

Aplicação da condição de contorno de Cauchy no cálculo da eficiência da transferência de massa durante a secagem de sementes de uva Cabernet sauvignon

Gracielle Johann (Universidade Estadual de Maringá) grajohann@yahoo.com.br
Nehemias Curvelo Pereira (Universidade Estadual de Maringá) nehemiascp@yahoo.com.br
Edson Antonio da Silva (Universidade Estadual do Oeste do Paraná) edsondeq@hotmail.com

Resumo:

Uvas são frutas populares e saborosas, ricas em compostos polifenólicos, cujos grãos são ricos em óleos essenciais. A extração desse óleo, por sua vez, é diretamente influenciada pela técnica de secagem realizada nas etapas preliminares do processamento. No presente trabalho, foi estudado numericamente o processo de secagem convectiva de grão de uva cultivar Cabernet Sauvignon em camada fina. Foi desenvolvido um modelo fenomenológico considerando condições de contorno de Cauchy, ajustados os valores da difusividade mássica efetiva e do coeficiente convectivo de transferência de massa, e calculada a eficiência da transferência de massa. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais da literatura. O ajuste do coeficiente de difusividade mássica efetiva resultou na ordem de $10^{-9} \text{ m}^2/\text{min}$, com comportamento do tipo Arrhenius com a temperatura. Na análise dos resultados simulados, observou-se erro médio global de 4,51% e R^2 superior a 98%, quando comparados com os dados experimentais da literatura. No estudo da eficiência média da transferência de massa, verificou-se que, mantendo a velocidade e elevando-se a temperatura do ar de secagem, a eficiência média da transferência de massa aumentou. A eficiência média da transferência alcançou valor máximo de 94,5%.

Palavras chave: Secagem, Sementes de uva, Condição de Cauchy, Eficiência da transferência de massa.

Applying the Cauchy boundary condition in the calculation of mass transfer efficiency during Cabernet sauvignon grape seed drying

Abstract: Grapes are popular and tasty fruit, rich in polyphenol compounds, the grains are rich in essential oils. The extraction of this oil, in turn, is directly influenced by the drying technique used in the preliminary processing steps. In the present study, was numerically studied the thin layer convective drying process of grape seed cultivar Cabernet Sauvignon. A phenomenological model considering Cauchy boundary condition has been developed, it was adjusted values of the effective mass diffusivity and convective mass transfer coefficient, and calculated the mass transfer efficiency. The simulation results were compared with the literature experimental data. The adjustment of the effective mass diffusivity coefficient resulted in the order of $10^{-9} \text{ m}^2/\text{min}$ with Arrhenius type behavior with temperature. In analyzing the simulated results, it was observed overall average error of 4,51% and R^2 superior to 98%, when compared with the literature experimental data. In the study of average efficiency of mass transfer, it has been found that by keeping the rate and raising the temperature of the drying air, the average efficiency of mass transfer increased. The average transfer efficiency reached a maximum of 94,5%.

Key-words: Drying, Grape seeds, Cauchy condition, Mass transfer efficiency.

1. Introdução

Uvas são uma das frutas mais populares e cultivadas em todo o mundo (FADHEL et al., 2005), sendo que cerca de 80% de toda a colheita é empregada na fabricação de vinhos (DROSOU et al., 2015). Como principais resíduos da indústria de vinhos, têm-se o caule (25%), pele (50%), grãos (25%), além do lodo (BUSTAMANTE et al., 2008; KELLY; JOAN, 2009). Segundo o estudo de Jiang et al. (2011), uvas frescas *Vitis vinifera* cultivar Cabernet Sauvignon são compostas de aproximadamente 20.91% de sementes, Figura 1. Essas sementes de acordo com Davidov-Pardo e McClements (2015), são ricas em óleos insaturados, que representam cerca de 89% da composição total de óleos, sendo a maioria classificados como óleos essenciais.



Figura 1 – Corte de uma baga de Cabernet Sauvignon (DIAS, 2006)

Por sua vez, o processo de extração de óleo envolve diversas etapas preliminares, como limpeza, descasque e secagem, esta última etapa afeta diretamente a microestrutura e qualidade do produto final (GUTIÉRREZ et al., 2008). A etapa de secagem possivelmente é a mais antiga operação unitária da engenharia química (DUFOUR, 2006), e está entre os métodos de preservação mais habitualmente utilizados, uma vez que inibe o crescimento de microrganismos (RAHIMMALEK; GOLI, 2013). Por sua vez, a secagem convectiva porém pode consumir até 15% de toda a energia utilizada no processo produtivo (PERUSSELLO et al., 2014), sendo que os mecanismos de transferência de calor e massa necessitam de modelos que descrevam adequadamente o processo de secagem.

Diferentes métodos são usados na secagem de frutas e vegetais, sendo a secagem com ar quente atualmente o método mais amplamente empregado na tecnologia de pós-colheita de produtos agrícolas (STURM et al., 2014). Porém, a secagem pode consumir até 15% de toda a energia utilizada no processo produtivo (PERUSSELLO et al., 2014).

