



RUDNEY AMARAL

**SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE CAFÉ UTILIZANDO A
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**LAVRAS-MG
2017**

RUDNEY AMARAL

**SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE CAFÉ UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Modelagem de Sistemas Biológicos para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

LAVRAS-MG
2017

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Amaral, Rudney .

Simulação da secagem de café utilizando a fluidodinâmica
computacional / Rudney Amaral. - 2016.

43 p. : il.

Orientador(a): Francisco Carlos Gomes.

.
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Bibliografia.

1. Distribuição de teor de água. 2. Café natural. 3. Difusão
líquida. I. Gomes, Francisco Carlos. . II. Título.

RUDNEY AMARAL

**SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE CAFÉ UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL
SIMULATION OF COFFEE DRYING USING COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS**

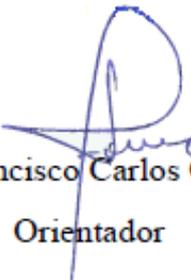
Dissertação apresentada a Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Modelagem de Sistemas Biológicos para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de dezembro de 2016

Dr. Francisco Carlos Gomes UFLA

Dr. Ednilton Tavares de Andrade UFLA

Dr(a). Joelma Rezende Durão Pereira UNILAVRAS


Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

**LAVRAS-MG
2017**

Aos meus pais, Sebastião Fátima Amaral e Anésia de Fátima do Amaral.
À minha esposa, Wanderleia de Oliveira Amaral.
Às minhas filhas, Brenda e Cecília.
Aos amigos e familiares,
Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar pela caminhada acadêmica, pois isso foi por Ele.

Ao professor Ednilton Tavares de Andrade pelo apoio incondicional e irrestrito neste trabalho que sem ele não existiria.

Às queridas colegas Isabela e Camila, pela imensa gentileza no trabalho experimental.

À minha esposa, Wanderléia pelo carinho e compreensão nos momentos difíceis.

Às minhas filhas, Brenda e Cecília pelo descanso proporcionado pelas brincadeiras.

Aos meus pais, por serem o exemplo de caráter, dignidade e luta que são, por me impulsionarem aos estudos durante toda a vida e me ensinarem o melhor caminho na vida.

Ao professor Jefferson L G Correa pelas sugestões na elaboração deste trabalho.

Ao professor Francisco C Gomes pela orientação.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, pela oportunidade de realizar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

MUITÍSSIMO OBRIGADO!

RESUMO

A secagem é uma etapa do processamento do café necessária à manutenção de sua qualidade e também para o armazenamento pós-colheita, se destaca por influenciar questões importantes como qualidade por exemplo. 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 ponto central nesse trabalho, para tanto, foram realizadas simulações por meio da técnica de elementos finitos, utilizando a fluidodinâmica computacional. Foram coletados dados experimentais de secagem de frutos realizada a uma temperatura (T) de 40°C e umidade relativa (UR) de 25% para comparar os resultados do experimento com os resultados das simulações. Os frutos foram secos até atingir 15,24%(b.u) de teor de água. Foram ajustados aos dados coletados dez modelos matemáticos de secagem. O modelo Exponencial de Dois Termos foi o que melhor se ajustou aos dados apresentando boa parametrização estatística. Os dados resultantes das simulações via fluidodinâmica computacional foram ajustados aos dados da secagem experimental. O ajuste dos dados experimentais aos simulados foi satisfatório, e desta forma, o modelo pode ser utilizado para outras aplicações que necessitem representar tal fenômeno. O coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) foi ajustado ao modelo computacional no valor de $2,87 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Ao final da secagem, o modelo computacional apresentou 57,1% da área de projeção do fruto de café natural com teor de água abaixo de 15,3% (b.u.).

Palavras-chave: Teor de água. Distribuição. Café natural. Elementos Finitos. Difusão.

ABSTRACT

Drying is a step in the processing of the coffee needed to maintain its quality and also for post-harvest storage, it is notable for influencing important issues such as quality. The determination of the distribution of the moisture content inside a natural coffee fruit during and at the end of the drying process is the central point in this work, for which, simulations were carried out using the finite element technique using computational fluid dynamics. Experimental data on fruit drying were carried out at a temperature (T) of 40 ° C and relative humidity (RH) of 25% to compare the results of the experiment with the results of the simulations. The fruits were dried until reaching 15.24% (b.u) of water content. Ten mathematic drying models were adjusted to the data collected. The Exponential Model of Two Terms was the one that best fit the data presenting good statistical parameterization. The data resulting from the computational fluid dynamics simulation were adjusted to the experimental drying data. The fit of the experimental data to the simulated ones was satisfactory, and in this way, the model can be used for other applications that need to represent such phenomenon. The effective diffusivity coefficient (D_{eff}) was adjusted to the computational model in the value of $2.87 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. At the end of drying, the computational model presented 57.1% of the projection area of the natural coffee fruit with moisture content below 15.3% (b.u.).

Keywords: Moisture content. Distribution. Natural Coffee. Finit Elements. Difusion.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Analogia entre a difusão líquida e a condução de calor.....	17
Tabela 2: Dimensões medidas de frutos de café naturais	23
Tabela 3 - Modelos matemáticos utilizados para predição de secagem.	26
Tabela 4 - 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	32
Tabela 5 - Equivalência das diferentes áreas do centro até a extremidade do fruto de café	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Volume elementar para desenvolvimento da equação diferencial fundamental da difusão	17
Figura 2 - Dimensões características dos frutos de café.....	23
Figura 3 - Sistema utilizado na secagem mecânica.....	24
Figura 4 - Representação de um fruto de café como um esferóide oblato	28
Figura 5 - Geometria implementada no modelo de simulação.....	28
Figura 6 - Elemento PLANE77.....	29
Figura 7 - Representação da malha de elementos obtida no modelo.....	29
Figura 8 - Representação dos pontos nodais da malha de elementos.	29
Figura 9 - Valores de razão de umidade experimental e simulados pelo modelo Exponencial de Dois Termos para a secagem de frutos de café em função do tempo (h).	33
Figura 10 - Distribuição de concentração de teor de água ($\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{m}^{-3}$) resultante da simulação da secagem dos frutos de café.....	34
Figura 11 - Representação dos pontos nodais envolvidos em cada área no eixo X	34
Figura 12 - Visualização do campo de teor de água para 12 e 24 horas de secagem.....	36
Figura 13 - Visualização do campo de teor de água para 36 e 48 horas de secagem.....	36
Figura 14 - Visualização do campo de teor de água para 60 e 72 horas de secagem.....	36
Figura 15 - Visualização do campo de teor de água para 86 e 98 horas de secagem.....	37
Figura 16 - Visualização do campo de teor de água para 109 horas de secagem.	37
Figura 17 - Representação vetorial da difusão líquida ocorrida no fruto de café.....	37
Figura 18 - Representação dos pontos nodais analisados.	38
Figura 19 - Curvas de secagem para alguns nós escolhidos sobre o eixo X da geometria	38
Figura 20 - Ajuste dos dados simulados para a condição real de distribuição dos nós com relação a distância entre eles (simulado médio).....	39
Figura 21 - Teores de água simulado (com correção de área) e experimental ao longo do tempo de secagem	40
Figura 22 - Valores de razão de umidade para os dados experimentais comparados com dados simulados.	40

SUMÁRIO

<u>LISTA DE TABELAS.....</u>	<u>8</u>	
<u>LISTA DE FIGURAS.....</u>	<u>9</u>	
<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO.....</u>	<u>11</u>
<u>2</u>	<u>REVISÃO DA LITERATURA.....</u>	<u>12</u>
2.1	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	12
2.1.1	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA.....	12
2.1.2	DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO FLUXO.....	13
2.1.3	GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL.....	13
2.1.4	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	14
2.1.5	DISCRETIZAÇÃO.....	15
2.1.6	PÓS-PROCESSAMENTO E ANÁLISES.....	15
2.1.7	PACOTES COMPUTACIONAIS.....	16
2.2	DIFUSÃO LÍQUIDA.....	16
2.3	SECAGEM DE CAFÉ.....	18
2.3.1	TIPOS DE SECAGEM DE CAFÉ.....	20
2.3.1.1	Secagem natural.....	20
2.3.1.2	Secagem em terreiros.....	20
2.3.1.3	Secagem com altas temperaturas.....	21
2.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL NA SECAGEM DE CAFÉ.....	22
<u>3</u>	<u>MATERIAL E MÉTODOS.....</u>	<u>23</u>
3.1	EXPERIMENTO.....	23
3.1.1-	PROCEDIMENTO E SISTEMA DE SECAGEM.....	24
3.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SECAGEM.....	27
3.3	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	31
<u>4</u>	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	<u>32</u>
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	32
4.2-	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	33
4.3-	RESULTADOS E VALIDAÇÃO.....	39
<u>5</u>	<u>CONCLUSÕES.....</u>	<u>41</u>
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>42</u>

1 INTRODUÇÃO

A secagem de grãos é uma etapa do processamento de produtos agrícolas necessária para armazenagem e manutenção da qualidade do produto após a colheita. São diferentes teores de água exigidos para o armazenamento adequado, que encontramos entre os diferentes produtos. No processamento dos grãos a etapa de secagem se destaca por interferir principalmente na qualidade.

No Brasil, na produção de grãos destaca-se a produção de café. O mercado brasileiro de acordo com o Informe Estatístico do Café - Outubro de 2016 (vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA), o volume de café exportado de janeiro a outubro de 2016 foi de 27,8 milhões de sacas o que gerou uma receita cambial aproximada de US\$ 4,3 bilhões. Ainda segundo o Informe Estatístico do Café, esse montante representa 5,9% da receita total com exportações do agronegócio brasileiro. Com um mercado dessa magnitude, justifica-se que cada vez mais, pesquisas sejam realizadas sobre o processamento do café em geral.

No intuito de entender a transferência de calor e massa nos frutos de café, durante a secagem pode-se identificar a distribuição de teor de água no interior de um fruto de café pela modelagem matemática. Na fluidodinâmica computacional vê-se uma facilidade de análise das hipóteses, visto que, a fluidodinâmica computacional é uma técnica que utiliza o conceito do método de elementos finitos e tem sido usada para avaliação de vários fenômenos naturais ou processos mecanizados pelas equações governantes da dinâmica dos fluidos: conservação da massa, conservação da energia e conservação da quantidade de movimento.

