

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

ALISSON FRANK CANUTO BRANDÃO

**DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO TRANSPORTE SIMULTÂNEO DE CALOR
E MASSA NO PROCESSO DINÂMICO DE SECAGEM DE MADEIRA DE
*Pinus elliottii***

BELO HORIZONTE - MG
2020

ALISSON FRANK CANUTO BRANDÃO

**DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO TRANSPORTE SIMULTÂNEO DE CALOR
E MASSA NO PROCESSO DINÂMICO DE SECAGEM DE MADEIRA DE
*Pinus elliottii***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Linha de Pesquisa: Simulação e Otimização de Processos.

Orientadora: D.Sc. Andréa Oliveira Souza da Costa

Coorientador: D.Sc. Esly Ferreira da Costa Junior

BELO HORIZONTE – MG
2020

B817d

Brandão, Alisson Frank Canuto.

Descrição matemática do transporte simultâneo de calor e massa no processo dinâmico de secagem de madeira de *Pinus elliottii* [recurso eletrônico] / Alisson Frank Canuto Brandão. - 2020.

1 recurso online (118 f.: il., color.): pdf.

Orientadora: Andréa Oliveira Souza da Costa.

Coorientador: Esly Ferreira da Costa Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 111-118.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia química - Teses. 2. Diferenças finitas - Teses.
3. Madeira - Teses. 4. Secagem - Teses. 5. Simulação (Computadores) - Teses. I. Costa, Andréa Oliveira Souza da. II. Costa Junior, Esly Ferreira da. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
IV. Título.

CDU: 66.0(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

“Descrição matemática do transporte simultâneo de calor e massa no processo dinâmico de secagem de madeira de *Pinus elliottii*”

Alisson Frank Canuto Brandão

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**.

267ª DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11 DE FEVEREIRO DE 2020 POR:

Prof. Dra. Viviane Santos Birchal
DEQ/UFMG

Prof. Dr. Gustavo Matheus de Almeida
DEQ/UFMG

Prof. Dr. Esly Ferreira da Costa Júnior
Coorientador – DEQ/UFMG

Prof. Dra. Andréa de Oliveira Souza da Costa
Orientadora – DEQ/UFMG

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma, influenciaram nesta meta alcançada na minha vida.

À Deus, por ter me dado força, ânimo, saúde e determinação nesse caminho.

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

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Andréa Oliveira Souza da Costa e meu coorientador Prof. Dr. Esly Ferreira da Costa Junior pela atenção, pelos conhecimentos transmitidos e direcionamento da pesquisa.

Aos professores Dr.^a Viviane Santos Birchal e Dr. Gustavo Matheus de Almeida pelas sugestões fornecidas no exame de qualificação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais por me aceitar, me manter no curso e pelo apoio a meus estudos.

Aos meus professores que me inspiraram direta ou indiretamente durante minha trajetória acadêmica, em especial à Prof.^a Dr.^a Maria Elena Walter pelo incentivo e confiança.

Aos meus colegas do laboratório de Modelagem e Otimização de Processos (MOP) André, Túlio, Gabriela, Suzimara, Igor e Fernando pela ajuda, dicas, discussões e as tardes de descontração regadas a café, em especial ao meu amigo *Sir*. Tomás Pessoa Londe Camargos pelo companheirismo e pelas conversas fascinantes sobre ciência e filosofia.

Aos meus amigos da República “Curtiço” pela amizade e anos de convivência.

À minha família por sempre me apoiar e acreditar em mim, em especial à minha mãe Irene Aparecida Canuto por restaurar minhas energias a cada abraço e ter permitido que eu sempre continuasse a estudar e ir atrás dos meus sonhos, meu irmão Alexander Bruno Canuto Brandão, pela paciência ao me ouvir todas as vezes que eu lhe explicava meu trabalho e a meu pai Cesar Augusto da Silva Brandão pelo apoio que sem o qual não seria possível a conclusão dessa etapa.

Meu muito obrigado à minha companheira, Fernanda Gomes dos Santos, por toda compreensão, incentivo e ajuda nos momentos difíceis, me auxiliando a ressignificar as incertezas que me permeavam, com paciência, amor e carinho, oferecendo suporte emocional nos desafios e nas dificuldades.

Dedico este trabalho, à minha mãe Irene Canuto, ao meu irmão Alexsander Brandão, à minha companheira Fernanda dos Santos e à minha família.

“Existem coisas que são para sentir, não para nomear.”

