



SECAGEM DE MINÉRIO DE FERRO EM LEITO FIXO EM CAMADA FINA E ESPESSA

LUANA B. GENARO^{1*}, ALFREDO M. SARKIS², THIAGO C. S. PINTO², JOSÉ T. FREIRE¹,
RODRIGO BÉTTEGA¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

²Centro de Desenvolvimento Mineral – Vale, Minas Gerais – Brasil

*e-mail: luana.genaro@outlook.com

RESUMO - Este trabalho avaliou a secagem do minério de ferro em leito fixo em camada fina e espessa com escoamento ascendente de ar. Os ensaios foram realizados a 50, 60, 70 e 80 °C e velocidade do ar de 0,7 m·s⁻¹. Foram obtidos os coeficientes de transferência de massa, a difusividade mássica efetiva e o número de Biot mássico para a secagem em camada fina. Na secagem em camada espessa, foram obtidos valores de umidade média do leito, temperatura transiente para 10 posições axiais e de umidade para 10 camadas de 1 cm de espessura. A observação de um período de taxa de secagem decrescente indicou a presença de mecanismos internos de transferência de massa no processo. Os modelos difusivos tradicional e de condição de contorno convectiva apresentaram bons ajustes para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C. Os valores de difusividade mássica efetiva obtidos ficaram entre 1,7522·10⁻⁹ m²·s⁻¹ e 8,2535·10⁻⁹ m²·s⁻¹ para o modelo difusivo convectivo. Os resultados indicaram a formação de gradientes de umidade e de temperatura para diferentes posições axiais na secagem em camada espessa.

INTRODUÇÃO

O minério de ferro possui grande importância para a economia mundial pois é a matéria prima base para a produção do aço (Holmes e Lu, 2015). A umidade presente no minério extraído em lavras a céu aberto e subterrâneas, pode causar problemas nas etapas de beneficiamento e de transporte, como o entupimento das correias transportadoras, diminuição da eficiência energética dos autos fornos e provocar pausas indesejáveis nos embarques em navios devido ao excedente da TML (*Transportable Moisture Limit*) (Souza Pinto *et al.*, 2020). Desta forma, existe a necessidade do desenvolvimento e a melhoria dos processos de secagem utilizados na mineração.

Neste contexto, a secagem em leito fixo pode fornecer informações a respeito do comportamento do material quando submetido a diferentes condições de processo e também dos mecanismos de transferência de calor e

massa presentes (Prado e Sartori, 2011). Os valores de umidade e de temperatura obtidos para diferentes posições axiais e os coeficientes de transferência de massa obtidos na secagem em leito fixo em camada espessa podem auxiliar na modelagem, simulação e no desenvolvimento dos processos de secagem dos produtos da indústria de mineração.

No trabalho de Souza Pinto *et al.* (2020) foi realizada a caracterização, secagem em estufa com convecção forçada e a secagem em leito fixo a 400 °C do minério de ferro *pellet feed* e *sinter feed*. Os autores obtiveram períodos prolongados de taxa de secagem constante na secagem em estufa e concluíram que a secagem em leito fixo à taxa constante pode reduzir os custos de operação. Ljung *et al.* (2012) simularam a transferência de calor e de massa na secagem em leito fixo de pelotas de minério de ferro utilizando um modelo bidimensional com discretização Voronoi e com um modelo contínuo unidimensional, o modelo contínuo apresentou melhor ajuste para

a distribuição de partículas de tamanho uniforme.

Tendo em vista os aspectos apresentados, este trabalho apresenta um estudo de secagem de minério de ferro em leito fixo em camada fina e espessa. A análise dos resultados foi baseada na avaliação da influência da temperatura no processo, no ajuste de modelos da literatura e na obtenção de coeficientes de transferência de massa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material

Os experimentos de secagem foram conduzidos utilizando o minério de ferro *pellet feed*, fornecido pelo Instituto Tecnológico Vale, proveniente de Carajás-PA. Para o preparo das amostras, o minério *in natura* foi seco em estufa a 105°C por 24 horas para a remoção da umidade residual. Após, foi separado em peneiras Tyler. A fração mássica do material com diâmetro inferior a 500 µm foi umidificada e utilizada nos experimentos de secagem.

Umidificação

O minério de ferro foi umidificado até a umidade de 10% em base úmida pela adição de água líquida às amostras, assim como o procedimento realizado por Souza Pinto *et al.* (2020). Para o empacotamento do leito, o minério umidificado foi extrudado em uma peneira com 6 mm de abertura. Na Figura 1 são apresentadas imagens do material.

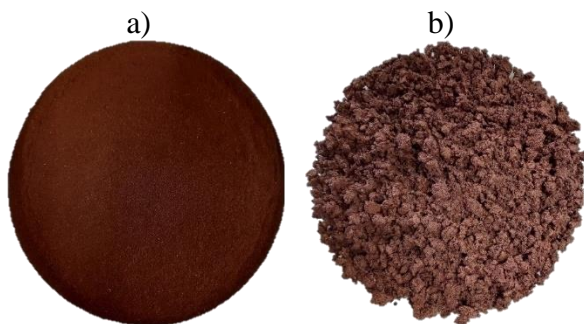


Figura 1: a) Minério de ferro *pellet feed* com diâmetro inferior a 500 µm. b) Minério de ferro com umidade de 10 % (b.u.) extrudado em peneira de 6 mm de abertura.

