



## **SECAGEM DE BORRA DE CAFÉ: LEITO VIBROFLUIDIZADO E ESTUFA DE CONVECÇÃO FORÇADA**

THALYNE A. F. ROCHA<sup>1\*</sup>, JOSÉ T. FREIRE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Faculdade de Engenharia Química  
\*e-mail: rochathalyne@ufscar.br

**RESUMO** – A bora de café é o principal resíduo da indústria do café solúvel, seu descarte após o processo é difícil por causa do seu caráter tóxico, mas seu uso como biocombustível se mostra viável depois de ser seca. Este trabalho analisa o processo de secagem convectiva da borra de café em leito fluidizado, vibrofluidizado e em estufa de convecção forçada através da análise de cinéticas de secagem em batelada. Para o leito fluidizado foi identificado que tanto o aumento da velocidade do ar quanto da temperatura do leito acarretou na diminuição do tempo de secagem do material, sendo que aproximadamente 80% do conteúdo de umidade é perdido no primeiro período de taxa decrescente. Foi observado também que adição de vibração ao leito diminuiu o tempo de secagem, sendo mais expressivas as diminuições obtidas com o aumento da amplitude de vibração do que com o aumento da frequência vibracional. Por fim, para um estudo do material particulado, foi feita a cinética de secagem em estufa em função da granulometria do material, verificou-se que quanto menor a partícula, mais difícil é a retirada da água presente e onde se obteve  $Bi < 0,2$ , indicando que as condições externas controlam o processo de secagem convectiva.

### **INTRODUÇÃO**

O café é um dos mais importantes commodities agrícolas do mundo. Em 2020 a produção mundial atingiu 169 milhões de toneladas de sacas do grão, dos quais o Brasil, maior produtor mundial, produziu cerca de 63 milhões (ICO, 2021). Aproximadamente metade da produção é encaminhada à indústria do café solúvel e a outra parte aos lares e cafeterias, em ambos os destinos se objetiva a fabricação da bebida a partir do grão. Neste processo de fabricação da bebida, a borra de café é gerada como principal resíduo (Mussatto et al., 2011). A borra tem caráter tóxico devido à presença de cafeína, taninos e polifenóis (Mussatto et al., 2011), sua alta carga de matéria orgânica a torna um resíduo poluente e que requer alta demanda de oxigênio para se degradar (Silva et al., 1998), estes fatores inviabilizam seu descarte em aterros sanitários.

Por outro lado, a borra de café tem na sua estrutura química componentes como lignina, celulose e hemicelulose (Mussatto et al., 2011) que caracterizam alto conteúdo de carbono na sua constituição. A borra tem poder calorífico próximo a 20MJ/kg (Kang et al., 2017), baixo teor de cinzas e alta porcentagem de matéria volátil (Tsai et al., 2012) quando seca. Tais características se assemelham à de outros resíduos agrícolas amplamente utilizados como combustíveis sólidos (Jenkins et al., 1998).

No entanto, a borra de café crua, assim como outros combustíveis de biomassa, tem vários problemas que limitam a sua aplicação para a geração de energia. Entre eles, alta umidade (80% b.u), ampla distribuição granulométrica, alta densidade bulk, baixo poder calorífico e baixa densidade energética que causam baixa eficiência em processos térmicos; além disso os altos índices de escoabilidade, que acarretam em dificuldades

de transporte e manuseio do material (Sousa; Ferreira, 2018; Kang et al., 2017; Silva et al., 1998). Contornar estas limitações é essencial para utilização da borra de café como biocombustível, sendo a redução da umidade um fator de impacto significativo na qualidade e na eficiência de plantas de bioenergia (Yi et al., 2019).

É comum para biomassas com mais de 50% de umidade (b.u.) que antes da secagem térmica seja feita uma pré-secagem por ação de forças mecânicas (Verma et al., 2017). No caso da borra de café, por desague mecânico a umidade pode ser reduzida até 45-38% b.u. (Efthymiopoulos et al., 2018; Rocha et al., 2021), esta redução da umidade tem importante impacto econômico, uma vez que o desague por via mecânica tem menor custo energético que a secagem por via térmica (Laurila et al., 2014). No desague mecânico da borra é retirada o excesso de água não ligada presente (Efthymiopoulos et al., 2018), posteriormente com a secagem térmica se obtém umidade ainda menores.

Existem vários tipos de secadores convectivos para a secagem de materiais lignocelulósicos. Os tipos mais comuns são o tambor rotativo, secador de leito fluidizado, secador pneumático e secadores de leito fixo e móvel (Pang; Mujumdar, 2010; Verma et al., 2017). Os secadores de leito fluidizado apresentam a vantagem das altas taxas de transferência de calor e massa, boa mistura dos sólidos e a boa uniformidade na distribuição da temperatura no leito (Law; Mujumdar, 2006). Além disso, o uso de agitadores mecânicos, pulsações e vibrações podem melhorar a qualidade da fluidização, o contato sólido-fluido e a eficiência térmica da secagem (Moreno et al., 2007). Assim, com a adição de vibração mecânica ao leito pode-se obter menores velocidades de mínima fluidização, maior eficiência energética e menor arraste de finos (Law; Mujumdar, 2006).