Fernanda dos Santos

RESUMO

De maneira geral, a secagem industrial de madeira é caracterizada por ser um processo que demanda grande investimento devido ao alto consumo energético e por exigir uma operação lenta. Seu controle operacional é complexo pois é fortemente baseado em parâmetros empíricos devido às características intrínsecas à madeira. Modelos computacionais para análise de processos de secagem permitem reproduzir e prever, com certo grau de acurácia, a dinâmica dos fenômenos físicos relacionados a esses sistemas, o que representa uma base importante para as decisões operacionais e econômicas das empresas, podendo reduzir custos e riscos. Neste trabalho, o fenômeno de transferência simultânea de calor e massa durante o processo de secagem de madeira é analisado por meio da simulação computacional. O modelo matemático utilizado descreve o fenômeno como sendo intrinsecamente difusivo, porém considerando a influência das condições ambientais de secagem, como a temperatura e a umidade de equilíbrio da corrente de ar no interior da estufa. O modelo constituído de um sistema de equações algébrico-diferenciais descreve os balanços de calor e massa e a variação de propriedades termodinâmicas. Sua resolução é realizada através da implementação de um algoritmo que usa da integração das equações do sistema no tempo e o método de diferenças finitas para discretizar na direção espacial. A análise da transferência combinada de calor e massa (umidade) foi realizada para uma placa de madeira de *Pinus eliottii* submetida às condições típicas de uma secagem em estufa convectiva convencional. Os parâmetros termofísicos e operacionais utilizados no modelo, bem como suas correlações com as variáveis do sistema, foram obtidos da literatura. A validação foi realizada através da comparação com dados experimentais da literatura e sua avaliação mostra significativa similaridade, obtendo correlações lineares acima de 0,9. Foi estudado ainda o comportamento dos fenômenos de transporte de massa e energia com a admissão de diferentes cronogramas de secagem. Propriedades termodinâmicas foram empregadas na análise da eficiência do processo. Admissão de variações gradativas nas condições operacionais durante o processo de secagem resultou em efeitos positivos nos parâmetros de qualidade e eficiência do processo, aumentando a taxa de secagem e reduzindo a tendência à danos estruturais no material.

Palavras-chave: diferenças finitas; estufa convencional; madeira; secagem; simulação.

ABSTRACT

In general, industrial drying of wood is characterized by being a process that requires a large investment due to high energy consumption and by requiring slow operation. Its operational control is complex because it is strongly based on empirical parameters due to the intrinsic characteristics of the wood. Computational models for drying process analysis that use and accurately calculate system-related clinical effect levels, which is an important basis for business analysis and economic savings using costs and risks. In this work, the phenomenon of simultaneous heat and mass transfer during the wood drying process is analyzed by computer simulation. The used mathematical model describes the phenomenon as intrinsically diffusive, but considering the influence of environmental drying conditions, such as temperature and equilibrium temperature of the air flow inside the greenhouse. The model consisting of a system of algebraic-differential equations describes the heat balances and the variation of thermodynamic variations. Its resolution is performed by implementing an algorithm that uses the integration of timeless system equations and the finite difference method to discretize the spatial direction. An analysis of the combined heat and mass transfer (moisture) was studied for a *Pinus elliottii* wood slab subjected to conditions typical of conventional oven drying. The thermophysical and operational parameters used in the model, as well as their correlations with the system variables, were shown in the literature. Validation was performed by comparison with experimental data from the literature and its evaluation shows significant similarity, obtaining linear correlations above 0.9. The behavior of mass and energy transport phenomena with admission of different drying schedules was also studied. Thermodynamic properties were employed in the process efficiency analysis. Admission of gradual variations in operating conditions during the drying process resulted in positive effects on the quality and efficiency parameters of the process, increasing the drying rate and reducing the tendency for structural damage to the material.

Key words: finite differences; conventional kiln; wood; drying; simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Secção transversal do tronco de carvalho branco evidenciando sua estrutura anatômica.....	24
Figura 2 - Moléculas de água em um pequeno capilar.	30
Figura 3 – Diagrama dos estágios da secagem convencional de madeira.....	39
Figura 4 – Estufa convencional de secagem de madeira com forno de queima direta e trilho duplo, no qual produtos de combustão são descarregados diretamente na corrente de ar que circula dentro do forno.	42
Figura 5 – Disposição dos palets de madeira serrada dentro do forno e circulação do ar no interior do forno durante o processo de secagem.....	43
Figura 6 – Ilustração qualitativa da relação entre o impacto ambiental, a sustentabilidade de um processo e sua eficiência exergética.	55
Figura 7 – Representação da malha considerada.....	66
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo da Simulação 1.....	69
Figura 9 – Fluxograma do algoritmo da Simulação 2 para obtenção dos dados de entalpia ou entropia.....	73
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo do cronograma de secagem em função do tempo.	76
Figura 11 – Análise da convergência da malha.....	78
Figura 12 – Comparação dos resultados das simulações para temperatura no centro e na superfície da madeira comparados com os dados experimentais de Martinović; Horman e Demirdžić (2001).....	79
Figura 13 – Comparação dos resultados das simulações para umidade no centro e na superfície da madeira comparados com os dados experimentais de Martinović; Horman e Demirdžić (2001).....	80