O estudo da cinética da secagem permite a predição da distribuição de temperatura e umidade no material e no equipamento, sendo essencial para o projeto e controle de processos de secagem já existentes, ou mesmo desenvolvimento de novos equipamentos, além de possibilitar a otimização de processos. Assim, estudos de secagem conduzidos a convecção forçada são essenciais para determinação das propriedades de transferência de massa envolvidas no processo. Na literatura existem alguns trabalhos que avaliaram a cinética de secagem de uvas sem sementes com base na lei de Fick, como Bennamoun e Belhamri (2006), que estudaram a secagem solar de uvas cultivar Majorcan; Esmaili et al. (2007a) e Esmaili et al. (2007b) que estudaram a secagem em camada fina de uvas *Vitis vinifera* L.; Çakmak e Yıldız (2009), que desenvolveram um secador solar de uvas oriundas da região de Elazığ/Turkey e o trabalho de Azzouz et al. (2002) que investigaram a cinética da secagem em camada fina, e também as

isotermas de equilíbrio, de uvas das cultivares Chasselas e Sultanin. Apenas os trabalhos de Roberts et al. (2008) e Clemente et al. (2014) estudaram especificamente a secagem de grãos de uva, respectivamente a secagem em camada fina de grãos *Vitis vinifera*, cultivares Riesling e Cabernet Franc e *Vitis labrusca* cultivar Concord; e grãos *Vitis vinifera* cultivar Bobal, aplicando os modelos difusivo e de Peleg.

O presente trabalho investigou numericamente a cinética da secagem de grãos de uva *Vitis vinifera* cultivar Cabernet Sauvignon. Foram empregadas as equações da difusão mássica e térmica, descritas por equações diferenciais parciais, e, para a resolução do conjunto de equações, foi aplicada a condição de contorno de Cauchy. Foram ajustados os valores da difusividade mássica efetiva e do coeficiente de transferência convectiva de massa.

2. Materiais e Métodos

Os dados experimentais empregados na validação do modelo foram obtidos por Menezes (2014), que estudou experimentalmente a secagem de grãos de uva cultivar *Cabernet Sauvignon*, em uma unidade experimental de secagem em camada fina (Figura 2).



Figura 2 – Módulo experimental utilizado por Menezes (2014)

O módulo da Figura 2, foi constituído de um soprador de ar, com ajuste de velocidade realizado por um dumper, ligado a um duto metálico equipado com quatro resistências elétricas. A saída do duto metálico foi conectada à uma caixa de aço, por onde passava o ar aquecido, que segue até uma bandeja perfurada que serve de suporte para a amostra. A temperatura do ar de secagem foi ajustada a partir de resistências elétricas, controladas por um reostato. A indicação da temperatura do ar foi feita por um termopar, inserido logo abaixo da tela perfurada do secador.

Na solução de modelos difusionais, aplicados à secagem, em geral, são consideradas muitas suposições simplificadoras, como difusividade invariável com o teor de umidade, e resistência externa à transferência de massa desprezível, ou seja: a umidade na superfície do sólido instantaneamente alcança o valor de umidade de equilíbrio de grãos (BARROZO et al. 2006).

Na construção do presente modelo, foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras: os grãos, aproximadamente esféricos, formam um leito fino; as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis; a umidade e temperatura iniciais das sementes são uniformes;

transporte unidimensional de calor e massa nos grãos; distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador; na transferência de calor entre o ar de secagem e os grãos, predomina o fenômeno da convecção; o ar de secagem comporta-se gás ideal, nas condições de modelagem; a difusão da umidade ocorre nos micro poros; as variações de temperatura e umidade no ar de secagem são desprezíveis.

Com base nessas considerações, foram efetuados balanços de massa e energia nos grãos, obtendo-se um conjunto de duas equações diferenciais parciais. Em coordenadas esféricas, com variação de umidade e temperatura radial, o balanço de massa em cada grão é dado pela Equação 1.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} (D_{eff} X) \quad (1)$$

Em que X é a umidade do grãos em base seca (b.s.), t é o tempo (min), r é a coordenada radial (m), e D_{eff} é o coeficiente de difusividade efetiva (m^2/min).

Na secagem por convecção, a superfície do grão troca calor com o ambiente, como resultado da convecção e por condução interna, existindo, ainda, fluxo de energia saindo do grão devido à dessorção. Tem-se, portanto, o balanço de energia no grão, descrito pela Equação 2.

$$\frac{\partial T_S}{\partial t} = \alpha_S \frac{\partial^2 T_S}{\partial r^2} + \alpha_S \frac{2}{r} \frac{\partial T_S}{\partial r} \quad (2)$$

Em que T_S é a temperatura do grão ($^{\circ}C$), e α_S é a difusividade térmica do grão (m^2/min).

O processo de transferência de massa entre um sólido e um fluido é influenciado pela resistência interna e/ou externa ao transporte de massa. A resistência à transferência de massa interna depende principalmente das características do sólido e da temperatura (SIMAL et al. 1998), enquanto a resistência externa está ligada ao coeficiente de transferência de massa externa, relacionado à espessura da camada limite. Uma dessas resistências frequentemente prevalece, embora a verificação da importância relativa seja necessária para o estabelecimento das condições de processo (ROSSELLÓ et al. 1997). Como regra geral, a resistência à transferência de massa em sólidos é elevada, sendo possível estabelecer que uma característica geral da cinética do processo de transferência de massa é a sua relativa lentidão (MULLET et al. 2003).