Assim, 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 ponto central nesse trabalho e pôde ser determinada ao implementar um modelo pela fluidodinâmica computacional para descrever a transferência de calor e massa. Esse modelo possibilita analisar, pelos resultados das simulações, a taxa de difusão líquida nos frutos de café durante a secagem bem como a distribuição do teor de água no final da secagem. Confrontando os resultados das simulações com resultados obtidos experimentalmente o modelo computacional poderá ser avaliado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional é uma área de grande interesse para a solução de muitos problemas práticos. Como exemplos podem ser citados problemas de aerodinâmica, termodinâmica (Gungor, 2008), dentre outros. É um conjunto de ferramentas computacionais para solucionar e interpretar soluções em escoamento de fluidos. Estas ferramentas são baseadas em algoritmos numéricos capazes de resolver problemas de escoamentos de fluidos (SCHNEIDER e MALISKA,2000).

Para os escoamentos de fluidos, o modelo matemático é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, conservação da massa e conservação da energia. A solução analítica destas equações somente é possível para escoamentos muito simples, nos quais não há variações temporais, e somente uma dimensão de escoamento. Para se analisar problemas reais em que se encontram fortes variações temporais e turbulência, usam-se os métodos numéricos capazes de analisar, por meio da discretização das equações citadas, os escoamentos de forma geral. Nos casos de escoamentos laminares, os modelos são relativamente simples, pois as equações de Navier-Stokes, conservação da massa e conservação de energia são resolvidas. Para se trabalhar com Fluidodinâmica Computacional deve-se seguir uma estrutura de solução do processo que inclui três etapas básicas: a primeira é o pré-processamento em que é feita a geração da geometria e da malha numérica, além da definição das condições de contorno. A segunda etapa é o processamento que é a solução do problema pelos Solvers, que resolvem as equações matemáticas geradas na etapa anterior utilizando a discretização das equações e várias iterações do algoritmo. A terceira etapa é pós-processamento na qual se extrai a visualização das informações, gráficos e análises geradas na solução (Silva et al, 2012).

2.1.1 Definição da geometria

Essa é a etapa em que faz-se a definição do formato e das dimensões do domínio, ou seja, do volume a ser trabalhado. A geometria pode ser definida por várias maneiras, utilizando vários softwares, ou o próprio software da simulação, prevalecendo à escolha do pesquisador. Alguns softwares de desenho também oferecem a possibilidade de geração da malha (Rocha, 2012).

O software de simulações Ansys® também apresenta uma linguagem de programação chamada APDL (Ansys Parametric Design Language) que permite a geração da geometria e da malha por comandos que criam pontos chave para se formar linhas e posteriormente uma área e em seguida outros comandos para gerar a malha, que pode ser uni, bi ou tridimensional (Ansys, 2011).

2.1.2 Definição das características físicas do fluxo

É necessário definir e informar ao software algumas características do escoamento estudado na geometria já definida no tópico anterior. Aqui, precisa-se dos conceitos de mecânica dos fluidos e transferência de calor como: compressibilidade ou incompressibilidade, viscosidade, condições iniciais, condições de contorno do problema e condições de escoamento.

Essa etapa é conhecida como modelagem, pois é nela que são informados os dados do problema. Quando refere-se às condições de contorno deve-se definir se o escoamento é interno ou externo, se há deslizamento ou não nas paredes da geometria (onde não há deslizamento a velocidade do fluido é zero) e em quais superfícies serão aplicadas as condições iniciais.

Quando se fala em condições de escoamento é necessário saber: (1) se o escoamento é laminar ou turbulento; (2) se o escoamento é de uma única fase ou multifásico; (3) se o fluxo é viscoso ou não viscoso; (4) se há reações químicas ou combustão; (5) tensão de superfície ou superfície livre. Essas informações podem ser levantadas nos números adimensionais da mecânica dos fluidos e transferência de calor e massa (Incropera et al. 2008).

2.1.3 Geração da malha computacional

A malha computacional é uma divisão do volume total ou da área total da geometria do problema em mínimos elementos, que gera um máximo número de elementos aonde os algoritmos resolvem as equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia para cada volume ou área definido na malha levando em consideração o resultado obtido nos elementos vizinhos. Devido à extensão dos cálculos, essa solução só é possível mediante uso de um método numérico (Patankar, 1983).

Algumas questões devem ser resolvidas para se definir a malha. Além do tipo de malha, é necessário se definir o grau de refinamento dessa malha para a geometria formada. O

refinamento da malha é, basicamente, o aumento do número de elementos da malha e pode ser usado em toda a geometria ou apenas em uma área de maior interesse.

Outro fator importante, nesta etapa é a verificação das condições de máquina para realizar as simulações, como por exemplo, verificar se a memória RAM é suficiente. O custo computacional das simulações aumenta consideravelmente cada vez em que se aumenta o grau de refinamento da malha, pois o tempo das simulações aumenta muito.

2.1.4 Modelagem matemática

A modelagem matemática do problema é realizada a partir do *Solver* que é responsável por processar a resolução das equações governantes do problema. O *Solver* realiza uma aproximação das variáveis do problema, a partir da discretização das equações envolvidas no problema. Grande parte das aproximações, feitas em fluidodinâmica computacional, são baseadas em aproximações de séries de expansão de funções contínuas, como a série de Taylor, por exemplo, (Patankar, 1983).

A discretização das equações gera um sistema de equações algébricas polinomiais linearizadas que devem ser resolvidas para os limites de integração em cada ponto nodal da malha gerada. Todas as variáveis da solução e propriedades de fluxo são armazenadas nos pontos nodais de cada elemento da malha. Nessa fase não há tanta influencia do usuário como na geração da geometria e malha, pois todas as propriedades necessárias já foram definidas. Geralmente o usuário não tem acesso ao código de resolução do problema. É requerido um grande poder computacional (Silva, 2012).

O modelo matemático para os diversos tipos de escoamentos, como os escoamentos multicomponentes, é estabelecido com base nas equações de Navier-Stokes, conservação da massa e da energia e devem ser resolvidas todas as equações para cada componente. As equações são escritas na forma tensorial a seguir:

- Equação de Navier-Stokes modificada:

$$\frac{\partial \varepsilon \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon \rho v_j v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \varepsilon \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\varepsilon \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + \sum \varepsilon \rho F_{si} \quad (01)$$

-Equação da conservação da massa modificada:

$$\frac{\partial \varepsilon \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon \bar{\rho} u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (02)$$

Simplificando a equação (02), considerando que o escoamento é incompressível:

$$\frac{\partial \varepsilon u}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon v}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon w}{\partial z} = 0 \quad (03)$$

2.1.5 Discretização

De maneira geral a discretização é a solução de equações diferenciais, comum à solução exata, com valores de ponto da malha. Esses valores são chamados de valores discretos. Para que se entenda a discretização das equações, a título de exemplificação, consideram-se equações algébricas com valores de ϕ em pontos de uma malha e faz-se considerações de como varia ϕ entre os pontos, ou seja, como varia ϕ com a distancia. Supondo que a variação de ϕ com a distancia seja dada por (Patankar, 1980):

$$\phi = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m \quad (04)$$

Nesse caso emprega-se um método numérico para obter os coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$. Isso permite a obtenção da coordenada de distancia (x) em qualquer localização.

2.1.6 Pós-processamento e análises

Pós-processamento dos resultados da simulação é realizado, a fim de extrair a informação desejada a partir do campo de fluxo computadorizado gerado (Ansys, 2011).

São duas vertentes a serem exploradas. Na primeira vertente são realizadas análises relacionadas a dependência no tempo e na segunda as análises são realizadas sobre os nós ou elementos de malha afim de obter resultados de cargas aplicadas a cada nó, por exemplo. Nas duas vertentes de análises há potencialidade para realizar animações, gráficos e tabelas dos resultados (Silva, 2012).

2.1.7 Pacotes computacionais

Existem diferentes pacotes computacionais para Fluidodinâmica Computacional, alguns são para construção de geometria, como o ICEM CFD, outros já são pacotes mais completos tais como o FLUENT[®], ou o CFX[®].

O ICEM CFD é um pacote que tem como objetivo a construção de diferentes geometrias e malhas numéricas para a simulação.

O CFX[®] é um software ANSYS[®] no qual é possível construir a geometria, construir a malha numérica, ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar posteriormente, além de apresentar uma boa interface software-usuário, sendo que o mesmo tem a possibilidade de incluir sub-rotinas computacionais escritas em linguagem FORTRAN, além disso, apresenta a flexibilidade da inclusão de equações para o cálculo de certas variáveis (Ansys, 2011).

O software comercial ANSYS[®] possui várias formas de se implementar um modelo. Uma delas é por uma interface amigável que é o chamado ANSYS[®] Workbench. Outra forma é pela programação onde os comandos devem ser escritos em linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language) podendo inserir rotinas e sub-rotinas de programação em linguagem FORTRAN tendo como vantagem a facilidade em arquivar e modificar os programas (Ansys, 2011).

