

ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DA LINHAÇA EM LEITO FLUIDIZADO E EM LEITO DE JORRO

D. R. ARROTÉIA¹, B. G. BARBALHO¹, G. C. CARA¹, V. RISOLÉO¹, L. C. SANTOS¹,
F. A. G. TESTA¹, R. CONDOTTA^{1,*}

¹Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Química

*E-mail: rcondotta@fei.edu.br

RESUMO: *O processo de secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas em indústrias químicas, alimentícias e agrícolas. A secagem em leito adquiriu grande atenção nos processos industriais devido a algumas vantagens, tais como uma maior área de contato entre o sólido e o fluido de secagem e altas taxas de transferência de calor e massa. Neste trabalho objetivou-se estudar a cinética do processo de secagem da linhaça em dois sistemas: leito fluidizado e leito de jorro, nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C. A realização do processo de secagem foi feita com uma velocidade equivalente a 1,567 m/s, utilizando o leito fluidizado, e para leito de jorro trabalhou-se com 3,318 m/s. O sistema que apresentou melhor eficiência em relação ao gasto de energia foi o leito fluidizado, enquanto que em relação ao tempo foi o leito de jorro com cone de 45°. Dentre as temperaturas estudadas, a secagem à 60 °C apresentou um menor gasto de energia e tempo, quando o objetivo foi atingir 8 % de teor de umidade.*

PALAVRAS-CHAVE: Leito Fluidizado; Leito de Jorro; Linhaça; Secagem.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento da procura por alimentos funcionais se mostra evidente, por apresentarem componentes que ajudam a prevenir doenças degenerativas e cardiovasculares, além de possuírem ação anticancerígena e anti-inflamatória. A linhaça é um alimento que se enquadra nessas características. Desta forma, as condições de armazenamento deste produto são essenciais para sua conservação. Uma dessas condições é o teor de umidade no sólido, o qual deve ser reduzido. Para esta redução, um processo muito utilizado é o da secagem, que é um processo de baixa complexidade e custo. A secagem em leito apresenta uma boa interação do material a ser seco com o fluido de secagem, sendo o foco deste trabalho. Além disso, o projeto dá continuidade a outro projeto, realizado por alunos do Centro Universitário FEI.

O teor ideal para armazenagem é definido entre 4 e 8 %, intervalos de 12 a 20 % favorecem a proliferação de fungos, de 20 a 45 % aumentam a respiração da semente e de microrganismos, e de 45 a 60 % a semente tende a germinar (POPINIGIS, 1977). A secagem desta semente é normalmente feita no intervalo de temperatura de 25 a 65 °C, visto que

maiores temperaturas tendem a degradar o material original e danificar geneticamente semente (VALENTE, 2012).

A secagem é um processo de remoção de água, ou outro solvente, de um sólido ou semi-sólido, para uma fase gasosa não saturada. É, essencialmente, um processo de transferência de calor e massa, podendo ter um alto consumo energético. A avaliação do processo de secagem se dá pela análise das curvas típicas de secagem, que relacionam a umidade do sólido com o tempo de secagem, ou ainda a taxa de secagem em função da umidade do sólido.

Existe um limite de umidade que pode ser removido do sólido, o qual é dependente da umidade do ar empregada na secagem, denominada umidade de equilíbrio. Além disso, existe outro parâmetro chamado umidade crítica, que se resume ao momento em que a taxa de secagem passa de um valor máximo e constante para um valor decrescente, e que depende das características do sólido a ser seco e das condições do fluido de secagem.

A fluidização é uma operação unitária na qual um fluido escoar de forma ascendente em um leito de partículas sólidas, adquirindo velocidade suficiente para suspender essas partículas, sem arrastá-las (McCABE; SMITH; HARRIOT, 1993). Esta operação unitária tem grande aplicação no processo de secagem de sólidos devido às elevadas taxas de transferência de calor e massa entre o fluido e as partículas.

