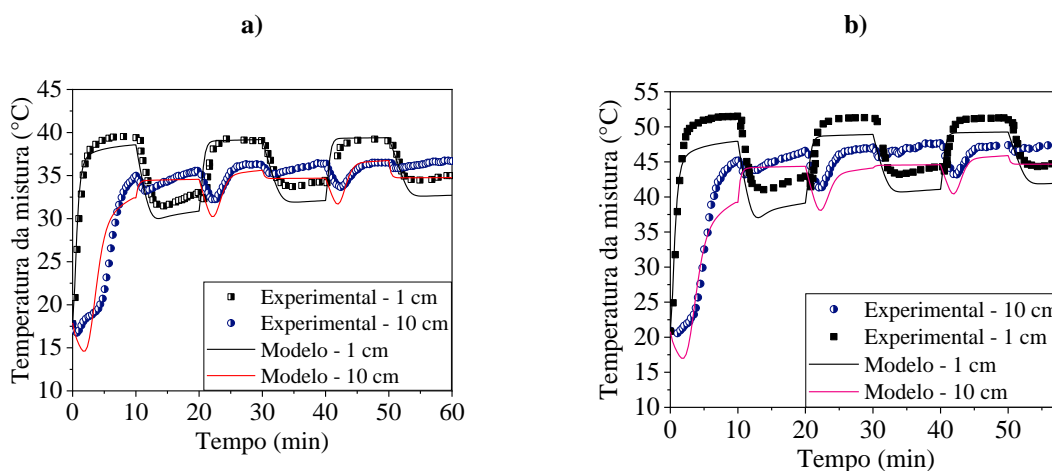
É importante destacar que embora os erros relativos absolutos médios percentuais obtidos para a simulação da transferência de massa, tenham sido maiores do que os preditos pelo modelo para a transferência de calor na secagem das esferas de alumina, verifica-se o potencial da utilização deste modelo em projetos de secadores e na simulação do processo com reversão do escoamento do ar.

#### 4.6 Estudo de Caso - Simulação da secagem de grãos de cevada em leito fixo e camada espessa utilizando o modelo de duas fases no processo com reversão do sentido do escoamento de ar

Tendo em vista a importância da verificação da capacidade do modelo de duas fases na predição da secagem em camada espessa, principalmente para a sua aplicação na simulação em diferentes condições de operação. Este estudo de caso tem por objetivo avaliar o desempenho do modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992) e que foi adaptado por Albini (2019) para a secagem de grãos de cevada com escoamento ascendente de ar em leito fixo e camada espessa. Neste trabalho, o modelo foi empregado para a simulação da secagem dos grãos de cevada com a reversão do sentido de escoamento do ar. Este grão, ao contrário do comportamento idealizado das esferas de alumina, apresenta alterações nas suas propriedades durante a secagem. A análise do desempenho do modelo para o processo sem reversão do ar de secagem, pode ser encontrada no trabalho desenvolvido por Albini (2019).

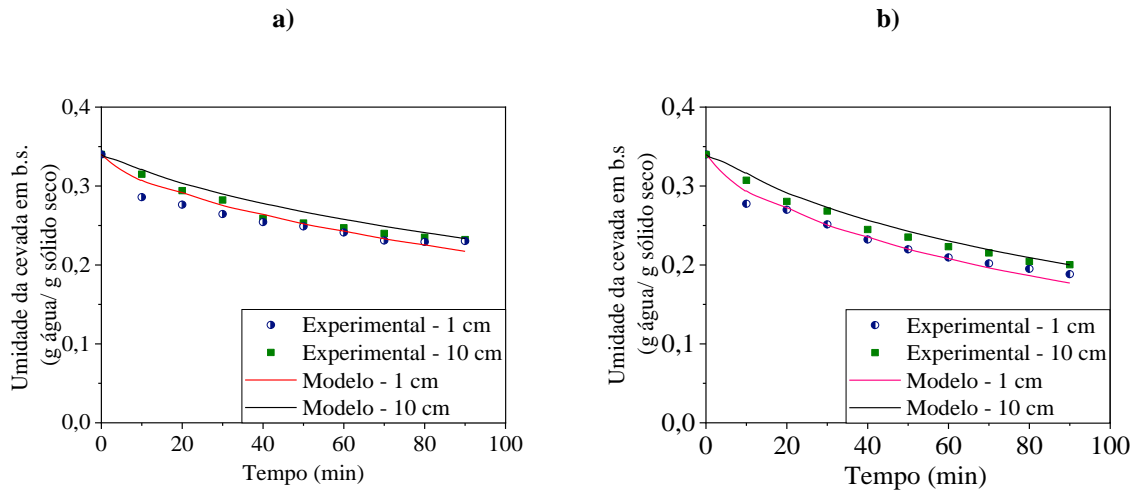
Na Figura 71 e Figura 72 são apresentados os gráficos de temperatura e umidade estimados pelo modelo de duas fases para a secagem dos grãos de cevada com reversão, nas temperaturas de 40 °C e 50 °C.

**Figura 71** – Temperatura experimental e estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo para as posições axiais de 1 e 10 cm para a secagem dos grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar ( $t_0 = 10\text{min}$ ;  $\Delta t = 10\text{min}$ ): a)  $T_{\text{ascendente}} = 40\text{ °C}$  e  $T_{\text{descendente}} = 35\text{ °C}$ ; b)  $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ °C}$  e  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ °C}$



Fonte: Dados experimentais de Albini (2019).

**Figura 72** – Umidade experimental e estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo para as posições axiais de 1 e 10 cm para a secagem dos grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar ( $t_0 = 10\text{min}$ ;  $\Delta t = 10\text{min}$ ): a)  $T_{\text{ascendente}} = 40\text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_{\text{descendente}} = 35\text{ }^\circ\text{C}$ ; b)  $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Dados experimentais de Albin (2019).

Para os valores de umidade, observa-se que a tendência do modelo é superestimar a diferença entre as posições axiais de 1 e 10 cm. Apesar disso, os erros relativos médios percentuais apresentados na Tabela 9, indicam uma boa estimativa do modelo para os valores de temperatura da mistura e da umidade do material, sendo a correção aplicada para a temperatura de secagem descendente, coerente com os resultados previstos. Albin (2019) observou a boa concordância do modelo nas estimativas da secagem de cevada sem reversão do sentido do escoamento, avaliando como positiva a sua utilização em análises preliminares. No caso do processo com reversão, observa-se que o modelo apresentou coerência nas previsões da secagem em termos de transferência de calor e massa, podendo ser utilizado na avaliação dos parâmetros do processo com reversão ( $t_0$  e  $\Delta t$ ) que permitam obter um leito com maior homogeneidade em termos de umidade e de eficiência energética.

**Tabela 9** - Erros relativos absolutos médios percentuais entre os valores experimentais de temperatura e umidade dos grãos cevada e os obtidos a partir do modelo de duas fases.

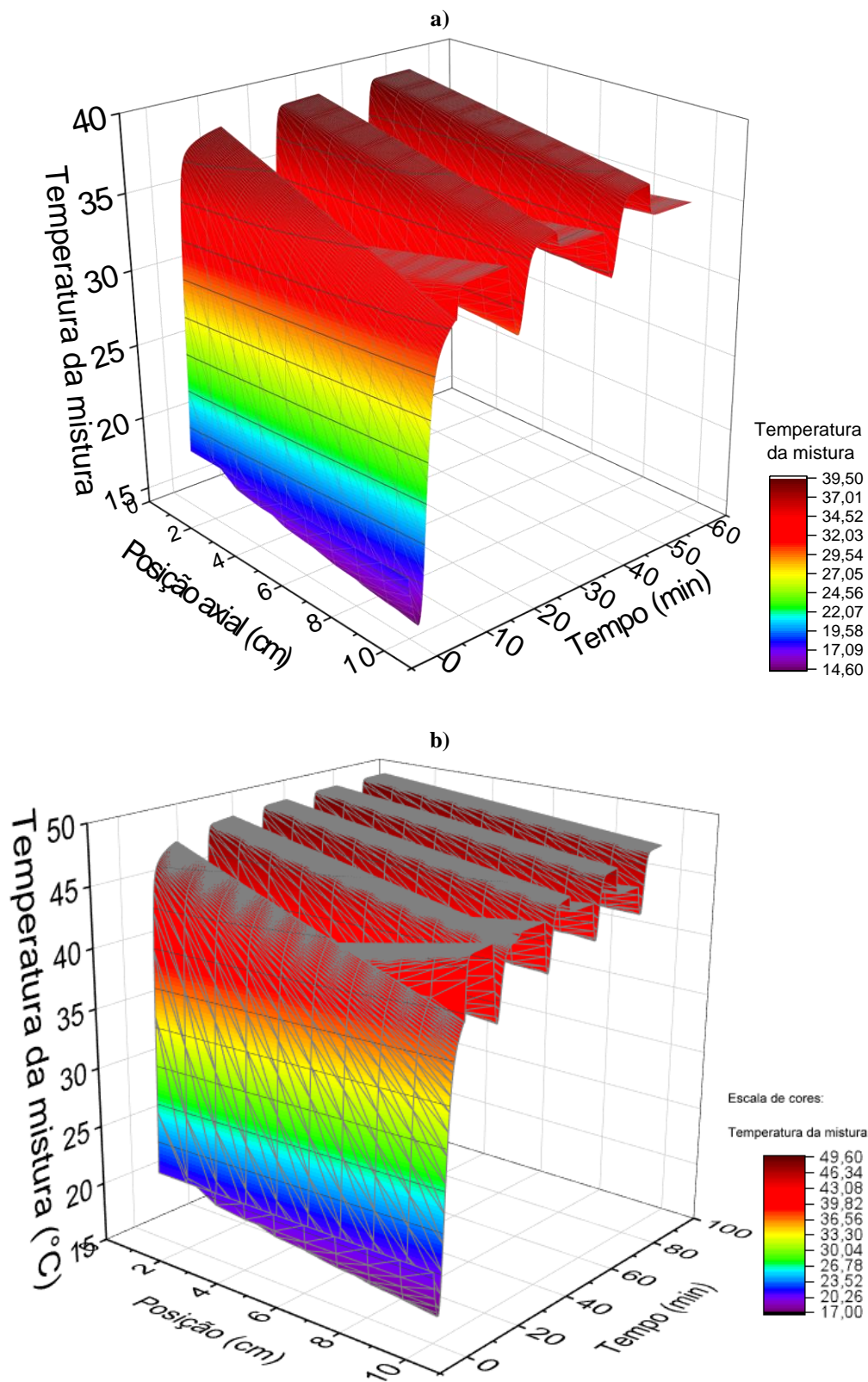
Temperatura de secagem	E% - Umidade		E% - Temperatura de mistura	
	Posição axial 1 cm	Posição axial 10 cm	Posição axial 1 cm	Posição axial 10 cm
40 °C	2,30	6,96	1,73	1,97
50 °C	2,24	2,41	6,38	5,87

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 73 e Figura 74 são apresentados gráficos de temperatura e umidade em função do tempo e da posição axial obtidos a partir das estimativas do modelo de duas fases.