Umidade

A umidade do minério foi determinada pelo método de estufa, em que a massa seca é

obtida após 24 horas em estufa a 105 °C. A razão de umidade média adimensional do leito (RU) foi determinada utilizando a Equação 1,

$$RU(t) = \frac{\overline{X(t)} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (1)$$

Módulo experimental

Na Figura 2 é apresentada uma ilustração do módulo de secagem.

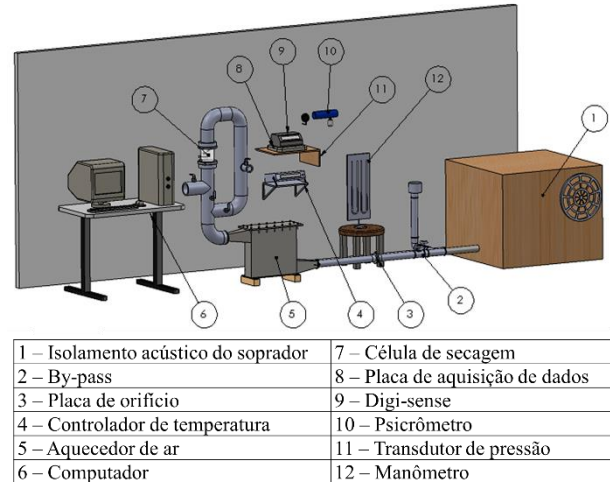


Figura 2: Módulo de secagem em leito fixo. Imagem adaptada de (Genaro *et al.*, 2022).

A unidade consiste de uma célula de secagem cilíndrica de acrílico com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. O ar de secagem foi fornecido por um soprador IBRAM de 3,5 HP de potência. Um sistema de válvulas *by-pass* foi utilizado para o ajuste da vazão de ar alimentada, aferida através da queda de pressão obtida com uma placa de orifício. O ar foi aquecido por duas resistências elétricas de 1000 W e a temperatura controlada por um controlador Flyever FE50S. A unidade é equipada com um sistema de aquisição de dados de pressão fornecidos por transdutores de pressão Auto Tran Incorporated (0-10 inH₂O e 1-5 V) e termopares do tipo J, o sistema possui um microcomputador, uma placa de aquisição de dados Lynx ADS0500 e uma interface em LabVIEW.

Secagem em camada fina e espessa

A secagem foi realizada com escoamento ascendente de ar nas temperaturas de alimentação de 50, 60, 70 e 80 °C e velocidade superficial de 0,7 m·s⁻¹ em relação à área transversal da célula de acrílico. Para a secagem

em camada fina foi utilizada uma camada 1 cm de espessura de minério com umidade inicial de 10 % (b.u.), correspondente a massa de $174,0 \pm 0,1$ g. A cinética de secagem para cada condição foi obtida através da aferição da massa total da célula durante 60 minutos, utilizando uma balança analítica.

Para a secagem em camada espessa foi utilizada uma espessura do leito de 10 cm de altura, correspondente a $1600,0 \pm 0,1$ g de minério de ferro com umidade inicial de 10 % (b.u.). A célula de secagem ilustrada na Figura 3 – a) foi utilizada para obter a umidade média do leito e a temperatura transiente em 10 posições axiais, medidas a partir da face inferior do leito. A célula de secagem fracionada, Figura 3 – b), foi utilizada para obter a umidade em 10 posições axiais do leito. O procedimento experimental segue os descritos por Albini *et al.* (2018) e Genaro *et al.* (2022).

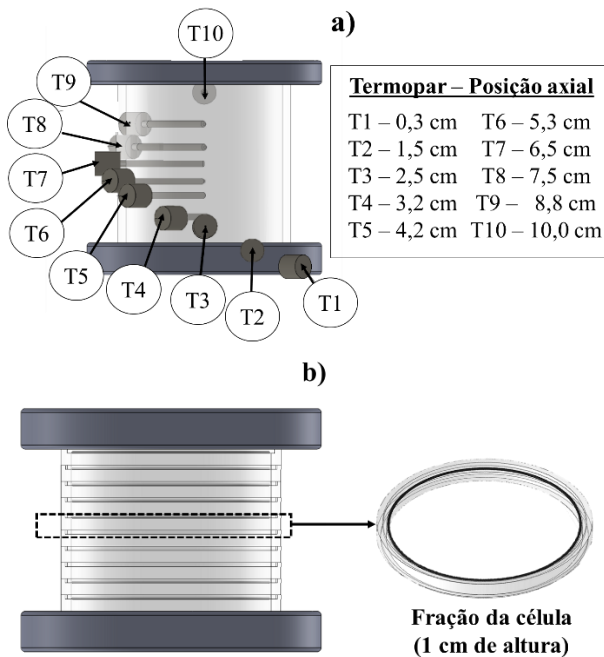


Figura 3: a) Célula de secagem utilizada para os experimentos de temperatura em camada espessa e de umidade média do leito em camada fina e espessa. b) Célula de secagem fracionada. Imagem adaptada de Genaro *et al.* (2022).