O leito de jorro pode ser considerado como uma modificação do leito fluidizado e é utilizado, principalmente, para partículas com dimensões superiores a 1 mm, as quais dificilmente se obtém um regime fluidodinâmico estável na fluidização. A modificação realizada é na base do leito que, neste caso, apresenta formato cônico, tendo seu orifício inferior com dimensão reduzida em relação ao cilindro (PALLAI; SZENTMARJAY; MUJUMDAR, 1995). Esta alteração proporciona a formação de um caminho preferencial para o fluido do processo de secagem, resultando em um movimento cíclico dos grãos que elimina os espaços vazios que acontecem na fluidização. Como consequência, tem-se um contato ainda maior entre fluido e sólido, garantindo maiores taxas de transferência de calor e massa.

Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar o processo de secagem da linhaça, com base no tempo e gasto energético, empregando-se um leito fluidizado e dois leitos de jorros com bases cônicas de 45° e 30°, em relação à vertical.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

Para a realização do processo de secagem da linhaça foi utilizado um leito fluidizado, Figura 1, produzido por alunos do Centro Universitário FEI (SILVA et al., 2013), com algumas modificações: inserção de um difusor de ar (A) na base do leito; acoplagem de um sensor de umidade (B) na saída do leito. Além disso, o equipamento apresenta uma entrada de ar bidirecional (C), um medidor de diferença de pressão do tipo tubo em U (D), contendo bromofórmio, um rotâmetro (E), um controlador e indicador de temperatura (F), e um acionador da resistência (G).

As partes dos leitos foram confeccionadas em acrílico, exceto os cones, que são de polietileno. A configuração do leito é modificada mediante junção de diferentes partes através de flanges de conexão, as quais apresentam uma malha metálica (mesh 14) para suportar os sólidos. Os cilindros possuem graduação para auxiliar na leitura da altura do leito. O tubo utilizado no leito fluidizado possui altura de 0,493 m e diâmetro de 0,0438 m, assim como as partes da base do leito. Já para o leito de jorro são empregadas duas bases cônicas de polietileno com ângulos de 30° (I) e 45° (H) em relação a vertical. A base cônica de 30° tem uma altura de 0,0447 m e a de 45°, 0,0219 m. Os diâmetros inferior e superior são iguais para ambos e são 0,0438 m e 0,102 m, respectivamente. Os tubos do leito de jorro têm o mesmo diâmetro superior do cone e altura de 0,484 m. A Figura 1 a seguir mostra o equipamento e seus componentes aqui descritos.

