

ESTUDO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DO CARPELO DA MACADÂMIA EM LEITO DE JORRO

P. S. ALMEIDA¹, T. P. XAVIER¹, M. S. BACELOS¹, M. A. S. BARROZO² e T. S. LIRA¹

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharias e Tecnologia

² Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

E-mail para contato: taisa.lira@ufes.br

RESUMO – A cultura da macadâmia está em pleno desenvolvimento no Brasil, sendo o estado do Espírito Santo o segundo maior produtor nacional. A utilização do seu carpele para geração de energia renovável torna-se uma alternativa muito atrativa, visto o fácil acesso e obtenção deste resíduo do processo de beneficiamento da macadâmia. A secagem do carpele aumenta o seu poder calorífico. O leito de jorro vem sendo utilizado para o processo de secagem devido às suas vantagens, como proporcionar um maior contato gás-sólido e um alto coeficiente convectivo de calor e de transferência de massa entre as fases. Neste trabalho, objetivou-se estudar a secagem do carpele da macadâmia em leito de jorro, avaliando quais as melhores condições operacionais: temperatura e vazão do ar. Sendo esta última uma função da velocidade mínima de jorro, determinada através da construção da curva característica. A queda de pressão máxima também foi determinada. O menor teor de umidade obtido ao final dos experimentos foi de aproximadamente 1,5%. As equações que melhor representaram a cinética de secagem do carpele foram a equação de Page e a equação de Overhults.

1. INTRODUÇÃO

A noqueira macadâmia é uma planta originária da Austrália que possui seus primeiros registros de cultivo no Brasil datados da década de 30 (Pimentel, 2007). Segundo este autor, seu fruto é um folículo, composto por três partes principais: carpele, casca e amêndoa. No Brasil, a produção em 2003 esteve em cerca de 3.000 toneladas de nozes “em casca” e de 600 toneladas em amêndoas, alcançando assim, a sexta posição no mercado internacional (Sobierajski et al., 2006). O estado do Espírito Santo é o segundo maior produtor de macadâmia no Brasil, e o município de São Mateus é o maior produtor do estado, possuindo aproximadamente 500 hectares de área plantada e uma produção de 800 toneladas por ano (Globo Rural, 2011).

Tanto a casca quanto o carpele são resíduos do processo de beneficiamento da noz macadâmia e encontram-se disponíveis em grande quantidade no Norte do estado do Espírito Santo. Tais resíduos podem ser utilizados para a geração de energia através da pirólise. Porém, o carpele da macadâmia possui uma maior umidade. Como a secagem do carpele aumenta seu poder calorífico, já que o poder calorífico relaciona-se negativamente com a umidade, secar este material antes de pirolisá-lo possibilita que o processo da pirólise seja mais eficiente.

Diversos trabalhos mostram a aplicação do leito de jorro para a secagem, como por exemplo, secagem de misturas de polpa de frutas tropicais (Souza, 2009), secagem de *Spirulina platensis* (Oliveira, 2006), secagem de resíduo de leite de soja “OKARA” (Lescano, 2009), secagem de feijão (Lima, 1995), secagem de microcápsulas de caseína e pectina (Marreto, 2006).

Assim, este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo experimental da secagem do carpelo de macadâmia em um leito de jorro, avaliando as melhores condições de vazão e temperatura do ar. Objetivou-se também verificar o comportamento fluidodinâmico das partículas e a estabilidade do regime de jorro.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da amostra

Os carpelos de macadâmia utilizados neste trabalho foram concedidos pela Cooperativa Agroindustrial dos Produtores de Noz Macadâmia (COOPMAC), situada no município de São Mateus – ES. Após serem recolhidos in natura, os carpelos de macadâmia foram triturados utilizando um moinho de facas e em seguida submetidos a uma classificação por peneiramento. Utilizou-se nos experimentos as partículas maiores que 1,7 mm e menores que 2,0 mm. Para determinar a umidade do carpelo empregou-se o método da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas. Obteve-se a massa específica aparente do carpelo da macadâmia por picnometria, segundo a metodologia empregada por Jones (1981) apud Rasul et al. (1999). O fluido de picnometria utilizado foi querosene.

2.2. Procedimento experimental

O leito de jorro utilizado nos experimentos foi do tipo cônico e um esquema do sistema empregado no procedimento é apresentado na Figura 1. A porosidade do leito foi determinada inserindo 470 g de carpelo no leito de jorro cilindro-cônico, atingindo uma altura de 18 cm.