2.1. Condição de contorno de Cauchy

Um ponto controverso dos modelos difusionais, aplicados aos materiais biológicos, são as condições de contorno adotadas na superfície do material. Tanto condições de contorno de equilíbrio (primeiro tipo ou condição de Dirichlet), quanto condições de contorno convectivas (terceiro tipo ou condição de Robin), têm sido utilizadas para a descrição da secagem convectiva.

No presente estudo, foi considerada uma associação entre a condição do segundo tipo com o terceiro tipo.

Para o segundo tipo, considera-se que no centro da semente não existe fluxo de massa e energia, assim, tem-se as Equações (3) e (4).

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T_S}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (4)$$

Para o terceiro tipo, considerou-se que, no instante imediatamente inicial à secagem, na superfície da esfera, a massa que sai por difusão é igual à massa que entra no ar de secagem e a energia que sai é igual à soma da energia que entra no ar de secagem devido à convecção e devido à evaporação, Equações (5) e (6).

$$-D_{eff} \frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{k_F(Y^* - Y)}{\rho_S}, t > 0 \quad (5)$$

$$\kappa_S \frac{\partial T_S}{\partial r} \Big|_{r=R} = h_c(T_G - T_S) - k_F(Y^* - Y)\lambda_D, t > 0 \quad (6)$$

Em que R é o raio do grão (m), k_F é o coeficiente convectivo de transferência de massa ($\text{kg/m}^2 \text{ min}$), Y^* é a umidade de saturação do ar (b.s.), Y é a umidade na seio do gás (b.s.), κ_S é a condutividade térmica do grão (W/m K), h_c é o coeficiente de transferência de calor convectivo (W/m K), T_G é a temperatura do ar de secagem (K), λ_D é o calor de dessorção (kJ/kg) e ρ_S é a densidade do grão (kg/m).

2.2. Parâmetros do modelo

As propriedades termo físicas dos grãos de uva, densidade e calor específico, foram determinadas em estudo anterior, Menezes (2014), sendo respectivamente 1260 kg/m^3 e $1,5 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$. O diâmetro foi considerado igual a $4.265 \times 10^{-3} \text{ m}$ e a condutividade térmica igualada à do milho, $0,315 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ (ISTADI; SITOMPUL, 2002) e a difusividade térmica foi calculada pela Equação 7.

$$\alpha_S = \frac{\kappa_S}{\rho_S c p_S} \quad (7)$$

Em que $c p_S$ é o calor específico do grão ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$).

O valor do calor de dessorção do grão, λ_D , foi igualado ao calor de vaporização da água pura, conforme Treybal (1980), Equação 8.

$$\lambda_D = 2,162 \times 10^3 + 2T_S \quad (8)$$

A relação entre a umidade de equilíbrio, X_E , e a atividade da água, a_w , foi calculada com base na equação proposta por Menezes (2014), que ajustaram dados experimentais de equilíbrio de grãos de uva à isoterma de Henderson (1952), Equação (9).

$$X_E = 3,0280 \left[\frac{1}{T} \ln \left(\frac{1}{1-a_w} \right) \right]^{0,9838} \quad (9)$$

2.3. Procedimento numérico

Para as simulações, o coeficiente de difusividade mássica efetiva foi ajustado como único para cada temperatura.

Na resolução do sistema de equações diferenciais, Equações 1 e 2, foi empregado o método das Linhas, no qual as derivadas espaciais foram aproximadas por diferenças finitas, transformando o sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações ordinárias. Para aplicar este método, primeiramente verificou-se que a divisão do domínio do problema, tanto em 10 como em 50 elementos de discretização, resultou em valores próximos (ordem de 10^{-8}). Optou-se, portanto, em utilizar 10 elementos de discretização, de modo a reduzir o esforço computacional.

Para a resolução do sistema das equações, obtidas após a discretização das equações, foi empregado o software Maple 13[®], método numérico de Rosenbrook, por meio do comando *dsolve*, sendo que no problema de secagem investigado, a temperatura e a umidade inicial é a ambiente (T_{G_0} , Y_0), que repentinamente são aumentadas para $T_{G_{feed}}$ e Y_{feed} , na alimentação do secador, e mantida neste valor. Esta condição de contorno foi modificada com o intuito de torná-la a contínua na variável tempo de acordo com as Equações 10 e 11.

$$T_G = T_{G_{feed}} + (T_{G_0} - T_{G_{feed}}) e^{-st} \quad (10)$$

$$Y = Y_{feed} + (Y_0 - Y_{feed})e^{-st} \quad (11)$$

Em que T_{G_0} é a temperatura ambiente do ar ($^{\circ}\text{C}$), $T_{G_{feed}}$ é a temperatura de alimentação do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), Y_{feed} é a umidade de alimentação do ar de secagem (b.s.), Y_0 é a umidade ambiente do ar (b.s.), e $s=10^5 \text{ min}^{-1}$.