Coefficiente de transferência de massa na secagem em camada fina

Aos dados experimentais de taxa de secagem ($d\bar{X}/dt$) em camada fina, para cada temperatura, foi ajustado o modelo apresentado na Equação 2. A taxa é proporcional a umidade

do material em um instante de tempo, sendo possível determinar o coeficiente de transferência de massa (k) a partir de um ajuste linear da equação aos dados experimentais.

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = -k(\bar{X} - X_{eq}) \quad (2)$$

Modelagem matemática da cinética de secagem em camada fina

Foram utilizadas duas abordagens para a modelagem da cinética de secagem do minério de ferro. A secagem em camada fina foi analisada sob a ótica de uma camada composta por inúmeras partículas de aglomerados esféricos de minério, com 6 mm de diâmetro. Dessa forma, a análise dos resultados foi baseada na avaliação de uma única partícula representativa para a média de partículas presentes na camada fina. Abordagem semelhante foi realizada por Genaro *et al.* (2017) na secagem de grãos de soja.

A equação diferencial parcial apresentada pela Equação 3, descreve a difusão intrapartícula da umidade em uma esfera de minério de ferro a partir da Lei de Fick. A Equação 3 é válida para $0 < r < R$ para todo $t > 0$.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ef} r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \quad (3)$$

Abordagem i) - Modelo difusivo tradicional:

O modelo prevê a umidade média de uma partícula ao longo do tempo, assumindo que a difusividade efetiva (D_{ef}) é constante e que o transporte de massa ocorre na direção radial. Como condição inicial, assume-se distribuição uniforme de umidade, Equação 4. Como primeira condição de contorno, temos a simetria no centro da partícula, Equação 5. Para a segunda condição de contorno considera-se que a resistência interna à transferência de massa é predominante, ou seja, que a umidade na superfície da esfera do aglomerado é a de equilíbrio durante a secagem, Equação 6. Crank (1975) propõe como solução analítica para a Equação 3 o modelo apresentado pela Equação 7.

Condição inicial ($t = 0$):

$$X(r, 0) = X_0 \quad (4)$$

Condição de contorno 1 ($r = 0$):

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (5)$$

Condição de contorno 2 ($r = R$):

$$X(R, t) = X_{eq} \quad (6)$$

Modelo difusivo tradicional:

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right) \quad (7)$$

Abordagem ii) - Modelo difusivo com condição de contorno convectiva: O modelo matemático mantém as condições inicial e de contorno 1 do modelo difusivo tradicional, Equações 4 e 5, respectivamente. A condição de contorno 2 de umidade de equilíbrio na superfície é substituída pela condição de contorno convectiva na superfície da esfera, Equação 8. A solução analítica é apresentada pela Equação 11 (Moreira, 2022), cujos parâmetros Bi_m e α_n devem satisfazer a equação transcendental, Equação 10.

Condição de contorno 2 ($r = R$):

$$-D_{ef} \left. \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = K_{tm} (X(r, t)|_{r=R} - X_{eq}) \quad (8)$$

$$Bi_m = \frac{K_{tm} R}{D_{ef}} \quad (9)$$

$$\frac{\alpha_n}{1 - Bi_m} = \tan(\alpha_n) \quad (10)$$

Modelo difusivo com contorno convectivo:

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6 Bi_m^2}{(1 - Bi_m)} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\cos(\alpha_n) \sin(\alpha_n)}{\alpha_n^2 [\alpha_n - \sin(\alpha_n) \cos(\alpha_n)]} \exp\left(\frac{-\alpha_n^2 D_{ef} t}{R^2}\right) \right\} \quad (11)$$

Para o ajuste dos modelos difusivos aos dados de cinética de secagem em camada fina, foram utilizados os 100 primeiros termos das séries. Os parâmetros D_{ef} e Bi_m foram estimados em uma rotina desenvolvida em MatLab® R2016a, utilizando uma função de otimização para a minimização da função objetivo apresentada a seguir:

$$f_{obj} = \sum (RU_{experimental} - RU_{modelo})^2 \quad (12)$$

A raiz do erro quadrático médio (REQM), Equação 13, foi utilizada como critério de avaliação da qualidade dos ajustes. Nesta equação, N é o número de dados avaliados, RU_{modelo} e $RU_{experimental}$ são as razões adimensionais de umidade previstas pelos modelos e experimentais, respectivamente.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RU_{experimental} - RU_{modelo})^2} \quad (13)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Secagem em camada fina

Na Figura 4 - a) e b) são apresentados os gráficos de razão de umidade em função do tempo e de taxa de secagem para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente.