O secador de leito fluidizado com a adição de vibração mecânica é chamado de secador vibrofluidizado. A modificação da vibração do leito é feita pelos ajustes de amplitude (A) e frequência (f) de vibração, que por sua vez influenciam na dinâmica do leito (Daleffe; Freire, 2004). A relação entre a

aceleração vibracional média e a aceleração gravitacional é dada pelo adimensional de vibração ( $\Gamma$ ), o principal parâmetro utilizado para descrever o comportamento do leito, como dado pela equação (1).

$$\Gamma = \frac{A (2\pi f)^2}{g} \quad (1)$$

Em diversas aplicações, a borra é utilizada como matéria-prima a aproximadamente 10% de umidade (b.u.) (Jeguirim et al., 2014; Limousy et al., 2013; Tsai et al., 2012). Então a redução da umidade é fundamental para o balanço térmico do processo e consequentemente viabilidade da reutilização do resíduo. De modo que o principal objetivo desse trabalho é avaliar o processo de secagem da borra em leito vibrofluidizado, verificando como a temperatura, a velocidade do ar, a amplitude e a frequência vibracional afetam o conteúdo de umidade da bora em um processo de secagem. Além disso analisar como o comportamento de secagem das partículas em função do seu diâmetro médio em ensaios de cinética de secagem em estufa de convecção forçada para melhor caracterizar a secagem desse material.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Materiais

Foi utilizada a borra de café da máquina de café do DEQ/UFSCar recolhida 3 vezes por semana e imediatamente seca em estufa convencional a 105°C por 24h. O material seco foi armazenado em sacos plásticos vedados a temperatura ambiente até a utilização. Para os ensaios com a borra úmida, o processo de reumidificação foi feito 12h antes do ensaio pela adição de água destilada ao material na proporção referente à umidade desejada e o material úmido foi armazenado na geladeira a 4 °C em um recipiente fechado.

### Equipamentos

Na Figura 1 é apresentado o leito vibrofluidizado do Centro de Secagem DEQ/UFSCar utilizado nos ensaios de secagem da primeira parte deste trabalho. Na segunda