2.2 Difusão líquida

Difusão é um processo pelo qual a matéria é transportada de uma parte a outra de um sistema como resultado de movimentos moleculares aleatórios. De acordo com Crank (1975) a transferência de calor por condução é também, devido a ,movimentos moleculares aleatórios. Há uma analogia entre os dois processos, Fick (1855), foi o primeiro que analisou a difusão numa base quantitativa análoga, tendo adotado a equação matemática de condução de calor proposta por Fourier (1822). A teoria matemática da difusão em corpos isotrópicos baseia-se na hipótese de que a taxa de transferência de substância difusa através da área unitária de uma seção é proporcional ao gradiente de concentração medido normal à secção.

$$F = D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (05)$$

Em que, F é a taxa de transferência por unidade de área da seção, C é a concentração da substância difusa, x é a coordenada de espaço medida normal à seção, e D é chamado de

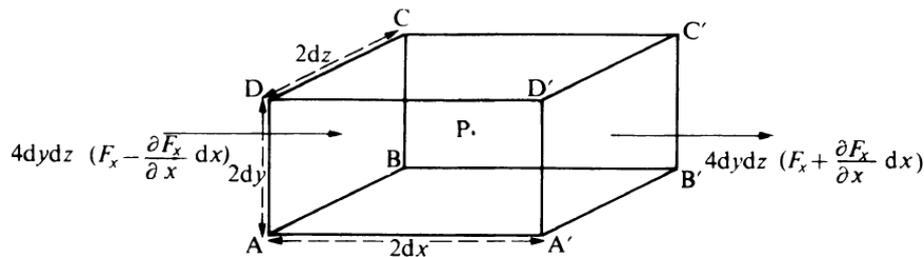
coeficiente de difusão. Quando F é função do tempo assim como a taxa de transferência de calor, podemos fazer analogia entre as duas entidades conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1: Analogia entre a difusão líquida e a condução de calor.	
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
$F(t) = -D \partial C / \partial x$	$F(t) = -K \partial \theta / \partial x$

Fonte: Do autor (2016)

Ainda segundo Crank (1975) a equação diferencial fundamental da difusão em meio isotrópico é derivada da equação (05). Considerando um volume elementar na forma retangular com seus lados paralelos aos eixos de coordenadas de comprimentos $2dx$, $2dy$ e $2dz$, com centro do elemento em $P(x, y, z)$, onde a concentração de substância difusora é C . Seja $ABCD$ e $A'B'C'D'$ faces perpendiculares ao eixo de x , de acordo com a figura (01).

Figura 1 - Volume elementar para desenvolvimento da equação diferencial fundamental da difusão



Fonte- Crank, 1975.

Em função do exposto “Crank” desenvolveu a equação para difusão em que o coeficiente de difusão é constante.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (06)$$

2.3 Secagem de café

Os frutos de café normalmente são colhidos com alto teor de água. Dependendo da maturação do fruto o teor de água chega até a 65% (bu). O fruto para ser armazenado não pode conter essa quantidade de água, fazendo-se necessária a secagem ou outro método de preservação de alimentos (criopreservação, resfriamento, atmosfera controlada). Para o café a secagem ainda é o método mais utilizado (BORÉM, 2008).

A secagem pode ser definida como um processo de transferência simultânea de energia e massa entre o produto e o ar de secagem que é a retirada do excesso de água contida no grão por meio de evaporação que é causada por convecção forçada de ar aquecido visando manter sua qualidade durante armazenamento (BROOKER et al., 1978; HALL, 1980). Fatores como: temperatura e umidade relativa do ar de secagem, velocidade do ar e tempo de secagem influenciam na secagem do café de forma que se não forem bem controlados podem comprometer a qualidade do fruto (BORÉM, 2008). A qualidade do café é fator determinante no valor de venda desse produto, portanto, a secagem influencia nos custos de produção e nos ganhos na hora da venda, ou seja, o impacto da secagem sobre o negócio é muito grande.

A secagem do café pode ser realizada pelas três formas básicas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Comumente é usada a convecção, em que, um fluxo de ar aquecido passa pela massa de grãos. Esse processo gera uma diferença de pressão de vapor entre o ar e os frutos, onde a pressão de vapor do ar deve ser menor que a dos frutos. Durante o processo de secagem, há migração da água, do centro para a superfície do grão. Daí então, a água é evaporada para o ar de secagem (Athié et al, 1998; Pabis et al., 1998).

Burmester e Eggers (2010) estudaram a variação do fluxo de ar durante a secagem de café e concluíram que o fluxo de ar influencia apenas no início da secagem, quando os teores de água ainda são elevados. Ribeiro et al. (2003) variaram o fluxo de ar de $20 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ para $30 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ em café cereja descascado e perceberam que, independente da variação da temperatura (que variou entre 40°C , 45°C e 50°C) o aumento do fluxo de ar tem efeito somente na primeira hora de secagem e não influenciou a qualidade da bebida.

Alves, et al. (2013) trabalhando na cinética de secagem de frutos de café a baixas umidades relativas, concluíram por meio do ajuste de sete modelos matemáticos de secagem que o aumento da temperatura de bulbo seco provoca aumento no coeficiente de difusividade efetivo assim como na taxa de secagem e provoca redução no tempo de secagem para baixa temperatura de ponto de orvalho. Ainda observaram que o coeficiente de difusividade efetivo

de água para café natural varia entre 1,908 e $3,721 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e que a energia de ativação para a difusão líquida foi de $52,89 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

No início do processo de secagem, quando o fruto ainda tem teor de água alto, a água é transferida para o ar de secagem na fase líquida. Ocorrendo um decréscimo no volume dos grãos aproximadamente igual ao volume de água evaporado (Athié et al, 1998; Pabis et al., 1998). Nesse momento do processo há transferência de água livre para o ar de secagem.

Num segundo momento, a água na fase líquida interliga as partículas do sólido, formando o que é chamado de ponte líquida. Em seguida, ocorre a migração de água ao longo das paredes capilares com evaporação e condensação entre as pontes líquidas. Nessa etapa a transferência de vapor é determinante para a contração volumétrica do produto (Saath et al, 2010).

Na etapa final é onde os riscos de aquecimento aumentam, pois, é necessário imprimir maior fluxo de ar, há uma demanda de energia maior e também um tempo maior de exposição dos grãos ao calor (Brooker et al. 1992). O fato de a taxa de transporte interno de água ser menor que a taxa de evaporação traz como consequência um aumento na temperatura do grão que tende a ser igual a temperatura do ar de secagem (Hall, 1980; Foust et al., 1982).

O processo de secagem deve ser realizado com baixas temperaturas (40° C a 60° C) para todos os grãos (Athié et al, 1998; Pabis et al., 1998). Isso garante que a superfície do grão não endureça durante a secagem, fato que dificultaria a retirada de água no final do processo e provocaria perdas de coloração.

Aliadas à temperatura moderada, algumas horas de repouso se tornam muito bem vindas durante a secagem dos grãos de café. Principalmente quando se trata de grãos desmucilados e despolpados. Esse repouso possibilita a redução do gradiente de umidade e promove uma remoção extra de umidade da massa de grãos. Durante o repouso a água migra para a superfície do grão (Saath et al, 2010).

De acordo com Corrêa et al, (1994), a temperatura do ar de secagem em 40° C fornece uma uniformidade maior do teor de água final da massa de grãos, enquanto que em temperaturas superiores de 50° C e 60° C os grãos mais próximos a entrada do ar de secagem ficaram supersecos.

2.3.1 Tipos de secagem de café

2.3.1.1 Secagem natural

Este tipo de secagem ocorre com a exposição do fruto a radiação solar e movimentação natural do vento, com os frutos ainda na planta. Por ser uma secagem natural é de custo quase zero, contabilizando somente as perdas por ataque de fungos. Apesar de não ser o método mais adequado ocorre muito em final de safra ou quando a colheita é tardia e também onde a única forma possível seja essa, por falta de condições de investimento (BORÉM, 2008).

2.3.1.2 Secagem em terreiros

Os frutos são expostos ao sol em superfícies planas sendo revolvidos manualmente, com tração animal ou mecanicamente. A principal vantagem da secagem em terreiros é o baixo custo com energia além de ser uma técnica tradicional e simples. Do ponto de vista ambiental é a técnica mais adequada, pois não há queima de combustíveis. Porém, quando o produtor dispõe somente de terreiros para executar a secagem completa do café torna-se necessário um grande contingente de mão-de-obra e mais tempo de secagem além de uma grande área plana disponível. Quanto mais tempo o produto é exposto ao sol, maiores são as chances de ocorrerem fermentações e contaminações (Borém, 2008). Outros fatores também afetam o tempo de secagem, são: o tipo de terreiro (concreto, terra, tijolo, asfalto, etc) e o manejo empregado no que tange a espessura da camada de café e ao número de revolvimentos diários. Quando se tem camadas muito espessas de café no terreiro perde-se muito em qualidade do fruto (REINATO, 2006).

Os terreiros com leito suspenso se destacam por apresentar melhores qualidades dos grãos e menores tempos de secagem como no trabalho de Dardengo, M. et al. (2013) quando foi obtido para os frutos do cafeeiro Conilon que: a secagem em leito suspenso levou 192 horas e apresentou melhores resultados em número de defeitos, enquanto no terreiro de concreto foram gastas 288 horas de secagem.

2.3.1.3 Secagem com altas temperaturas

São consideradas como altas temperaturas aquelas que ultrapassam em 10°C ou mais a temperatura ambiente em sistemas de ar forçado. Altas temperaturas são necessárias quando o volume diário de produção em uma propriedade é muito grande, pois seriam necessários espaços muito grandes de terreiros, o que é inviável. Também é necessário quando as condições atmosféricas são impróprias para a completa secagem em terreiros (BORÉM, 2008).

A secagem em secadores mecânicos altera a cor dos grãos de café e a cor desigual é o defeito mais generalizado. O controle da temperatura dos grãos deve ser rigoroso, pois um aumento excessivo da temperatura do grão afeta em muito a qualidade deste. O café deve ser submetido a secagem com temperatura de 45°C para a operação não afetar o aroma e sabor da bebida (Puzzi, 1986).

Segundo Brooker et al. (1992), no processo de secagem em camada fixa, o ar de secagem move-se de baixo para cima da camada de grãos. As transferências de umidade do grão para o ar tomam lugar em uma camada definida de grãos, que é a frente de secagem. No início do processo, a frente de secagem localiza-se na parte inferior da camada. À medida que a secagem prossegue, a frente move-se para cima, e, quando esta passa por toda a camada, toda massa é seca até atingir o teor de umidade final desejado. Segundo Pierce e Thompson, citados por BERBERT (1991), na secagem convencional em camada fixa quanto maior a espessura da camada de grãos, menor deverá ser a temperatura do ar de secagem e maior deverá ser a vazão do ar. Essas limitações da secagem em camada fixa são semelhantes à secagem com fluxos cruzados.