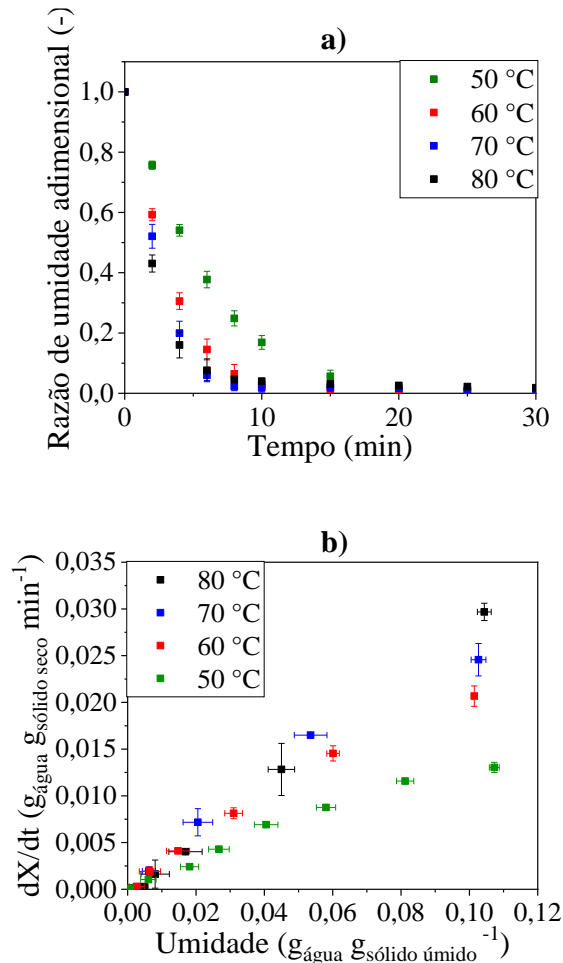


Figura 4: a) Razão de umidade adimensional em função do tempo de secagem, para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C. b) Taxa de secagem em função da umidade em b.u. para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

Pela Figura 4 - a) verifica-se, conforme esperado, que o aumento da temperatura de secagem provocou a diminuição do tempo total do processo. Para as temperaturas de 70 e 80 °C, as curvas de razão adimensional de umidade não apresentam diferenças significativas quando comparadas às temperaturas de 50 e 60 °C. Contudo, as taxas de secagem apresentadas na Figura 4 - b), indicam o aumento da taxa com o aumento da temperatura do ar. Observação semelhante foi relatada por Souza Pinto *et al.* (2020), na secagem de minério de ferro *pellet feed* em estufa de convecção forçada com contato paralelo entre o ar e o minério de ferro.

A taxa de secagem obtida para as quatro temperaturas, Figura 4 - b), se dá em período decrescente. Este resultado indica que os mecanismos de transferência de massa internos podem ser os predominantes para estas condições experimentais avaliadas. Os resultados de Souza Pinto *et al.* (2020) mostraram a presença de períodos prolongados de taxa constante de secagem para as quatro temperaturas avaliadas, até o valor de umidade crítica, a partir deste ponto, também observaram a taxa decrescente. Destaca-se que a secagem realizada por Souza Pinto *et al.* (2020) foi realizada em estufa com circulação forçada, em condições de baixa velocidade do ar, onde o empacotamento do leito de partículas aglomeradas era praticamente inexistente.

Os valores de taxa de secagem em período constante encontrados por Souza Pinto *et al.* (2020) foram de 0,0023 a 0,0050 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ para o minério *pellet feed* nas temperaturas de 50 a 80 °C, valores aproximadamente 10 vezes menores quando comparados com os resultados encontrados neste trabalho no início da secagem em leito fixo. Além disso, deve-se considerar que a secagem em estufa possibilitou um melhor mapeamento do início do processo, pois o sistema de aquisição de dados viabiliza a obtenção da massa do material em instantes de tempo menores em comparação com os intervalos de tempo possíveis na operação manual do leito fixo. Assim, é possível que existam períodos de taxa de secagem constante no início do processo de secagem em leito fixo, entre as faixas de umidade de 0,06 a

0,10 $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, que não foram identificados devido a metodologia empregada na aquisição dos dados.

Desta forma, os resultados indicam que a forma de aglomeração das partículas e do empacotamento do leito influenciou a taxa de secagem e os mecanismos de transferência observados. As partículas de minério de ferro secas, Figura 1 - a), apresentam grande fração de finos. Aproximadamente 32,7% das partículas possuem diâmetro volumétrico inferior a 20 μm . Souza Pinto *et al.* (2020) mostram que o minério de ferro não apresenta grande porosidade intra-partícula, ou seja, após a umidificação e a extrusão em peneira, são formados aglomerados como os ilustrados na Figura 5 com a formação de poros entre as partículas. A umidade retida nos interstícios, deve então migrar até a superfície dos aglomerados para ser arrastada pela corrente de ar. Neste processo de transferência de massa, mecanismos como a capilaridade e a difusão podem estar presentes na secagem do minério de ferro.



Figura 5: Ilustração esquemática dos aglomerados de minério de ferro úmidos e dos mecanismos de transferência presentes na secagem em leito fixo.

Na Tabela 1 são apresentados os coeficientes de transferência de massa obtidos para a secagem em camada fina. Observa-se a tendência de aumento linear de k com a temperatura de secagem. Esta tendência foi representada a partir do ajuste de uma correlação do tipo Arrhenius, Equação 14, cujo ajuste linear forneceu um R^2 de 0,9089.

Tabela 1: Coeficientes de transferência de massa e os coeficientes de determinação obtidos para os ajustes lineares.