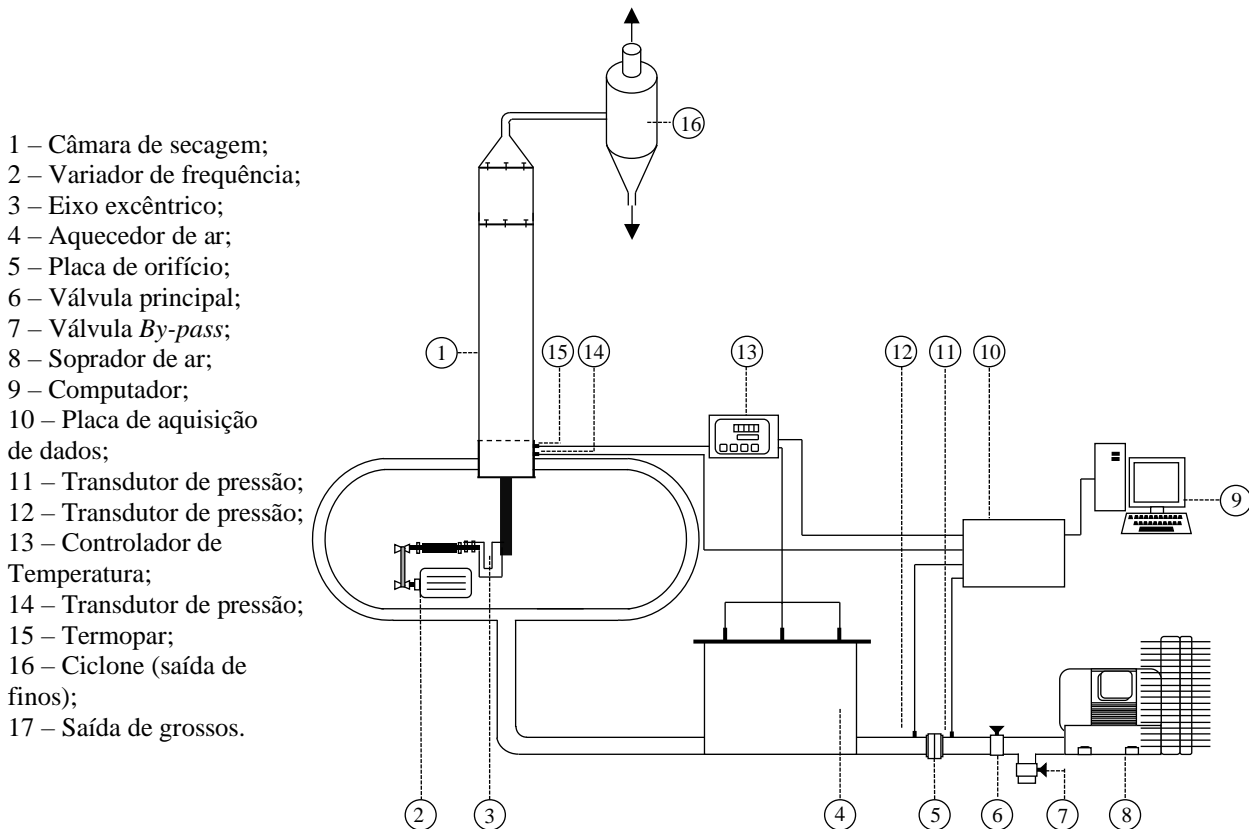


Figura 1: Leito vibrofluidizado do Centro de Secagem DEQ/UFSCar

parte, os ensaios de cinética de secagem em estufa foram realizados em uma estufa de convecção forçada convencional.

### Métodos

Secagem em leito fluidizado e vibrofluidizado: Os experimentos de secagem foram conduzidos em regime batelada buscando avaliar como os parâmetros de vibração mecânica do leito (frequência e amplitude do leito), a temperatura e a velocidade do ar afetam a umidade.

Para os ensaios em batelada em leito vibrofluidizado foram utilizadas as condições operacionais apresentadas na Tabela 1. Foram umedificadas 250g de borra seca 12h antes do experimento para umidade de 45% (b.u) por adição de água. Utilizou-se essa umidade para os experimentos de secagem térmica porque esse valor alcançado após o desague mecânico.

O leito foi estabilizado por cerca de 1h na temperatura e velocidade de operação do ensaio antes do início de cada corrida. Após a estabilização, foi adicionado ao leito de secagem a massa úmida a ser seca, e iniciou-se

o ensaio. Depois do início, as amostras foram coletadas em intervalos de tempo do interior do leito de secagem e a umidade medida por gravimetria, deixando a amostra 24h na estufa a 105°C. Todos os ensaios tiveram tempo total de 120min.

Tabela 1 - Condições operacionais dos ensaios de secagem batelada em leito fluidizado e vibrofluidizado.

Temperatura (°C)	Velocidade de (m/s)	Amplitude de (m)	Frequência (RPM)
70°	0,5	0,000	0
80°	0,75	0,003	200
-	-	0,015	300
-	-	-	400

Secagem em estufa de convecção forçada: Para a avaliação da cinética de secagem da borra de café em estufa de circulação forçada com renovação do ar foram utilizadas amostras de borra com diâmetro médio respectivamente de 610, 450, 236 e 213

um. Os dados de massa foram coletados em intervalos de tempos pré-determinados na balança acoplada a estufa. Os ensaios foram realizados com amostras de aproximadamente 8,5 g a 45 % (b.u.) com espessura de 1cm. As condições operacionais adotadas foram a temperatura de 70°C e velocidades de circulação de ar de 0,22 e 0,48 m/s, a maior velocidade de ar alcançada pela estufa que, por sua vez, se aproxima da velocidade adotada nos ensaios de leito vibrofluidizado. Os experimentos foram realizados em triplicata, totalizando 24 experimentos.

Com os dados de massa fornecidos pela balança foi calculada a umidade adimensional  $XR = f(t)$  de acordo com a definição:

$$XR = \frac{X_t - X_f}{X_0 - X_f} \quad (2)$$

Onde  $X_t$  é a umidade da amostra no tempo  $t$ ,  $X_f$  é a umidade final do ensaio e  $X_0$  é a umidade inicial da amostra.

Para o cálculo do número de Biot mássico e da difusividade efetiva, partindo da equação diferencial parcial da segunda lei de Fick (equação 3), foi utilizada a solução analítica de Crank (1957) para o transporte de massa unidimensional em uma fatia fina. A solução (Equação 5) é obtida pelo método de separação de variáveis utilizando uma condição inicial e duas condições de contorno. Assumindo as hipóteses que há evaporação de umidade na superfície, que as condições de temperatura e coeficiente de difusão constantes e que o encolhimento do leito é desprezível.

$$\frac{\partial XR}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 XR}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$\text{C.I.: } t = 0, -L \leq x \leq L,$$

$$XR = XR_0$$

$$\text{C.C. 1: } t > 0, x = 0,$$

$$\frac{dXR}{dx} = 0$$

$$\text{C.C. 2: } t > 0, x = L,$$

$$D_{ef} \frac{dXR}{dx} = h_m (XR_\infty - XR_s) \quad (4)$$

$$\overline{XR} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 Bi^2 \exp(-\alpha_n^2 D_{ef} \frac{t}{L^2})}{\alpha_n^2 (\alpha_n^2 + Bi^2 + Bi)} \quad (5)$$

Onde  $\alpha_n$  são as raízes positivas, tal  $\alpha_n \tan(\alpha_n) = Bi$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Secagem em leito fluidizado

Na Figura 2 são apresentados os gráficos de cinética de secagem da borra de café a 0,45 (b.u.) de umidade inicial, em (a) a umidade em base úmida em função do tempo e em (b) a taxa de secagem em função da umidade, com temperatura do leito de 70 e 80 °C respectivamente e da velocidade de ar de 0,5 e 0,75m/s respectivamente.