De acordo com Burmester e Eggers (2010), o coeficiente global de transferência de calor do café, obtido pela curva de arrefecimento de uma amostra aquecida até 100° C e depois submetida a um fluxo de ar forçado em 20° C, é dado por:

$$h = -\ln\left(\frac{T_S - T_{SUR}}{T_0 - T_{SUR}}\right) \frac{m_s c_{p,s}}{A \Delta t} \quad (07)$$

Em que h é o coeficiente global de transferência de calor do café, T_S é a temperatura da amostra, T_0 é a temperatura inicial, T_{SUR} é a temperatura da superfície, m_s é a massa da amostra, $c_{p,s}$ é o calor específico da amostra, A é a área de transferência de calor e Δt é a diferença de temperatura. Esse coeficiente pode ser usado em situações onde a convecção de calor domina a condução, ou seja, $Bi < 0,1$ (número de Biot menor que 0,1). A condutividade

térmica efetiva dos grãos de café foi diagnosticada como uma dependência linear do teor de água.

De acordo com Patil, (1988) citado por Nilnont, et al. (2012), o coeficiente de transferência de massa na superfície (h_m) para o café em pergaminho é dado por:

$$h_m = \frac{D_{air}}{d} (2,0 + 0,522Re^{0,5}Sc^{0,33}) \quad (08)$$

Onde D_{air} é a difusividade do ar, d é o diâmetro equivalente do café em pergaminho, Re é o número de Reynolds e Sc é o número de Schmidt.

2.4 Modelagem computacional na Secagem de Café

Nilnont, et. al, (2012) modelaram a secagem do café em pergaminho via elementos finitos. Por esta modelagem obtiveram um modelo suficiente para a predição de teor de água durante o processo de secagem. O modelo foi bidimensional e desenvolvido em linguagem Fortran 6.5. Outras considerações são feitas nesse trabalho como a concentração de cafeína por exemplo. Além de tudo, segundo os autores, o modelo proporciona uma melhor compreensão dos processos de transporte em diferentes componentes do café em pergaminho. Os valores médios, encontrados pelos autores, do coeficiente de difusão líquida do grão de café e do coeficiente de difusão líquida do pergaminho, são respectivamente de $7,173 \times 10^{-10}$ e $6,737 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Experimento

Para este trabalho, foram utilizados frutos de café maduros ou “cereja” (*Coffea arabica* L. cv. Catuai Vermelho).

A colheita dos frutos foi manual. Foram selecionados somente frutos maduros pela separação hidráulica e 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. Para determinar o teor de água nos frutos foi utilizado o método padrão de estufa, $105 \pm 3^\circ\text{C}$, por 24 horas consecutivas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

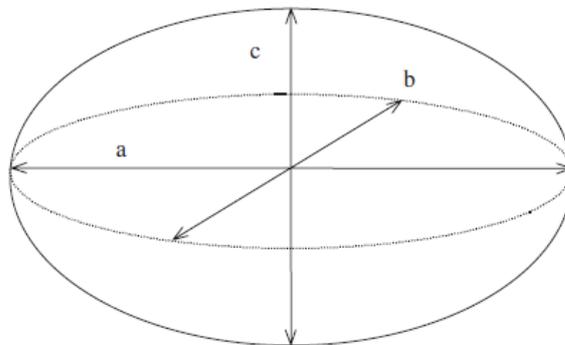
Antes do início da secagem mecânica foram medidas as dimensões principais dos frutos de café, a partir de 10 amostras. Essas medidas foram realizadas com um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm resultando em dimensões médias mostradas na tabela 2 em que (a) é o comprimento dos frutos, (b) é a largura e (c) é a espessura. A figura 2 mostra como são colocadas as dimensões características dos frutos de café.

Tabela 2: Dimensões medidas de frutos de café naturais

Eixo	Dimensão (mm)	Dimensão usada (mm)
a	13,8265	6,913
b	11,4695	5,734
c	9,8975	4,948

Fonte: Do autor (2016)

Figura 2 - Dimensões características dos frutos de café.



Fonte: Do autor (2016)

Foi calculado o volume dos frutos de café (V) pela equação 09. Os frutos de café foram considerados como um esferóide oblato. Também foi calculado o raio equivalente dos frutos de café, definido como o raio de uma esfera com volume equivalente ao volume do fruto de café.

$$V = \frac{4\pi(abc)}{3} \quad (09)$$

Em que, V = volume em cada teor de água, m^3 ;

a = comprimento em m;

b = largura em m;

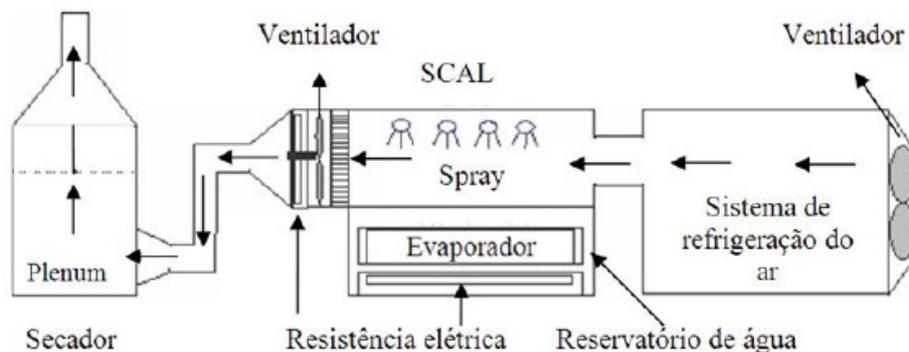
c = espessura em m.

As amostras foram pesadas em balança digital com precisão de 0,01 g. A massa específica real antes da secagem dos frutos foi calculada pela relação simples entre massa e volume de um corpo, bem como a massa específica real ao final da secagem. Também foi calculada a massa específica média dos frutos durante o processo de secagem.

3.1.1- Procedimento e sistema de secagem

O sistema envolvido na secagem das amostras foi composto por um sistema de condicionamento de ar acoplado a um secador de camada fixa (Figura 03).

Figura 3 - Sistema utilizado na secagem mecânica



Fonte: Isquierdo, E. P. (2011)

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). Esse equipamento permite o controle do fluxo, da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem e é composto de um sistema de refrigeração com três unidades de ar condicionado para fornecer o ar pré-condicionado ao SCAL. 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. A temperatura do ar de secagem foi medida no plenum, sob as bandejas de fundo perfurado por termopares conectados a controladores universais marca Novus, modelo N1100. Um termo-higrômetro digital portátil com sensor inserido no interior do plenum media a umidade relativa do ar de secagem. Um inversor de frequência marca Weg, modelo CFW-10 era o controlador da rotação do ventilador centrífugo que insufla o ar aquecido no plenum, assim sendo, ele regulava o fluxo de ar.

O procedimento foi iniciado com o completo preenchimento das bandejas de fundo perfurado. 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 15,24% (b.u.) sendo utilizado o método padrão de estufa (BRASIL, 2009) para determinar o teor de água dos frutos. O tempo total de secagem foi de 109 horas. Foi feito um rodízio de 90° na posição das bandejas a cada hora para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre as bandejas de fundo perfurado. Ao longo do procedimento as variáveis de fluxo do ar de secagem foram mantidas constantes, sendo que 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.

Para as condições de secagem desse trabalho, o teor de água de equilíbrio dos frutos foi calculado utilizando um modelo proposto por Afonso Júnior (2001) citado por Borém (2008) para frutos “cereja” (Equação 10).

$$Ue = (2,0222 + (0,0288T) - (18,7397 UR^{86181}))^{-2,1385} \quad (10)$$

Em que Ue é o teor de água de equilíbrio (bs), 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 equação (11) aos dados observados utilizando o *software* STATISTICA[®] 5.0 (Statsoft, Tulsa, USA). A razão de umidade (RU) é essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada fina. A equação (11) é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica como esférica e considerando conhecida a condição de contorno na superfície (Brooker, et al. 1992)

$$RU = \frac{U-U_e}{U_i-U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{9} \cdot \left(\frac{3}{R}\right)^2 \right] \quad (11)$$

em que, RU = razão de umidade do produto, adimensional;

U = teor de água do produto, decimal (b.s.);

U_e = teor de água de equilíbrio de produto, decimal (b.s.);

U_i = teor de água inicial do produto, decimal (b.s.);

D = Coeficiente de difusividade efetivo (m²s⁻¹);

R = Raio equivalente dos frutos de café (m);

Os modelos matemáticos dispostos na tabela 3 pelas Equações (12) a (22) foram ajustados aos dados experimentais de secagem do café.

Tabela 3 - Modelos matemáticos utilizados para predição de secagem.

Modelo	Equações
Aproximação da Difusão	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$ (12)
Dois Termos	$RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$ (13)
Exponencial de 2 Termos	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$ (14)
Logaritmo	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$ (15)
Midili	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ (16)
Newton	$RU = \exp(-k \cdot t)$ (17)
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$ (18)
Page Modificado	$RU = \exp(-(k \cdot t)^n)$ (19)
Thompson	$RU = \exp((-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0.5}) / 2 \cdot b)$ (20)
Verna	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$ (21)
Wang e Singh	$RU = 1 + at + bt^2$ (22)

RU - razão de umidade (adimensional); k, k₀, k₁ = constantes de secagem (s⁻¹); t = tempo de secagem (h); a, b, n = constantes que dependem da natureza do produto (adimensional). (Brooker et al., 1992; Corrêa et al., 2001; Alves et al., 2013; Corrêa Filho et al., 2015).

Fonte: Adaptada pelo autor (2016)

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), calculados por meio das equações 23 a 25.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y-\hat{Y})^2}{GLR}} \quad (23)$$

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum \frac{|Y-\hat{Y}|}{Y} \quad (24)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum(Y-\hat{Y})^2}{GLR} \quad (25)$$

em que,

SE= desvio padrão da estimativa (decimal)

Y = valor observado experimentalmente,

\hat{Y} = valor calculado pelo modelo,

GLR = graus de liberdade do modelo,

P = erro médio relativo (%).

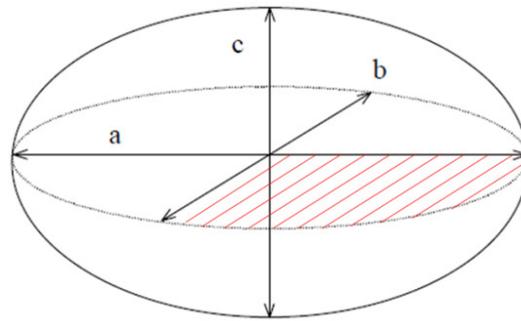
n= número de dados observados.