O procedimento de estimação de parâmetros tem por finalidade ajustar os parâmetros de maior influência na resolução do modelo matemático dos processos de secagem em análise. As formas das funções para o cálculo dos coeficientes de transferência e também a exatidão dos valores numéricos dos parâmetros envolvidos nestas duas funções é vital para o sucesso da simulação. Desta forma, os coeficientes de transferência convectivo de massa foram determinados empregando o método de otimização nonlinear simplex, utilizando o comando *NLPSolve*, sendo que os parâmetros foram determinados após minimização do erro quadrático dos desvios da umidade do leito (valor predito e valor experimental). A Equação a ser minimizada é a Equação (12).

$$FOB = \sum_{i=1}^{nexp} (\overline{X_{EXP}} - \overline{X_{CAL}})^2 \quad (12)$$

Em que FOB é a função objetivo, $nexp$ é o número de dados experimentais, $\overline{X_{EXP}}$ é a umidade média experimental do leito e $\overline{X_{CAL}}$ é a umidade média do calculada do leito pela resolução do modelo.

2.4. Eficiência da transferência de massa

O estudo da eficiência da transferência de massa será feito com base no método utilizado por Aregba et al. (2006), que definiu essa eficiência como a razão entre a diferença da umidade inicial e a umidade pela diferença entre a umidade inicial e a de equilíbrio:

$$\varepsilon_m(r, t) = \frac{X_0 - X}{X_0 - X_E} \quad (13)$$

Em que ε_m é a eficiência da transferência de massa (-).

2.5. Análise estatística

A fim de verificar a adequação dos modelos teóricos, validar o modelo fenomenológico e, ainda, testar as considerações usadas para a simplificação do modelo foram empregados testes estatísticos do coeficiente de determinação (R^2), Teste F, raiz do erro médio (RM) e Critério de Informação de Akaike (AIC).

O critério de Critério de Informação de Akaike, AIC , que pode ser entendido como um critério que dá uma pontuação para o modelo, baseado em sua adequação aos dados e na ordem do modelo (AKAIKE, 1973), é definido pela Equação (14).

$$AIC = N \cdot \ln(SQ/N) + 2K \quad (14)$$

Em que N é o número de observações, SQ é a soma de quadrados dos desvios e K é o número de parâmetros do modelo a ser analisado.

O Critério de Informação de Akaike é uma medida da qualidade do ajuste do modelo estimado, fornecendo uma medida relativa da perda de informações quando um determinado modelo é usado para descrever dados experimentais, assim, o objetivo é minimizar essa perda.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados do ajuste do coeficiente de difusividade mássica, realizado simultaneamente com as simulações da cinética da secagem dos grãos de uva.

Condição de Secagem		Coefficiente de difusividade mássica efetiva (m ² /min)	Coefficiente convectivo de transferência de massa (kg/m ² min)
60 °C	0,8 m/s	3,6980×10 ⁻⁹	0,3554
	1,2 m/s	3,6980×10 ⁻⁹	0,3600
	1,6 m/s	3,6980×10 ⁻⁹	0,3601
70 °C	0,8 m/s	4,8007×10 ⁻⁹	0,3555
	1,2 m/s	4,8007×10 ⁻⁹	0,4011
	1,6 m/s	4,8007×10 ⁻⁹	2,6464
80 °C	0,8 m/s	6,1460×10 ⁻⁹	0,3919
	1,2 m/s	6,1460×10 ⁻⁹	0,4062
	1,6 m/s	6,1460×10 ⁻⁹	13,9342

Tabela 1 – Difusividade efetiva e coeficiente convectivo de transferência de massa ajustados

Os valores estimados do coeficiente de difusividade mássica efetiva (Tabela 1), resultaram na ordem de 10⁻⁹ m²/min, apresentando uma dependência do tipo Arrhenius com a temperatura. Segundo Madamba et al. (1996) os valores do coeficiente de difusividade para materiais alimentícios encontram-se dentro de uma faixa de 10⁻¹¹ a 10⁻⁹ m²/s, conforme verificado em todas as condições de secagem estudadas.

Por sua vez, os valores estimados para o coeficiente de transferência de massa variam entre 0,3554 kg/m² min para 60 °C e 0,8 m s⁻¹ e 13,9342 kg/m² min para 80 °C e 1,6 m/s, verifica-se, que, mantendo a temperatura de secagem constante, e aumentando a velocidade, há incremento no valor do coeficiente convectivo de transferência de massa. Os pesquisadores Sfredo et al. (2005), cujo trabalho estudou a secagem de grãos de café, estimaram o coeficiente convectivo de transferência de massa em torno de 0,06 kg/m min, para secagem em leito vibratório, a 45 °C, já Sitompul e Istadi (2000), que estudaram a secagem convectiva de grãos de milho a 0,09 m/s e 60 °C, obtiveram valor igual a 1,662 kg/m²min. Portanto, os valores do coeficiente de transferência de massa estimados nas simulações resultaram em grandeza intermediária dos coeficientes encontrados na literatura para outros tipos de grãos.

Os valores calculados do coeficiente de transferência de massa, k_F , em função da velocidade e da temperatura do ar de secagem, foram ajustados à Equação 15 (modelo logístico), após tentativas de ajuste com base em diversos modelos. Com o auxílio do software OriginPro 8®, obteve-se valor de $R^2 = 0,99998$ e soma dos quadrados dos resíduos igual à $9,5128 \times 10^{-4}$.

$$k_F = 0,36455 + \frac{23,95312}{\left[1 + \exp\left(\frac{344,1391 - T_{Feed}}{0,61866}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{95,02961 - v}{3,62601}\right)\right]} \quad (15)$$

A Figura 2 apresenta as curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva, conduzidas a 1,6; 1,2 e 0,8 m/s com temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente.