**Figura 73** – Valores de temperatura estimados pelo modelo de duas fases em função do tempo e da posição para a secagem dos grãos de cevada com reversão:

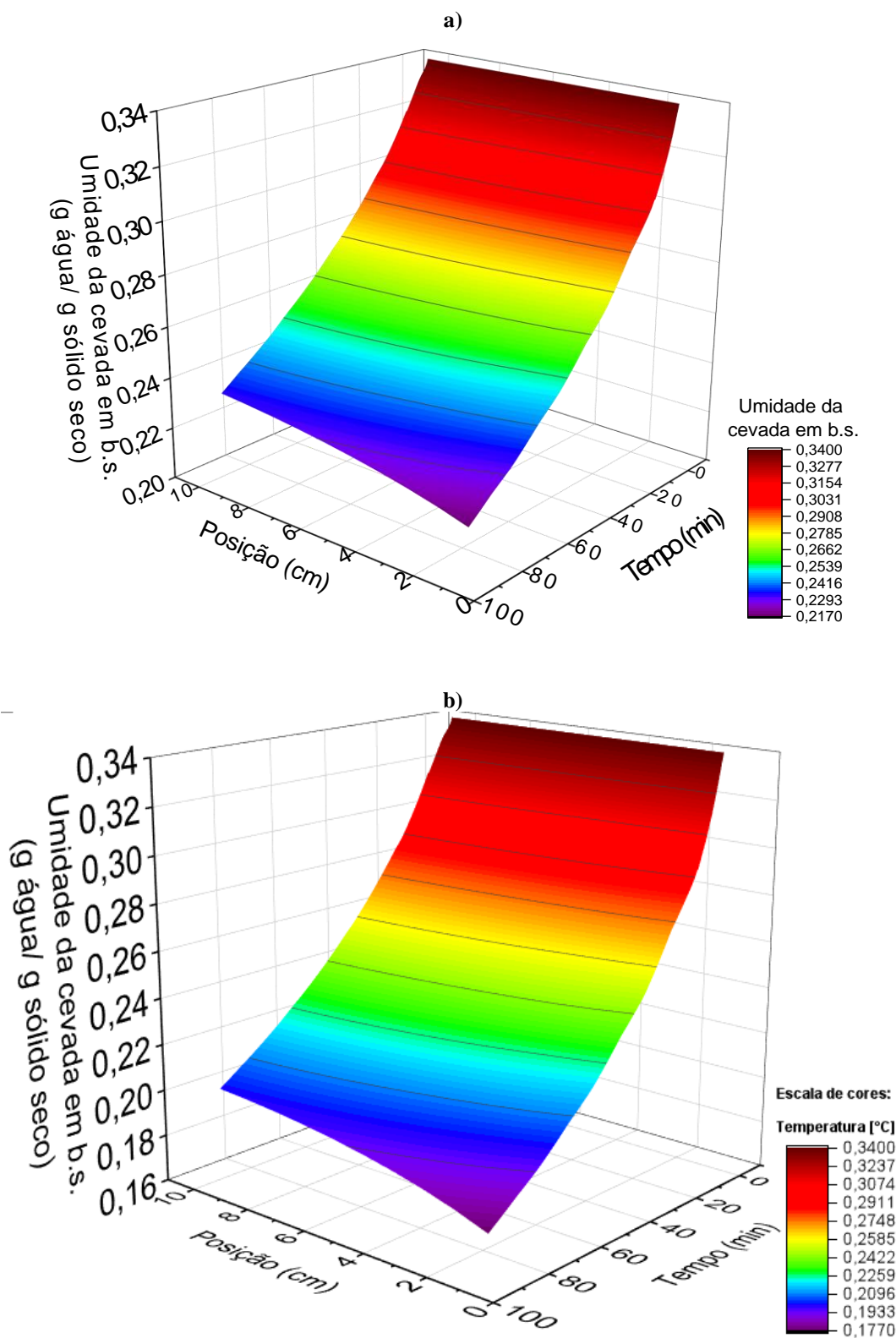
- a)  $T_{\text{ascendente}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ;  $\Delta t = 10\text{ min}$ .
- b)  $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_0 = 10\text{ min}$ ;  $\Delta t = 10\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 74** – Umidade em base seca em função do tempo e da posição axial estimada pelo modelo de duas fases para a secagem dos grãos de cevada com reversão:

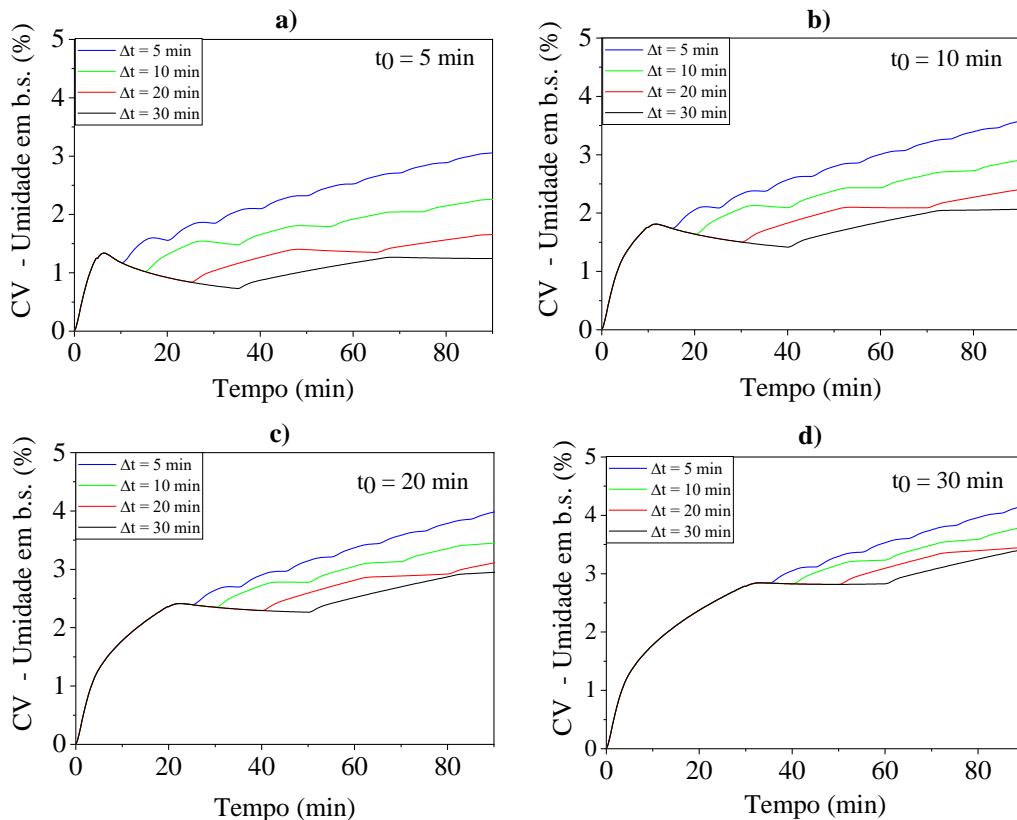
- a)  $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_0 = 10\text{min}$ ;  $\Delta t = 10\text{min}$ .
- b)  $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_0 = 10\text{min}$ ;  $\Delta t = 10\text{min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a avaliação da homogeneidade da umidade no leito em diferentes condições de reversão, foram realizadas simulações da secagem da cevada para diferentes valores de  $t_0$  e  $\Delta t$ . Com as predições do modelo de duas fases para a umidade transiente em 10 posições axiais do leito, determinou-se os coeficientes de variação apresentados na Figura 75. Observa-se que as respostas indicam um menor CV, relacionado a maior homogeneidade do leito, para  $t_0$  aplicado em 5 min e  $\Delta t$  de 30 min. A condição de aplicação da reversão com  $\Delta t$  de 5 min aumenta a heterogeneidade da umidade no leito, podendo relacionar-se a perda de energia que ocorre em cada aplicação da reversão do sentido do escoamento, conforme citado nos itens 4.2.2 e 4.2.3. Outro fator importante que deve ser considerado, é a operacionalidade do processo, uma vez que seria necessário o ajuste das válvulas a cada 5 minutos.

**Figura 75** - Coeficientes de variação de umidade em função do tempo para a secagem dos grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar para diferentes  $t_0$  e  $\Delta t$ . Valores obtidos a partir das estimativas utilizando o modelo de duas fases ( $T_{\text{ascendente}} = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 35\text{ }^\circ\text{C}$ ):  
 a)  $t_0 = 5\text{ min}$ ; b)  $t_0 = 10\text{ min}$ ; c)  $t_0 = 20\text{ min}$ ; d)  $t_0 = 30\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.



## 5 CONCLUSÕES

A partir do estudo experimental da secagem da alumina em leito fixo com e sem a reversão do sentido do escoamento do ar e da avaliação dos modelos matemáticos, pode-se concluir que:

Os resultados experimentais obtidos para a secagem da alumina em camada espessa sem reversão do sentido do escoamento, mostraram um comportamento térmico bem estabelecido com a formação de dois patamares de temperatura transientes para as diferentes posições axiais do leito, nas secagens a 40, 50 e 60 °C. Este resultado foi relacionado aos mecanismos difusivos e convectivos presentes no processo. Para a partícula de maior diâmetro, ( $7,1 \pm 0,7$  mm), foram obtidas menores taxas de aquecimento e o maior tempo de secagem necessário para o equilíbrio térmico.

Na operação com reversão do sentido do escoamento do ar, os experimentos térmicos mostraram que utilizando  $t_0$  de 10 min e  $\Delta t$  de 10, 30 e 50 min, os gradientes de temperatura do leito foram reduzidos, favorecendo a utilização da energia fornecida pelo fluido nas frentes de secagem ascendentes e descendentes. Entretanto, foi observado o aumento do tempo necessário para o equilíbrio térmico periódico do sistema.

Na análise da transferência de massa para a secagem utilizando o leito fracionado, foi observado que a reversão favoreceu a formação de duas frentes de secagem: a ascendente e a descendente, que diminuíram os gradientes de umidade do leito, indicando menores valores do coeficiente de variação de umidade. Também, foi verificado que algumas regiões ganharam e perderam umidade, observação que não ocorreu para a secagem convencional.

Os tempos de secagem necessários para a redução da umidade média do leito aos valores de umidade de equilíbrio dinâmico, foram maiores para todas as condições de reversão avaliadas, frente ao processo convencional.

Apesar da redução da heterogeneidade da umidade e das temperaturas do leito com a utilização da técnica de reversão, a análise energética mostrou o aumento do consumo energético específico e a redução da eficiência de secagem. A redução dos indicadores energéticos foi relacionada à dissipação da energia armazenada no sistema em cada aplicação da reversão do sentido do escoamento do ar e aos efeitos de perda e ganho de umidade.

Em relação à cinética de secagem em camada fina, os resultados experimentais mostraram o aumento das taxas de secagem para o aumento da temperatura do processo. Além disso, observou-se que a secagem foi conduzida em taxa decrescente, sem a presença de períodos de taxa constante. Os modelos empíricos e semi-empíricos de Lewis, Page, Overhults

e de Henderson e Pabis, apresentaram bons ajustes aos dados experimentais nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar de 2,7 m·s<sup>-1</sup>, com coeficientes de determinação acima de 0,99. A taxa de secagem do modelo Lewis (1921), por apresentar menor complexidade e boa representação da cinética de secagem em camada fina, foi utilizada no modelo matemático de duas fases aplicado para a simulação da secagem da alumina em camada espessa. O ajuste do modelo difusivo com condição de contorno convectiva aos dados de cinética de secagem em camada fina, forneceram valores do Número de Biot mássicos, que indicaram em iguais ordens de grandezas as influências das resistências internas e externas na transferência de massa durante a secagem.

Para a secagem da alumina em camada espessa com e sem reversão do escoamento de ar, o modelo de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) mostrou boa concordância qualitativa com o comportamento térmico e de umidade do leito. Com erros relativos absolutos médios percentuais entre as temperaturas experimentais e as simuladas de 1,70 a 6,59 % e de 2,38 a 11,87 % para o processo sem e com reversão, respectivamente. Para a umidade em diferentes posições axiais, os erros foram de 11,33 a 28,94 % e de 7,66 a 33,18 % na secagem sem e com reversão, respectivamente. Os maiores erros obtidos para as estimativas da umidade da alumina indicaram a necessidade de aprimoramento da modelagem para o processo com reversão do escoamento de ar.

O modelo de duas fases de Albin (2019) adaptado de Massarani e Silva Telles (1992) se mostrou eficiente na simulação da secagem em leito fixo de grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar, apresentando erros relativos absolutos médios percentuais de 2,3 a 7,0 % nas estimativas da umidade e de 1,7 a 6,4 % para as estimativas de temperatura de mistura.

## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados deste estudo, propõe-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Adaptar o modelo matemático de Massarani e Silva Telles (1992) para simular a secagem com reversão do sentido do escoamento de ar, considerando os fenômenos de ganho de umidade do material.
- Estudar a secagem de partículas com o mesmo material e diferentes formatos em camada espessa e leito fixo, de forma a incluir fatores de forma na modelagem matemática e simulação da transferência de calor e massa do processo.
- Modelar e simular matematicamente o processo de secagem em camada espessa utilizando modelos matemáticos simplificados, que reduzam o tempo de processamento e que possam ser utilizados em sistemas de controle e monitoramento do processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENUGA, O. T.; MPOFU, K.; BOITUMELO, R. I. Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 735–740, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.002>.
- AGHBASHLO, M.; MÜLLER, J.; MOBILI, H.; MADADLOU, A.; RAFIEE, S. Modeling and Simulation of Deep-Bed Solar Greenhouse Drying of Chamomile Flowers. **Drying Technology**, v. 33, n. 6, p. 684–695, 2015.
- ALBINI, G. **Reumidificação, Caracterização e Secagem de Grãos de Cevada em Leito Fixo**, 2015. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.
- ALBINI, G. **Estudo da Secagem de Grãos em Leito Fixo, com e sem escoamento reverso do ar de secagem**. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- ALBINI, G.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Barley: Effect of airflow reversal on fixed bed drying. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 134, n. September, p. 97–104, 2018.
- ALTINO, H. O. N. **Secagem em leito fixo de materiais granulares com diferentes esfericidades**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, SP, 2019.
- ALVARENGA, C. M. **Alumina recoberta com carbono como suporte de catalisadores em reações de HDS**, p.26. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- ALVARINHO, S. B.; MARTINELLI, J. R.. Utilização de alumina para a remoção de fluoretos em águas e efluentes. **Cerâmica**, São Paulo, v. 46, n. 298, p. 104-117, 2000.
- ANELLI, A. **Soja: Brasil é capaz de armazenar apenas 72% da safra**, 2019. Disponível em: <https://canalrural.uol.com.br/sites-e-especiais/projeto-soja-brasil/soja-brasil-armazenar-safra/>. Acesso em: 23 de Agosto de 2019.
- AREGBA, A. W.; SEBASTIAN, P.; NADEAU, J. P.; Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model. **Journal of Food Engineering**, 77, p. 27–40, 2006.
- ARRIECHE, L. DA S. **MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM, POR CONVECÇÃO FORÇADA, DE SISTEMAS SIMULADORES DE ALIMENTOS ESFÉRICOS E DEFORMÁVEIS**, 2007. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.
- BALA, B. K. **Drying and Storage of Cereal Grains**. Second ed. WILEY Blackwell, 2017.
- BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DEBOER, S. F.; ROTH, M. G. Grain drying simulation. Research Report, n. 224, Michigan State University, E. Lansing., 1974. Citado por: DAVILA, S. I.; CHEN, L. H.; WELCH, G. B. Simulation Model for Reversing Direction Airflow Drying of Rough Rice. **Paper - American Society of Agricultural Engineers**, p. 1842–1848, 1983.
- BARRE, H. J.; BAUGHMAN, G. R.; HAMDY, M. R. Application of the logarithmic model to cross-flow deep bed grain drying. **Trans. Am. Sot. Agric. Engrs**, 14 (6), p. 1061-1064, 1971.

- BARROZO, M. A. S.; HENRIQUE, H. M.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds. **Journal of Stored Products Research**, v. 42, n. 3, p. 348–356, 2006.
- BARROZO, M. A. S.; MUJUMDAR, A.; FREIRE, J. T. Air-Drying of Seeds: A Review. **Drying Technology**, v. 32, n. 10, p. 1127–1141, 2014.
- BAUGHMAN, G. R.; HAMDY, M. Y.; BARRE, H. J. Analog computer simulation of deep bed drying of grain. **Trans. Am. Soc. agric. Engrs**, 14 (6), p. 1058-1060, 1971.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; FILHO, J. B. P. Drying of Coffee (*Coffea arabica* L.) in a Fixed Bed with a Simulated Periodic Airflow Reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 59, n. 3, p. 195–202, 1994. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021863484710778>
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; FILHO, J. B. P. Simulation of Coffee Drying in a Fixed Bed with Periodic Airflow Reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 60, n. 3, p. 167–173, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021863485710104>
- BON, J.; SIMAL, S.; ROSSELLÓ, C.; MULET, A. Drying Characteristics of Hemispherical Solids. **Journal of Food Engineering**, v. 34, n. 2, p. 109–122, 1997.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. 8ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2013.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**, 2ª Ed. brasileira, São Paulo: Blucher, 2018.
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. Drying cereal grains. Connecticut: The AVI Publishing Company, INC., 1974. Citado por: CENKOWSKI, S.; JAYAS, D. S.; PABIS, S. Deep-Bed Grain Drying - A Review of Particular Theories. **Drying Technology**, v. 11, n. 7, p. 1553–1582, 1993. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373939308916919>
- BRITO, R. C.; DE 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, n. L, p. 95–105, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2017.03.021>
- BRITO, R. C.; SOUSA, R. C.; BÉTTEGA, R.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Chemical Engineering & Processing: Process Intensi fication Analysis of the energy performance of a modi fi ed mechanically spouted bed applied in the drying of alumina and skimmed milk. **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification**, v. 130, n. April, p. 1–10, 2018. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.05.014>.
- BRITO, R. C.; BETTEGA, R. FREIRE, J.T. Energy analysis of intermittent drying in the spouted bed. **Drying Technology**, 25, p. 291–302, 2018.
- BRITO, R. C.; PAULA, E.R.; FREIRE, J. T.; FREIRE, J. T. Modelo realimentado em cascata para secagem de alumina em leito de jorro. Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – ENEMP 2017, Maringá – PR, 2017.
- BRITO, R.C.; PAULA, E.R.; FREIRE, J.T.; FREIRE, F.B. **Modelo realimentado em cascata para secagem de alumina em leito de jorro**. XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2017.

- BRITO, S. Embrapa. **Armazenamento inadequado de grãos resulta em cerca de 15% de perdas, 2015.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3860638/armazenamento-inadequado-de-graos-resulta-em-cerca-de-15-de-perdas>. Acesso em: 23 de Agosto de 2019.
- BUCKLIN, R.; THOMPSON, S.; MONTROSS, M.; ABDEL-HADI, A. Grain Storage Systems Design. **Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering**. p.123–175, 2013. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00007-0>.
- CALÇADA, L. A.; BISCAIA Jr, E. C.; MASSARANI, G.. Secagem de Material Particulado: Modelo a Três Fases. Artigo Publicado nos anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. 2002.
- CALÇADA, L. A.; MANCINI, M. C.; BISCAIA JR, E. C.; MASSARANI, G.; Estudo Preliminar da Secagem de Materiais Porosos em Leito Fixo. Anais-Vol.II – XXII ENEMP, Florianópolis-SC, 1994.
- CALÇADA, L. A.; MANCINI, M. C.; WILDHAGEN, G. R. S. Drying of Inorganic Particulate Compounds. **Drying Technology**, 24, p. 349–358, 2006.
- CALÇADA, L. A., Modelagem e simulação da secagem em leito fixo. D Dissertação – Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.
- CENKOWSKI, S.; JAYAS, D. S.; PABIS, S. Deep-Bed Grain Drying - A Review of Particular Theories. **Drying Technology**, v. 11, n. 7, p. 1553–1582, 1993. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373939308916919>
- CENKOWSKI, S.; MUIR, W. E.; JAYAS, D. S. SIMULATION OF CANOLA AND BARLEY DRYING IN A DEEP BED. , v. 12, n. 1990, p. 171–190, 1989.
- CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts - An overview. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 3, p. 285–295, 2003.
- COLNAGO, M. **Estudo da Estabilidade do Método das Linhas Usando a Dinâmica de um Cabo Flexível.** Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional) – Universidade Estadual Paulista, 2012.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion.** 2º ed. Oxford University Press, 1975.
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos.** 3ª Ed. São Paulo: Blucher, 2018.
- DARVISHI, H.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; MINAEI, S. Fluidized Bed Drying Characteristics of Soybeans. **Journal of Agricultural Science and Technology**. v. 16, p. 1017-1031, 2014.
- DAVILA, S. I.; CHEN, L. H.; WELCH, G. B. Simulation Model for Reversing Direction Airflow Drying of Rough Rice. **Paper - American Society of Agricultural Engineers**, p. 1842–1848, 1983.
- DEFENDI, R. O. **Otimização da Secagem Periódica de Soja em Leito Fixo,** 2015. Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR.
- DERDOUR, L.; DESMORIEUX, H.; ANDRIEU, J. Determination and interpretation of the critical moisture content (C.M.C.) and the internal moisture content profile during the constant drying rate period. **Drying Technology**, v. 16, n. 3–5, p. 813–824, 1998.

- DOBRE, T.; PÂRVULESCU, O. C.; STOICA-GUZUN, A.; et al. Heat and mass transfer in fixed bed drying of non-deformable porous particles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 103, p. 478–485, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931016308626>
- ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441–464, 2010.
- FELIZARDO, M. P. **Secagem de cevada: análise da anatomia e do meio de transporte**. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2018.
- FREIRE, J.T.; FREIRE, F.B.; FERREIRA, M.C.; NASCIMENTO, B.C. A Hybrid Lumped Parameter/Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles. **Drying Technology**. Vol. 30. p. 1342–1353, 2012.
- FREIRE, F. B.; VIEIRA, G. N. A.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Trends in Modeling and Sensing Approaches for Drying Control. **Drying Technology**, v. 32, n. 13, p. 1524–1532, 2014.
- FREIRE, FÁBIO B.; ATXUTEGI, A.; FREIRE, FLAVIO B.; et al. 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. Taylor & Francis. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2016.1190937>
- GASTÓN, A. L.; ABALONE, R. M.; GINER, S. A. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 313–322, 2002.
- GENARO, L. B.; MOREIRA, M. F. P.; SOUSA, R. C.; FREIRE, J. T. **ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE UM LEITO DE JORRO PARA A SECAGEM DE SOJA**. XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringa - PR, 2017.
- GEVAUDAN, A.; ANDRIEU, J. Contact Drying Modelling of Agitated Porous Alumina Beads. **Chemical Engineering Process**, 30, p. 31-37, 1991.
- GHALY, T. F.; SUTHERLAND, J. W. Heat damage to grain and seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, n. C, p. 337–345, 1984.
- GINER, S. A.; MASCHERONI, R. H. Diffusive drying kinetics in wheat, part 1: Potential for a simplified analytical solution. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 80, n. 4, p. 351–364, 2001.
- GUEDES, M. A.; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M.; FARIAS, P. A. Caracterização Física De Grãos De Soja Utilizando-Se Processamento Digital De Imagens. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 3, p. 279–294, 2011.
- GURTIN, M. E.; VARGAS, A. S. On the Classical Theory of Reaction Fluid Mixtures, 1971. Citado por MASSARANI, G., SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: FREIRE, J. T., SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: Editora UFSCar, 1992, p. 3-39.
- HEMIS, M.; BETTAHAR, A.; SINGH, C. B.; BRUNEAU, D.; JAYAS, D. S. An experimental study of wheat drying in thin layer and mathematical simulation of a fixed-bed convective dryer. **Drying Technology**, v. 27, n. 10, p. 1142–1151, 2009.

- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 7, 85-89.
- HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, 146, p. 359–374, 1999.
- HERMAN-LARA, E.; SALGADO-CERVANTES, M.A.; GARCIA-ALVARADO, M.A. Mathematical simulation of convection food batch drying with assumptions of plug flow and complete mixing of air. **Journal of Food Engineering**. Vol. 68, p. 321–327, 2005.
- HERMAN-LARA, E.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E.; AMADOR-MENDOZA, A.; RUIZ-LÓPEZ, I. I. Effect of airflow reversal on packed-bed drying of carrots. **Journal of Food Process Engineering**, v. 33, n. 4, p. 684–700, 2010.
- HUKILL, W. V. Grain drying. In: **Storage of Cereal Grains and their Products** (ed. Anderson, J. A. and PEÇAS, P.; GONÇALVES, B.; ROCHA, B.; JORGE, D.; BAPTISTA, A., Chapter 2 - Optimization techniques to support decision-making processes via MSM—an Industry 4.0 approach, In: RAM, M. **Advances in Mathematics for Industry 4.0**, Academic Press, 2021, p. 23-60.
- HUNG, N. VAN; MARTINEZ, R.; TUAN, T. VAN; GUMMERT, M. Development and verification of a simulation model for paddy drying with different flatbed dryers. **Plant Production Science**, v. 22, n. 1, p. 119–130, 2019. Taylor & Francis. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1518723>
- IBRAHIM, M. N.; TALAB, K. T.; SPOTAR, S.; MUHAMMAD, K.; TALIB, R. A. Effects of Airflow Reversal in Fixed-Bed Drying of Rough Rice on Head Rice Yield and Drying Performance. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 4, p. 1485–1493, 2013. Disponível em: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=43961&t=3&dabs=Y&redir=&redirType>
- IGUAZ, A.; ESNOZ, A.; MARTINEZ, G.; LOPEZ, A.; VÍRSEDA, P. Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. **Journal of Food Engineering**. Vol 59. p. 151-160, 2003.
- JANGAM, S. V; MUJUMDAR, A. S. Basic Concepts and Definitions. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Vol. 1)**. p.232, 2010.
- JASPER, S.P.; BIAGGIONI, M.A.M; RIBEIRO, J.P. Viabilidade econômica de aquisição de um silo-secador para pequenas áreas de produção. **Eng. Agrícola**. Vol. 26 (3), p. 795-803, 2006.
- JIA, C.; WANG, L.; GUO, W.; LIU, C. Effect of swing temperature and alternating airflow on drying uniformity in deep-bed wheat drying. **Applied Thermal Engineering**, v. 106, p. 774–783, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.056>
- JOHANN, G.; SILVA, E.A.; LIMA, O.C.M.; PEREIRA, N.C. Mathematical modeling of a convective textile drying process. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. Vol. 21. p. 959-965, 2014.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98–108, 2007.
- KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER, I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. **Drying Technology**, v. 32, n. 7, p. 757–773, 2014.