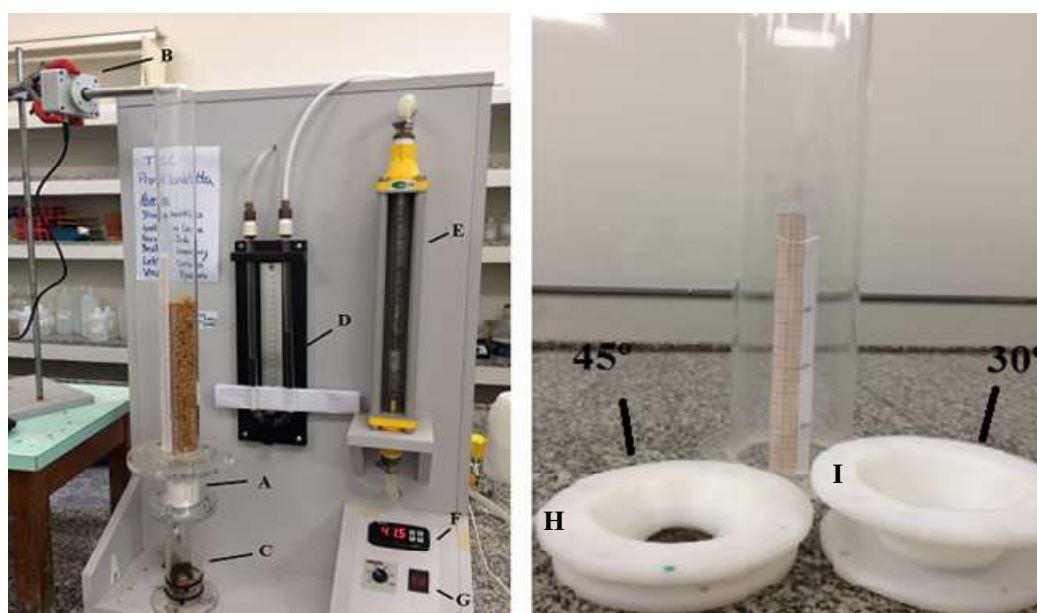


Figura 1- Equipamento e componentes dos leitos fluidizado e de jorro

Para análise da umidade da linhaça durante os experimentos foi utilizado um analisador de umidade por infravermelho modelo IV2000, da marca GEHAKA.

2.2 Métodos

Caracterização e Umidificação da linhaça: A caracterização da linhaça foi feita pela medição das três dimensões do grão: largura, comprimento e espessura. A geometria do grão foi aproximada à de um elipsoide e calculou-se sua área superficial e volume. Igualaram-se então, os volumes da partícula real a uma partícula esférica, com o intuito de calcular a esfericidade da mesma.

Em uma proveta adicionou-se uma quantidade conhecida de linhaça, verificou-se o volume aparente ocupado, então adicionou-se um volume de água pré-definido e anotou-se o volume final da proveta. A partir destes dados, calculou-se o volume real ocupado pela linhaça, como sendo a diferença entre o volume total e o da água para cálculo da densidade.

Para calcular a porosidade, encontrou-se o volume dos vazios, que é a diferença entre o

volume aparente e o volume real de linhaça, e dividiu-se pelo volume aparente.

O processo de umidificação da linhaça foi fundamental para que os ensaios pudessem partir de um mesmo panorama, do qual se objetivou atingir o valor de 25% de umidade, em base úmida, assim como 33% de umidade, em base seca. Os valores citados foram obtidos a partir de amostras preparadas com 200g de linhaça natural, além da adição de 51,2g de água, em um intervalo de tempo mínimo de 24 horas anteriormente aos ensaios de secagem. O cálculo foi baseado na medição da umidade natural da linhaça adquirida, que apresentou 5,8% de umidade, em base úmida. Portanto, utilizou-se uma balança analítica para medir as massas de material sólido em um béquer, além da medição da massa de água em outro béquer, adicionados a um saco plástico hermeticamente lacrado.

Nas operações de secagens, o estudo foi efetuado baseando-se no mesmo valor de massa seca de 150g, ou seja, a massa a ser adicionada no respectivo leito de secagem é função da umidade final da amostra obtida no processo de umidificação.

Determinação dos parâmetros fluidodinâmicos: A determinação dos parâmetros fluidodinâmicos, como velocidade mínima de fluidização, velocidade mínima de jorro, altura mínima de jorro, entre outros, foram determinados experimentalmente variando-se a vazão de ar no leito, até que este se expandisse. Variou-se a vazão de forma ascendente e descendente, anotando-se a altura do leito e a queda de pressão. Estes pontos foram plotados em função da velocidade superficial do ar e analisados. Todos os processos foram realizados em triplicata para obtermos uma análise mais fiel à realidade.

Processo de secagem: Com os leitos fluidizado e de jorro montados de forma adequada, o processo de secagem para ambos foi similar, com exceção das peças utilizadas. Foi adicionada uma massa de linhaça umidificada equivalente a 150 g de sólido seco, sempre na mesma umidade de início, 33% em base seca. Alimentou-se o leito já com a vazão de fluidização previamente estabilizada. Nos intervalos de tempo estabelecidos, amostras de sólidos foram retirados para análise da umidade, e, da maneira mais homogênea possível, essa massa retirada foi repostada para manter a massa total do leito constante. Além disso, nos mesmos intervalos anotou-se a altura do leito/jorro, a queda de pressão e a umidade de saída do ar para posterior comparação.

Modelos matemáticos: Os dados obtidos na secagem foram ajustados para três modelos matemáticos, apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Modelos empíricos para perfil de secagem (Valente, 2012).