Temperatura de secagem	k (min^{-1})	R^2
50 °C	0,1184	0,9804
60 °C	0,1937	0,9863
70 °C	0,2278	0,9841
80 °C	0,2592	0,9986

$$k[\text{min}^{-1}] = 1001,36[\text{min}^{-1}] \exp\left(2891,53[\text{K}] \frac{1}{T[^\circ\text{C}] + 273,15}\right) \quad (14)$$

Na Figura 6 são apresentados os gráficos de razão de umidade em função do tempo, preditas pelo modelo difusivo tradicional para as temperaturas de secagem de 50, 60, 70 e 80 °C. Na Tabela 2 são apresentadas as D_{ef} e os REQM obtidos a partir dos ajustes. O modelo difusivo tradicional apresentou melhores estimativas para as secagens a 60, 70 e 80 °C.

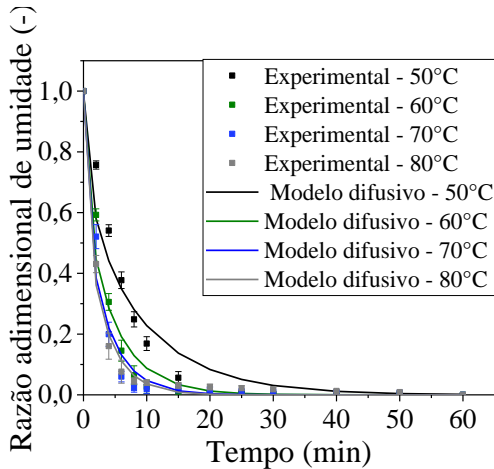


Figura 6: Razão de umidade adimensional em função do tempo, predita pelo modelo difusivo tradicional para a secagem em camada fina nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

Tabela 2: Parâmetros estatísticos e de ajuste do modelo difusivo tradicional.

Temperatura	$D_{\text{ef}} \cdot 10^{-9}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	REQM $\cdot 10^{-2}$
50 °C	1,5102	6,9023
60 °C	2,9463	4,9756
70 °C	3,8878	4,6959
80 °C	4,2994	2,7599

As razões de umidade em função do tempo preditas pelo modelo difusivo com condição de contorno convectiva são apresentadas na Figura 7. Os parâmetros de ajuste, D_{ef} e Bi_m , o coeficiente de transferência de massa externo, K_{tm} , e o REQM são apresentados na Tabela 3.

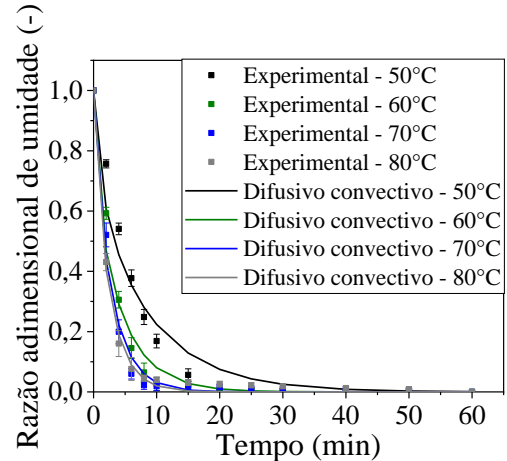


Figura 7: Razão de umidade adimensional em função do tempo, predita pelo modelo difusivo com condição de contorno convectiva, para a secagem em camada fina nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

Tabela 3: Parâmetros estatísticos e de ajuste do modelo difusivo com condição de contorno convectiva.

Temperatura	Bi_m (-)	$D_{\text{ef}} \cdot 10^{-9}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$K_{\text{tm}} \cdot 10^{-5}$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	REQM $\cdot 10^{-2}$
50 °C	34,87	1,7522	2,0368	5,9530
60 °C	27,77	3,4754	3,2174	4,2819
70 °C	5,98	7,0226	1,4001	3,1698
80 °C	5,41	8,2535	1,4874	1,8923

Avaliando as predições dos modelos difusivos, observa-se que o modelo mais complexo, com condição de contorno convectiva, apresentou desempenho semelhante ao modelo difusivo tradicional. A partir da Figura 7 e dos valores de REQM da Tabela 3, é possível verificar que o modelo difusivo convectivo forneceu melhores resposta para as razões de umidade em função do tempo nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, assim como o modelo difusivo tradicional. Os valores de Bi_m representam a razão entre a resistência interna e externa à transferência de massa na secagem de uma partícula esférica de minério de ferro. A faixa dos valores de Bi_m obtidos experimentalmente está entre 0,2 e 50. Nesta

faixa, de acordo com Strumillo e Kudra (1986), a ordem de grandeza entre as resistências internas e externas à transferência de massa são iguais. A difusividade efetiva obtida é relativa à secagem de uma esfera de minério de ferro com diâmetro de 6 mm, este parâmetro pode ser utilizado na simulação da secagem do minério de ferro.

Destaca-se que o modelo difusivo com condição de contorno convectiva apresenta lacunas que precisam ser melhor averiguadas, principalmente pelo formato dos aglomerados de minério não ser esférico como sugere a hipótese do modelo e pelo ajuste não representar adequadamente a secagem na temperatura de 50 °C.