3.2 Simulação Computacional da Secagem

Para se chegar aos objetivos deste trabalho que foi o diagnóstico da distribuição de teor de água no interior de um fruto de café durante e após a secagem, foi escolhida a modelagem pelo software comercial ANSYS® Student 2016 pela programação em linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language).

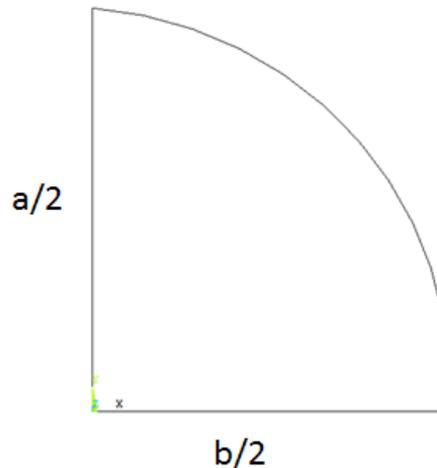
Para realizar as simulações foi escolhida uma geometria que corresponde a um quarto de um fruto de café, conforme mostra as figuras 4 e 5. Na realidade a geometria dos frutos de café natural é axissimétrica, ou seja, possuem simetria em um eixo. Para simplificar o problema os frutos de café natural foram considerados totalmente simétricos.

Figura 4 - Representação de um fruto de café como um esferóide oblato



Fonte: Do autor (2016)

Figura 5 - Geometria implementada no modelo de simulação



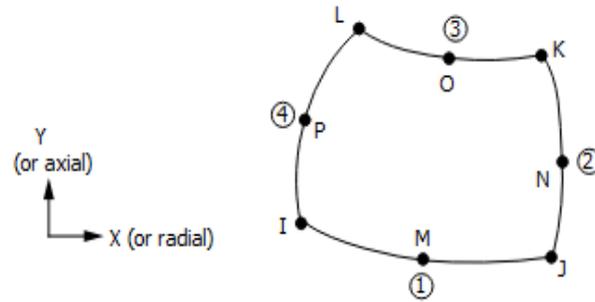
Fonte: Do autor (2016)

As dimensões principais dos frutos de café “cereja” foram medidas a partir de um paquímetro digital com resolução de 0,01 m. Na tabela 1 são mostradas as dimensões principais de um fruto de café, seguindo a nomenclatura dos eixos da figura 4.

Foi utilizado, para a geometria implementada os valores de a e b, respectivamente, $6,9132 \times 10^{-3}$ m e $5,7347 \times 10^{-3}$ m.

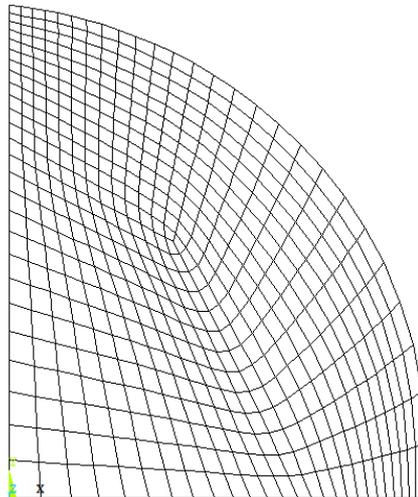
Foi escolhido um elemento térmico chamado PLANE77 (Figura 06) que é um elemento bidimensional, quadrangular com oito nós aplicável a análises térmicas bidimensionais de acordo com ANSYS (2011) para integrar a malha computacional. A malha foi regular tendo seus três lados divididos em um mesmo número de elementos. Esse procedimento dividiu a geometria apresentada em 507 elementos e 1600 nós (Figuras 7 e 8).

Figura 6 - Elemento PLANE77



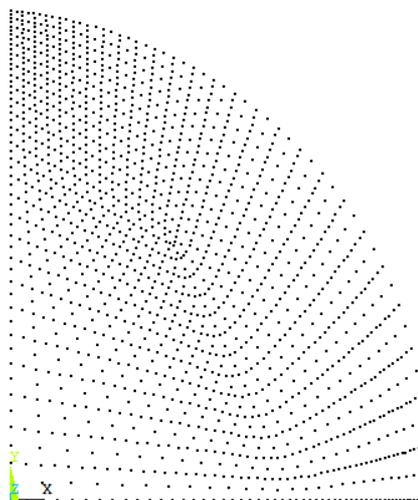
Fonte: ANSYS (2011)

Figura 7 - Representação da malha de elementos obtida no modelo.



Fonte: Do autor (2016)

Figura 8 - Representação dos pontos nodais da malha de elementos.



Fonte: Do autor (2016)

Ainda dentro do Pré-processamento (primeira etapa da modelagem em fluidodinâmica computacional) foram definidas as condições iniciais e as condições de contorno.

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

As condições de secagem, temperatura e umidade relativa do ar de secagem, foram estabelecidas em 40°C e 25% respectivamente, para viabilizar as comparações entre o modelo computacional e os dados experimentais. O tempo total de exposição dos frutos ao fluxo de ar no modelo computacional, 109 horas, foi o mesmo tempo obtido experimentalmente com os frutos atingindo um teor de água médio de 15,24 % (b.u.).

A condição inicial, usada para a solução do problema 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 inicial igual a 861,55 kg(H₂O).m⁻³. Esse valor foi obtido do produto entre o teor de água dos frutos em base seca e a massa específica dos frutos. Esta condição inicial corresponde a teor de água de 2,11 decimal (b.s.). Para o valor da massa específica foi considerado uma média da mesma no tempo sendo o valor calculado de 1305 kg m⁻³. Foi considerada a parte de matéria seca dessa massa específica sendo utilizado nos cálculos o valor de 408,3 kg m⁻³.

Já para o caso da condição de contorno foi aplicada a concentração de teor de água de equilíbrio na superfície externa do fruto, representada pelo arco na geometria implementada nas simulações. A concentração de teor de água de equilíbrio é o produto entre teor de água de equilíbrio dos frutos de café (calculado pela equação 10) e sua massa específica no valor de 408,3 kg m⁻³. A concentração de teor de água de equilíbrio teve seu valor calculado em 34,53 kg(H₂O).m⁻³.

Mediante o exposto, foi desenvolvido o programa-fonte, a partir do estudo dos comandos disponíveis na biblioteca do *software* Ansys[®], aplicando as condições iniciais e de contorno calculadas, o software solucionando o problema pelas iterações para executar a simulação do processo de retirada de água do fruto de café no *software* Ansys[®].

Foram obtidos pela simulação os valores nodais de concentração de teor de água em cada minuto do processo de secagem, bem como, a distribuição do teor de água no interior do fruto. A simulação chegou ao fim apresentando um total de 720 iterações.

3.3 Validação do modelo

Para avaliar a eficiência do modelo desenvolvido computacionalmente em linguagem APDL para a difusão líquida dos frutos de café, os resultados deste foram comparados aos resultados obtidos dos dados colhidos experimentalmente. A curva de razão de umidade para os dois casos foi comparada, assim como a curva do teor de água.

Pela equação 24, foi calculado o erro médio relativo (P) entre as curvas de secagem obtidas pelo modelo computacional e as curvas de secagem obtidas pelo experimento afim de realizar a parametrização estatística.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados experimentais

Para as amostras utilizadas, o volume dos frutos calculado foi de $9,922 \times 10^{-5} \text{ m}^3$.

A massa específica real dos frutos de café no início do processo era de $1540,69 \text{ kg m}^{-3}$. Ao final da secagem, quando os frutos atingiram um teor de água de 15,24% (b.u.) a massa específica real foi de $918,84 \text{ kg m}^{-3}$. Foi calculada a massa específica real média durante a secagem em 1305 kg m^{-3} .

O raio equivalente inicial das amostras calculado foi de $6,18 \times 10^{-3} \text{ m}$.

O teor de água de equilíbrio (U_e) calculado foi de $8,458 \times 10^{-2}$ decimal (b.s.).

A razão de umidade em função do tempo foi calculada pela equação (11). Na Figura 09 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 4 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 ajustado aos dados experimentais. Esse modelo apresentou valores satisfatórios dos erros médios relativo e estimado apresentou também um elevado coeficiente de determinação (R^2). De acordo com Isquierdo, (2011), esses parâmetros estatísticos são utilizados como critério de avaliação da eficiência de modelos matemáticos para predizer o fenômeno de secagem de frutos de café. Valores de erro médio relativo abaixo de 10% significa um bom ajuste de dados para o fenômeno da secagem segundo Madamba et al. (1996).

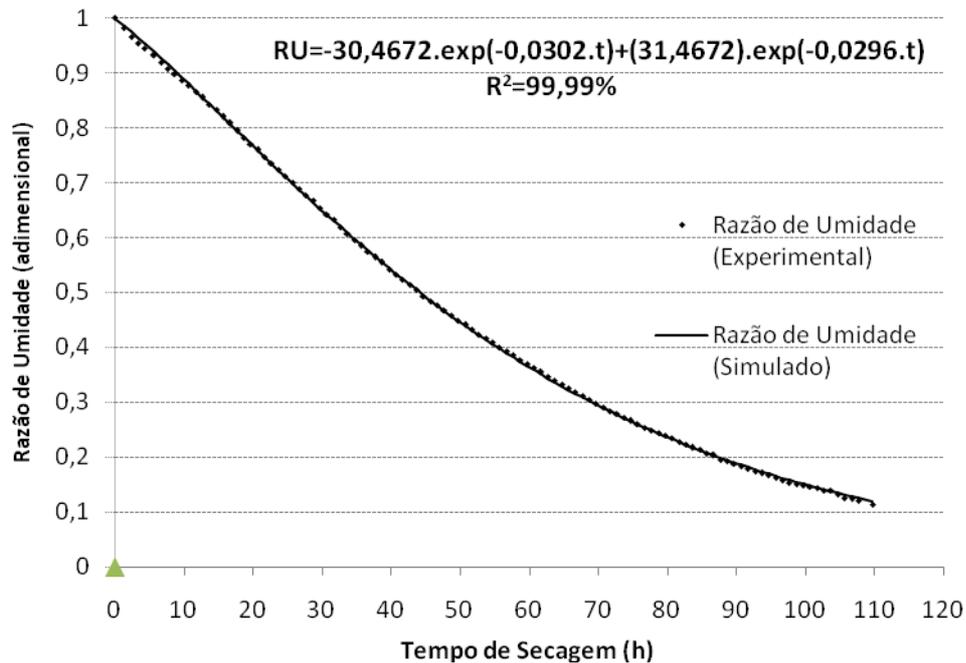
O coeficiente de difusividade efetivo (D_{eff}) foi calculado no valor de $1,86 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esse resultado é corroborado por Alves, et al. (2013) que encontraram valores desse coeficiente variando entre $1,908$ e $3,721 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Tabela 4 - 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

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

Fonte: Do autor (2016)

Figura 9 - Valores de razão de umidade experimental e simulados pelo modelo Exponencial de Dois Termos para a secagem de frutos de café em função do tempo (h).