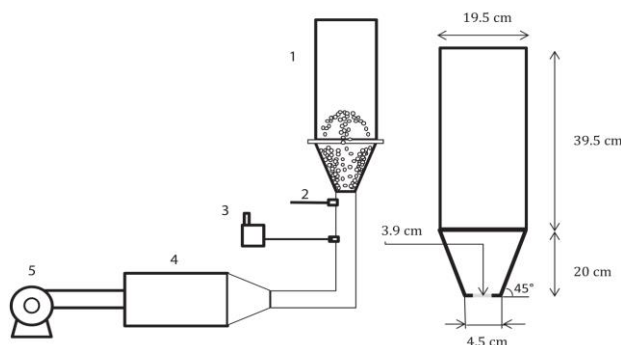


Figura 1 - Esquema do aparato utilizado no procedimento: 1-leito de jorro cilindro-cônico, 2-termopar, 3-transdutor de pressão, 4-sistema de aquecimento de ar com controle de temperatura PID, 5-soprador. Fonte: Marques, I. I. D. R.; Bacelos, M. S. (2012)

Antes dos procedimentos de obtenção da curva característica e de secagem do carpelo, foi realizada uma umidificação da amostra utilizando vapor de água por 2 horas para padronizar a umidade das amostras. Para a determinação da curva característica para a secagem de carpelo de macadâmia no leito de jorro foi inserido 470 g de carpelo, atingindo assim, 18 cm da base cônica. Em seguida, a velocidade da entrada de ar foi aumentada a partir da vazão de 0,21 m³/min até que o jorro estável fosse atingido. Após isso, a velocidade foi reduzida continuamente. Com os dados de queda de pressão e de velocidade do ar obteve-se a curva característica e determinou-se a velocidade de jorro mínimo, queda de pressão máxima no leito e queda de pressão de jorro estável.

A secagem foi realizada em batelada. Foram inseridos aproximadamente 470 g de carpelo, atingindo uma altura no leito de 18 cm. As temperaturas utilizadas na secagem foram 40, 60 e 80°C. A velocidade do ar de secagem não foi alterada, uma vez que não afeta significativamente a secagem do carpelo da macadâmia (Almeida et al., 2013), mantendo-se esta em um valor 10% acima da velocidade de mínimo jorro (24,56 m/s). A secagem foi realizada em 3 horas para cada temperatura. Para que durante o procedimento de secagem, o leito não fosse alterado significativamente pela retirada das amostras, optou-se por dividir o procedimento de secagem em duas partes. Inicialmente, a secagem foi realizada por 1 hora e 30 minutos, sendo retirados do leito de 2 a 4 gramas de carpelo a cada 30 minutos durante este período. E em uma segunda parte do experimento, a secagem foi realizada nas 3 horas propostas, sendo a primeira amostra retirada do leito somente 2 horas após o início do processo. Logo após a retirada das amostras, estas foram pesadas e em seguida inseridas em uma estufa, onde permaneceram por 24 horas para determinação da massa seca. A cinética de secagem do carpelo foi determinada utilizando modelos semi-empíricos, frequentemente utilizados para estudo de cinética de secagem, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações semi-empíricas de cinética de secagem

Equação	Referência
MR = exp(-K.t) sendo K = A.exp(-B/T _f)	Lewis (1921)
MR = C.exp(-K.t) sendo K = A.exp(-B/T _f)	Brooker et al. (1974)
MR = C[exp(-K.t) + 1/9.exp(-9.K.t)] sendo K = A.exp(-B/T _f)	Henderson e Henderson (1968)
MR = exp(-K.t ⁿ) sendo K = A.exp(-B/T _f)	Page (1949)
MR = exp[-(K.t) ⁿ] sendo K = exp(A + B/T _f)	Overhults et al. (1973)

Sendo T_f a temperatura do ar, e A, B, C e n adimensionais a serem estimados. MR é o adimensional de umidade, definido como $MR = (M - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq})$, em que M é a umidade em base seca em um dado instante, M₀ e M_{eq} são, respectivamente, as umidades em base seca inicial e de equilíbrio. Para ajustar os dados experimentais a equações de cinética de secagem realizaram-se regressões não lineares, sendo os parâmetros estimados pela minimização dos quadrados dos resíduos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A umidade do carpelo in natura foi $16,9 \pm 0,7$ %; a massa específica aparente foi $0,46 \pm 0,01$ g/cm³; e a porosidade do leito foi $0,56 \pm 0,01$. A umidade obtida após a umidificação foi de $18,5 \pm 1,3$ % (b.u.). Apesar da umidificação não resultar em um valor tão diferente do valor da umidade in natura, esta é uma etapa importante, pois quando estocado, o carpelo tem uma diminuição no valor de sua umidade.