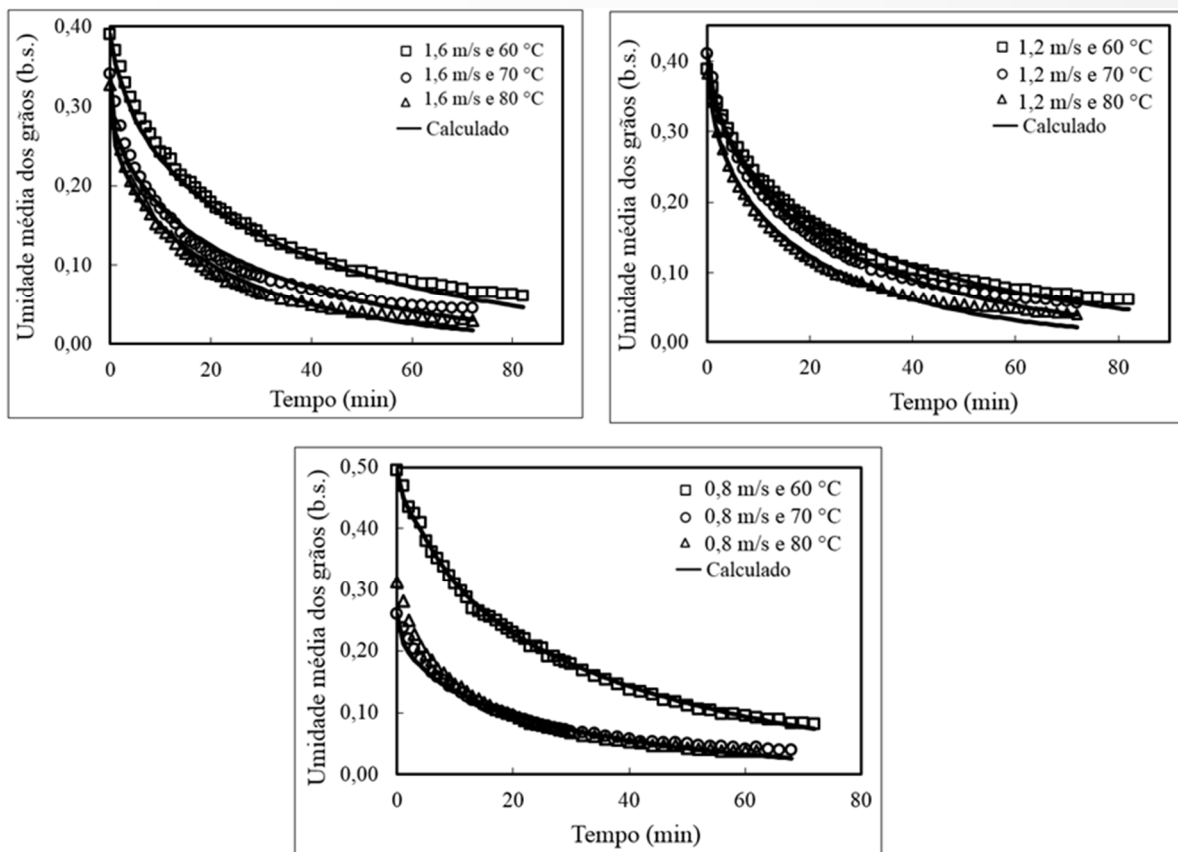


Figura 3 – Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva variedade Cabernet Sauvignon

A partir da Figura 3, pode-se observar a influência da temperatura do ar na secagem convectiva. Verifica-se que, mantendo a velocidade constante e aumentando a temperatura do ar, obtém-se tempos de equilíbrio distintos. Quanto maior a temperatura, menor é o tempo necessário para se alcançar o equilíbrio entre a umidade dos grãos e o ar de secagem. É possível, ainda observar a influência pouco pronunciada da velocidade do ar de secagem na curva de secagem. Essas características, influência acentuada da temperatura e modesta da velocidade, pode ser atribuída ao mecanismo cinético da secagem ocorrido nos grãos, em que se observa, como discutido anteriormente, apenas período de taxa decrescente, em que a difusão interna de umidade controla o movimento desta. Nesse mecanismo, a diferença de temperatura entre o interior do grão e sua superfície é determinante, e não a influência provocada pela velocidade do ar de secagem, que implica na evaporação do filme superficial.

Esse mesmo resultado foi observado em outros trabalhos que estudaram a secagem de grãos (BORGES, 2002; e KHATCHATOURIAN; VIELMO; OLIVEIRA, 2009). De acordo com Borges (2002), é provável que a singular influência da velocidade na curva de secagem se dá devido a limitação da migração da umidade do interior do grão até a superfície, em velocidades elevadas. Segundo Borges (2002); e Khatchatourian, Viemo e Oliveira (2009), pode-se imaginar que, quanto maior a velocidade do ar de secagem, a influência desta ficará menos relevante, até seu desaparecimento, momento a partir do qual somente a difusão terá influência na cinética. Para os autores, espera-se, então, que, partindo-se do mesmo ponto inicial, e operando na mesmas temperaturas e diferentes velocidades, as curvas se distanciem e cheguem ao mesmo ponto de equilíbrio.

