

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DURANTE A SECAGEM DE SEMENTES DE PAINÇO EM LEITO DE JORRO

L. D. NASCIMENTO^{1*}, S. C. S. ROCHA², O. P. TARANTO², C.M.L. COSTA³, L.J.G. FARIA³

¹ Universidade Federal do Pará, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química;
Museu Paraense Emílio Goeldi

² Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

³ Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química.

*e-mail: lidiane1610@gmail.com

RESUMO

A secagem de sementes é importante para a obtenção de um produto final em condições de ser armazenado, comercializado ou até mesmo processado e o leito de jorro é uma alternativa para a realização de operações de secagem, assim como para o recobrimento de partículas e desenvolvimento de reações. As partículas utilizadas neste trabalho foram sementes de painço, as quais podem se tornar uma possível alternativa na alimentação de diabéticos. O objetivo deste trabalho é verificar como a temperatura e o tempo de secagem influenciam na resposta razão de umidade, por meio de um modelo matemático, durante a secagem de sementes de painço em leito de jorro. Elaborou-se um planejamento composto central rotacional com o objetivo de avaliar a influência das variáveis independentes tempo (X_1) e temperatura (X_2) na resposta razão de umidade (X_R). Para um intervalo de confiança de 95%, verificou-se que a variável de resposta X_R sofreu influência apenas de X_1 , X_2 e X_2^2 , sendo proposto um modelo com R^2 igual a 96,32%. O leito de jorro foi eficaz para a secagem de sementes de painço e por meio da superfície de resposta e curvas de nível, observou-se que os menores valores para a razão de umidade (X_R) são obtidos quando opera-se em elevadas temperaturas em qualquer um dos intervalos de tempo analisados.

1 INTRODUÇÃO

O leito de jorro tem se mostrado uma técnica versátil, sendo utilizado para a secagem de sementes (NASCIMENTO et al., 2014), polpas (ARAUJO et al., 2015), recobrimento de partículas (CHEN; KUO, 2015) e até mesmo como reator (SAN JOSÉ et al., 2014; MAKIBAR et al., 2015).

De acordo com Mujumdar (2006) a secagem de sólidos é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nas indústrias agrícola, cerâmica, química, alimentícia, entre outras. Neste processo,

ocorrem simultaneamente dois fenômenos: transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial e transferência de massa (umidade), do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo (PARK, 2007). Secadores do tipo leito de jorro são apropriados para partículas pertencentes ao Grupo D (como por exemplo as sementes de painço) na classificação de Geldart, as quais são grosseiras e densas demais para um leito fluidizado convencional. Neste sistema a movimentação das partículas é regular e circular (YANG,

2003) o que favorece as taxas de transferência de calor em massa.

No Brasil, as sementes de painço (*S. italica*) são destinadas principalmente para a alimentação de pássaros (CORRÊA et al., 2006), mas são utilizadas na alimentação humana em países como China, Índia e Rússia. De acordo com os estudos de Anju e Sarita (2010), as sementes podem ser utilizadas como alternativa na alimentação de diabéticos, pois *cookies* preparados a partir da farinha dessas sementes apresentaram menores índices glicêmicos, quando comparados àqueles feitos apenas com farinha de trigo.

A Metodologia de Superfície de Resposta é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais que foi introduzida por G.E.P. Box na década de 1950 (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010), a qual explora relações existentes entre algumas variáveis que supostamente interferem no processo (conhecidas como variáveis de entrada) com uma variável resposta (conhecida como variável dependente), tal como o teor umidade final de uma semente.

Este trabalho utiliza o leito de jorro como uma alternativa para a secagem de sementes de painço e verifica por meio de um planejamento de experimentos como a temperatura e o tempo de secagem podem influenciar a resposta razão de umidade, propondo então um modelo matemático que relacione estas variáveis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aquisição do Material

Sementes de *S. italica* foram adquiridas no comércio varejista e armazenadas em um refrigerador a uma temperatura de 6 °C até a realização dos experimentos.

2.2 Configuração do Leito de Jorro

Os ensaios experimentais foram realizados em um leito de jorro com base cônica de 0,15 m de altura, ângulo de 60° e diâmetro de entrada do ar (D_i) de 0,0254 m. A coluna cilíndrica apresentava 0,8 m de altura e diâmetro interno (D_c) de 0,16 m, de tal forma que a relação D_i/D_c foi de 0,16.

