

SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE CAFÉ UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

RUDNEY AMARAL¹, EDNILTON T. DE ANDRADE², FRANCISCO C. GOMES³,
ISABELA A. LEMOS⁴, CAMILA DE A. DIAS⁵

¹ Eng^o Mecânico, Mestrando, Depto Engenharia, UFLA, Lavras - MG. Fone: (35) 991923259, rudneymec@yahoo.com.br.

² Eng^o Agrícola, Prof Doutor, Depto Engenharia, UFLA, Lavras - MG.

³ Eng^o Agrícola, Prof Doutor, Depto Engenharia, UFLA, Lavras - MG.

⁴ Eng^a Agrônomo, Mestranda, Depto Engenharia, UFLA, Lavras - MG.

⁵ Eng^a Agrônomo, Mestranda, Depto Engenharia, UFLA, Lavras - MG.

Apresentado no
XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017
30 de julho a 03 de agosto de 2017 - Maceió - AL, Brasil

RESUMO: A secagem do café é necessária para armazenamento pós-colheita e se destaca por influenciar questões importantes como qualidade. A determinação da distribuição do teor de água no interior de um fruto de café natural durante e ao final do processo de secagem é o objetivo desse trabalho, onde foram realizadas simulações por meio de elementos finitos, utilizando a fluidodinâmica computacional. Foram coletados dados experimentais de teor de água durante a secagem de frutos cereja a qual foi realizada a uma temperatura de 40°C e umidade relativa de 25% e até que os frutos atingissem 0,18 decimal (b.s.) visando a validação do modelo. Foram ajustados aos dados coletados dez modelos matemáticos de secagem. O modelo Exponencial de Dois Termos foi o que melhor se ajustou aos dados. Os resultados das simulações em fluidodinâmica computacional foram ajustados aos resultados da secagem experimental, obtendo um ajuste satisfatório. O coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) foi ajustado ao modelo obtendo-se o valor de $2,87 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Ao final da secagem, o modelo apresentou 57,1% da área de projeção do fruto de café com teor de água abaixo de 0,18 decimal (b.s.). Desta forma, o modelo pode ser utilizado para outras aplicações.

PALAVRAS-CHAVE: Teor de água. Distribuição. Elementos Finitos.

SIMULATION OF COFFEE DRYING USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ABSTRACT: Coffee drying is necessary for post-harvest storage and is notable for influencing important issues such as quality. The determination of the moisture content distribution within a natural coffee fruit during and at the end of the drying process is the objective of this work, where finite element simulations were performed using computational fluid dynamics. Experimental drying data of the cherry fruits were collected at a temperature of 40 °C and relative humidity of 25% and until the fruits reached 0.18 decimal (d.b.) to compare the results of the experiment with the results of the simulations. Ten mathematic drying models were adjusted to the data collected. The Two-Phase Exponential model was better fitted to the data. The results of the simulations were adjusted to the results of the experimental drying, obtaining a satisfactory adjustment. The coefficient of effective diffusivity (D_{eff}) was adjusted to the model in the value of $2.87 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. At the end of drying, the model presented 57.1% of the projection area of the coffee fruit with moisture content below 0.18 decimal (d.b.). In this way, the model can be used for other applications.

KEYWORDS: Moisture content. Distribution. Natural Coffee. Finit Elements. Diffusion.

INTRODUÇÃO

No Brasil, na produção de grãos se destaca a produção de café com 5,9% da receita total de exportações do agronegócio brasileiro, segundo o Informe Estatístico do Café (2016). A secagem de grãos é necessária para armazenagem pós-colheita e se destaca por interferir na qualidade dos grãos e na sua armazenabilidade.

O café deve ser secado com temperatura de 40°C para a operação não afetar o aroma e sabor da bebida (BORÉM, 2008).

Ribeiro et al. (2003) variaram o fluxo de ar em café cereja descascado e perceberam que, independente da variação da temperatura o aumento do fluxo de ar tem efeito somente na primeira hora de secagem e não influencia a qualidade da bebida.