Resultado semelhante foi encontrado por Barrozo et al. (2006), que estudando a secagem convectiva de grãos de soja, verificaram que velocidades diferentes resultaram em teores de umidade bastante próximo. No trabalho, os autores concluíram que, nas condições estudadas, a resistência à transferência de massa convectiva foi desprezível. Como a velocidade do ar não apresentou efeito nas curvas de secagem, em todos os casos estudados, a resistência ao movimento da umidade na superfície dos grãos (resistência externa) pode ser considerada insignificante (MASKAN; KAYA; MASKAN, 2002). Dessa forma, o movimento interno da umidade (resistência interna) foi a principal resistência à taxa de perda de umidade. De acordo Geankoplis (1993), essa resistência interna é evidenciada pela presença de período de taxa decrescente de secagem, característica de grãos e sementes.

Ainda, da Figura 2 e Tabela 1, verifica-se que o aumento da temperatura do ar de secagem não só aumenta a taxa de secagem, mas, também, aumenta o coeficiente de difusividade mássica efetiva nos grãos e, portanto, facilita a transferência de massa a partir da camadas interiores para a superfície exterior (GOLMOHAMMADI; ASSAR; RAJABI-HAMANE, 2012).

A Tabela 2 apresenta os resultados estatísticos das simulações.

Condições de secagem		Erro médio (%)	Erro máximo (%)	F	valor-P	F crítico	R ²	AIC
0,8 m/s	60 °C	1,56	8,33	20586,40	0,9715	3,9258	0,9972	-502,27
	70 °C	3,76	36,69	3128,53	0,6987	3,9342	0,9839	-204,61
	80 °C	4,40	49,92	4338,22	0,8072	3,9342	0,9883	-177,02
1,2 m/s	60 °C	2,66	13,72	12220,20	0,8553	3,9258	0,9954	-448,37
	70 °C	3,98	31,02	7016,13	0,9623	3,9342	0,9927	-257,62
	80 °C	4,07	46,11	6670,38	0,8743	3,9342	0,9924	-181,60
1,6 m/s	60 °C	3,46	15,37	16303,59	0,6589	3,9258	0,9965	-513,34
	70 °C	8,64	31,48	2240,51	0,9999	3,9342	0,9777	-221,58
	80 °C	8,06	42,48	3502,09	0,9660	3,9342	0,9856	-200,31

Tabela 2 – Resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva

No cálculo do erro médio entre a umidade calculada e a experimental, observou-se que o maior erro médio foi de 8,64%, para 1,6 m/s e 70 °C e o maior erro máximo foi de 49,92%, também obtida para 0,8 m/s e 60 °C, esta condição apresentou maior valor de AIC. Os valores de erro médio global, considerando todas as condições de secagem, foi de 4,51%.

Na análise de R², observa-se que todas as condições simuladas apresentaram valores de correlação acima de 98%, exceto para 1,6 m/s e 70 °C.

Na análise do teste F, observa-se que, em todas as condições simuladas, o modelo descreveu satisfatoriamente os casos investigados, apresentando razões de Fcalculado/Ftabelado, ao nível de 95% de confiança, superiores a 5.

Assim, em todas as condições simuladas, o modelo descreveu satisfatoriamente os casos investigados. O modelo desenvolvido para a secagem convectiva de grãos de uva, pode ser utilizado para fins preditivos.

A Figura 4 compara a eficiência da transferência de massa, calculada pela Equação (13), na secagem conduzida a 0,8 m/s, nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.

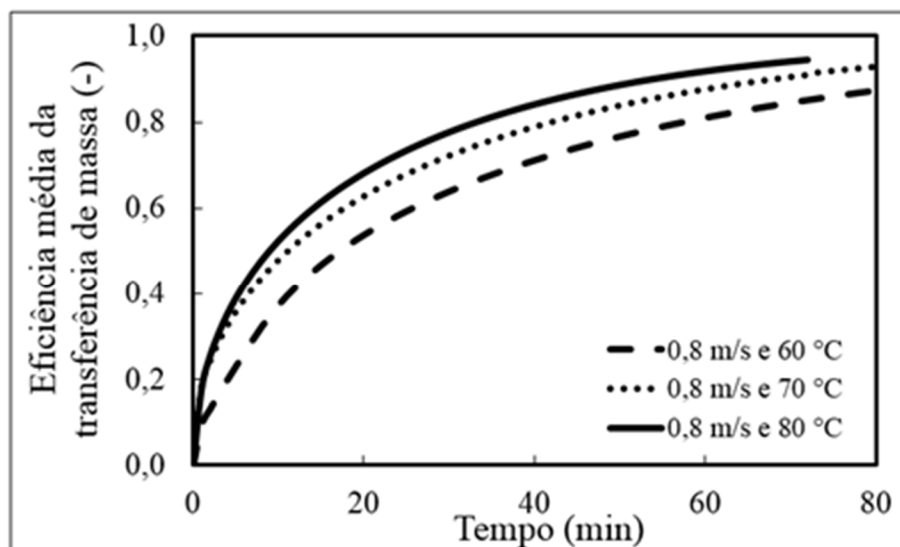


Figura 4 – Comparação entre a eficiência média da transferência de massa para a secagem conduzida a 0,8 m/s

Verifica-se que, mantendo a velocidade e elevando-se a temperatura do ar de secagem, a eficiência média da transferência de massa aumenta, fato condizente com a suposição de que a difusão interna seja a etapa controladora da cinética de secagem. Na velocidade de 0,8 m/s, a eficiência média da transferência alcança valores máximos de 87,8; 91,9 e 94,5% e médias globais de 64,9; 70,1 e 74,67%, respectivamente para 60, 70 e 80 °C.