2.3 Umidificação

Uma vez que as sementes adquiridas apresentavam um teor de umidade em base seca $13,85\% \pm 1,02$, foi necessário umidificá-las para dar prosseguimento aos ensaios de secagem. Para isso, foi realizado o seguinte procedimento: aspergiu-se um volume definido de água destilada sobre as sementes, a cada 24h, completando um ciclo de 72h a fim de alcançar um teor de umidade em média igual a $30\% \pm 0,01\%$ em base seca. Ao término de cada aspersão, as sementes eram armazenadas à 6°C até a realização dos experimentos de secagem.

2.4 Delineamento Experimental

Foram utilizados cinco níveis de tempo: 48, 60, 90, 120 e 132 min e cinco diferentes temperaturas: 44, 50, 65, 80 e 86°C conforme a Tabela 1. O projeto experimental consistiu em um planejamento composto central rotacional (PCCR), com quatro repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios, para determinar a influência dos parâmetros tempo (X_1) e temperatura do ar de secagem (X_2) sobre a resposta razão de umidade (X_R), definida conforme a Equação 1. $X(t)$, X_i e X_e representam o teor de umidade da amostra em função do tempo, a umidade inicial da amostra e a umidade de equilíbrio, respectivamente.

$$X_R = \frac{X(t) - X_e}{X_i - X_e} = \frac{X(t)}{X_i} \quad (1)$$

A interpretação dos resultados foi realizada utilizando o aplicativo *Statistica*® 7.0 e a metodologia de superfície de resposta (em função do modelo proposto para a variável de resposta). Foi considerado um nível de significância $\alpha = 0,05$ (confiança 95%).

Tabela 1 – Valores codificados e originais para as variáveis utilizadas no PCCR.

Variáveis codificadas (originais, unidade)	Níveis				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
X_1 (tempo de secagem, minuto)	48	60	90	120	132
X_2 (temperatura do ar, °C)	44	50	65	80	86

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 mostra a matriz de experimentos composta pelas variáveis avaliadas durante o processo de secagem de sementes de painço em leito de jorro, seguindo um PCCR.

Tabela 2 - Matriz de experimentos e os resultados experimentais para a secagem das sementes de painço em leito de jorro.

Corridas	Variáveis Codificadas		Variável de Resposta
	X_1	X_2	X_R (adim.)
1	-1	-1	0,67
2	+1	-1	0,59
3	-1	+1	0,44
4	+1	+1	0,28
5	-1,41	0	0,53
6	+1,41	0	0,33
7	0	-1,41	0,76
8	0	+1,41	0,35
9	0	0	0,35
10	0	0	0,4
11	0	0	0,43
12	0	0	0,45

Os valores de teor de umidade final das sementes submetidas a secagem em leito de jorro, ficaram na faixa entre 18,35 e 9,32% em base seca, mostrando que é possível obter sementes com teores de umidade apropriados para uma armazenagem livre do ataque de insetos (SOAVE; MORAES, 1987).

3.1 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância permite avaliar a probabilidade que cada efeito possui de ser considerado estatisticamente significativo para a variável de resposta. Portanto, foi realizada a ANOVA para a resposta X_R e de acordo com os resultados obtidos para um nível de 95% de confiança, somente as variáveis X_1 , X_2 e X_2^2 foram estatisticamente significativas, pois seus valores de p apresentaram menor probabilidade de estar dentro da região de hipótese nula, o que foi evidenciado pela ordem de grandeza dos valores numéricos encontrados. Em seguida foi proposto um modelo completo para a variável de resposta razão de umidade, como mostra a Equação 2, em função das variáveis de entrada, cujos efeitos e coeficientes de regressão estão sumarizados na Tabela 3. A partir desta Tabela, é verificado que os efeitos provocados pelas variáveis codificadas X_1 e X_2 são negativos, portanto a elevação dos valores de temperatura de 44°C para 86°C e o aumento do tempo de 48 min para 132 min, provocam efeitos negativos na resposta X_R , ou seja, maiores valores de temperatura e tempo de secagem favorecem a redução do teor de umidade final das sementes.

Tabela 3 – Efeitos e coeficientes de regressão para a resposta razão de umidade.