Autor	Equação
Henderson e Pabis	$W_{rel} = a \cdot e^{-kt}$
Midilli	$W_{rel} = a \cdot e^{-kt^n} + b \cdot t$
Henderson	$W_{rel} = a \cdot e^{-k_1 t} + b \cdot e^{-k_2 t}$

Onde: $W_{rel} = \frac{W_{d,t=0}}{W_{d,t}}$

Análise energética: Para a análise energética levou-se em conta dois componentes do sistema: a resistência de aquecimento e o compressor. Para os cálculos, utilizou-se o software *Aspen Plus V8.4*. As variáveis de entrada nos sistemas foram comuns a todos os ensaios, para a resistência trabalhou-se com temperatura média de entrada constante igual a 25°C, umidade relativa do ar de 0% e pressão de 2,8 bar. As temperaturas de saída dependiam de cada ensaio.

Já para o compressor foi estabelecida uma temperatura de entrada igual a 25°C, umidade relativa do ar de 60% e pressão de entrada igual a 698 mmHg e de saída igual a 6,9 bar. Também foi adotado que o compressor não era ideal, tinha uma eficiência de 70%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Física das Sementes

Os valores encontrados são resumidos na Tabela 2 a seguir. A coluna da diferença refere-se ao valor da densidade real encontrada na literatura.

Tabela 2–Propriedades obtidas da amostras de linhaça e comparação com literatura

Linhaça	$\rho_{\text{parente}} \text{ (g/mL)}$	$\rho_{\text{real}} \text{ (g/mL)}$	Diferença (%)	ε	$d_p \text{ (mm)}$	ϕ
Natural	0,670	1,102	3,67	0,391	2,19	0,605
Úmida	0,552	1,105	3,41	0,501	2,24	0,823

3.2 Determinação dos Parâmetros Fluidodinâmicos

O parâmetro fluidodinâmico mais relevante ao estudo é a velocidade mínima, tanto de fluidização quanto de jorro. Foram calculados para a linhaça natural e umidificada, sendo a segunda a utilizada no processo. Para o leito fluidizado, a velocidade mínima encontrada foi de 1,475 m/s e para os leitos de jorro de 45° e 30° foram a mesma, igual a 3,318 m/s.

3.3 Processo de Secagem

Com os dados obtidos de teor de umidade em função do tempo foi possível construir curvas que os relacionam para todos os ensaios. A Figura 2 mostra o comportamento destas curvas nas temperaturas estudadas, provando que o jorro com cone de 45° é o que atinge um valor de teor de umidade mais rápido. Apesar dos valores para o leito de jorro serem bem próximos, o com inclinação de 30° é um pouco menos eficiente. As curvas foram plotadas a partir de equações encontradas que melhor representavam o comportamento dos dados. Esses dados foram divididos em dois ou três trechos e cada trecho aproximado para uma equação que melhor o ajustava.

Com os dados dos perfis de secagem, foi possível calcular a taxa de secagem e representá-la em função do tempo. Para o leito fluidizado e de jorro com cone de 45°, as curvas da taxa de secagem estão ilustradas na Figura 3.

Observando-se a Figura 3, verifica-se que a taxa de secagem é aumenta com o aumento da temperatura, o que é esperado devido ao fato de que maiores temperaturas fornecem mais calor para o processo. Os outros sistemas apresentam comportamento similar, sendo as maiores taxas de secagem observadas para o leito de jorro.

A Figura 3 também permitiu a estimativa da umidade crítica da linhaça, que apresentou um valor médio de 22%, considerando todos os sistemas estudados.