A Figura 2 apresenta: (a) a curva característica, que relaciona a queda de pressão no leito com a velocidade do fluido, e (b) o desvio da flutuação de sinal da queda de pressão no leito em função da velocidade do fluido. Observa-se um comportamento fluidodinâmico típico de leito de jorro. A máxima altura da fonte alcançada durante o regime foi 350 mm (para a determinação desta altura fez-se uso de papel milimetrado acoplado a parede de vidro do equipamento). A queda de pressão máxima foi de 971,84 Pa e a queda de pressão de jorro estável foi de 354,35 Pa. A velocidade de jorro mínimo obtida foi 23,7 m/s ($1,6$ m³/min). Estes valores podem ser identificados na Figura 2 como ponto i, ii e iii, respectivamente.

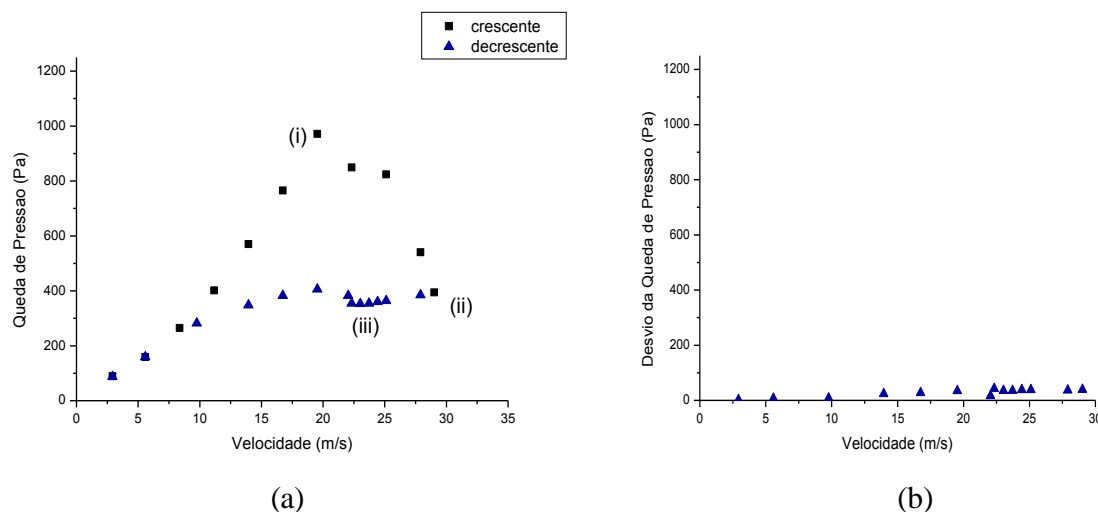


Figura 2 - (a) Curva característica e (b) desvio da queda de pressão em um leito de jorro em função da velocidade do fluido

A Figura 3 mostra a evolução do regime de jorro. Nesta figura é possível observar a passagem do leito estático (Figura 3-a), onde o ar passa através das partículas sem as perturbar, para o regime de jorro (Figura 3-b). O regime de jorro é obtido quando a vazão de ar alcança um valor capaz de romper o jorro interno formado e a concentração de partículas localizadas logo acima deste jorro diminui de forma significativa. O leito de jorro do carpelo é um regime estável, pois apresenta baixos desvios, como pode ser observado na Figura 2-b. Isto pôde ser observado visualmente durante o procedimento, já que o material jorrava facilmente, sem a formação de bolhas, leito pistonado ou grande variação da altura da fonte.