Tendo em vista que os modelos não representaram adequadamente os resultados para a temperatura de 50 °C, foi considerada a possibilidade de existência de um período constante de taxa de secagem nos instantes iniciais dessa condição experimental. Os modelos difusivos tradicional e convectivo foram então ajustados excluindo os dois primeiros pontos da secagem, que correspondem ao período de taxa média constante de $0,0123 \text{ g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{sólido}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ da Figura 4 – b), de forma a garantir que a condição de taxa decrescente fosse atendida. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros dos modelos e estatísticos obtidos a partir dessa análise.

Tabela 4: Parâmetros estatísticos e de ajuste do modelo difusivo tradicional e convectivo, excluindo os pontos iniciais para a temperatura de 50°C.

Parâmetro	Modelo difusivo tradicional	Modelo difusivo convectivo
$Bi_m (-)$	-	34,10
$D_{ef} \cdot 10^{-9} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	1,6553	1,8992
$K_{tm} \cdot 10^{-5} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	-	2,1588
$REQM \cdot 10^{-2}$	5,0290	4,4242

Os valores de REQM obtidos para os dois modelos são menores do que os apresentados nas Tabelas 2 e 3, mostrando que os modelos difusivos representam melhor a secagem desconsiderando o intervalo de tempo inicial

nessa condição, onde há a possibilidade da existência de taxa constante no início da secagem a 50 °C.

Secagem em camada espessa

A secagem do minério de ferro em camada espessa nas diferentes temperaturas forneceu meios porosos e quebradiços de formato cilíndrico, como o ilustrado na Figura 8. Estes tarugos são resultantes da compactação e aglutinação dos aglomerados úmidos durante a secagem.



Figura 8: Fotografias do meio poroso de minério de ferro obtido após a secagem em camada espessa.

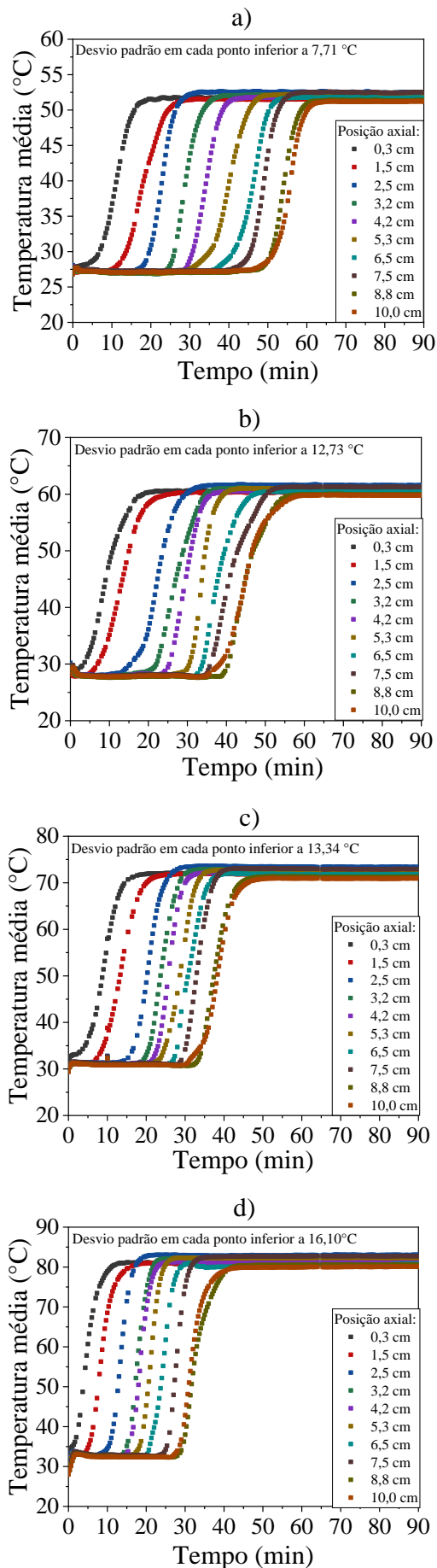


Figura 9: Temperatura média axial em função do tempo. Velocidade do ar de $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e temperatura de alimentação de: a) $50 \text{ }^\circ\text{C}$, b) $60 \text{ }^\circ\text{C}$, c) $70 \text{ }^\circ\text{C}$, d) $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Avaliando a reprodutibilidade dos experimentos, embora obtiveram-se valores de desvios padrões das temperaturas axiais elevados para algumas posições axiais e, considerando a dificuldade de reprodução do empacotamento do leito de minério úmido, foi possível distinguir a temperatura transiente em cada posição axial do leito. Para a melhor visualização dos gráficos, são apresentados apenas os valores médios de temperatura.

O comportamento térmico do leito apresentado pela Figura 9 – a), b), c) e d) é característico da secagem em leito fixo, com a formação dos gradientes de temperatura. As regiões próximas a seção de alimentação do ar, posições axiais de 0,3 a 2,5 cm, atingem o equilíbrio térmico antes da região de exaustão do ar, posições axiais de 7,5 a 10,0 cm. Autores como Albini *et al.* (2018) na secagem de cevada, Altino (2019) na secagem de soja, lentilha, cevada e aveia e Genaro *et al.* (2022) na secagem de partículas esféricas de alumina, obtiveram gradientes de temperatura na secagem em leito fixo.