Fonte de variação	Efeito	Coefficientes de regressão estimados \pm erro
Grande média	0,41 \pm 0,02	0,41 \pm 0,02
X_1	-0,13 \pm 0,03	-0,06 \pm 0,02
X_1^2	0,024 \pm 0,03	0,01 \pm 0,02
X_2	-0,28 \pm 0,03	-0,14 \pm 0,02
X_2^2	0,15 \pm 0,03	0,07 \pm 0,02
$X_1 X_2$	-0,04 \pm 0,04	-0,02 \pm 0,02

$$X_R = 0,4075 - 0,0654X_1 - 0,1402X_2 - 0,02X_1X_2 + 0,0118X_1^2 + 0,0747X_2^2 \quad (2)$$

Onde as variáveis codificadas estão relacionadas às variáveis originais conforme as Equações 3 e 4:

$$X_1 = \frac{t - 90}{30} \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{T - 65}{15} \quad (4)$$

O modelo descrito pela Equação 2 representou bem os dados experimentais, de acordo com as restrições deste trabalho, uma vez que seu coeficiente de determinação múltipla (R^2) foi equivalente à 0,9738. No entanto, a fim de verificar a possibilidade de reduzir os parâmetros na equação para a resposta X_R (Equação 2), foi realizada uma nova análise de variância, como mostra a Tabela 4, considerando apenas as variáveis que apresentaram significância estatística, ou seja, X_1 , X_2 e X_2^2 e obteve-se o modelo reduzido, como mostra a Equação 5.

Tabela 4 - ANOVA para a variável de resposta X_R considerando apenas as variáveis com significância estatística.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	p
X_1	0,03	1	0,03	0,02
X_2	0,15	1	0,15	0,00
X_2^2	0,03	1	0,03	0,02
Falta de ajuste	0,00	5	0,00	0,87
Erro puro	0,00	3	0,00	-
Total (correlação)	0,23	11	-	-

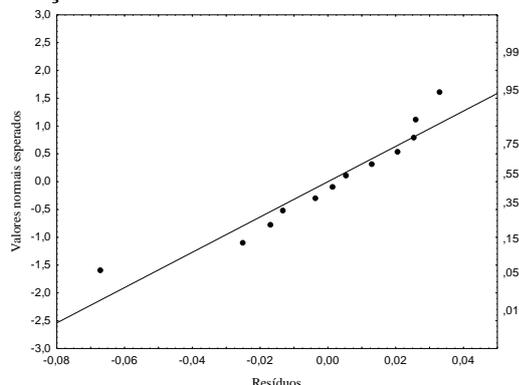
$R^2 = 0,9632$ $\alpha = 0,05$.

$$X_R = 0,4075 - 0,0654X_1 - 0,1402X_2 + 0,0747X_2^2 \quad (5)$$

De acordo com a Tabela 4, foi verificado que não houve alteração na influência das variáveis X_1 , X_2 e X_2^2 sobre a resposta X_R e que o modelo reduzido (Equação 5) conseguiu reproduzir ou explicar 96,32% das variabilidades experimentais, valor inferior ao alcançado pelo modelo completo, mas ainda muito satisfatório. Com base nos modelos completo e reduzido, é possível verificar a influência quadrática da temperatura e linear do tempo na resposta X_R .

A Figura 1 ilustra a correlação entre os valores preditos pelo modelo reduzido e os valores observados experimentalmente, no qual verifica-se que a maioria dos resíduos estão localizados próximo ao zero e com distribuição em torno da curva normal, indicando um bom ajuste ao modelo proposto.

Figura 1 - Gráfico normal dos resíduos para X_R em função do modelo reduzido.



3.2 Superfície de resposta e curvas de nível para X_R

O modelo estatístico reduzido proposto para X_R é visualizado por meio da superfície de resposta e respectivas curvas de nível, conforme as Figuras 2 e 3, respectivamente. Representa-se no eixo z a resposta, neste caso X_R , e nos eixos x e y as duas variáveis independentes X_1 e X_2 . É importante ressaltar que os valores nos eixos x e y estão codificados, portanto os mesmos precisam ser inseridos nas Equações 3 e 4 para obter os valores reais.

Verifica-se que para a obtenção de baixos valores de razão de umidade (X_R) é necessário operar em altas temperaturas (elevados níveis de X_2) em qualquer intervalo de tempo (X_1) avaliado, sobretudo nos superiores.