Alves et al., (2013), concluíram que o aumento da temperatura provoca aumento no coeficiente de difusividade efetivo assim como na taxa de secagem e reduz o tempo de secagem para baixa umidade. Observaram que o coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) de água para café natural varia entre 1,908 e $3,721 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Nilnont et al., (2012) modelaram a secagem do café em pergaminho via elementos finitos e obtiveram valores médios do coeficiente de difusão líquida do grão de café e do pergaminho, que são respectivamente de $7,173 \times 10^{-10}$ e $6,737 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

O objetivo desse trabalho foi determinar a distribuição do teor de água no interior de um fruto de café natural durante e ao final da secagem e implementar um modelo pela fluidodinâmica computacional para descrever a difusão líquida nos frutos. Esse modelo possibilita analisar a taxa de difusão líquida nos frutos de café durante a secagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados frutos de café maduros ou “cereja” (*Coffea arabica* L. cv. Catuai Vermelho). A colheita foi manual. Foram removidos os frutos com menor massa específica (secos, chochos, etc). Os frutos apresentaram teor de água médio de 2,11 decimal (b.s.) no início da secagem.

Antes da secagem foram medidas as dimensões (mostradas na tabela 1) dos frutos de café de 10 amostras com paquímetro digital de resolução 0,01 mm.

Tabela 1. Dimensões medidas de frutos de café naturais.

Dimensions measured of fruits of natural coffees.		
Eixo	Dimensão (mm)	Dimensão usada (mm)
Comprimento (a)	13,827	6,913
Largura (b)	11,467	5,734
Espessura (c)	9,898	4,948

As amostras foram pesadas em balança digital com precisão de 0,01 g. Foi calculada a massa específica real média dos frutos durante o processo de secagem.

O sistema para a secagem das amostras foi composto por unidade de condicionamento de ar acoplada a um secador de camada fixa (Figura 01).

O sistema de condicionamento de ar de laboratório (SCAL) foi utilizado para controlar as características do ar de secagem conforme modelo proposto por Fortes et al. (2006). Quatro bandejas removíveis com fundo perfurado, de seção quadrada, com dois lados iguais a 0,3 m e profundidade de 0,1 m, localizadas sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar eram constituintes do secador.



FIGURA 1. Sistema utilizado na secagem mecânica

O procedimento foi iniciado com o preenchimento das bandejas. A cada hora de secagem as bandejas eram retiradas do secador e pesadas em uma balança analítica com resolução de 0,01 g. Esse procedimento se repetiu até que os frutos chegassem a 0,18 decimal (b.s.) utilizando o método padrão de estufa (BRASIL, 2009) para determinar o teor de água dos frutos. O tempo total de secagem foi de 109 horas. As variáveis de fluxo do ar de secagem foram mantidas constantes, a temperatura foi de 40 °C, a umidade relativa de 25 %(b.u.) e a velocidade de 0,33 m s⁻¹ para um fluxo de 20 m³min⁻¹m⁻².

O teor de água de equilíbrio dos frutos foi calculado utilizando modelo proposto por Afonso Júnior (2001) citado por Borém (2008) para frutos “cereja” (Equação 01).

$$U_e = (2,0222 + (0,0288T) - (18,7397 UR^{-2,1385})) \quad (01)$$

em que;

U_e é o teor de água de equilíbrio (b.s.);

T é a temperatura do ar de secagem (°C), e

UR é a umidade relativa do ar de secagem (decimal).

A razão de umidade foi calculada com o ajuste da segunda lei de Fick aos dados observados utilizando o *software* STATISTICA[®] 5.0 (Statsoft, Tulsa, USA).

Onze modelos matemáticos já consagrados na literatura utilizados para predição de secagem foram ajustados aos dados experimentais. A escolha do melhor modelo baseou-se nos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R^2) e o qui-quadrado (χ^2).

A Fluidodinâmica Computacional é uma técnica usada para avaliação de fenômenos físicos por meio do método de elementos finitos (SCHNEIDER; MALISKA, 2000).

De acordo com Crank (1975) há uma analogia entre condução de calor e difusão líquida que foi utilizada para desenvolver a simulação da secagem de café com o *software* ANSYS[®] ED[™] (versão 9.0) por meio da programação em linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language). A tabela 2 mostra esta analogia.

Tabela 2. Analogia entre a difusão líquida e a condução de calor.

Analogy between liquid diffusion and heat conduction.