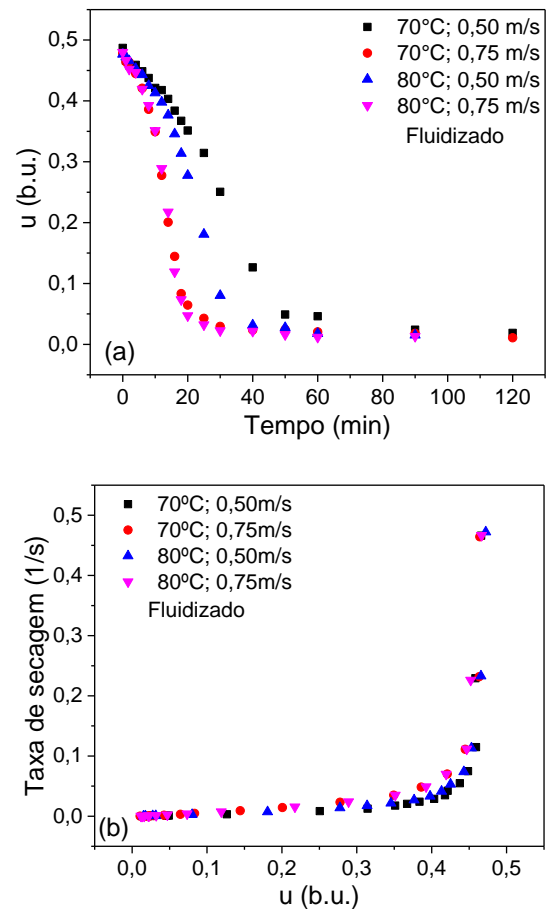


Figura 2: (a) Umidade em função do tempo de secagem e (b) taxa de secagem em função da umidade da borra de café em leito fluidizado.

Como esperado o aumento da temperatura, para ambas as velocidades do ar de secagem, acarretou na diminuição do tempo de secagem, sendo esse comportamento mais expressivo na menor velocidade do ar. Pode ser observado também que para ambas as temperaturas de secagem, o aumento da velocidade do ar leva à diminuição significativa do tempo de secagem. Assim, na condição mais favorável, a 80 °C e 0,75 m/s, a borra alcança umidade inferior a 0,05 (b.u) com aproximadamente 20 min de ensaio. Enquanto, a 70 °C e 0,5 m/s, condições menos favoráveis, foram necessários 50 min de experimento para mesma umidade ser atingida. Já na Figura 2(b) são observados os períodos de taxa de secagem decrescentes, não sendo identificado o período de taxa de secagem constante.

Na Figura 3 são apresentados a umidade e a temperatura em função do tempo para a secagem em leito fluidizado nas 4 condições operacionais utilizadas. A mudança entre o primeiro e o segundo período de taxa decrescente pode ser identificada a partir do aumento da temperatura do leito. No primeiro período de taxa decrescente as condições externas controlam a secagem, os mecanismos de transferência de calor e massa convectivo e difusivo atuam na secagem, a água superficial começa e secar e a migração do interior da partícula começa a ocorrer, neste período a temperatura do sólido aumenta lentamente a medida que água superficial se evapora (Strumillo e Kudra, 1986). Quando toda a água superficial do sólido de evapora, inicia o segundo período de taxa decrescente, os mecanismos internos de transferência de calor e massa passam a controlar totalmente a secagem e a temperatura do sólido vai aumentado até se equilibrar com a temperatura do meio (Strumillo e Kudra, 1986; Jia et al., 2015). Nas Figuras 3 (a) e (c), a 0,5 m/s e 70 e 80 °C, a mudança de mecanismos de transferência de calor e massa ocorre a aproximadamente 34 e 25 min, respectivamente. Enquanto que nas Figuras 3 (b) e (d), a 0,75 m/s e 70 e 80 °C, são ambas a aproximadamente 13 min. Nota-se que a aumento da velocidade do ar de secagem teve mais efeito na mudança dos mecanismos de secagem, e conseqüentemente do tempo de secagem global, do que a temperatura em leito fluidizado.