Outro aspecto relevante do comportamento térmico obtido na secagem do minério de ferro em camada espessa é a sua semelhança com o obtido na secagem de esferas de alumina de Perazzini (2014) e Genaro *et al.* (2022). Os gráficos da Figura 9 possuem dois patamares de temperaturas constantes, característicos dos mecanismos difusivos e convectivos de transferência massa e calor envolvidos na secagem e da interação entre a umidade e a partícula. O minério de ferro e a alumina são materiais inorgânicos, cuja umidade não se encontra quimicamente ligada a estrutura do material como nos grãos e sementes, facilitando a sua remoção.

Na Figura 10 é apresentado o gráfico de razão adimensional de umidade média do leito em função do tempo, para as quatro temperaturas avaliadas. O aumento da temperatura diminuiu o tempo total de secagem, conforme esperado. Ainda, observa-se uma boa reprodutibilidade dos experimentos devido aos baixos valores de desvio padrão apresentados graficamente. O efeito da temperatura de secagem na diferença entre as razões adimensionais de umidade obtidas para 60, 70 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$ é maior na secagem em camada

espessa, Figura 10, do que na secagem em camada fina, Figura 4 - a).

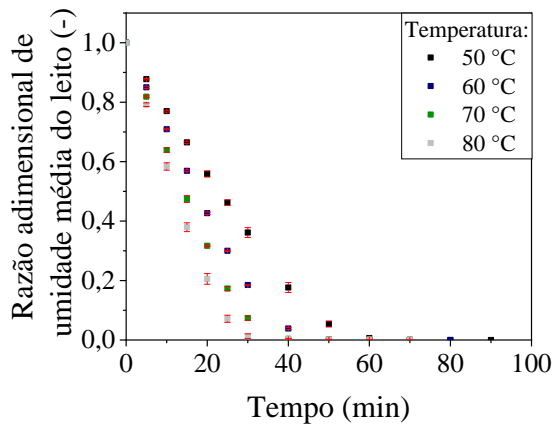


Figura 10: Razão adimensional de umidade média do leito em função do tempo. Temperatura de secagem de 50, 60, 70 e 80 °C e velocidade do ar de $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

A umidade média do leito não mostra os gradientes de umidade que são formados durante a secagem em camada espessa. Estes gradientes podem ser visualizados nas imagens da Figura 11. Além dos gradientes axiais, as fotografias indicam a presença de gradientes radiais, com regiões mais escuras e de maior umidade no centro do leito. Os gradientes radiais de temperatura e umidade geralmente são desprezados em modelos matemáticos de camada espessa, devido à complexidade dos métodos numéricos necessários para as simulações e a dificuldade em se obter medidas experimentais de temperatura e umidade.

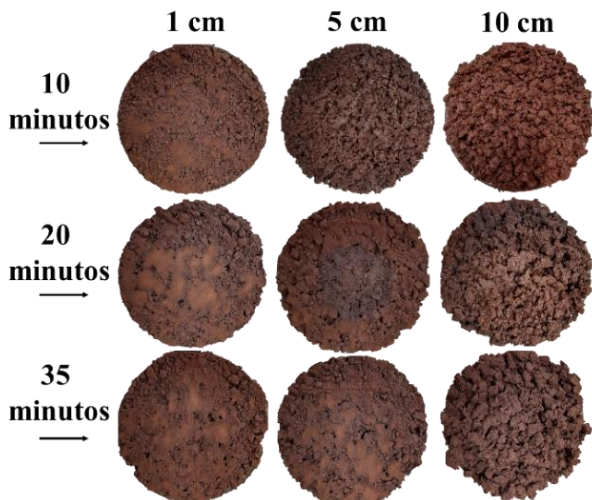


Figura 11: Fotografias do leito de minério de ferro em diferentes posições axiais e tempos de secagem. Temperatura de secagem de 80 °C e velocidade do ar de $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Na Figura 12 é apresentado o gráfico de umidade em base seca em função da posição axial e do tempo, para a secagem a 80 °C. Neste gráfico é possível verificar a formação dos gradientes de umidade axiais, característicos da secagem em leito fixo. Inicialmente em $t = 0$, todas as posições axiais estão com a umidade inicial de 10 % em base úmida. Conforme transcorrido o tempo de secagem, as regiões próximas a seção de alimentação do ar reduzem as suas umidades de acordo com a formação da frente de secagem. No tempo de 35 minutos, todas as posições axiais do leito estão secas sem a presença de umidade residual.