DIFUSÃO LÍQUIDA	CONDUÇÃO DE CALOR
Ocorre por movimentos aleatórios	Ocorre por movimentos aleatórios
Fick 1855	Fourier 1822
D é o coeficiente de difusão	K é a condutividade térmica
C é a concentração da substância	θ é a temperatura
$F(t) = -D \partial C / \partial x$	$F(t) = -K \partial \theta / \partial x$

F é o fluxo difusivo e/ou fluxo de calor

Foi escolhida uma geometria conforme mostra a Figura 2, considerando uma simetria de eixo do fruto de café. Foram utilizados os valores de a e b, respectivamente, $6,9132 \times 10^{-3}$ m e $5,7347 \times 10^{-3}$ m conforme tabela 1.

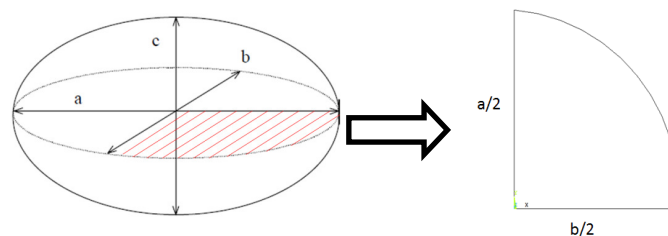


FIGURA 2. Representação de um fruto de café como um esferóide oblato

Foi escolhido o elemento PLANE77 (Figura 03) que é um elemento bidimensional, quadrangular com oito nós aplicável a análises térmicas bidimensionais Ansys (2011) para formar a malha computacional. A malha foi regular e contou com 507 elementos e 1600 nós (Figura 03).

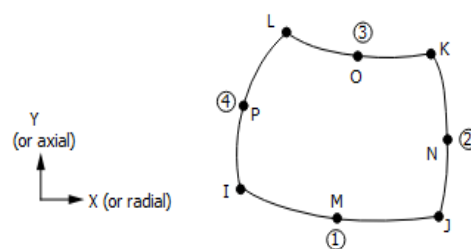


FIGURA 3. Elemento PLANE77

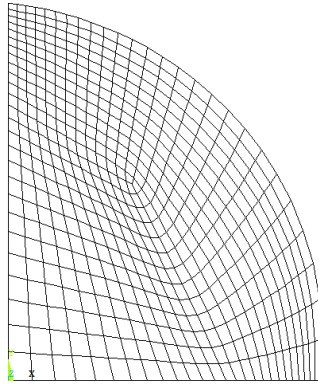


FIGURA 4. Representação da malha de elementos obtida no modelo.

O coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) utilizado na simulação foi ajustado aos dados reais para representar os dados experimentais.

O tempo de secagem dos frutos no modelo foi 109 horas (igual ao experimento).

A condição inicial foi aplicar a todos os pontos nodais da malha a mesma concentração de teor de água. Para tanto foi calculada a concentração de teor de água (produto entre o teor de água dos frutos em base seca e a massa específica dos frutos.) inicial igual a $861,55 \text{ kg(H}_2\text{O).m}^{-3}$. Esta condição inicial corresponde a teor de água de 2,11 decimal (b.s.). Para o valor da massa específica foi considerado a média da variação da mesma no tempo, sendo obtido o valor de 1305 kg m^{-3} . Foi considerada a parte de matéria seca dessa massa específica para utilização na modelagem ($408,3 \text{ kg m}^{-3}$).

Foi aplicada a concentração de teor de água de equilíbrio (produto entre o teor de água de equilíbrio dos frutos de café e sua massa específica) na superfície externa do fruto. no valor calculado de $34,53 \text{ kg(H}_2\text{O).m}^{-3}$.

Foi desenvolvido o programa-fonte, a partir do banco de comandos disponíveis na biblioteca do *software* Ansys[®], aplicando as condições iniciais e de contorno calculadas.

Para avaliar a eficiência do modelo desenvolvido para a difusão líquida dos frutos de café, os resultados deste foram comparados aos resultados obtidos experimentalmente. A curva de razão de umidade para os dois casos foi comparada. Foi calculado o erro médio relativo (P) pela equação 16 das curvas de secagem obtidas pelo modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A massa média dos frutos medida foi de 1,52g e a massa específica real dos frutos antes da secagem foi de $1540,69 \text{ kg m}^{-3}$, ao final da secagem, foi de $918,84 \text{ kg m}^{-3}$ e a média durante a secagem de 1305 kg m^{-3} . O raio equivalente inicial das amostras foi de $6,18 \times 10^{-3} \text{ m}$ e o teor de água de equilíbrio (U_e) foi de $8,458 \times 10^{-2}$ decimal (b.s.).