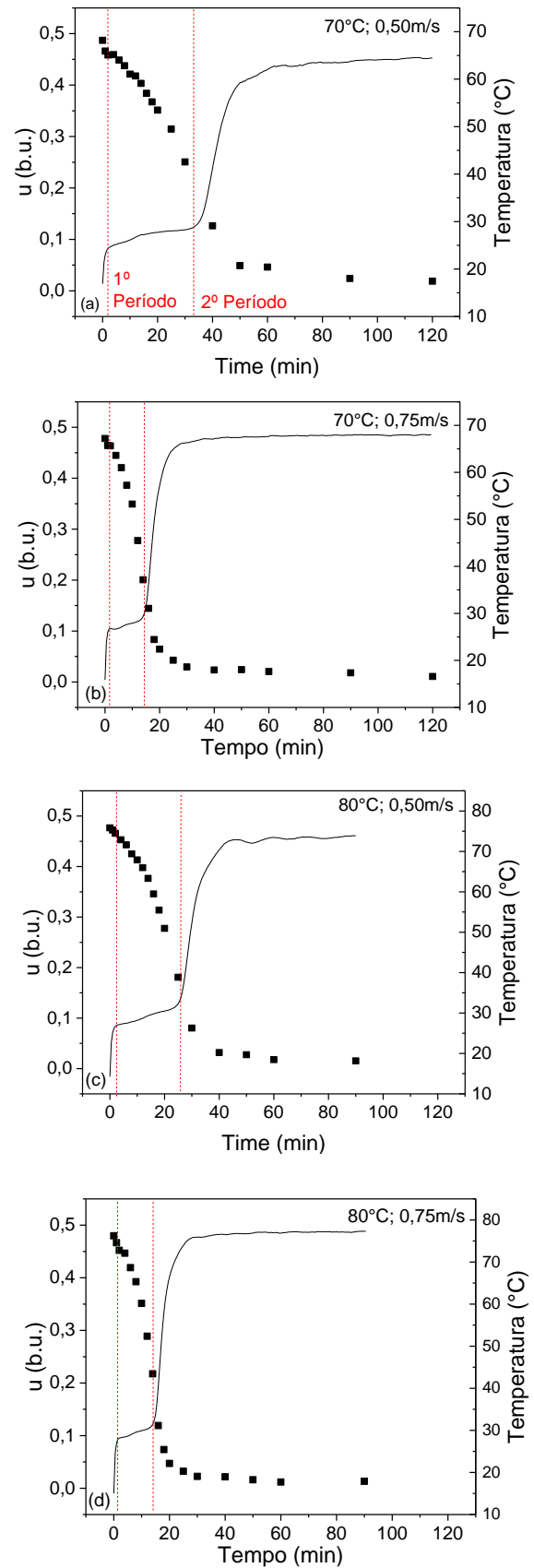


Figura 3: Umidade e temperatura em função do tempo de secagem variando temperatura e velocidade do ar.

### Secagem em leito vibro fluidizado

Para a avaliação do efeito da vibração do leito no processo de secagem foram combinadas amplitudes vibracionais de 0,015 m e 0,003 m com as frequências de 200 e 400 RPM (0,015m e 200RPM,  $\Gamma=0,67$ ; 0,003m e 200RPM,  $\Gamma=0,13$ ; 0,015m e 400RPM,  $\Gamma=2,68$ ; 0,003m e 400RPM,  $\Gamma=0,53$ ). Na Figura 4 são apresentadas a umidade em função do tempo e a taxa de secagem em função do tempo. Pode-se observar que a aplicação de vibração mecânica no leito em todas as condições favoreceu a secagem em relação ao fluidizado (sem vibração,  $\Gamma=0$ ). Foi observado também que o aumento da amplitude de vibração, nestes intervalos e para este material, favorecem a diminuição do tempo de secagem por fornecer maior energia ao processo (Meili et al., 2012) e também por favorecer o aumento da taxa de elutriação da borra de café. No entanto, para a variação da frequência vibracional não foi observada relação direta, neste caso. Enquanto que a 0,0015m de amplitude o aumento da frequência favorece as condições de secagem, a 0,003mm mudanças significativas no tempo de secagem não são observadas. O período de taxa constante não foi identificado ao longo da secagem da amostra. Pode-se observar, contudo, os dois períodos de taxa decrescente de secagem semelhantes ao leito fluidizado, modificações no comportamento da curva de taxa de secagem não foram observados em nenhum dos casos.