A Figura 5 apresenta o perfil da eficiência da transferência de massa para a secagem conduzida a 0,8 m/s e 60 °C.

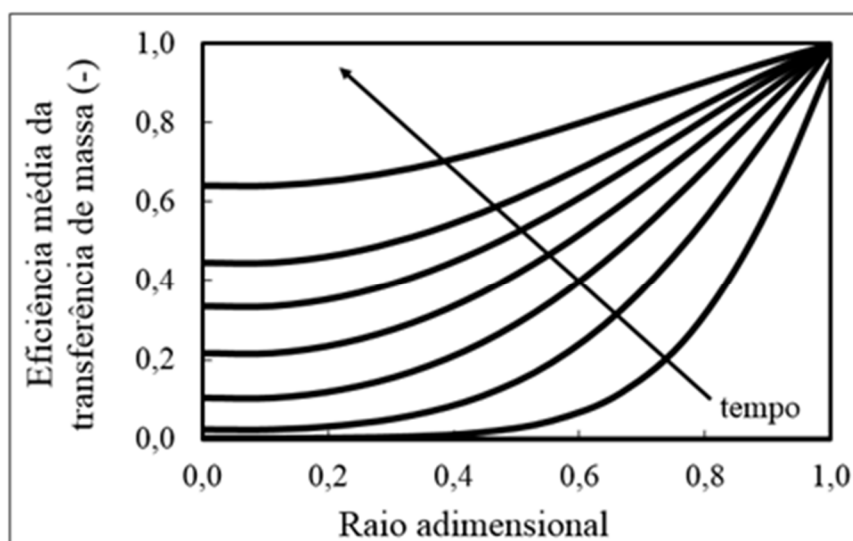


Figura 5 – Perfil da eficiência da transferência de massa para a secagem conduzida a 60 °C e 0,8 m/s

Verifica-se que a eficiência da transferência de massa sofre maior variação nos períodos iniciais de secagem, uma vez que, a diferença entre a umidade inicial e a umidade em determinado tempo, $X(r, t)$, é reduzida à medida que a secagem evolui.

4. Conclusões

Foi estudado o processo de secagem convectiva de grão de uva Cabernet Sauvignon em camada fina, sendo desenvolvido um modelo fenomenológico, testada a condição de contorno de Cauchy, e ajustados os valores da difusividade mássica efetiva e de transferência convectiva de massa. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais da literatura.

O ajuste do coeficiente de difusividade mássica efetiva resultou na ordem de $10^{-9} \text{ m}^2/\text{min}$, apresentando uma dependência do tipo Arrhenius com a temperatura. Na análise dos resultados simulados, observou-se erro médio global de 4,51% e R^2 superior a 98%, quando comparados com dados experimentais da literatura. O modelo desenvolvido para a secagem convectiva de grão de uva, método de resolução e considerações mostraram-se adequados para a representação do sistema simulado.

No estudo da eficiência média da transferência de massa, verificou-se que, mantendo a velocidade e elevando-se a temperatura do ar de secagem, a eficiência média da transferência de massa aumentou. A eficiência média da transferência alcançou valores máximos de 87,8; 91,9 e 94,5% e médias globais de 64,9; 70,1 e 74,67%, respectivamente para 60, 70 e 80 °C.

Referências

- AKAIKE, H.** *Information theory and an extension of the maximum likelihood principle*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION THEORY, 2, 1973, Budapest. Anais... Budapest: Akademiai Kiado, 1973, p. 267–281.
- AREGBA, A.W.; SEBASTIAN, P.; NADEAU, J.P.** *Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model*. Journal of Food Engineering Vol. 77, p. 27–40, 2006.
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A.** *Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes*. Journal of Food Engineering Vol. 55, p. 323-330, 2002.
- BARROZO, M.A.S.; HENRIQUE, H.M.; SARTORI, D. J. M., FREIRE, J. T.** *The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds*. Journal of Stored Products Research Vol. 42, p. 348–356, 2006.
- BENAMOUN, L.; BELHAMRI, A.** *Numerical simulation of drying under variable external conditions: application to solar drying of seedless grapes*. Journal of Food Engineering Vol. 76, p. 179-187, 2006.
- BORGES, P.A.P.** *Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos*. 2002. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C.** *Design of a new solar dryer system with swirling flow for drying seeded grape*. International Communications in Heat and Mass Transfer Vol. 36, p. 984-990, 2009.
- CLEMENTE, G.; SANJUÁN, N.; CÁRCEL, J.A.; MULET, A.** *Influence of Temperature, Air Velocity, and Ultrasound Application on Drying Kinetics of Grape Seeds*. Drying Technology Vol. 32, p. 68-76, 2014.
- DAVIDOV-PARDO, G.; MCCLEMENTS, D.J.** *Nutraceutical delivery systems: Resveratrol encapsulation in grape seed oil nanoemulsions formed by spontaneous emulsification*. Food Chemistry Vol. 167, 205-212, 2015.
- DIAS, J.P.** *Centésimo curso de vinificação*. Ministério da Agricultura e do Desenvolvimento, 2006.
- DROSOU, C.; KYRIAKOPOULOU, K.; BIMPILAS, A.; TSIMOGIANNIS, D.; KROKIDA, M.** *A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts*. Industrial Crops, artigo aceito em 2015 para publicação, aguarda impressão.
- DUFOUR, P.** *Control Engineering in Drying Technology: Review and Trends*. Drying Technology n. 24, p. 889-904, 2006.
- ESMAILI, M.; REZAZADEH, G.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R.; TAHMASEBI, A.** *Modeling of the Seedless Grape Drying Process using the Generalized Differential Quadrature Method*. Chemical Engineering Technology Vol. 30, p. 168-175, 2007(b).
- ESMAILI, M.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R.; MOUSAVIC, M.A.E.; REZAZADEH, G.** *Influence of dipping on thin-layer drying characteristics of seedless grapes*. Biosystems Engineering Vol. 98, p. 411-421, 2007(a).