- KUDRA, T. Energy aspects in drying. **Drying Technology**, v. 22, n. 5, p. 917–932, 2004.
- KUDRA, T. Energy Performance of Convective Dryers. **Drying Technology**, v. 30, n. 11–12, p. 1190–1198, 2012.
- LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. **Journal of Industrial & Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427–432, 1921. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50137a021>
- LIU, Z.; WU, Z.; WANG, X.; SONG, J.; WU, W. Numerical simulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.
- LOPES, D. C.; MARTINS, J. H.; NETO, A. J. S.; FILHO, A. J. S. Simulação da secagem de grãos com baixas temperaturas utilizando-se o modelo de Hukill: uma nova abordagem. **Exacta**, Vol. 3, p. 85-93, 2005.
- MASSARANI, G., SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: FREIRE, J. T., SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: Editora UFSCar, 1992.
- MATA, M. E. R. M. C.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. Programa Computacional Para a Simulação de Secagem de Grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Vol. 1, p. 33-50, 1999.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agropecuária Brasileira em Números**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros>. Acesso em: 23 de Agosto de 2019.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5ª edição. McGraw-Hill, Inc., 1993.
- MONTOVANNI, B. H. M.; HARA, T.; OLIVEIRA, L. M.; GIUDICE, P. M. Análise e Simulação de Secagem de Grãos de Milho em Camadas Espessas. **EXPERIENTIAE**. v. 23, n. 6, 1977.
- MOREIRA, M. F. P.; Operações Unitárias da Engenharia Química utilizando o Excel/VBA. 1ª ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2017.
- NARIMATSU, C. P.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Drying of coarse particles in a vertical pneumatic conveyor. **Drying Technology**, v. 25, n. 2, p. 291–302, 2007.
- NASCIMENTO, B. S.; FREIRE, F.B.; FREIRE, J.T. Neuronal and Grey Modelling of Milk Drying in Spouted Bed. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**. Vol. 91. p. 1815-1821, 2013.
- NAZGHELICHI, T.; KIANMEHR, M. H.; AGHBASHLO, M. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. **Energy**, v. 35, n. 12, p. 4679–4684, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.036>
- ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; JANIUS, R. B.; NAWI, N. M.; ABDAN, K. Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, n. 3, p. 599–618, 2016.
- PAGE, G. E. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled corn in Thin Layers**. M.Sc. Thesis, 1949. Purdue University - Indiana. Disponível em: <https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI1300089/>

- PALENCIA, C., NAVA, J., HERMAN, E., RODRÍGUEZ-JIMENES, G. C., & GARCÍA-ALVARADO, M. A. Spray drying dynamic modeling with a mechanistic model. **Drying Technology**, Vol. 20, p. 569–586, 2002.
- PAMUK, S.; ERDEM, A. The method of lines for the numerical solution of a mathematical model for capillary formation: The role of endothelial cells in the capillary. **Applied Mathematics and Computation**, v. 186, n. 1, p. 831–835, 2007.
- PARDE, S. R.; KAUSAL, R. T.; JAYAS, D. S.; WHITE, N. D. G. Mechanical damage to soybean seed during processing. **Journal of Stored Products Research**, v. 38, n. 4, p. 385–394, 2002.
- PARDESHI, I. L.; ARORA, S.; BORKER, P. A. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. **Drying Technology**, v. 27, n. 2, p. 288–295, 2009.
- PARRY, J. L. Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review. **J. agric. Engng. Res.** Vol. 32, p. 1-29, 1985.
- PAULSEN, M. R.; THOMPSON, T. L. Effects of Reversing Airflow in a Crossflow Grain Dryer. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 16, n. 3, p. 541–545, 1973.
- PERAZZINI, H. **Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo**. Dissertação – Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2011.
- PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2014.
- PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES POROSOS. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais...** p.8, 2014. São Paulo: Editora Edgard Blücher. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/17397>
- PORDAGE, L. J.; LANGRISH, T. A. G. Stack-wide behavior for hardwood drying. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1779–1789, 2007.
- PRADO, M. M.; MAZZINI SARTORI, D. J. Heat and Mass Transfer in Packed Bed Drying of Shrinking Particles. **Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications**, 2011. InTech. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/mass-transfer-in-multiphase-systems-and-its-applications/heat-and-mass-transfer-in-packed-bed-drying-of-shrinking-particles>
- PRADO, M. M.; SARTORI, D. J. M. Simultaneous heat and mass transfer in packed bed drying of seeds having a mucilage coating. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 1, p. 39–50, 2008.
- RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal. **Journal of Food Engineering**, v. 26, n. 3, p. 259–271, 1995.
- RUIZ-LÓPEZ, I. I.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E.; COBOS-VIVALDO, R.; HERMAN-LARA, E. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal. **Journal of Food Engineering**, v. 89, n. 3, p. 310–318, 2008.
- REINATO, C.H.R.; BORÉM, F.M.; VILELA, E.R.; CARVALHO, F.M.; MEIRELES, E.P. **Consumo de energia Consumo de energia e custo de secagem de café cereja e custo de**

- secagem de café cereja em propriedades agrícolas do sul de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 6 (1), p. 112-116, 2002.
- REIS, T.G. **Análise da secagem de partículas de alumina em secador vibrofluidizado.** Dissertação – Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2015.
- REIS, T.G.; PERAZZINI, H.; FREIRE, F.B.; FREIRE, J.T. **Análise da secagem de partículas de alumina em secador de leito vibrofluidizado.** XXXVII Congresso brasileiro de sistemas particulados, 2015.
- STRUMILLO, C. S.; JONES, T.; ZYLLA, R. **Handbook of Industrial Drying.** Chapter 46 – Energy Aspects in Drying. p. 1075-1099, 2014.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design.** New York: Gordon and Breach Science. 1986.
- SABBAH, M. A.; MEYER, G. E.; KEENER, H. M.; ROLLER, W. L. Simulation Studies of Reversed-Direction Air-Flow Drying Method for Soybean Seed in a Fixed Bed. **Transactions of the ASAE**, v. 22, n. 5, p. 1162–1166, 1979.
- SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B.; Rochas e Minerais Industriais. Capítulo 13: Bauxita, CETEM, p.279, 2005.
- SANDER, A.; KARDUM, J. P.; SKANSI, D. Transport Properties in Drying of Solids. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v.15(3), p.131–137, 2001.
- SHERWOOD, T. K. The Drying of Solids—I. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 21, n. 1, p. 12–16, 1929a. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50229a004>
- SHERWOOD, T. K. The Drying of solids—II. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 21, n. 10, p. 976–980, 1929b. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50238a021>
- SHERWOOD, T. K. The Drying of Solids—III Mechanism of the Drying of Pulp and Paper. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 22, n. 2, p. 132–136, 1930. Disponível em: [http://www.boneandjoint.org.uk/highwire/filestream/13335/field\\_highwire\\_article\\_pdf/0/741.full-text.pdf](http://www.boneandjoint.org.uk/highwire/filestream/13335/field_highwire_article_pdf/0/741.full-text.pdf)
- SILVA, D. I. S.; SOUZA, G. F. M. V.; BARROZO, M. A. S. Heat and mass transfer of fruit residues in a fixed bed dryer: Modeling and product quality. **Drying Technology**, v. 37, n. 10, p. 1321–1327, 2018. Taylor & Francis. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1498509>
- SILVA, C.A.M.; FERREIRA, M.C.; FREIRE, F.B.; FREIRE, J.T. Analysis of the dynamics of paste drying in a spouted bed. **Drying technology**. Vol. 37, p. 876–884, 2019.
- SILVA, F.R.G.B.; SOUZA, M.; COSTA, A.M.S.; JORGE, L.M.M; PARAÍSO, P.R. Experimental and numerical analysis of soybean meal drying in fluidized bed. **Powder Technology**. Vol. 29. p. 61-70, 2012.
- SOUSA, R.C. **Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional.** Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2017a.
- SOUSA, R. V. **SECAGEM EM CAMADA FINA E ESPESSA DE GRÃOS DE ARROZ VERMELHO EM CASCA: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL, MODELAGEM E SIMULAÇÃO.** Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-Paraíba, 2017b.

- SOUZA, GLAUCIA F.M.V.; MIRANDA, R. F.; BARROZO, M. A. S. Soybean (*Glycine max* L. Merrill) Seed Drying in Fixed Bed: Process Heterogeneity and Seed Quality. **Drying Technology**, v. 33, n. 14, p. 1779–1787, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1039542>
- SOUZA, G. F.M.V.; MIRANDA, R. F.; LOBATO, F. S.; BARROZO, M. A. S. Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 38–44, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.088>
- SOUZA PINTO, T. C.; SOUZA, A. S.; BATISTA, J. N. M.; et al. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–12, 2020. Taylor & Francis. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>
- SOUZA, G.F.M.V. **Secagem de sementes de soja em leito fixo: equilíbrio e cinética da sílica gel para controle de umidade, modelagem do processo e análise da qualidade das sementes**. Tese – Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- SUN, Y.; PANTELIDES, C. C.; CHALABI, Z. S. Mathematical modelling and simulation of near-ambient grain drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 243–271, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016816999500018Y>
- THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying — A New Model. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 4, p. 0582–0586, 1968.
- TOLABA, M.P. & SUÁREZ, C. (1988) . Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusional model. *LWT - Food Science and Technology*, 21(2), 83-86. Recuperado de: [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/paper/document/paper\\_00236438\\_v21\\_n2\\_p83\\_Tolaba](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/paper/document/paper_00236438_v21_n2_p83_Tolaba) [ ]
- TRUESEDEL, C. Sulle basi della Termodinâmica. 1957. Citado por MASSARANI, G., SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: FREIRE, J. T., SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: Editora UFSCar, 1992, p. 3-39.
- TVEITO, A.; LANGTANGEN H.P.; WINTHER R. Computational Partial Differential Equations. In: Engquist B. (eds) **Encyclopedia of Applied and Computational Mathematics**. Springer, 2015, [https://doi.org/10.1007/978-3-540-70529-1\\_292](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70529-1_292)
- VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado**, 2012. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.
- VIEIRA, G. N. A. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro**. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2015.
- VIEIRA, M. G. A.; ESTRELLA, L.; ROCHA, S. C. S. Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1639–1648, 2007.
- VUKSANOVIC, D.; UGARAK, J.; KORCOK, D. Industry 4.0: **The future concepts and new visions of factory of the future development**. **Advanced Engineering systems**. International Scientific Conference on ict and e-business related research – SINTEZA, 2016.
- WOUWER, A. VANDE; SAUCEZ, P.; SCHIESSER, W. **Adaptive method of lines**. 1º ed.

Chapman & Hall/CRC Press, 2001.

XU, Y.; QIN, X.; ZHANG, G.; ZHANG, Y. An experimental investigation on the drying characteristics and kinetics of Baorixile lignite in a fixed bed. **Fuel**, v. 253, n. April, p. 1317–1324, 2019. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.121>

YOUNG, J. H.; DICKENS, J. W. Evaluation of costs for drying grain in batch or cross-flow systems. **Amer. St. agric. Engrs.** v. 18, p. 734-739, 1975.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017. Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>

ZIAEE, A.; ALBADARIN, A.B.; PADRELA, L.; FEMMER, T.; O'REILLY, E.; WALKER, G. Spray drying of pharmaceuticals and biopharmaceuticals: Critical parameters and experimental process optimization approaches. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**. v. 127. p. 300-318, 2019.