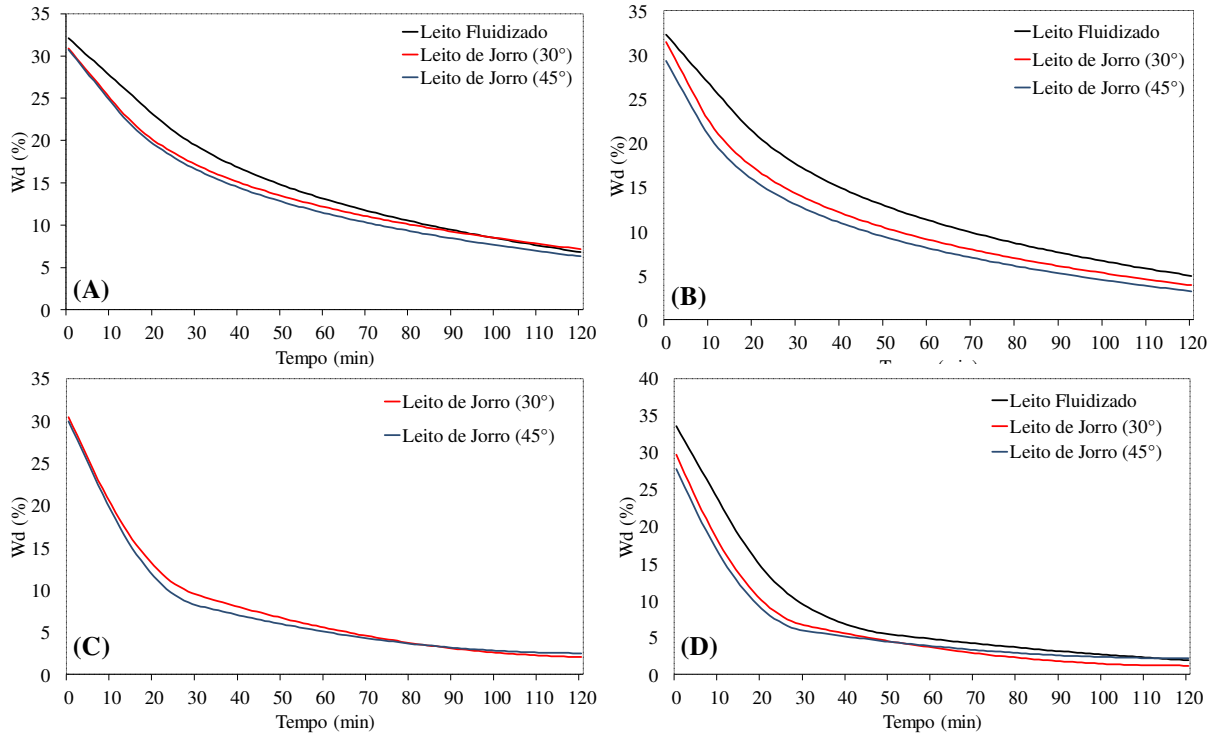


Figura 2 - Comportamento do teor de umidade: A) T = 30 °C; B) T = 40 °C; C) T = 50 °C e D) T = 60 °C