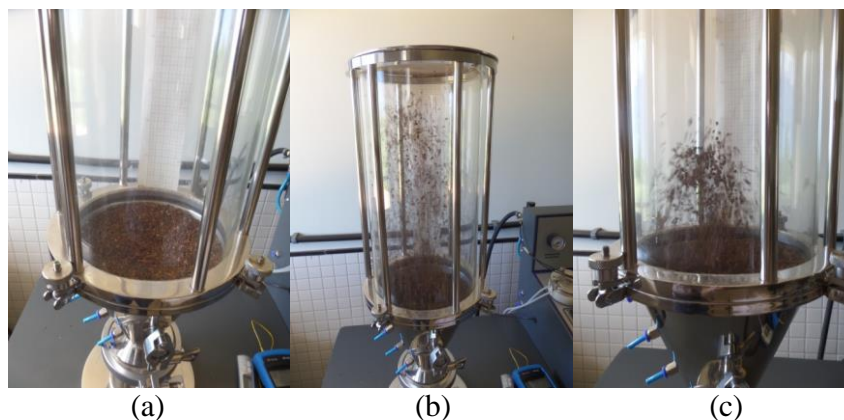


Figura 3 - Evolução do regime de jorro: a) leito estático; b) leito em regime de jorro; e c) leito na velocidade de mínimo jorro

As curvas de secagem obtidas para os experimentos nas temperaturas de 40, 60 e 80°C podem ser observadas na Figura 4. A umidade inicial do carpelo em base seca foi de $23 \pm 2\%$. A secagem a 80°C, como esperado, mostrou-se a mais eficiente, tendo 1,51% como teor de umidade final, enquanto as secagens a 40°C e 60°C obtiveram 9,06% e 4,49%, respectivamente.

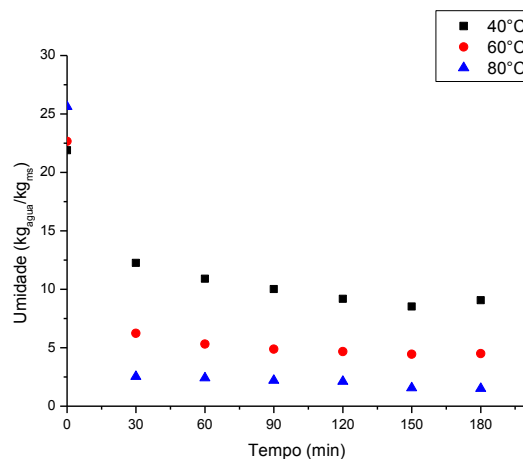


Figura 4 - Umidade em função do tempo a 40, 60 e 80°C

A cinética de secagem do carpelo foi determinada utilizando modelos semi-empíricos apresentados na Tabela 1. Os parâmetros estimados e o coeficiente de determinação para cada equação podem ser verificados na Tabela 2. Como o parâmetro A para as equações de Lewis, Brooker e Henderson e Henderson possuem desvio padrão maior do que o próprio valor estimado, estes modelos não são adequados para representar a cinética de secagem do carpelo. As equações que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram Page e Overhults, pois seus parâmetros foram estimados adequadamente e apresentaram os maiores valores de R^2 .

Tabela 2 - Parâmetros estimados e R^2

Referência	R^2	Parâmetros		Desvio padrão
Lewis	0,99630	A	0,582	0,829
		B	2026,651	456,599
Brooker	0,996307	A	0,584	0,859
		B	2027,848	470,929
		C	0,999	0,014
Henderson e Henderson	0,996618	A	0,787	1,149
		B	2144,194	467,921
		C	0,899	0,012
Page	0,999222	A	7,853	4,799
		B	1654,871	186,785
		C	0,505	0,045
Overhults	0,999222	A	4,08	1,384
		B	-3274,44	416,907
		C	0,510	0,045

Os gráficos de superfície relacionando os dados experimentais com os valores preditos pelos modelos de Page e Overhults propostos neste trabalho estão apresentados na Figura 5. Observa-se que a altas temperaturas, a umidade decresce de forma significativa em pouco tempo de secagem e se mantém praticamente constante.