## ANEXO A

As condições do ar de secagem foram determinadas utilizando as temperaturas de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ) e de bulbo seco ( $T_{bs}$ ), utilizando o equacionamento apresentado por Moreira (2017). A umidade absoluta ( $Y$ ) foi determinada utilizando a Equação A1 e a umidade relativa percentual mássica ( $UR$ ) utilizando a Equação A2.

$$Y = \frac{c}{\lambda_{sat}} (T_{bu} - T_{bs}) + Y_{sat} \quad A1$$

$$UR = 100 \frac{Y}{Y_{sat}} \quad A2$$

Na Equação A1, o valor de  $c$  utilizado foi de  $1,0995 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  e o calor latente de vaporização ( $\lambda_{sat}$ ) foi estimado pela Equação A3. A umidade absoluta nas condições de saturação ( $Y_{sat}$ ) foi determinada utilizando a Equação A4 e a pressão parcial da água nas condições de saturação ( $P_{\acute{a}gua-sat}$ ) pela Equação de Antonie (Equação A5).

$$\lambda_{sat} [kg \cdot kJ] = 3.221,7 - 2,065 T_{bu} [K] \quad A3$$

$$Y_{sat} = \frac{MM_{\acute{a}gua} P_{\acute{a}gua-sat}}{MM_{ar} (P - P_{\acute{a}gua-sat})} \quad A4$$

$$P_{\acute{a}gua-sat} = \exp \left[ 16,2886 - \frac{3.816,44}{T_{bu} [K] - 46,13} \right] \quad A5$$

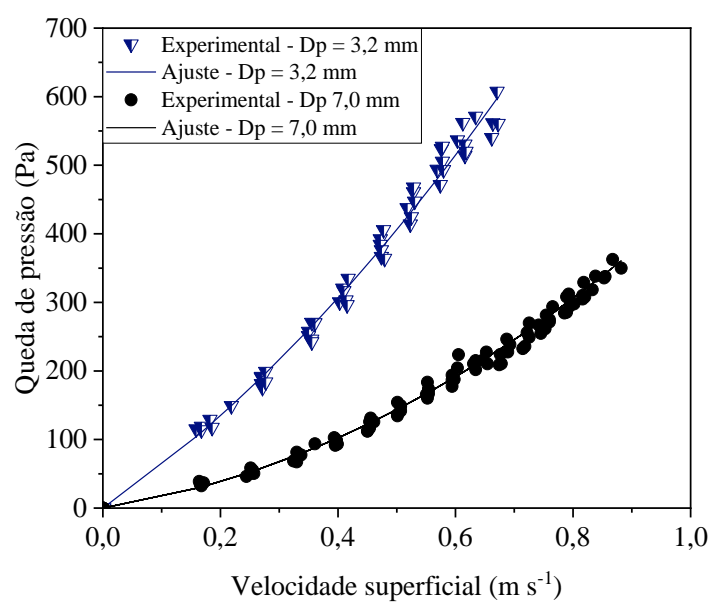
onde  $MM_{\acute{a}gua}$  é o peso molecular da água ( $18 \text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ),  $MM_{ar}$  o peso molecular do ar ( $28 \text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ) e  $P$  a pressão total do sistema.

## APÊNDICE A

## A.1 Fluidodinâmica do leito fixo

Com os dados experimentais de queda de pressão do meio poroso em função da vazão de ar alimentado no sistema, foram construídas as curvas fluidodinâmicas apresentadas na Figura A 1.

**Figura A 1** – Queda de pressão do meio poroso em função da velocidade superficial do ar alimentado no sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE B

### B.1 Teste t para verificar a influência da temperatura na média do tempo de equilíbrio térmico para a secagem com escoamento ascendente de ar

Para verificar a influência da temperatura de secagem no tempo de equilíbrio térmico, foram realizados os testes t apresentados na Tabela B 1. O teste t para duas amostras foi realizado com nível de significância de 5%, presumindo amostras com variâncias distintas. Os resultados do teste são apresentados na Tabela B 2.

Tabela B 1 – Hipótese do teste t para as médias dos tempos de equilíbrio térmico  $\bar{t}_{eq}$ .

Teste	Hipótese nula	Hipótese alternativa
01	$H_0: \bar{t}_{eq}^{40^\circ C} = \bar{t}_{eq}^{50^\circ C}$	$H_1: \bar{t}_{eq}^{40^\circ C} > \bar{t}_{eq}^{50^\circ C}$
02	$H_0: \bar{t}_{eq}^{50^\circ C} = \bar{t}_{eq}^{60^\circ C}$	$H_1: \bar{t}_{eq}^{50^\circ C} > \bar{t}_{eq}^{60^\circ C}$

Tabela B 2 – Resultado do teste de hipóteses.

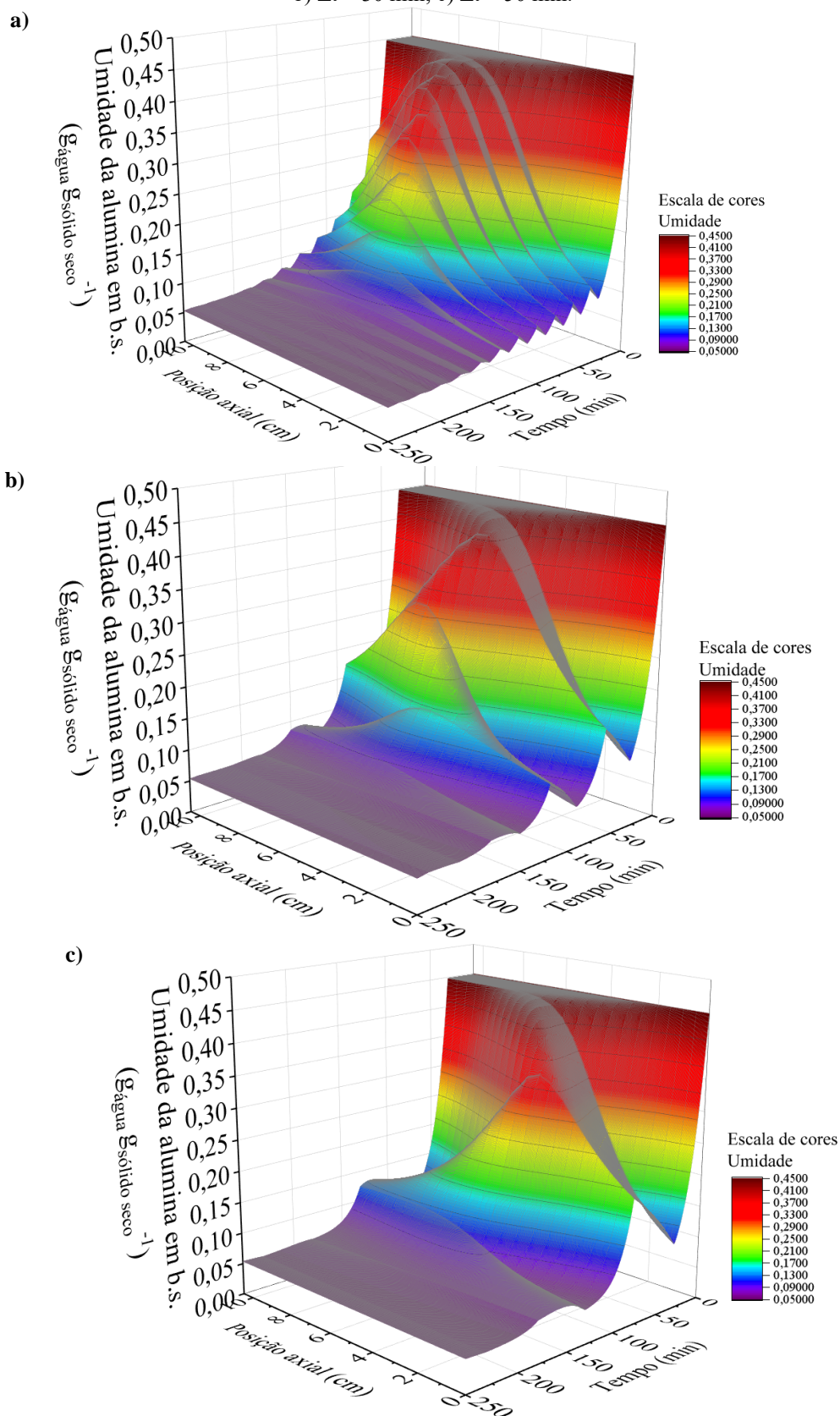
Teste	t <sub>calculado</sub> *	t <sub>crítico-unicaudal</sub> *	Valor-p*	Resultado
01	6,211026	2,353363	0,004206	Rejeito H <sub>0</sub>
02	3,400758	2,353363	0,021219	Rejeito H <sub>0</sub>