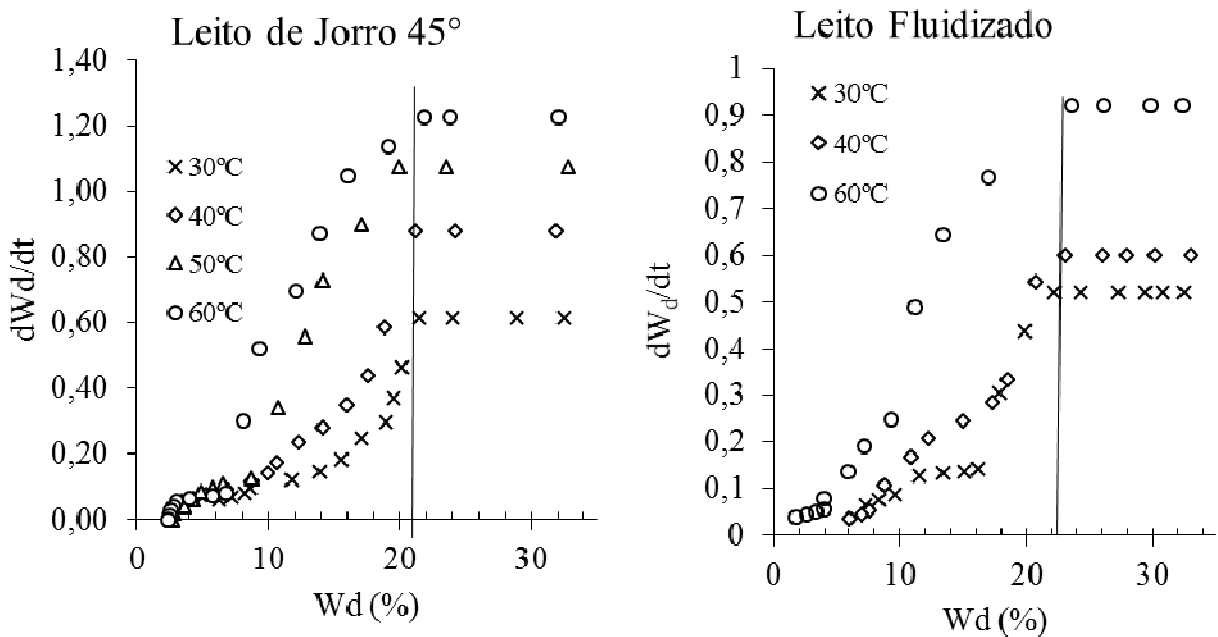


Figura 3: Taxa de secagem para o leito de jorro de 45° e leito fluidizado.

3.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Dos três modelos empíricos testados, o que melhor representou o perfil de secagem do leito fluidizado foi o modelo de Henderson. Já para os leitos de jorro, o modelo de Midilli foi o que apresentou o menor desvio-médio relativo. A Tabela 3 abaixo resume os valores dos parâmetros e os desvios-médios relativos para o melhor modelo de cada sistema.

Tabela 3 - Parâmetros e desvios dos modelos matemáticos estudados

Sistema	Modelo	Temperatura (°C)	Parâmetros				σ_m (%)
			a	b	k_1/k	k_2/n	
Leito fluidizado	Henderson	30	0,5000	0,5000	0,0138	0,0138	7,44
		40	0,2643	0,7357	0,0041	0,0307	1,51
		50	—	—	—	—	—
		60	0,7426	0,2574	0,0634	0,0111	7,44
Leito de jorro (cone 45°)	Midilli	30	1,0000	-0,0005	0,0829	0,5898	3,53
		40	1,0000	-0,0005	0,1278	0,5544	2,03
		50	1,0000	0,0004	0,1245	0,6903	3,16
		60	1,0000	0,0005	0,1657	0,6658	4,62
Leito de jorro (cone 30°)	Midilli	30	1,0000	-0,0005	0,0817	0,5781	3,13
		40	1,0000	0,0005	0,0600	0,7663	2,15
		50	1,0000	0,0000	0,1350	0,6332	4,70
		60	1,0000	0,0003	0,1312	0,7387	8,45

3.4 ANÁLISE ENERGÉTICA

Analisando-se os resultados obtidos pelos balanços efetuados, plotou-se em um mesmo gráfico a variação do teor de umidade e do gasto energético em função do tempo. Os pontos plotados são provenientes das equações ajustadas, por isso existe essa disparidade do início das curvas, porém o ponto de partida foi o mesmo para todos os ensaios.