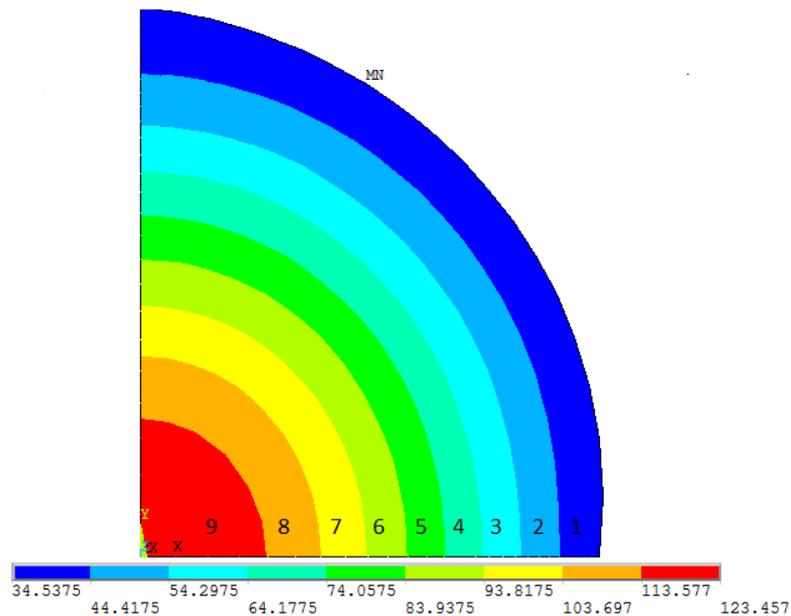
Fonte: Do autor (2016)

4.2- Resultados das simulações computacionais

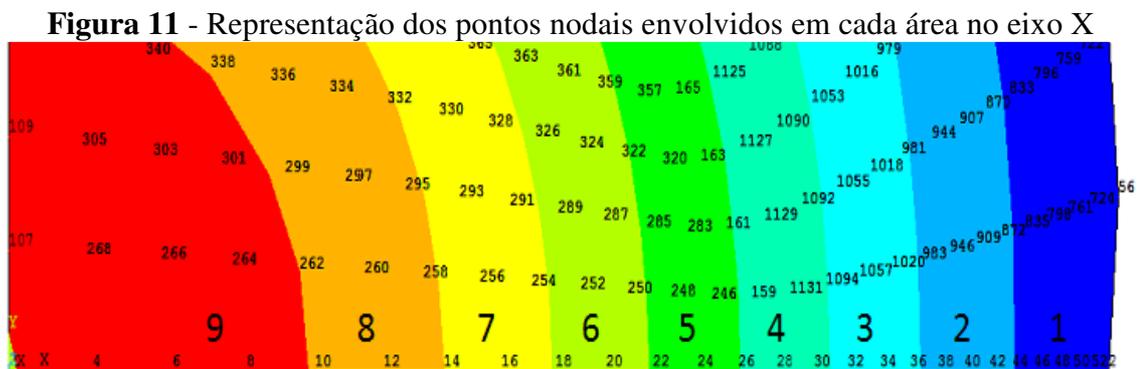
O valor obtido para o coeficiente de difusão líquida (D_{eff}) que melhor se ajustou aos dados experimentais foi de $2,87 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esse valor está de acordo com os resultados apresentados no trabalho de Isquierdo, E. P. (2011) que estudou a cinética de secagem para cafés naturais a 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 estudaram a cinética de secagem de cafés naturais a diferentes temperaturas e baixas umidades relativas e obtiveram o coeficiente de difusão 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 difusão líquida (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.

O campo de distribuição do teor de água no interior dos frutos de café ao final do processo de secagem, para os frutos analisados nesse trabalho é mostrado na figura 10. Cada cor no gráfico da figura indica uma faixa de concentração do teor de água.

Figura 10 - Distribuição de concentração de teor de água ($\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{m}^{-3}$) resultante da simulação da secagem dos frutos de café



Fonte: Do autor (2016)



Fonte: Do autor (2016)

As áreas numeradas na figura 11, diferenciadas pelas cores e faixa de concentração de teor de água, foram calculadas e a porcentagem de cada uma em relação à área do fruto inteiro. Na tabela 05 observa-se o percentual aproximado de cada área da figura 11. Percebe-se que a área 1 (mostrada em azul) é a maior e também a que mais perdeu água, como esperado, pois é a superfície externa do fruto. Uma faixa composta pela soma das áreas 1, 2, 3 e 4 equivale a 57,1% da área total de um fruto de café. Na tabela 05 observa-se os valores de faixa de concentração de teor de água em cada área. Nas áreas de 1 a 4, a maior concentração de teor de água é de $83,94 \text{ kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{m}^{-3}$ equivalente a 15,3 % (b.u.) de teor de água.

Tabela 5 - Equivalência das diferentes áreas do centro até a extremidade do fruto de café

Nº	Área (m ²)	Equivalência (%)	Concentração de água (kg(H ₂ O) m ⁻³)	Teor de água % (b.u.)
1	2,09E-05	16,4	34,54 – 44,42	7,80 – 9,81
2	1,75E-05	13,7	44,42 – 54,30	9,81 – 11,74
3	1,67E-05	13,1	54,30 – 64,18	11,74 – 13,58
4	1,77E-05	13,9	64,18 – 74,06	13,58 – 15,35
5	1,21E-05	9,5	74,06 – 83,94	15,35 – 17,05
6	1,19E-05	9,4	83,94 – 93,82	17,05 – 18,68
7	1,12E-05	8,8	93,82 – 103,70	18,68 – 20,25
8	9,65E-06	7,6	103,70 – 113,58	20,25 – 21,76
9	9,72E-06	7,6	113,58 – 123,46	21,76 – 23,22

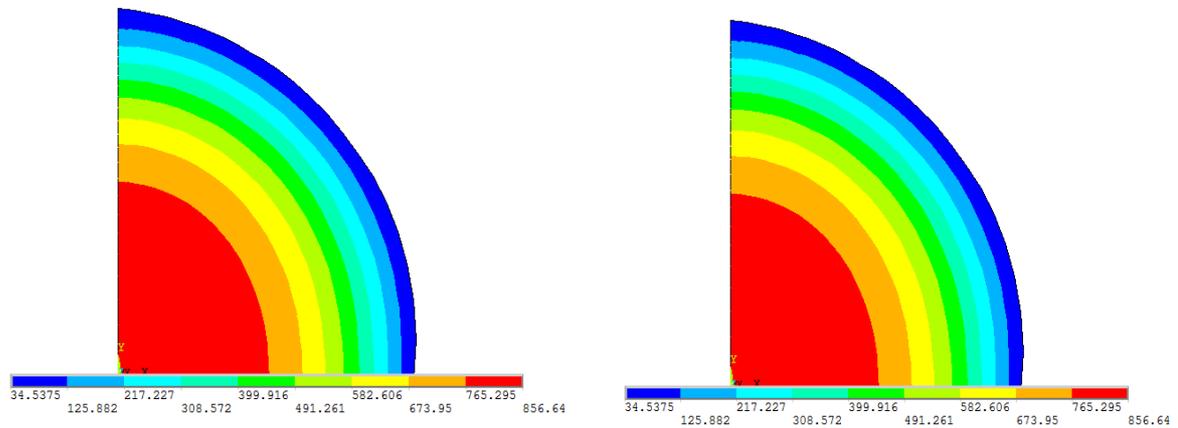
Fonte: Do autor (2016)

A fim de apresentar a evolução do processo de difusão de teor de água líquida nos frutos de café ao longo do tempo de secagem, foram implementados os gráficos das figuras 12 a 16 onde cada figura apresenta resultado extraído do *software* Ansys[®] que representa 12 horas de evolução do processo de difusão líquida.

É observado pelas figuras 12 a 16 que as simulações mostraram que a evolução do processo difusivo de água no interior do fruto de café é inversamente proporcional ao tempo de secagem, ou seja, a difusão líquida é cada vez mais lenta ao longo do tempo gerando maiores dificuldades de retirada da água do fruto ao final da secagem, aumentando, dessa forma os riscos de perdas de qualidade do produto. Isso confere com vários trabalhos já descritos na literatura, como o de Saath et al, (2010).

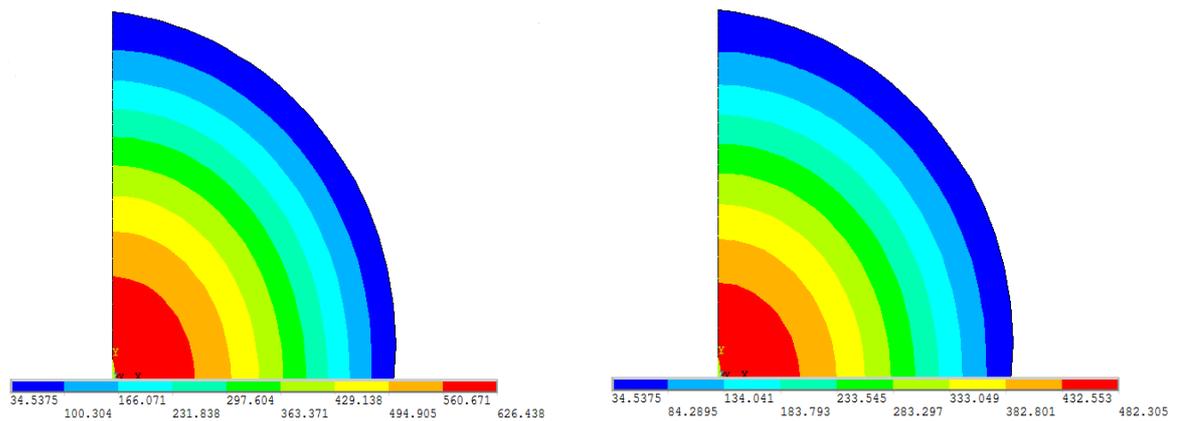
É apresentada na figura 17 a forma vetorial da difusão líquida ocorrida durante a simulação no interior de um fruto de café. Analisando o gráfico percebe-se a dificuldade de remover água nos pontos mais próximos do centro do fruto.