\* Uni-caudal



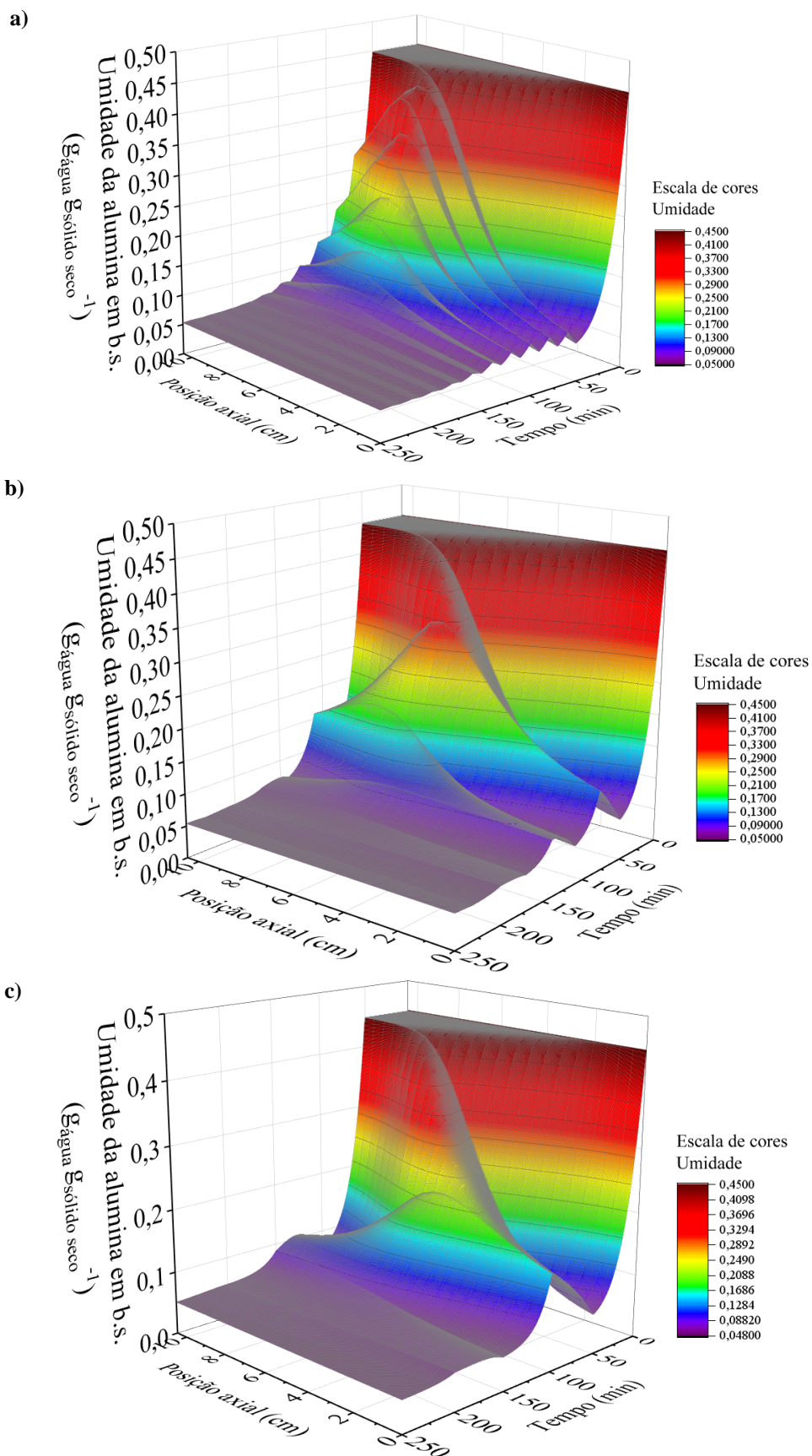
## APÊNDICE C

**Figura C 1** – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50 \text{ min}$ .



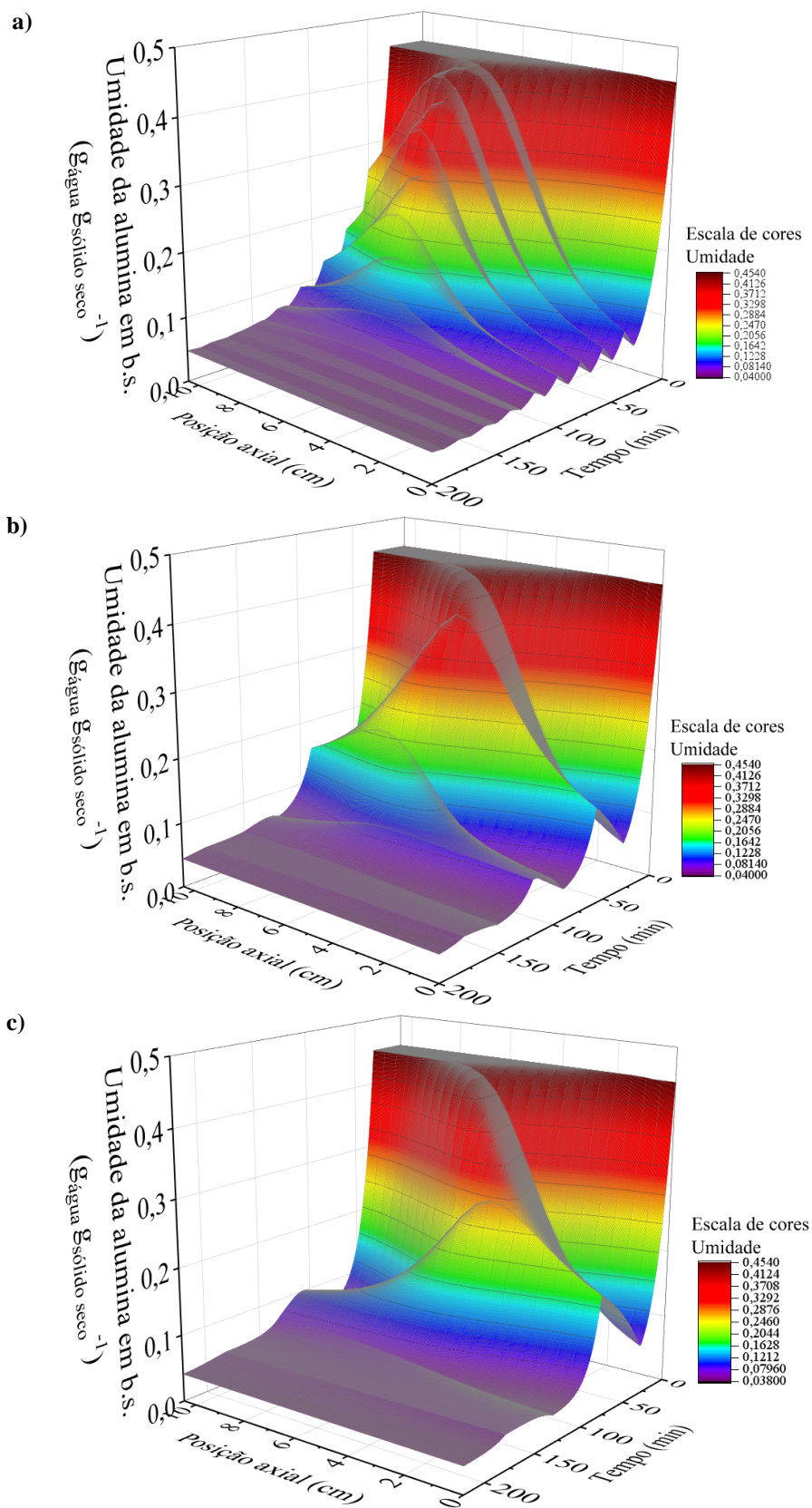
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura C 2** - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 50 \text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50 \text{ min}$ .



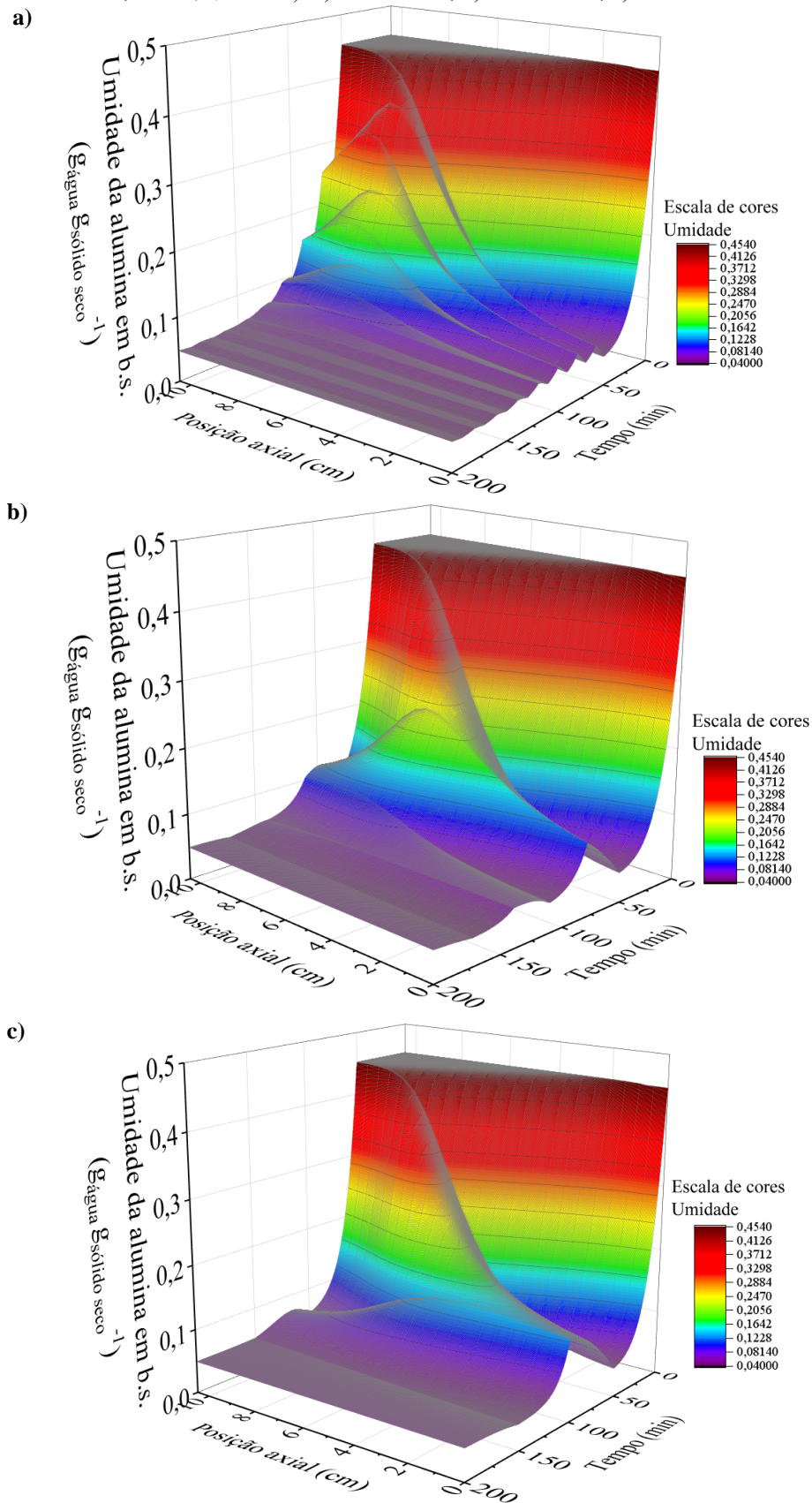
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura C 3** - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50 \text{ min}$ .



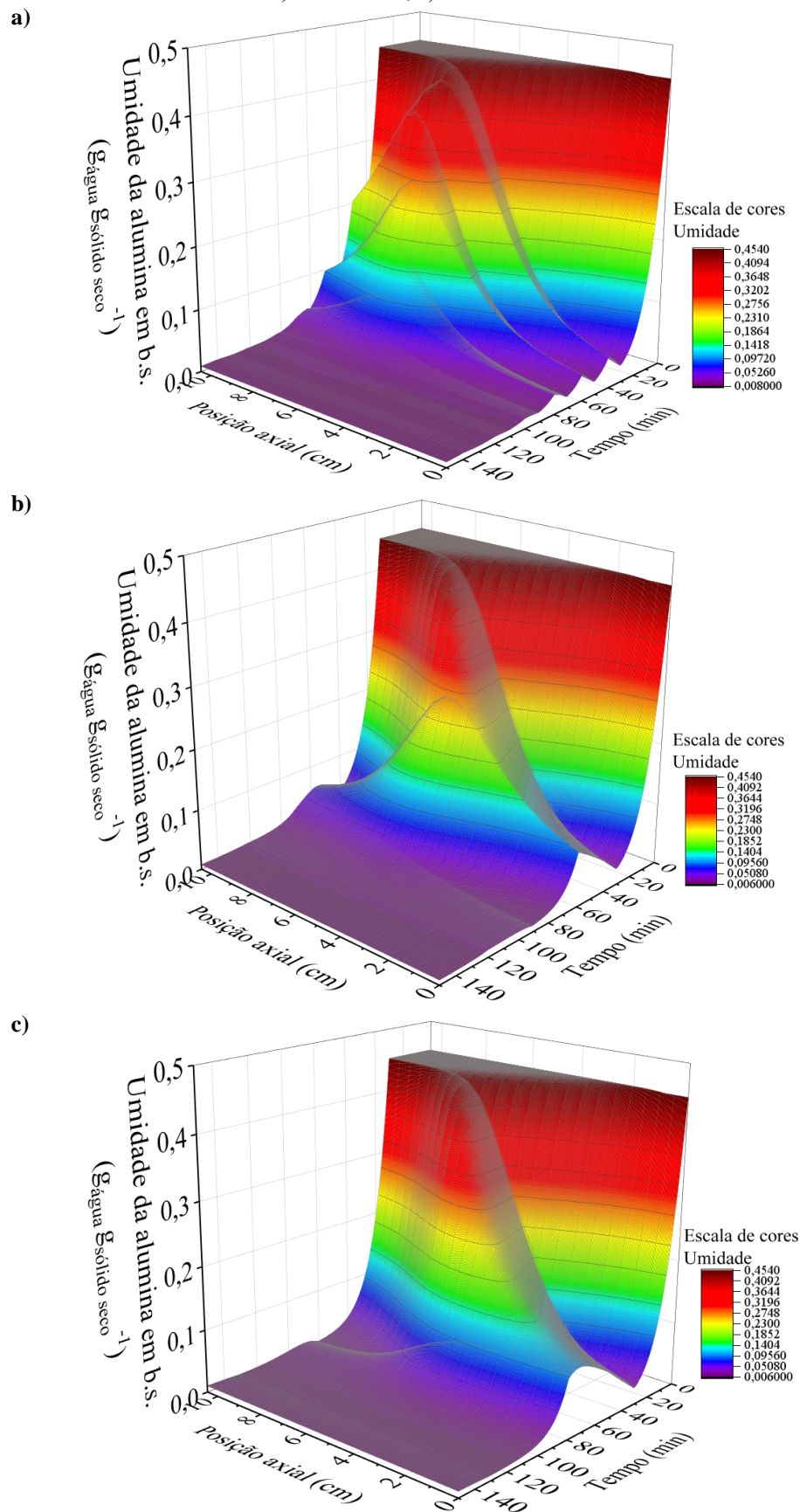
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura C 4** - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0=50\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



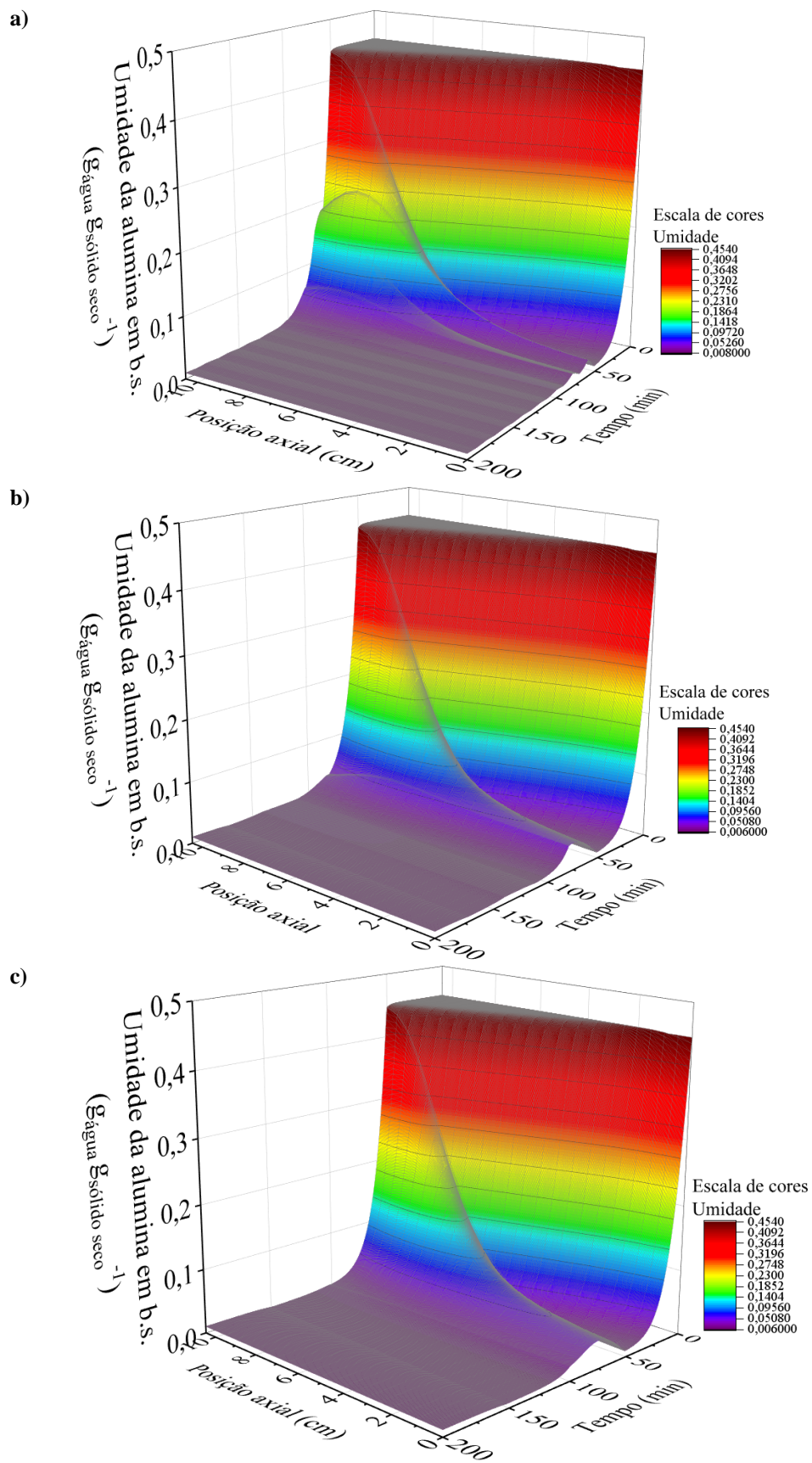
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura C 5** - Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 30\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