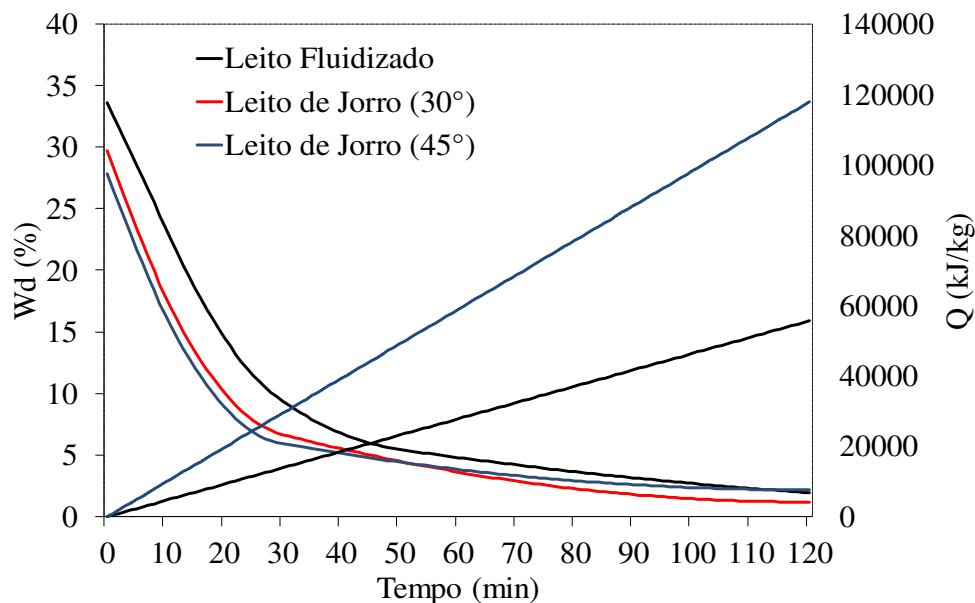


Figura 3 - Análise energética e em relação ao tempo para secagem à 60°C

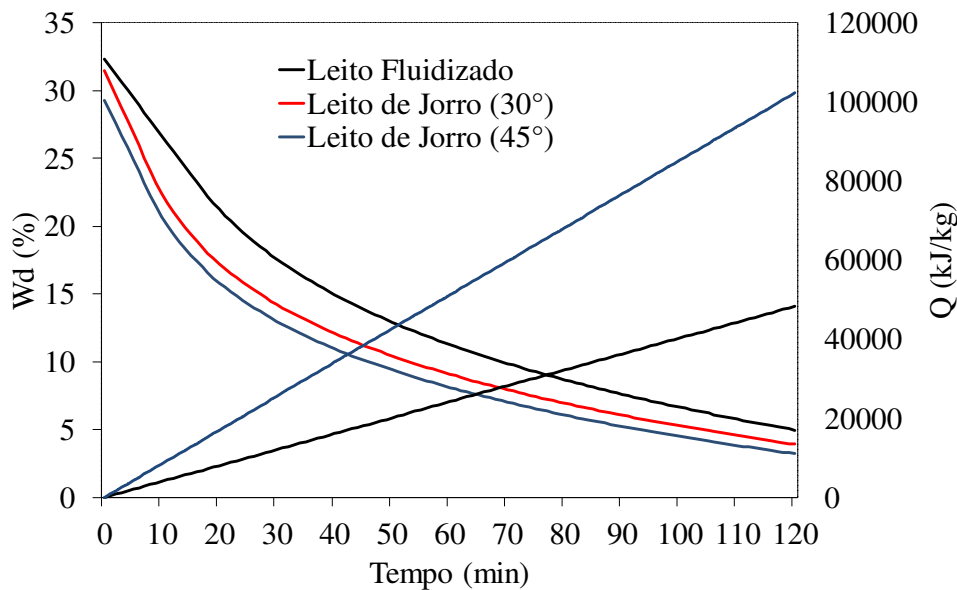


Figura 4 - Análise energética e em relação ao tempo para secagem à 40°C

Com isto, pode-se analisar, de forma independente, cada temperatura e cada sistema estudado. Através desta análise, verifica-se que o leito fluidizado, para qualquer temperatura, apresentou o menor gasto energético, conforme demonstrado pelos gráficos das Figuras 4 e 5: o patamar energético do leito fluidizado foi menor para ambas as temperaturas ilustradas. Isto se deve ao fato de que a velocidade de secagem do leito fluidizado ser menor que a do leito de jorro, necessitando de menos energia para o aquecimento de uma menor vazão de ar.

Em termos de tempo de secagem até um determinado teor de umidade, verifica-se que, para valores de umidade inferior a críticas (22%), o tempo de secagem do leito fluidizado é superior aos dos leitos de jorros. Neste estudo, o leito de jorro com cone de 45° apresentou um desempenho melhor em relação aos outros leitos. Entretanto, apesar da vazão de secagem do leito fluidizado ser menor que a metade da empregada nos leitos de jorros, o tempo de secagem do leito fluidizado é superior, porém inferior ao dobro do tempo. Assim, mais uma vez, tem-se a observação de que o leito fluidizado é o que apresenta o menor consumo energético.