Figura 12 - Visualização do campo de teor de água para 12 e 24 horas de secagem.



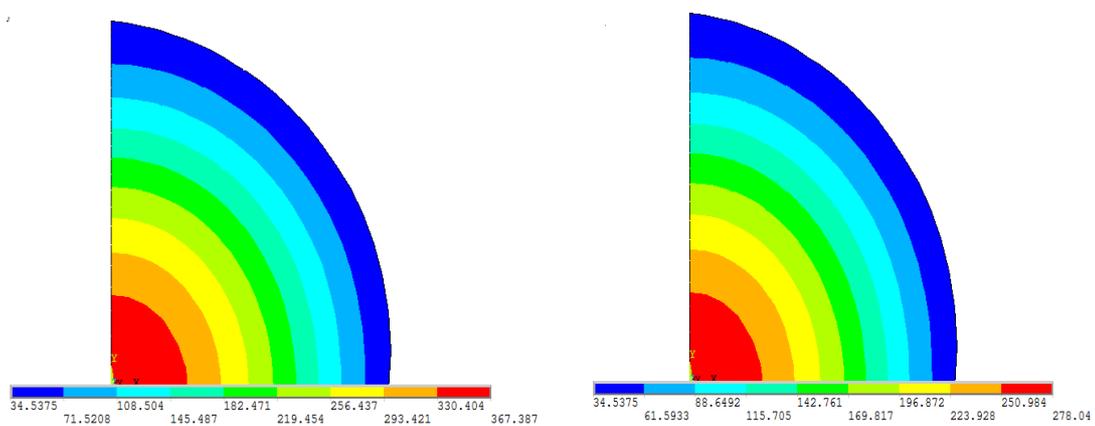
Fonte: Do autor (2016)

Figura 13 - Visualização do campo de teor de água para 36 e 48 horas de secagem



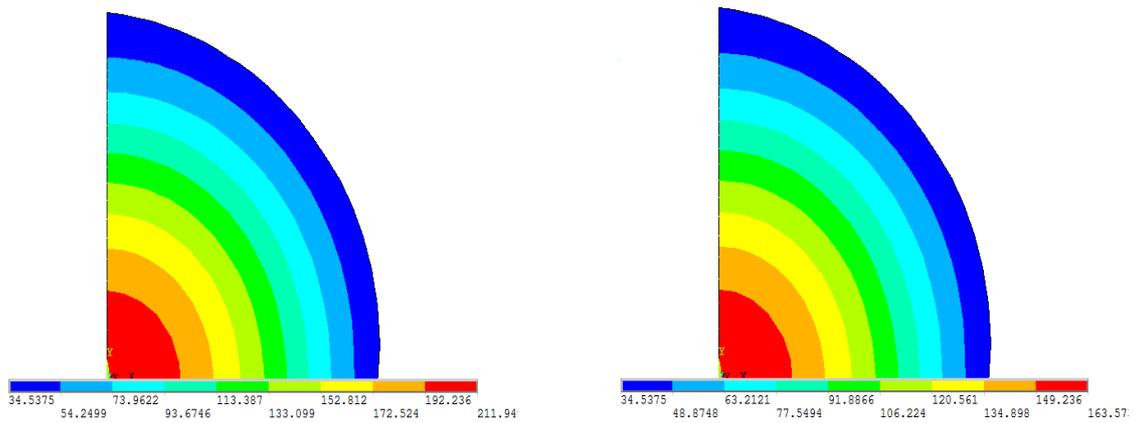
Fonte: Do autor (2016)

Figura 14 - Visualização do campo de teor de água para 60 e 72 horas de secagem



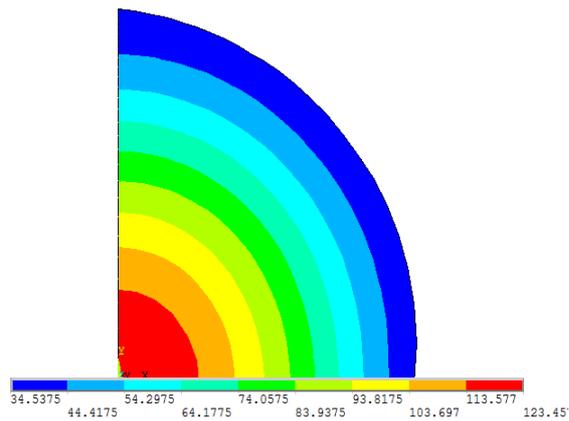
Fonte: Do autor (2016)

Figura 15 - Visualização do campo de teor de água para 86 e 98 horas de secagem.



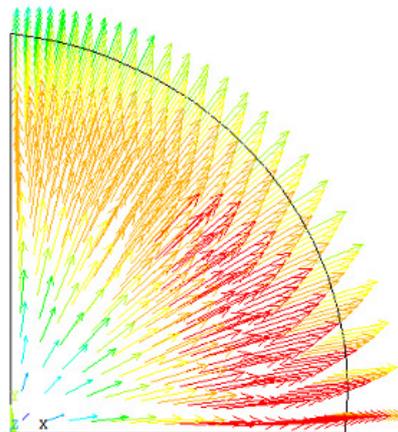
Fonte: Do autor (2016)

Figura 16 - Visualização do campo de teor de água para 109 horas de secagem.



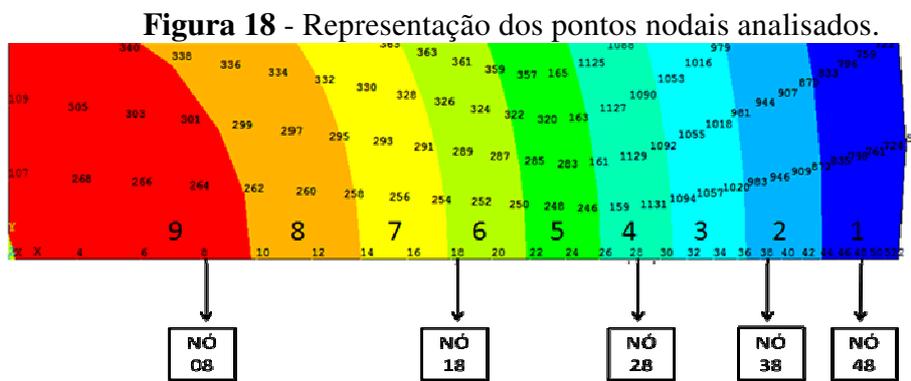
Fonte: Do autor (2016)

Figura 17 - Representação vetorial da difusão líquida ocorrida no fruto de café



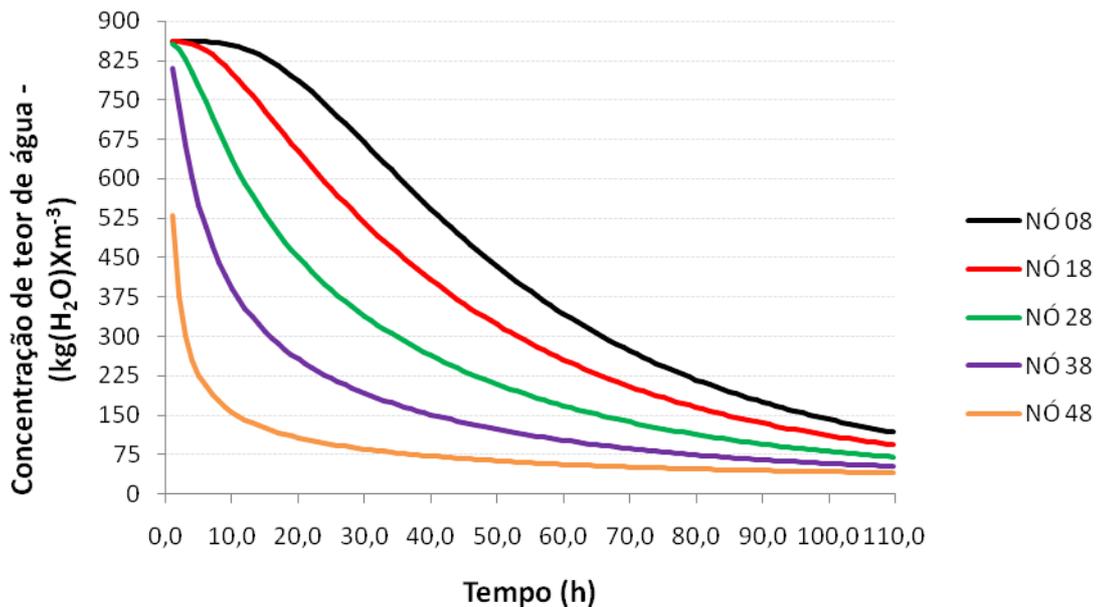
Fonte: Do autor (2016)

Na figura 19 são apresentados os valores de concentração de teor de água ($\text{kg}(\text{H}_2\text{O}) \text{m}^{-3}$) para alguns pontos nodais da malha computacional em função do tempo. A partir do gráfico da figura 19 percebe-se que no centro do fruto o teor de água é mais alto. A linha que representa a curva de secagem para o ponto nodal 08 é muito diferente da curva de secagem do ponto nodal 48. Isso ocorre porque o ponto nodal 08 está a $0,1239 \times 10^{-2} \text{ m}$ do centro do fruto e o ponto nodal 48 está a $0,5452 \times 10^{-2} \text{ m}$ do centro do fruto. Além dos pontos nodais 08 e 48 na figura 19 são apresentadas as curvas de secagem para outros pontos nodais (18, 28 e 38) indicados na figura 18.