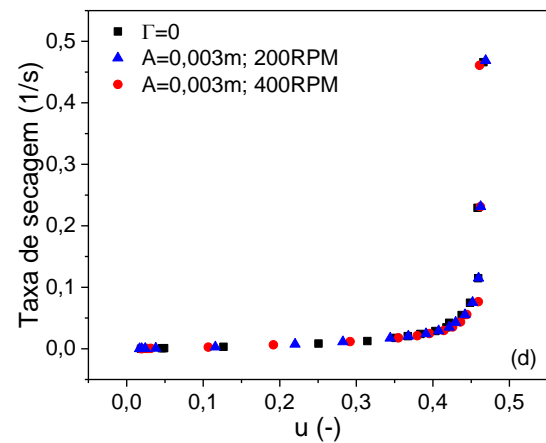
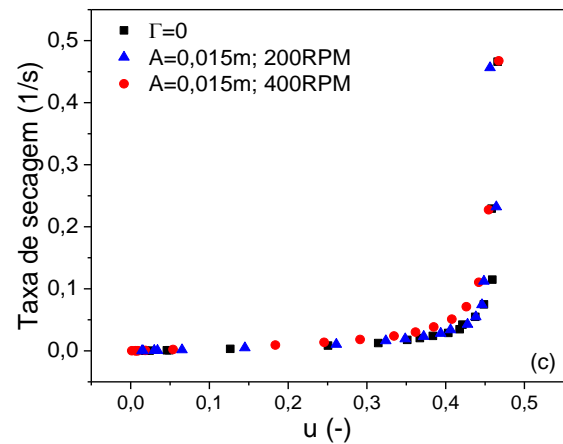
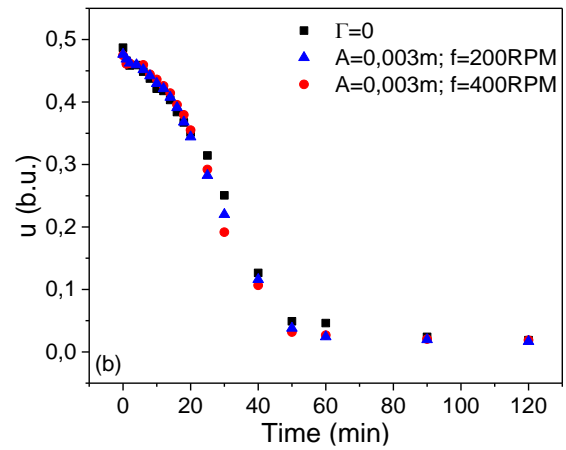
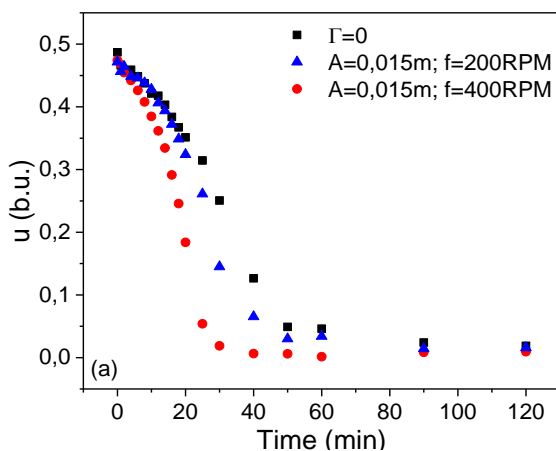


Figura 4: (a) e (b) Umidade em função do tempo de secagem e (c) e (d) taxa de secagem em função da umidade da borra de café em leito vibrofluidizado variando amplitude e frequência de vibração a  $70^{\circ}\text{C}$  e  $0,5\text{m/s}$ .

### Secagem em estufa de convecção forçada

Para melhor entendimento da relação do comportamento de secagem da borra em função da granulometria do material, ensaios de secagem em estufa com convecção forçada



foram realizados em duas velocidades do ar de secagem a 70°C para 4 frações granulométricas distintas.

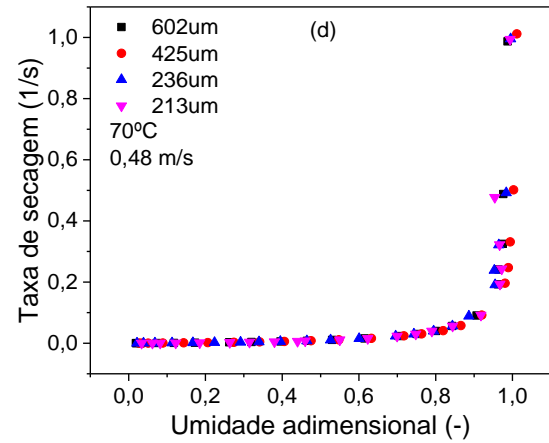
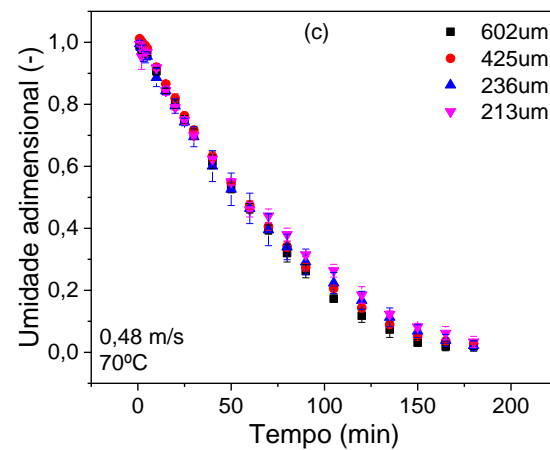
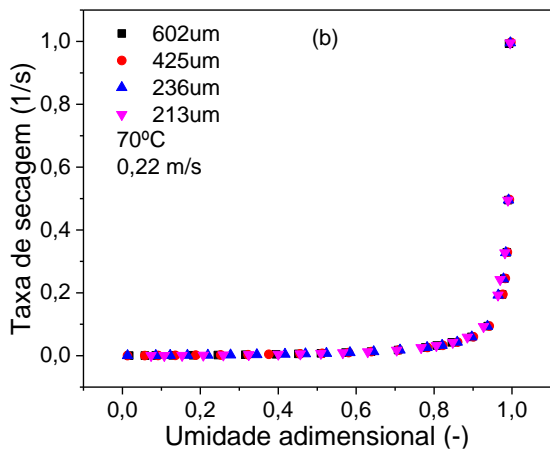
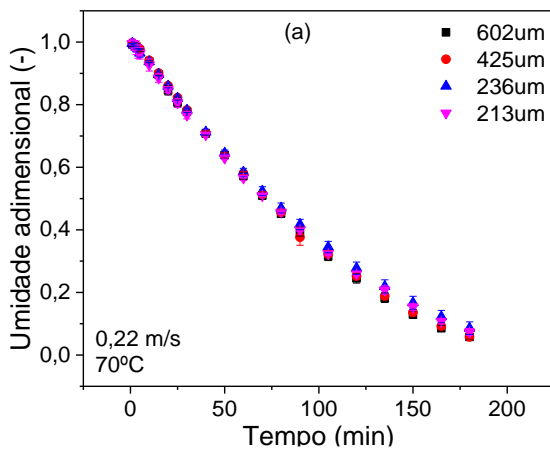