Na Figura 05 é colocada a comparação dos valores simulados e os valores experimentais para a variação da razão de umidade (RU) em função do tempo pelo modelo Exponencial de Dois Termos que melhor se ajustou aos dados experimentais. Na tabela 3 são apresentados os valores de coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), qui-quadrado (χ^2) e as constantes do modelo Exponencial de Dois Termos que apresentou valores satisfatórios dos erros médios relativo e estimado assim como um elevado coeficiente de determinação (R^2). Valores de erro médio relativo abaixo de 10% significa um bom ajuste de dados para a secagem segundo Madamba et al. (1996) confirmado por Mohapatra e Rao (2005).

O coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) foi calculado em $1,86 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esse resultado é corroborado por Alves et al. (2013) que encontraram uma variação desse coeficiente entre $1,908$ e $3,721 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

O valor obtido pelo modelo para o coeficiente de difusão líquida (D_{eff}) que melhor se ajustou aos dados experimentais foi de $2,87 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esse valor está de acordo com os resultados apresentados no trabalho de Isquierdo (2011) que estudou a cinética de secagem para cafés naturais em diferentes temperaturas e umidades relativas do ar de secagem e concluiu que o coeficiente de difusão líquida varia entre $1,460 \times 10^{-11}$ a $3,993 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Também apresenta conformidade com o resultado obtido por Alves et al. (2013) que obtiveram o coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) de água nos frutos do cafeeiro variando entre $1,908 \times 10^{-11}$ e $3,721 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. O valor obtido computacionalmente para o coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) é um valor médio, visto que, não foram considerados os componentes de um fruto de café como, pergaminho por exemplo. Na realidade cada componente apresenta um coeficiente de difusão líquida (D_{eff}) específico.

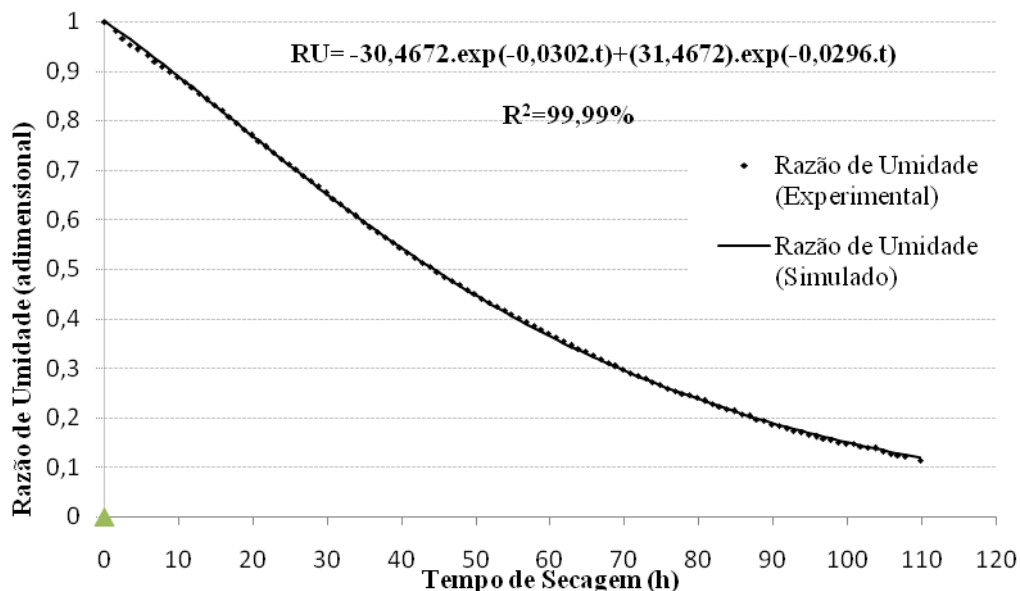


FIGURA 5. Valores de razão de umidade experimental e simulado pelo modelo Exponencial de Dois Termos para a secagem de frutos de café em função do tempo (h).