Figura 2 - Superfície de resposta para X_R .

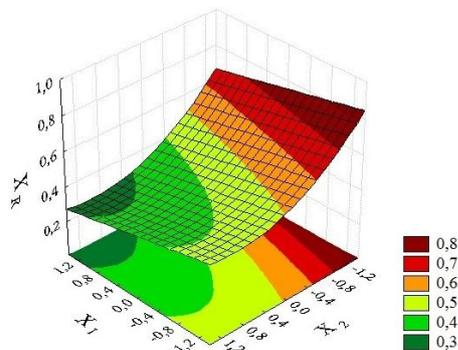
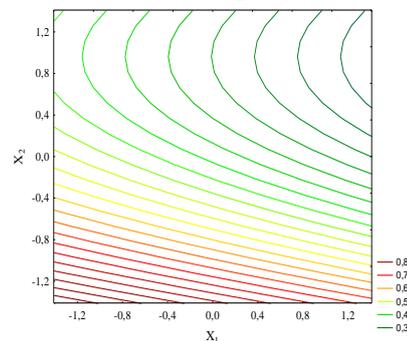


Figura 3 - Curvas de nível para X_R .



4 CONCLUSÃO

O leito de jorro se mostrou uma alternativa eficaz para a secagem de sementes de painço, de maneira que por meio das análises realizadas a partir da superfície de resposta e curvas de nível, os menores valores para a razão de umidade (X_R) são obtidos quando opera-se em elevadas temperaturas e qualquer um dos intervalos de tempo analisados, sobretudo os maiores tempos de operação.

As influências estatisticamente significativas na resposta X_R , foram X_1 , X_2 e X_2^2 , ambas influenciando na redução da razão de umidade, ou seja, reduzindo o teor de umidade final das sementes. Portanto, o modelo proposto mostra a influência quadrática da temperatura e linear do tempo na razão de umidade durante a secagem de sementes de painço em leito de jorro.

REFERÊNCIAS

ANJU, T.; SARITA, S. Suitability of Foxtail Millet (*Setaria itálica*) and Barnyard Millet (*Echinochloa frumentacea*) for development of low glycemic index biscuits. **Malaysian Journal of Nutrition**, v.16, p. 361 – 368. 2010.

ARAÚJO, A.D.A; COELHO, R.M.D.; FONTES, C.P.M.L.; SILVA, A.R.A.; DA COSTA, J.M.C; RODRIGUES, S. Production

and spouted bed drying of acerola juicecontaining oligosaccharides. **Food and Bioproducts Processing**, v. 94, p. 565–571, 2015.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CHEN, W.Y.; KUO, H.P. Surface Coating of Group B Iron Powders in a Spouted Bed. **Procedia Engineering**, v. 102, p. 1144 – 1149, 2015.

CORRÊA, P.C.; JÚNIOR, P.C.A.; RIBEIRO, D.M.; SILVA, F.F. Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: Obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.1, p.162–167, 2006.

NASCIMENTO, L. D.; CORUMBA, L. G.; ROCHA, S. C. S.; TARANTO, O. P.; COSTA, C.M.L.; FARIA, L. J. G. Mathematical modeling of the drying curves of foxtail millet seeds in spouted bed. In: 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2014, Belém. **Proceedings...**, 2014.

MAKIBAR, J.; FERNANDEZ-AKARREGI, A.R.; AMUTIO, M.; LOPEZ, G.; OLAZAR, M. Performance of a conical spouted bed pilot plant for bio-oil production by poplar flash pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 137, p. 283–289, 2015.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. Third Edition. New York: Taylor & Francis Group, 2006.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem**. 2007.

Disponível em:
<<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>> Acesso em: 16 fev. 2013.

SAN JOSÉ, M.J.; ALVAREZ, S.; GARCÍA, I., PENAS, F.J. Conical spouted bed combustor for clean valorization of sludge wastes from paper industry to generate energy. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, p. 672–678, 2014.

SOAVE J; MORAES SA. Medidas de controle de doenças transmitidas por sementes. In: SOAVE J; WETZEL M.M. (Coord). **Patologia de sementes**, Campinas, Fundação Cargill, 1987.

YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid particle systems**. Nova York: Marcel Dekker, 2003.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Processo 552374/2011-3) pelo suporte financeiro.