Figura 5: (a) e (c) Umidade e (b) e (d) taxa de secagem em função do tempo de secagem da borra de café em estufa de convecção forçada a 70°C variando velocidade do ar de secagem e granulometria da amostra.

A umidade e a taxa de secagem em função do tempo são apresentadas na Figura 5. Observa-se o decaimento da umidade em função do tempo e o rápido decréscimo da taxa de secagem em função da umidade do material, como esperado. Observa-se também a sobreposição dos pontos das frações no intervalo de desvio padrão, não sendo identificada uma tendência clara de variação do comportamento cinético em função da granulometria do material. Nota-se apenas que o aumento da velocidade do ar provocou um aumento no distanciamento das curvas entre si.

Na Figura 6 é apresentada a mesma cinética de secagem da Figura 5, só que com a supressão das granulometrias de borra intermediárias. Pode-se observar que a 0,22 m/s, na menor velocidade do ar, variações significativas de comportamento da secagem da borra não são identificadas. Provavelmente isso se deve a lenta velocidade do ar que favorece mecanismos difusivos de transferência interna de calor e massa (Pickles, 2003). Com o aumento da velocidade do ar de secagem de 0,22 m/s para 0,48 m/s diferenças no comportamento da curva de secagem são observadas após 60 min de ensaio. Nota-se que há um descolamento entre as duas curvas na etapa final de secagem, a borra com o diâmetro médio de 610µm, embora tenha maior tamanho, seca mais rapidamente do que a de 213µm. Esse fenômeno pode estar associado ao fato de que a borra de menor diâmetro tem maior área superficial, isso faz com que a água presente

esteja sob ação de forças superficiais mais fortes (Massaro Sousa; Ferreira, 2019) e a retirada desta água por convecção torna-se mais difícil.

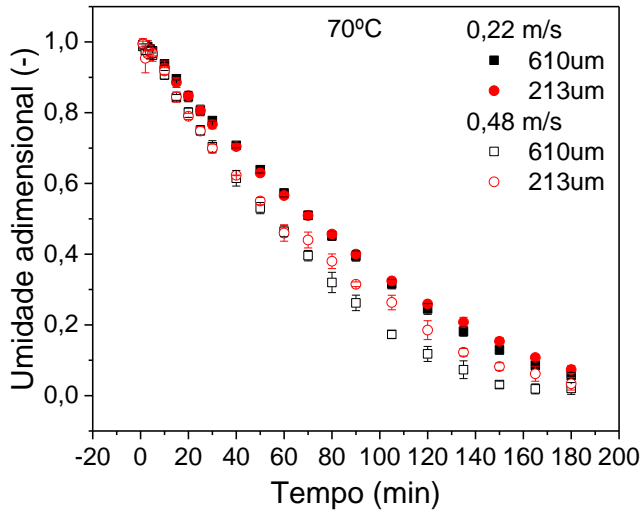


Figura 6: Umidade adimensional em função do tempo de secagem para a borra de café em estufa de convecção forçada para as amostras de 610 e 213µm variando a velocidade do ar.

Na Tabela 2 são apresentados os valores do número de Biot mássico, difusividade efetiva e coeficiente de determinação do ajuste ( $R^2$ ) calculados a partir da equação 5. Observa-se que em todas as condições foi obtido um  $R^2$  superior a 0,98, isto implica em um bom ajuste do modelo para o cálculo da difusividade aos dados experimentais. Foi encontrado que o número de Bi é menor que 0,2 em todas as condições, indicando que as condições externas de secagem controlam o processo (Strumillo e Kudra, 1986). O fato das condições externas controlarem o processo, é identificado também pelo aumento da difusividade efetiva calculada com o aumento da velocidade do ar. Isto significa que a resistência da transferência de massa na camada limite é maior que a resistência da migração de umidade interna, de modo que o processo de secagem é controlado pela resistência da camada limite (Strumillo e Kudra, 1986). A dependência das condições externas de secagem da borra é esperada tendo em vista as características do material como a alta porosidade e o pequeno diâmetro de partícula (Rocha et al., 2021).