Finalmente, os leitos de jorros foram os dispositivos que permitiram uma secagem mais homogênea e rápida da linhaça, apesar de um maior consumo de ar e de energia.

4. CONCLUSÃO

A caracterização da linhaça apresentou resultados de densidades coerentes com os apresentados na literatura.

A secagem foi realizada com êxito, mostrando uma diminuição no teor de umidade com o tempo e uma redução no tempo de secagem com o aumento da temperatura. A taxa de secagem também apresentou resultados satisfatórios, sendo maior em temperaturas mais altas. Foi possível identificar dois períodos de secagem, o período de taxa constante e o de taxa decrescente, cujo ponto de transição permitiu a estimativa do valor da umidade crítica,

determinadaa em torno de 22% (base seca).

O modelo empírico de Henderson apresentou uma boa aplicabilidade para o perfil de secagem da linhaça conduzida em leito fluidizado, e o modelo de Midilli para a secagem conduzida em leito de jorro.

A melhor temperatura de trabalho observada neste estudo foi de 60°C, consumindo menos tempo e energia. Entre os sistemas, o menor consumo energético foi observado para o leito fluidizado, porém a secagem ocorre em períodos mais longos. Já o leito de jorro com cone de 45° necessitou de menor tempo de secagem, porém maior gasto energético devido a necessidade de uma maior vazão de ar para promover a movimentação da linhaça em seu interior.

A vazão utilizada no processo foi constante, porém como o regime passa de fluidizado para *slugging* e a altura do jorro aumenta muito, conclui-se que a vazão deve ser variável ao longo do tempo para manter um regime uniforme durante todo o processo de secagem e, conseqüentemente, reduzir o consumo energético.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário FEI pelo suporte para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. 2009. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. 1st ed. London: Academic, 1974. p. 303.
- MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. Unit operations of chemical engineering. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- PALLAI, E.; SZENTMARJAY, T.; MUJUMDAR, A. S. Spouted bed drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1995. Cap. 13, p. 453-488.
- POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. Brasília, DF: AGIPLAN, 1977.
- SANTANA, E. B. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Paraná, Belém, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/3256>>. Acesso em: 19 mar 2016.
- SILVA, A. et al. **Montagem e operação de um secador em leito fluidizado**. 2013. 77 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2013.
- VALENTE, M. C. C.; COSTA, C. M. L.; SOUZA, C. A. G. Cinética de secagem em leito fluidizado de sementes de linhaças (*Linum usitatissimum* L.). **Rev. de Ciências Exatas**, v. 27/31, n. 2, p. 110-120, jul.-dez. 2012.

STUDY OF FLAXSEED DRYING PROCESS IN FLUIDIZED AND SPOUTED BED

D. R. ARROTÉIA¹, B. G. BARBALHO¹, G. C. CARA, V. RISOLÉO¹, L. C. SANTOS¹,
F. A. G. TESTA¹, R. CONDOTTA^{1,*}

¹FEI University, Department of Chemical Engineering

*E-mail: rcondotta@fei.edu.br

ABSTRACT: *The drying process is one of the most used unit operations in the chemical, food and agricultural industries. Bed drying has gained a great deal of attention in industrial processes due to some advantages such as large area of contact between the solid and the drying fluid and high rates of heat and mass transfer. This work aimed to study the kinetics of the drying process of flaxseed in two systems: fluidized bed and spouted bed, at temperatures of 30, 40, 50 and 60 °C. The drying process was carried out with a velocity equivalent to 1,567 m/s, in the fluidized bed, and in the spouted bed, it was worked with 3,318 m/s. The system that presented the best efficiency in relation to the energy expenditure was the fluidized bed, whereas in relation to the time the spouted bed with the cone inclination of 45° was the best. Among the studied temperatures, drying at 60°C presented a lower energy and time expenditure, when the objective was to reach 8% of moisture content.*

KEY-WORDS: Fluidized bed; Spouted bed; Flaxseed; Drying