Tabela 3. Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE), Qui-quadrado (χ^2) e as constantes do modelo Exponencial de Dois Termos.

Coefficient of determination, relative mean error, estimated mean error, chi-square and the constants of the Exponential Two Terms model.

Temperatura	Parâmetros Estatísticos				Constantes do modelo		
	χ^2	P	SE	R^2	a	b	k
40°C	0,0004	0,73	0,022	99,99	30,467	0,9789	-0,0302

A distribuição do teor de água no interior dos frutos de café ao final do processo é mostrada na Figura 6.

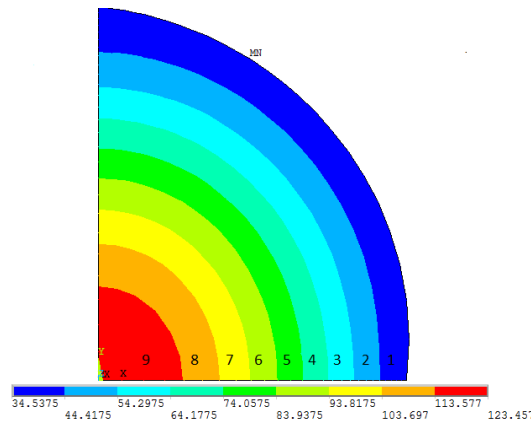


Figura 6 - Distribuição de concentração de teor de água [kg(H₂O) m⁻³] resultante da simulação da secagem dos frutos de café

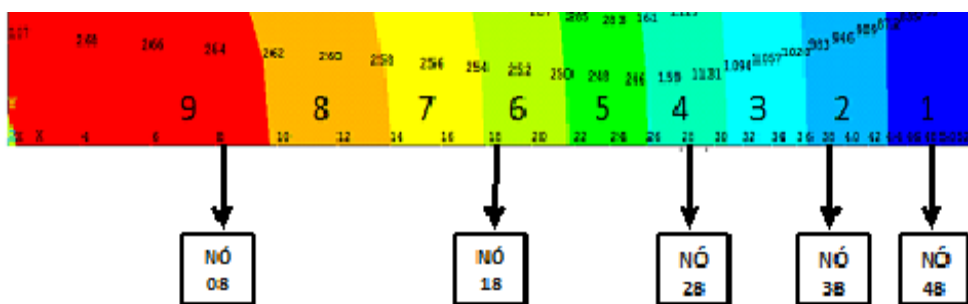


FIGURA 7. Representação dos pontos nodais envolvidos em cada área no eixo X

Na tabela 04 observa-se o percentual de cada área da Figura 07. Percebe-se que a área 1 (mostrada em azul) é a maior e a que mais perdeu água. Uma faixa composta pela soma das áreas 1, 2, 3 e 4 equivale a 57,1% da área total de projeção de um fruto de café. Na tabela 04 observam-se os valores de concentração de teor de água em cada área. Nas áreas de 1 a 4, a maior concentração de teor de água é de 0,18 decimal (b.s.).

Tabela 4. Distribuição do teor de água em diferentes áreas do centro até a extremidade do fruto de café depois de secado.

Distribution of the moisture content in different áreas from the Center to the end of the coffee fruit after drying.

Nº	Área (m ²)	Equivalência (%)	Concentração de água (kg(H ₂ O) m ⁻³)	Teor de água decimal (b.s.)
1	2,09E-05	16,4	34,54 – 44,42	0,08 – 0,11
2	1,75E-05	13,7	44,42 – 54,30	0,11 – 0,13
3	1,67E-05	13,1	54,30 – 64,18	0,13 – 0,16
4	1,77E-05	13,9	64,18 – 74,06	0,16 – 0,18
5	1,21E-05	9,5	74,06 – 83,94	0,18 – 0,21
6	1,19E-05	9,4	83,94 – 93,82	0,21 – 0,23
7	1,12E-05	8,8	93,82 – 103,70	0,23 – 0,25
8	9,65E-06	7,6	103,70 – 113,58	0,25 – 0,28
9	9,72E-06	7,6	113,58 – 123,46	0,28 – 0,30

A Figura 08 apresenta a evolução da difusão líquida nos frutos de café ao longo do tempo de secagem e se observa que a difusão líquida é cada vez mais lenta ao longo do tempo gerando maiores dificuldades de retirada da água do fruto, aumentando os riscos de perdas de qualidade do produto. Isso confere com vários trabalhos já descritos na literatura, como o de

Saath et al. (2010).