Fonte: Do autor (2016)

Figura 19 - Curvas de secagem para alguns nós escolhidos sobre o eixo X da geometria

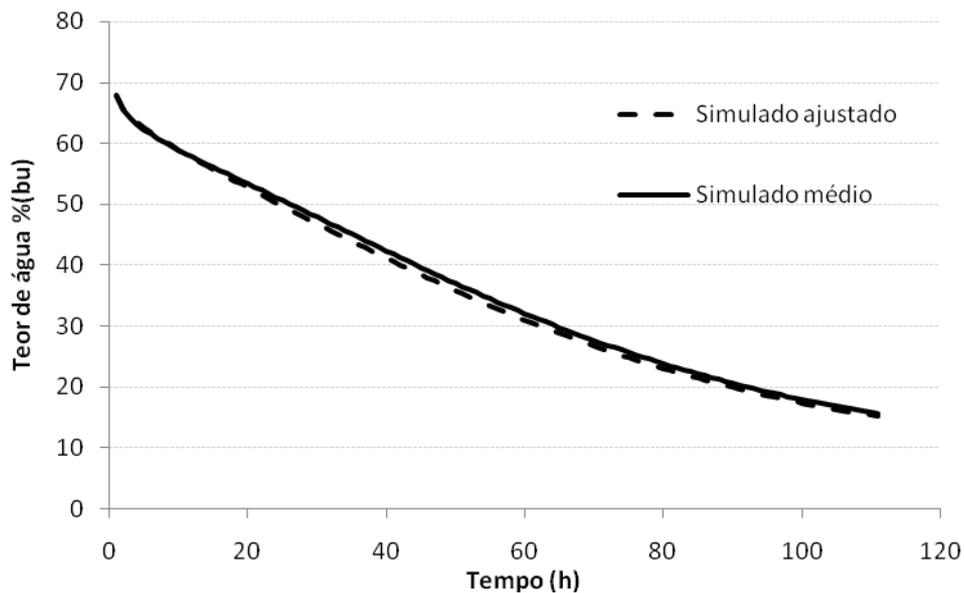


Fonte: Do autor (2016)

4.3- Resultados e validação

As médias dos resultados de concentração de teor água, ou seja, o teor de água não pôde ser representado adequadamente pelas médias dos resultados nodais apresentando um erro médio relativo (P) de 2,61% (Figura 20). Isto ocorreu devido as diferenças de distâncias geométricas entre os pontos nodais. Dessa forma foi implementado um ajuste da geometria que representa as distâncias reais de contribuição de cada ponto nodal para o fenômeno.

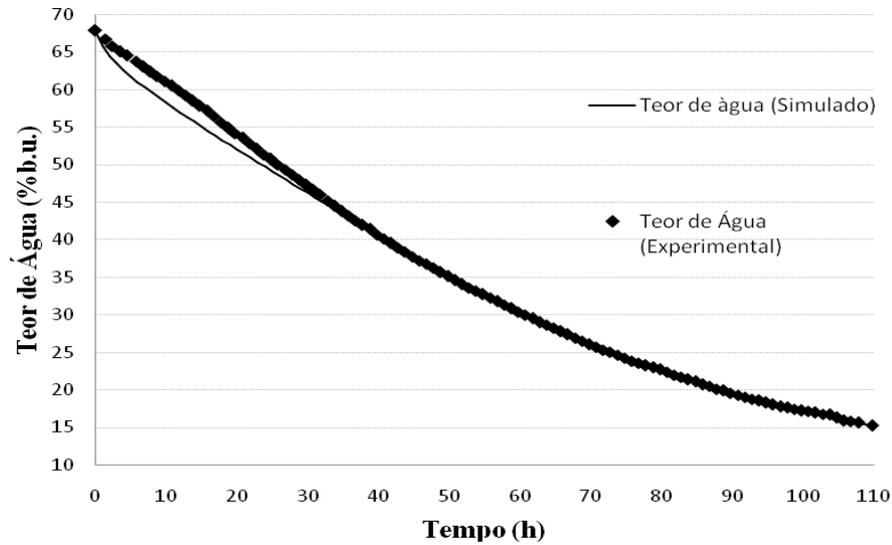
Figura 20 - Ajuste dos dados simulados para a condição real de distribuição dos nós com relação a distância entre eles (simulado médio)



Fonte: Do autor (2016)

Os valores dos resultados de teor de água simulado (ajustados) e experimental durante a secagem são comparados na figura 21. O erro médio relativo (P) foi de 1,8%, demonstrando que o uso dos dados simulados médios ajustados, representam melhor o fenômeno físico, sendo considerado satisfatório visto que Madamba et al. (1996) concluíram que valores de erro médio relativo abaixo de 10% representam um bom ajuste do modelo ao fenômeno de secagem, sendo confirmado por MOHAPATRA & RAO (2005).

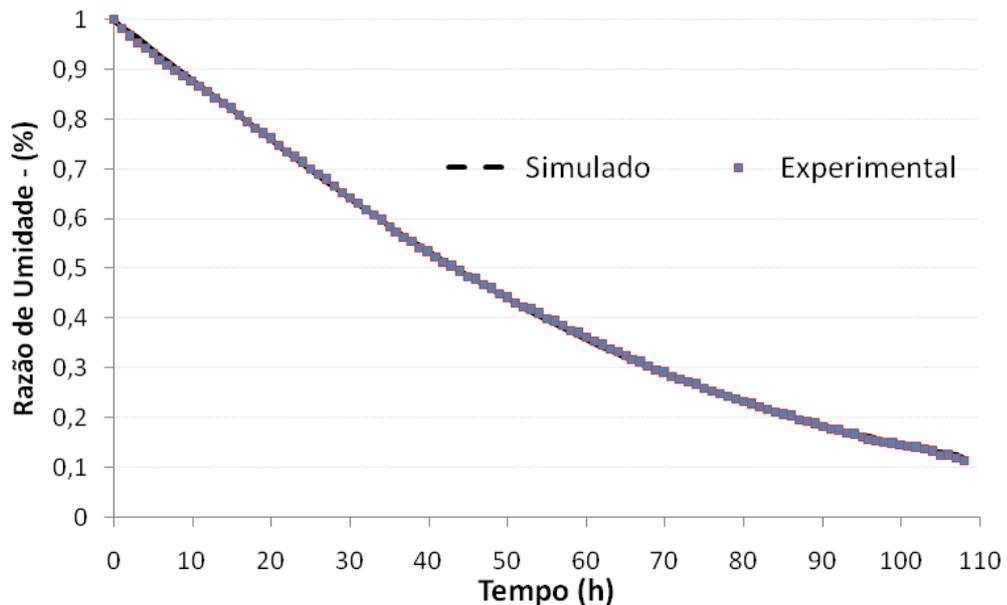
Figura 21 - Teores de água simulado (com correção de área) e experimental ao longo do tempo de secagem



Fonte: Do autor (2016)

Observa-se pela figura 22 que a simulação implementada representa adequadamente o fenômeno de secagem do fruto de café natural. O ajuste dos dados experimentais aos dados simulados foi satisfatório, e desta forma, o modelo pode ser utilizado para outras aplicações que necessitem representar tal fenômeno.

Figura 22 - Valores de razão de umidade para os dados experimentais comparados com dados simulados.



Fonte: Do autor (2016)

5 CONCLUSÕES

Em função dos estudos realizados neste trabalho pode-se concluir que:

- O modelo desenvolvido computacionalmente pela técnica fluidodinâmica computacional no *software* Ansys 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 15,35% (b.u.).

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 11: manual ansys. Ontario, 2008. Software.
- ATHIÉ, I.; CASTRO, M. F. P. M.; GOMES, R. A. R.; VALENTIN, S. R. de T. **Conservação de Grãos**. Campinas: Fundação Cargil, 1998. 236 p.
- BERBERT, P.A. Secagem de café (*Coffea arabica* L.), em camada fixa, com inversão de sentido de fluxo de ar. Universidade Federal de Viçosa. 1991
- 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.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-AREMA, F.W.; HALL, C.W. Drying cereal grains. Connecticut: AVI, 1978.
- BURMESTER, K; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal off Food Engeneering**, Essex, v. 99, n 4, p. 430-436, Aug. 2010.
- CORRÊA 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.
- CÔRREA, P. C.; HARA, T.; SIMÃO JÚNIOR, R. Análise da secagem de café em leito fixo, para temperaturas de ar a 40, 50 e 60oC. **Engenharia na Agricultura, Viçosa-MG: UFV**, v. 4, n. 7, p. 1-6, 1994.
- CORRÊA, P.C.; MACHADO, P.F.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. *Ciência e Agrotecnologia*. Lavras, v.25, n.1, p.134-142, 2001.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. Clarendon Press. Oxford, 1975.
- DARDENGO, M.C.J.D.; Sant'ana, B.T.; Pereira, R.L. Secagem e qualidade do cafeeiro conilon em terreiro de saibroimento, concreto e suspenso. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p. 2348. Dez. 2013
- 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.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 670 p.

GUNGOR, A; ESKIN, N. **Two-dimensional coal combustion modeling of CFB**; International Journal of Thermal Sciences 47 (2008) 157–174

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI Publishing, 1980.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P.; BERGMAN, T.L; LAVINE, A.S; "**Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, ed. Wiley , 2008.

INFORME ESTATÍSTICO DO CAFÉ. Outubro 2016. Disponível em: <http://www.consorcioesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/420-aprespdfviiiispcb#a>. Acesso em 01 dez. 2016.

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.

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 9 0 (2 0 1 2) 341–350

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: Theory and practice**. New York, 1998.303 p.

PATANKAR, S V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. 1983. New York: McGrall Hill Book Company.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas, SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986.

REINATO, C.H.R. **Secagem e armazenamento do café: aspectos qualitativos e sanitários**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. [Ver artigo](#)

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.

ROCHA, K. S. O. **Modelagem e simulação do processo de resfriamento de grãos armazenados em silos graneleiros por meio das leis de conservação de energia e massa**. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa – Viçosa: UFV, 2012.

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. e 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.

SILVA, J. A.; GOMES, F. C.; CORREA, J. L. G.; MAGALHÃES, L. Analysis of effects of grain dust explosion using computational fluid dynamics. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2012 Dallas, Texas, July 29 - August 1, 2012 121341005.(doi:10.13031/2013.42033)