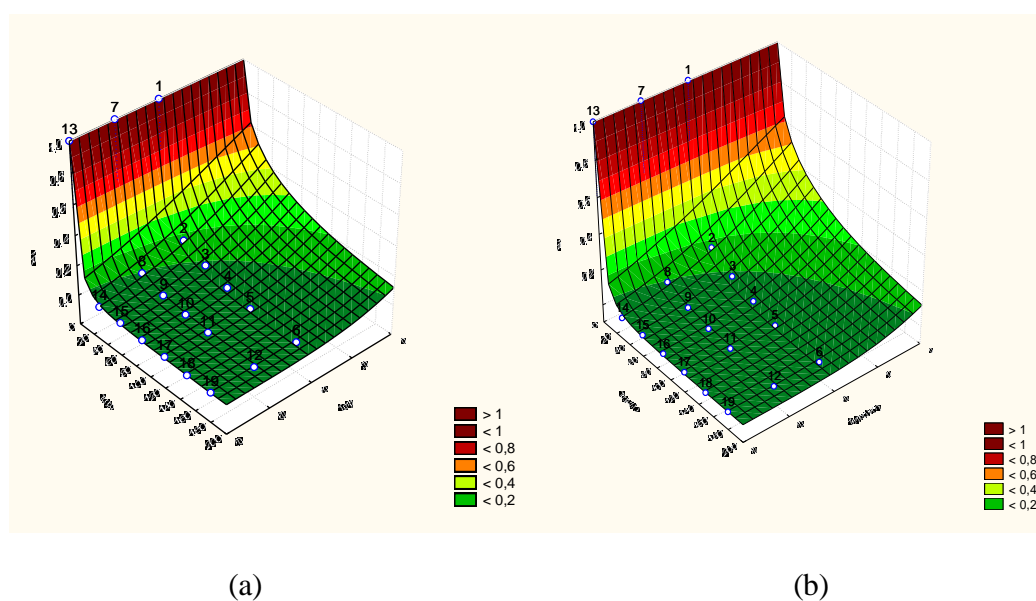


Figura 5 - Gráfico de superfície a) Page e b) Overhults

4. CONCLUSÕES

O regime de jorro do carpelo da macadâmia, nas condições propostas, se mostrou um regime estável, pois atingiu desvios da flutuação do sinal de grandeza menor do que 50 Pa. E como foi comprovado visualmente, não ocorreu formação de bolhas ou redemoinhos e a altura da fonte se manteve praticamente constante.

A secagem deu-se de forma satisfatória, uma vez que, para todas as temperaturas propostas, obteve-se um baixo valor de umidade final. As equações de Page e de Overhults são as equações que melhor representaram a cinética de secagem do carpelo, apresentando os maiores valores de R^2 . Diante do estudo realizado, confirma-se a eficiência do leito de jorro como secador para carpelo de macadâmia, visto que este alcançou um valor de umidade do carpelo significativamente baixo, reduzindo-o de 23% para 1,5% em um período de tempo de 3 horas, tempo este que pode ser considerado curto.

Dessa forma, o leito de jorro, devido ao seu contato efetivo entre o fluido e os sólidos torna-se uma ótima escolha para a secagem de partículas como o carpelo, auxiliando em processos futuros, como por exemplo, a pirólise de biomassa.

5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. S. , XAVIER, T. P., BACELOS, M. S., BARROZO, M. A. S., LIRA, T. S. Estudo sobre a cinética de secagem do carpelo da macadâmia em camada fina. Trabalho apresentado ao XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maceió, 2013.
- GLOBO RURAL, Cultivo da noz macadâmia cresce no Espírito Santo. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2011/04/cultivo-da-noz-macadamia-cresce-no-espírito-santo.html>> Acessado em 09 de agosto de 2013.
- LESCANO, C.A.A. Análise da secagem de resíduo de leite de soja “okara” em secadores de leito de jorro e de cilindro rotativo assistido a microondas. Tese de Doutorado, Campinas-SP, 2009.
- LIMA, A.C.C. Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado. Dissertação de Mestrado, Campinas-SP, 1995.
- MARRETO, R.N. Estudo da técnica de leito de jorro convencional para a secagem de microcápsulas de caseína e pectina. Tese de Doutorado, Ribeirão Preto-SP, 2006.
- OLIVEIRA, E.G. Secagem de *Spirulina platensis*: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada. Dissertação de Mestrado, Rio Grande-RS, 2006.
- PIMENTEL, L. D. A cultura da Macadâmia. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 29, p. 414-716, 2007.

- RASUL, M. G.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M. Physical properties of bagasse. *Fuel*, v. 78, p. 905–910, 1999.
- SOBIERAJSKI, G. R.; FRANCISCO, V. L. F. S.; ROCHA, P.; GHILARDI, A. A.; MAIA, M. L. Noz-macadâmia: produção, mercado e situação no Estado de São Paulo. *Informações Econômicas*, v.36, n. 5, p.25-36, 2006.
- SOUZA, J.S. Secagem de misturas de polpa de frutas tropicais em leito de jorro. Tese de Doutorado, Natal-RN, 2009.
- MARQUES, I. I. D. R.; BACELOS, M. S. Analysis of conical spouted bed fluid dynamics using carton mixtures. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 70, p. 37 - 47, 2013.