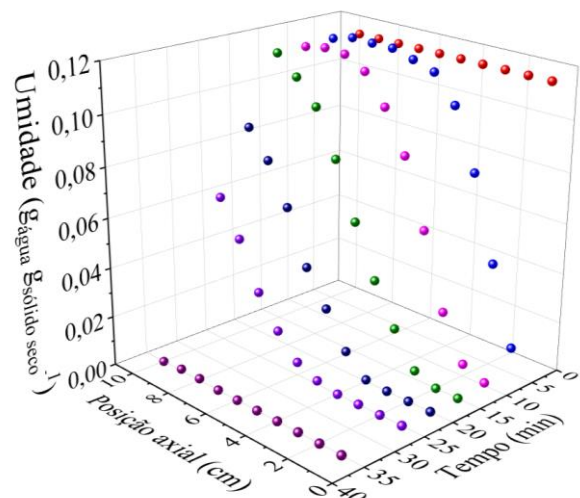


Figura 12: Umidade em base seca em função do tempo e da posição axial. Secagem do minério de ferro em camada espessa a 80 °C e velocidade do ar de $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais de secagem em camada fina verificou-se que a cinética ocorreu em taxa decrescente, indicando a presença de mecanismos internos de transferência de massa. Também, foi verificada a diminuição do tempo de secagem e aumento da taxa com o aumento da temperatura do ar. Os ajustes dos modelos forneceram o coeficiente de transferência de massa, a difusividade mássica efetiva e o número de Biot mássico. Os modelos difusivo tradicional e difusivo com condição de contorno convectiva apresentaram bons ajustes para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, embora as lacunas identificadas nas hipóteses do modelo mostrem a necessidade de maior avaliação. A secagem a 50 °C foi melhor

representada pelos modelos difusivos, excluindo dos ajustes o período de taxa de secagem constante.

Na secagem em camada espessa foi verificada a diminuição do tempo de processo, com o aumento da temperatura do ar. Também, foi observada a formação de gradientes de umidade e de temperatura em diferentes posições axiais do leito devido a formação da frente de secagem.

Por se tratar de um material inorgânico, que não apresenta encolhimento e é não higroscópico, embora apresente formato de partícula irregular, os dados de umidade e temperatura obtidos na secagem do minério de ferro em camada espessa podem ser utilizados na modelagem e simulação processo. As equações de conservação podem ser simplificadas sem a adição de fenômenos de encolhimento do leito.

NOMENCLATURA

B_{im}	Número de Biot mássico [-]
b.u.	Base úmida [$g_{\text{água}} \cdot g_{\text{sólido úmido}}^{-1}$]
D_{ef}	Difusividade mássica efetiva [$m^2 \cdot s^{-1}$]
k	Coefficiente de transferência de massa da secagem em camada fina [min^{-1}]
K_{im}	Coefficiente de transferência externo do modelo difusivo convectivo [$m \cdot s^{-1}$]
r	Coordenada radial
R	Raio da esfera de minério [m]
REQM	Raiz do erro quadrático médio
RU	Razão de umidade média adimensional [-]
t	Tempo [min]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
X	Umidade [$g_{\text{água}} \cdot g_{\text{sólido seco}}^{-1}$]
$\overline{X}(t)$	Umidade média [$g_{\text{água}} \cdot g_{\text{sólido seco}}^{-1}$]
X_{eq}	Umidade de equilíbrio dinâmica [$g_{\text{água}} \cdot g_{\text{sólido seco}}^{-1}$]
X_0	Umidade inicial [$g_{\text{água}} \cdot g_{\text{sólido seco}}^{-1}$]
α_n	Parâmetro do modelo difusivo convectivo [-]

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e a CAPES pelo suporte financeiro ao projeto de doutorado, processo 140614/2021-4.

REFERÊNCIAS

- ALBINI, G., FREIRE, F. B., FREIRE, J. T. (2018). Barley: Effect of airflow reversal on fixed bed drying. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 134 (September), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.11.001>
- 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.
- CRANK, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2nd ed.). Oxford University Press.
- PRADO, M. M., MAZZINI SARTORI, D. J. (2011). Heat and Mass Transfer in Packed Bed Drying of Shrinking Particles. In *Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/14916>
- GENARO, L. B., BISOGNIN, P. C., MOREIRA, M. F. P., SOUSA, R. C., FREIRE, J. T. (2017). ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE UM LEITO DE JORRO PARA A SECAGEM DE SOJA. *Anais do XXXVIII ENEMP 2017 - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Maringá - PR.
- GENARO, L. B., FREIRE, F. B., FREIRE, J. T., FREIRE, F. B. (2022). SOLID DRYING IN A THICK FIXED BED WITH AIRFLOW REVERSAL. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 170, 108666. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108666>
- HOLMES, R. J.; LU, L. (2015). Introduction: overview of the global iron ore industry. In *Iron Ore* (pp. 1–42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-156-6.00001-0>
- LJUNG, A. L., FRISHFELDS, V., LUNDSTRÖM, T. S., MARJAVAARA, B. D. (2012). Discrete and Continuous Modeling of Heat and Mass Transport in

Drying of a Bed of Iron Ore Pellets. *Drying Technology*, 30(7), 760–773. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.662567>

MOREIRA, M. F. P. (2022) *Matemática Aplicada à Engenharia Química: com Scilab*. 1ª Ed. E-papers, Rio de Janeiro.

PERAZZINI, H. (2014). *Secagem de sólidos porosos granulares*. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. New York: Gordon and Breach Science. 1986.

SOUZA PINTO, T. C., SOUZA, A. S., BATISTA, J. N. M., SARKIS, A. M., LEAL FILHO, L. S., PÁDUA, T. F., BÉTTEGA, R. (2020). Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>