Tabela 2: Número de Biot, Difusividade efetiva e  $R^2$  para as condições de secagem em estufa convectiva.

Veloc. (m/s)	dp (µm)	Bi	Deff (E-07)	$R^2$
0,22	610	0,103	1,96	0,986
	450	0,104	1,96	0,986
	236	0,103	1,84	0,989
	213	0,102	1,89	0,990
0,48	610	0,103	2,61	0,987
	450	0,104	2,52	0,990
	236	0,102	2,46	0,993
	213	0,102	2,31	0,992

## CONCLUSÕES

Foi observado neste trabalho que para as condições adotadas, o aumento da temperatura e velocidade do ar tem influência positiva sob o conteúdo de umidade da borra em leito fluidizado e vibrofluidizado. E que cerca de 80% do conteúdo de umidade do material é perdido no primeiro período de taxa decrescente. Foi observado ainda que a adição de vibração ao leito fluidizado favoreceu a taxa de secagem, nas condições adotadas. E que a variação da amplitude tem mais influência que o da frequência vibracional na diminuição da umidade do material em função do tempo de secagem. Por fim, como o estudo da cinética de secagem em estufa, foi encontrado  $Bi < 0,2$ , que indica que o processo de secagem convectiva da borra é controlado pelas condições externas de secagem e ainda que quanto menor o diâmetro da borra, mais difícil é a retirada da água por convecção desse material.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

CRANK, J. (1957), The Mathematics of Diffusion, Journal of the American



- Chemical Society, v. 79, n. 5, p. 1267–1268.
- DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. (2004), Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 21, n. 1, p. 35–46.
- EFTHYMIPOULOS, I. et al (2018), Integrated strategies for water removal and lipid extraction from coffee industry residues. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 29, n. October 2017, p. 26–35. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.016>>
- ICO: INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. World coffee production. 2021. Disponível em: <<http://www.ico.org/prices/po-production.pdf>>.
- JEGUIRIM, M.; LIMOUSY, L.; DUTOURNIE, P. (2014), Pyrolysis kinetics and physicochemical properties of agropellets produced from spent ground coffee blended with conventional biomass. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 92, n. 10, p. 1876–1882. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.018>>
- JENKINS, B. M. et al. (1998), Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, v. 54, p. 17–46.
- JIA, D. et al. (2015) Fluidization and drying of biomass particles in a vibrating fluidized bed with pulsed gas flow. *Fuel Processing Technology*. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.06.023>>
- KANG, S. B. et al. (2017), Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW). *Renewable Energy*, v. 113, p. 1208–1214.
- LAURILA, J.; HAVIMO, M.; LAUHANEN, R. (2014), Compression drying of energy wood. *Fuel Processing Technology*, v. 124, p. 286–289. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.016>>
- LIMOUSY, L. et al. (2013) Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, v. 107, p. 323–329. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.019>>
- MASSARO SOUSA, L.; FERREIRA, M. C. (2019), Spent coffee ground as a renewable source of energy : analysis of bulk powder flowability. *Particology*, [s. l.], v. 43, p. 92–100. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.002>>
- MEILI, L.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. (2012), Fluid Dynamics of Vibrofluidized Beds during the Transient Period of Water Evaporation and Drying of Solutions. *Chemical Engineering and Technology*, v. 35, n. 10, p. 1803–1809.
- MORENO, R.; RIOS, R.; CALBUCURA, H. (2007), Batch vibrating fluid bed dryer for sawdust particles: experimental results. *Drying Technology*, v. 18, p. 37–41.
- MUSSATTO, S. I. et al. (2011), Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, v. 4, n. 5, p. 661–672.
- PANG, S.; MUJUMDAR, A. S. (2010) Drying of Woody Biomass for Bioenergy: Drying Technologies and Optimization for an Integrated Bioenergy Plant. *Drying Technology*, v. 28, p. 690–701.
- PICKLES, C. A. (2003), Drying kinetics of nickeliferous limonitic laterite ores. *Minerals Engineering*, v. 16, n. 12, p. 1327–1338.
- ROCHA, T. A. F.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. (2021), Processing spent coffee ground powders for renewable energy generation: Mechanical dewatering and thermal drying. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 146, p. 300–311.
- SILVA, M. A. et al. (1998), The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry. *Biomass and Bioenergy*, v. 14, n. 5–6, p. 457–467.
- TSAI, W.; LIU, S.; HSIEH, C. (2012), Preparation and fuel properties of

biochars from the pyrolysis of exhausted coffee residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 93, p. 63–67. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2011.09.010>>

VERMA, M. et al. (2017), Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 71, p. 732–741.

YI, J. et al. (2019) Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review. *Drying Technology*, p. 1–16. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1628772>>