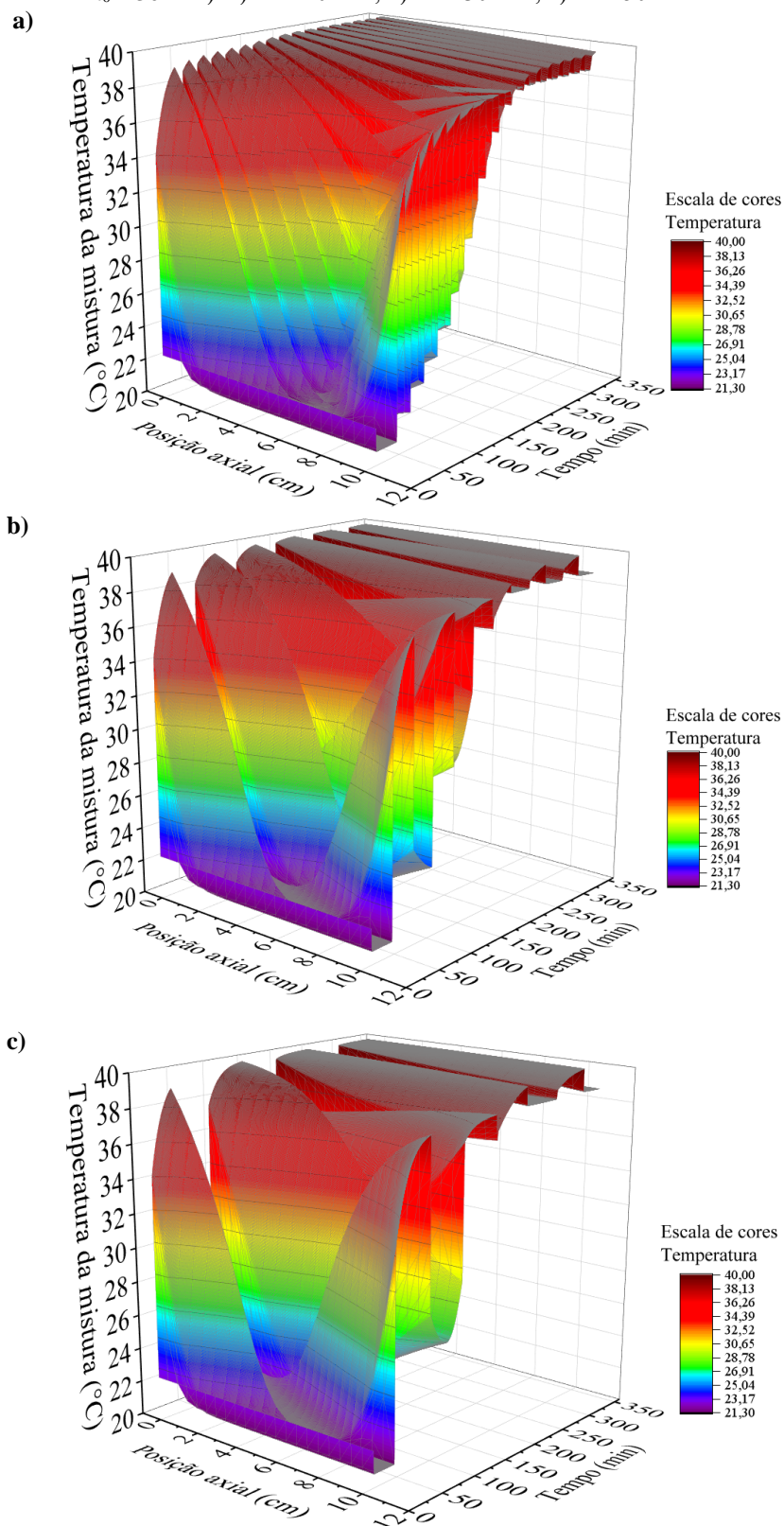
**Figura C 6** – Umidade da alumina estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 50\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

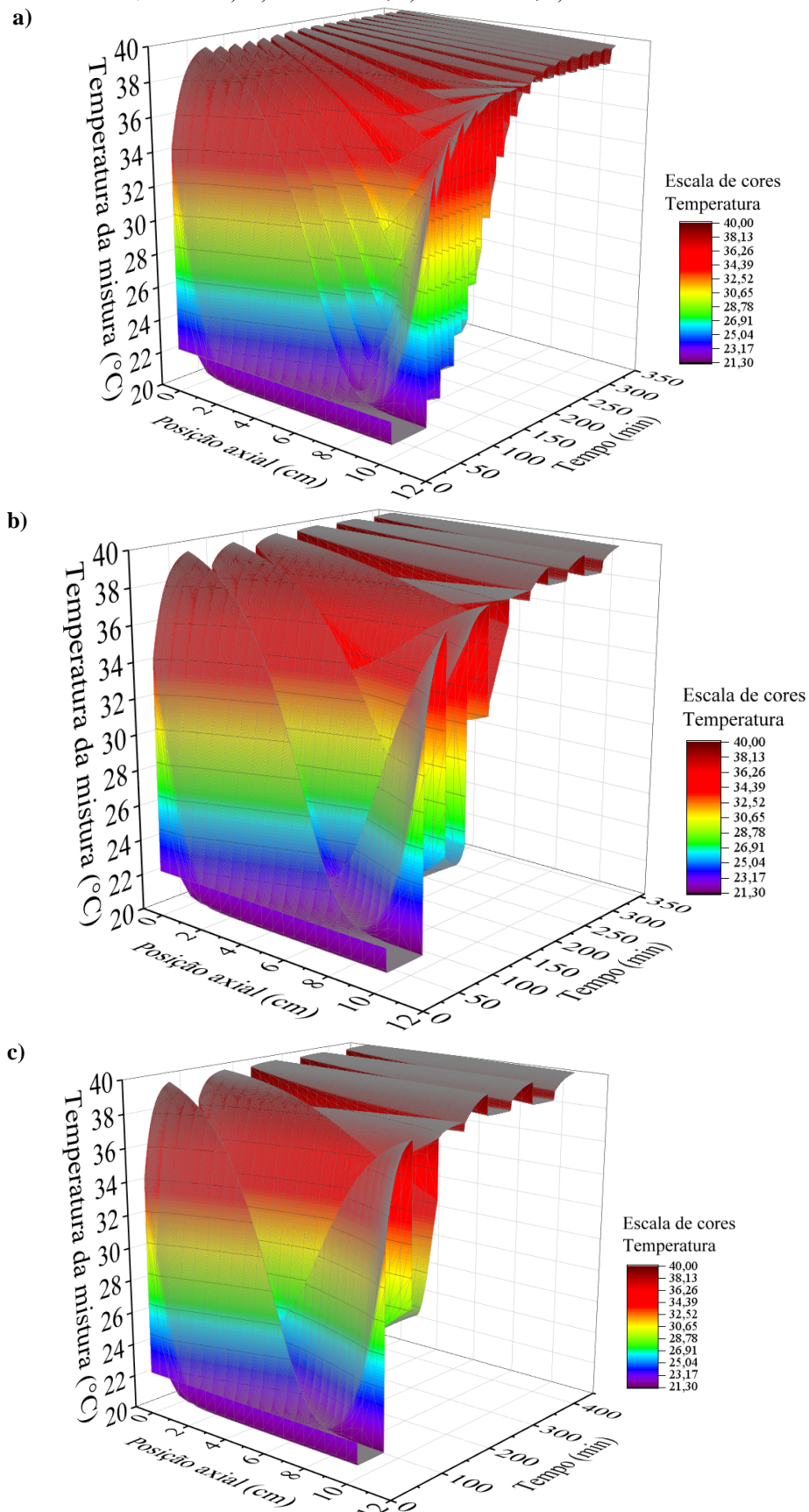
## APÊNDICE D

**Figura D 1** - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $t_0 = 30 \text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10 \text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30 \text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50 \text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

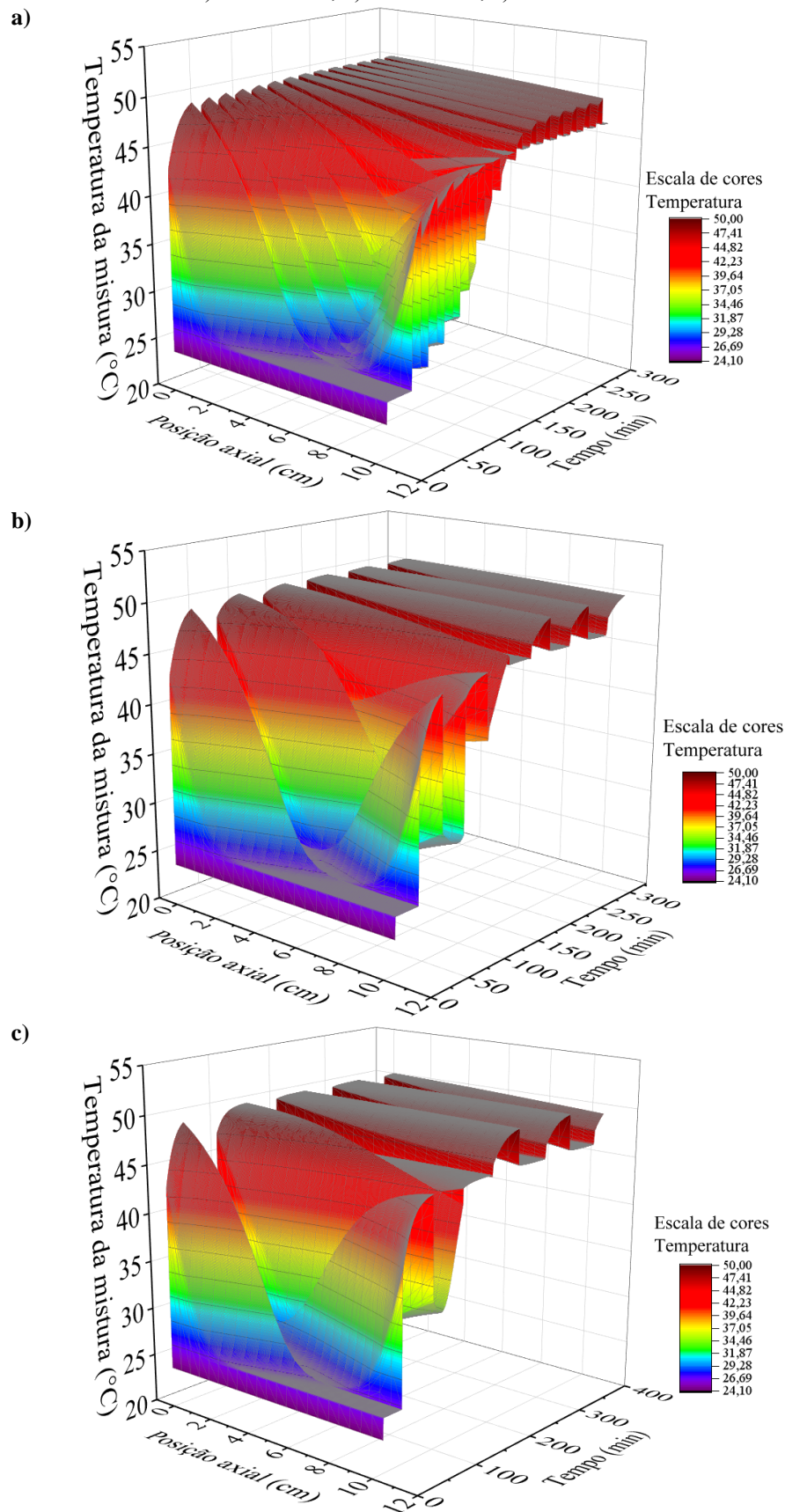
**Figura D 2** - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 50\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