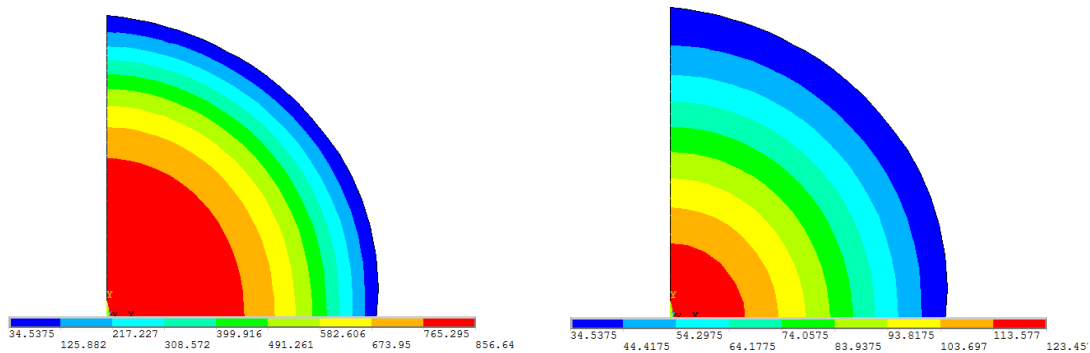


FIGURA 8. Visualização do campo de teor de água para 24 e 96 horas de secagem.

Na Figura 09 são apresentadas as curvas de secagem para alguns pontos nodais da malha. A linha que representa a curva do ponto nodal 08 que está a $0,12 \times 10^{-2}$ m do centro do fruto é muito diferente da curva de secagem do ponto nodal 48 que está a $0,54 \times 10^{-2}$ m do centro do fruto. Percebe-se que no centro do fruto o teor de água é mais alto.

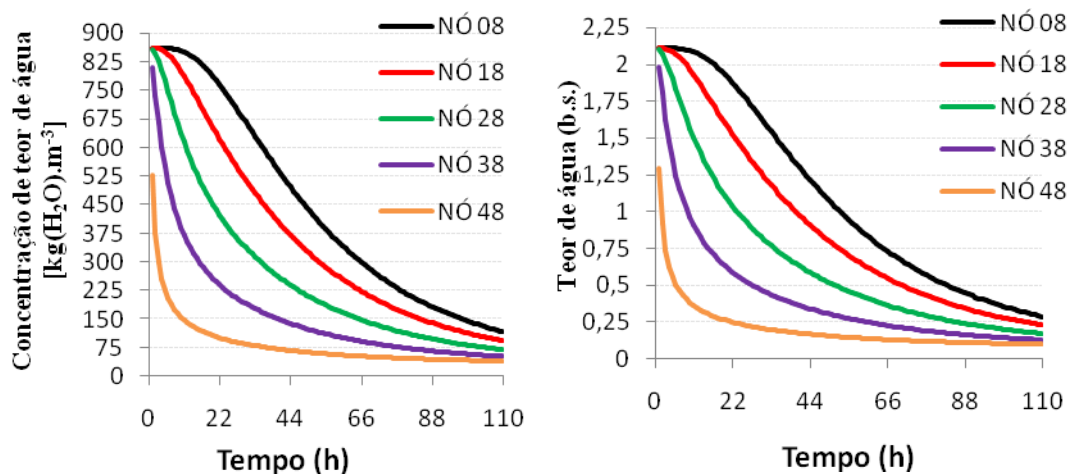


FIGURA 9. Curvas de secagem para alguns nós escolhidos sobre o eixo X da geometria

Na Figura 10 são apresentados os valores de razão de umidade para os dados experimentais comparados com dados simulados em função do tempo. Observa-se que a simulação representa adequadamente o fenômeno de secagem do fruto de café. O ajuste dos dados experimentais aos simulados foi satisfatório, portanto, o modelo pode ser utilizado para outras aplicações que necessitem representar tal fenômeno. O erro médio relativo (P) foi de 1,8%, sendo considerado satisfatório.