- FADHEL, A.; KOOLI, S.; FARHAT, A.; BELLGHITH, A. Study of the solar drying of grapes by three different processes. *Desalination* Vol. 185, p. 535-541, 2005.
- GOLMOHAMMADI, M.; ASSAR, M.; RAJABI-HAMANEH, M.; HASHEMI, S.J. *Energy Efficiency Investigation of Intermittent Paddy Rice Dryer: Modeling and Experimental Study*. Food and Bioproducts Processing Vol. 94, p. 275-283, 2015.
- GUTIÉRREZ, L.F.; RATTI, C.; BELKACEMI, K. *Effects of drying method on the extraction yields and quality of oils from quebec sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) seeds and pulp*. Food Chemistry, Vol. 106, p. 896-904, 2008.
- HENDERSON, S.M. *A basic concept of equilibrium moisture*. Agriculture Engineering Vol. 33, p. 29-32, 1952.
- ISTADI, I.; SITOMPUL, J.P. *A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying*. Drying Technology Vol. 20, p. 1123-1142, 2002.
- JIANG, Y.; SIMONSEN, J.; ZHAO, Y. *Compression-Molded Biocomposite Boards from Red and White Wine Grape Pomaces*. Journal of Applied Polymer Science Vol. 119, p. 2834-2846, 2011.
- KELLY, B.J.; JOAN, M. *Wine industry residues*, in: P.S. nee' Nigam, A. Pandey (Eds.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation*, 1st ed. The Netherlands: Springer, p. 293-311, 2009.
- KHATCHATOURIAN, O.; VIELMO, H.A.; OLIVEIRA, F.A. *Soybean drying in thin-layer: experimental and theoretical study*. In: International Congress of Mechanical Engineering, 20., 2009, Gramado. Anais... Gramado: COBEM, 2009.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. *Thin layer drying characteristics of garlic slices*. Journal of Food Engineering Vol. 29, p. 75-97, 1996.
- MASKAN, A.; KAYA, S.; MASKAN, M. *Hot air and sun drying of grape leather (pestil)*. Journal of Food Engineering Vol. 54, p. 81-88, 2002.
- MENEZES, M.L. *Estudo dos processos de secagem e extração para produção de óleo bruto de semente de uva*. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, 2014.
- MULET, A.; CÁRCEL, J.A.; SANJUÁN, N.; BON, J. *New Food Drying Technologies – Use of Ultrasound*. Food Science and Technology International Vol. 9, p. 215-221, 2003.
- PERUSSELLO, C.A.; KUMAR, C.; CASTILHOS, F.; KARIM, M.A. *Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (Smallanthus sonchifolius)*. Applied Thermal Engineering Vol. 63, p. 23-32, 2014.
- RAHIMMALEK, M.; GOLI, S.A.H. *Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of Thymys daenensis subsp. daenensis. Celak leaves*. Industrial Crops Vol. 42, p. 613-619, 2013.
- ROBERTS, J.S.; KIDD, D.R.; PADILLA-ZAKOUR, O. *Drying kinetics of grape seeds*. Journal of Food Engineering Vol. 89, p. 460-465, 2008.
- ROSSELLÓ, C.; SIMAL, S.; SANJUÁN, N.; MULET, A. *Non isotropic mass transfer model for green bean drying*. Journal of Agriculture and Food Chemistry Vol. 45, p. 337-342, 1997.
- SFREDO, M.A.; FINZER, J.R.D.; LIMAVERDE, J.R. *Heat and mass transfer in coffee fruits drying*. Journal of Food Engineering Vol. 70, p. 15-25, 2005.
- SIMAL, S.; BENEDITO, J.; SÁNCHEZ, E.S.; ROSSELLÓ, C. *Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration*. Journal of Food Engineering Vol. 36, p. 323-336, 1998.
- SITOMPUL, J.P.; ISTADI, I. *Alternating direction implicit method for solving equations of 2-D heterogeneous model of deep-bed grain drying*. Lembaga Penelitian Vol. 32, p. 425-433, 2000.
- STURM, B.; VEGA, A.M.N.; HOFACKER, W.C. *Influence of process control strategies on drying kinetics, color and shrinkage of air dried apples*. Applied Thermal Engineering Vol. 62, p. 455 – 460, 2014.
- TREYBAL, R.E. *Mass-transfer operations*. New York: McGraw Hill, 1980.