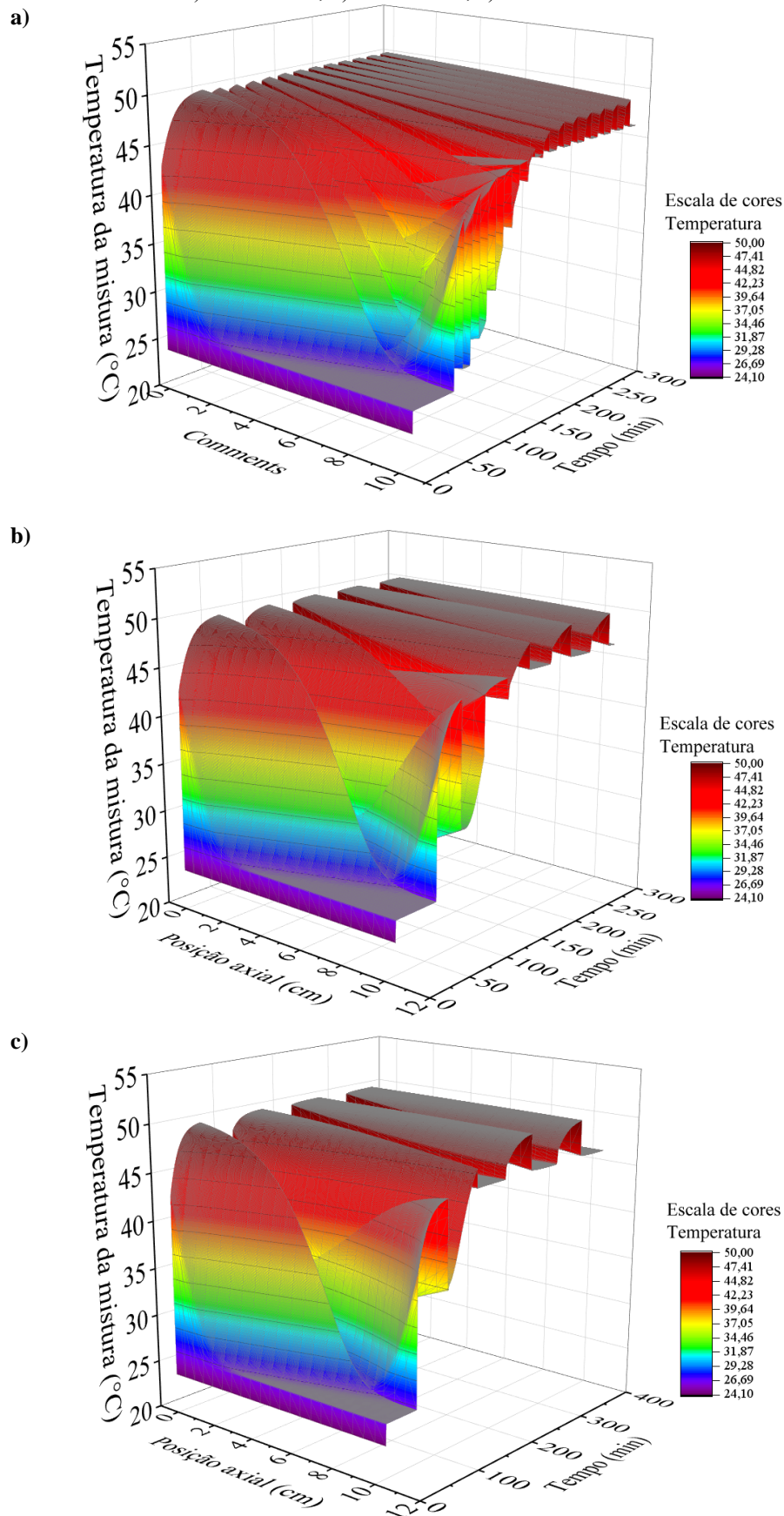


**Figura D 3** - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 30\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



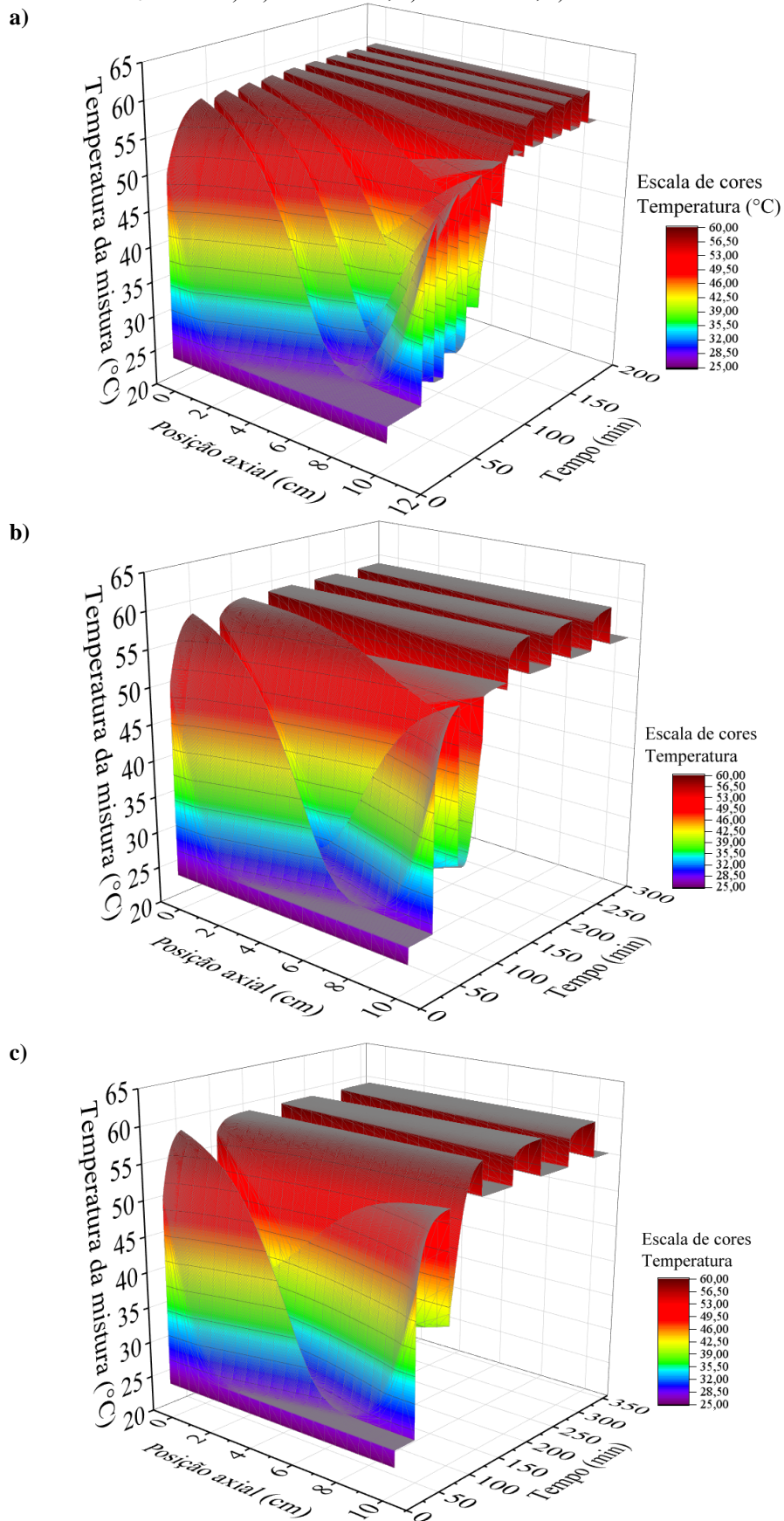
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura D 4** - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 50\text{ min}$ ):  
 a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



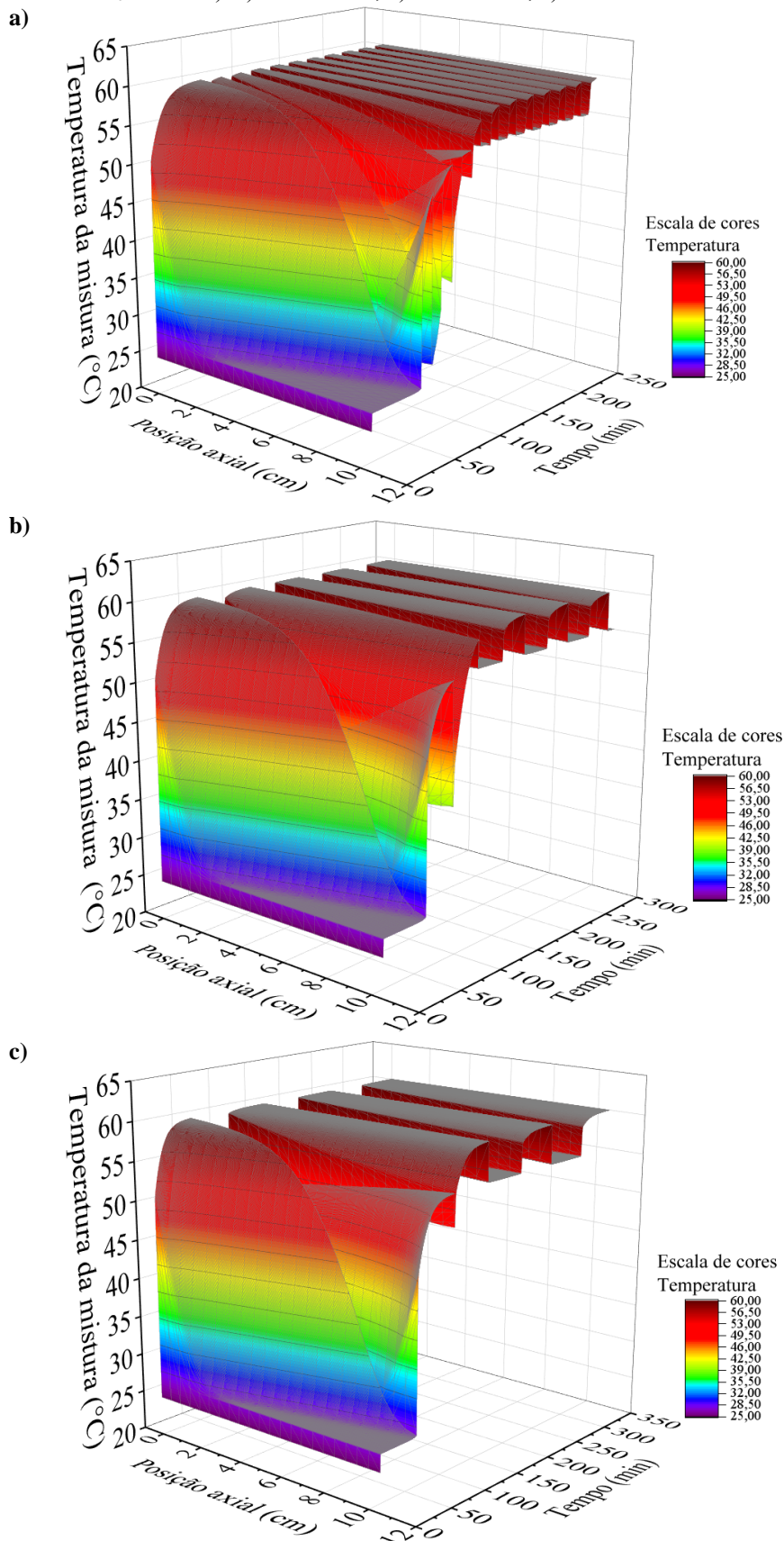
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura D 5** - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 30\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura D 6** - Temperatura da mistura estimada pelo modelo de duas fases, em função do tempo e da posição axial para a secagem da alumina com reversão ( $T_{\text{ascendente}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{descendente}} = 58,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_0 = 50\text{ min}$ ): a)  $\Delta t = 10\text{ min}$ ; b)  $\Delta t = 30\text{ min}$ ; c)  $\Delta t = 50\text{ min}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.