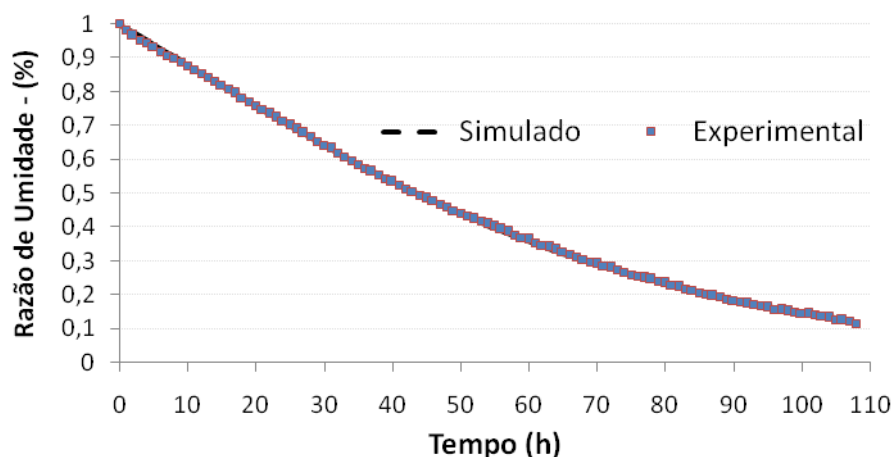


FIGURA 10. Valores de razão de umidade para os dados experimentais comparados com dados simulados.

CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- O modelo desenvolvido computacionalmente pela técnica da fluidodinâmica computacional para secagem de frutos de café natural se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais com erro médio relativo de 1,8%.

- Para temperatura do ar de secagem de 40°C e umidade relativa de 25%, ao final da secagem, 57,1% da área de projeção do fruto de café natural possui teor de água abaixo de 0,18 decimal (b.s.).

- O coeficiente de difusão líquida encontrado pelo modelo foi de $2,87 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

REFERÊNCIAS

AFONSO JUNIOR, P. C. Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

ALVES, G. E.; ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F.M.; SIQUEIRA, V. C.; OLIVEIRA, P. D.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, Lavras, v.8, n.2, p.238-247, abr./jun. 2013

ANSYS 14.2: manual ansys. Ontario, 2008. Software.

BORÉM, F. M. Pós-colheita do café. Lavras: Ed. Ufla. 2008

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para Análise de Sementes. Brasília, 2009. 399p.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Clarendon Press. Oxford, 1975.

FILHO, L. C. C.; ANDRADE, E. T.; MARTINAZZO, A. P.; D'ANDREA, M. E.; SOUSA, F. A.; FIGUEIRA, V. G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.8, p.797–802, 2015.

FORTES, M et al. Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.2, p. 578-589, maio/agosto 2006.

ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T. ; CORRÊA, J. L. G. ; OLIVEIRA, P.

D. ; ALVES, G. E. Drying Kinetics and quality of natural coffee. **American Society of Agricultural and Biological Engineers. Transactions**, v. 56, p. 1003-1010, 2013.

Informe Estatístico do Café. Outubro 2016. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/420-aprespdfviiiispcb#a>. Acesso em 01 dez. 2016.

Madamba, P.S.; Driscoll, R.H.; Buckle, K.A. **Thin layer drying characteristics of garlic slices**. Journal of Food Engineering, v. 29, p. 75 – 97, 1996.

Mohapatra, D.; Rao, P.S. **A thin layer drying model of parboiled wheat**. Journal of Food Engineering, London, v.66, n.4, p.513-18, 2005.

Nilnont, W ET AL. **Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying**. Food and bioproducts processing 90 (2012) 341–350

RIBEIRO, D. M. et al. Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 28, n. 7, p. 94-107, 2003. Especial.

Saath, R.; BORÉM, F. M.; ALVES, E.; TAVEIRA, J. H. da S.; MEDICE, R.; CORADI, P. C. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, jan./fev., 2010

SCHNEIDER, F. A.; MALISKA, C. R.. **Uma formulação em volumes finitos usando malhas não-estruturadas**. VIII ENCIT – Encontro Nacional de Ciências Térmicas, CD Rom edition, 2000. http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/site/iframe/publicacoes/artigos/novos_00s/2000_unstructured_and_hybrid_grids.pdf.