Figura 14 – Comparação dos resultados das simulações para temperatura média da madeira comparados com os dados experimentais de Zhao <i>et al.</i> (2016).....	81
Figura 15 – Comparação dos resultados das simulações para umidade média da madeira comparados com os dados experimentais de Zhao <i>et al.</i> (2016).	81
Figura 16 – Comparação dos dados de simulação para valores de variação de umidade média da madeira de Ayous comparados com os resultados experimentais de Simo-Tagne <i>et al.</i> (2016).	82
Figura 17 – Comparação dos dados de simulação para valores de variação de umidade média da madeira de Frake comparados com os resultados experimentais de Simo-Tagne <i>et al.</i> (2016).	83
Figura 18 – Variação da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo.....	85
Figura 19 – Variação da umidade e temperatura no centro e na superfície da peça de madeira em função do tempo para diferentes espessuras.....	87
Figura 20 – Variação da umidade e temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo para diferentes valores iniciais de umidade da madeira	89
Figura 21 – Variação do teor de umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo em diferentes temperaturas de aquecimento da estufa	91
Figura 22 – Variação do gradiente de umidade e de temperatura em função do tempo para as Simulações 1 e 2	93
Figura 23 – Comparação da variação da taxa de secagem em função do tempo e em função da umidade média da peça entre as Simulações 1 e 2.	95
Figura 24 - Comportamento da temperatura do ar e da umidade de equilíbrio no interior da estufa para simulações do processo sem um cronograma de secagem, com cronograma baseado da umidade média da madeira e com cronograma baseado no tempo.	97

Figura 25 - Comparação da variação da temperatura e da umidade em função do tempo para as diferentes condições consideradas para o cronograma baseado na umidade média da madeira.	98
Figura 26 - Comparação da variação da temperatura e da umidade em função do tempo para as diferentes condições consideradas para o cronograma baseado no tempo de permanência na estufa de secagem.	100
Figura 27 – Comparação das variações dos gradientes de temperatura e umidade em função do tempo para simulações do processo sem um cronograma de secagem, com cronograma baseado da umidade média da madeira e com cronograma baseado no tempo.	102
Figura 28 – Variação do potencial de secagem no decorrer do processo para os testes sem o uso de um cronograma de secagem, com cronograma baseado da umidade média da madeira e com cronograma baseado no tempo.....	104
Figura 29 – Variação da entalpia e da entropia em função do tempo para processo sem um cronograma de secagem, com o cronograma baseado na umidade média da madeira e com o cronograma baseado no tempo de secagem.	105
Figura 30 – Taxa de variação da exergia em função do tempo para os processos sem um cronograma de secagem e com os cronogramas baseados na umidade média da madeira e no tempo de secagem.	106
Figura 31 – Variação da eficiência exergética em função do tempo para os processos sem um cronograma de secagem e com os cronogramas baseados na umidade média da madeira e no tempo de secagem.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cronograma de secagem baseado na umidade média da peça..	64
Tabela 2 – Cronograma de secagem baseado no tempo.....	64
Tabela 3 – Parâmetros considerados na simulação.....	77
Tabela 4 – Coeficiente de correlação (R^2) para a validação com os dados de Martinović; Horman e Demirdžić (2001).....	80
Tabela 5 – Coeficiente de correlação (R^2) para a validação com os dados de Zhao <i>et al.</i> (2016).	82
Tabela 6 – Coeficiente de correlação (R^2) para a validação com os dados de Simo-Tagne <i>et al.</i> (2016).	81
Tabela 7 – Parâmetros dos cronogramas de secagem.	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos para determinação da densidade da madeira.	27
Quadro 2 – Modelos para determinação da condutividade térmica da madeira.	34
Quadro 3 – Modelos para determinação do calor específico da madeira.	36
Quadro 4 – Modelos para determinação do calor latente de evaporação (λ).	44
Quadro 5 – Organização das etapas do trabalho.	59

LISTA DE SIGLAS

b.s. – Base seca

FPL – *Forest Products Laboratory*

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

IPT-SP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

ISO – *International Organization for Standardization*

PIB – Produto Interno Bruto

PID – *Proportional Integral Derivative*

PSF – Ponto de Saturação das Fibras

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	fator de ajuste para calor específico da madeira úmida	[]
C	concentração de umidade	[kg/m ³]
C_m	umidade específica	[kg _{água} /kg _{sólido seco}]
C_p	calor específico	[kJ/kg.K]
D_0	fator de Arrhenius	[m ² /s]
D_{AB}	difusividade mássica	[m ² /s]
ex	exergia específica	[kJ/kg]
E	energia	[kJ]
E_a	energia de ativação	[kJ/mol]
Ex	exergia	[kJ]
h	entalpia específica	[kJ/kg]
h_c	coeficiente global de transferência de calor	[W/m ² .K]
h_m	coeficiente global de transferência de massa	[kg/m ² .s]
j	fluxo mássico	[kg/m ² .s]
k_h	condutividade térmica	[W/m.K]
k_m	coeficiente de transferência de massa	[kg/m.s]
M	percentual de umidade a base seca	[%]
m	massa	[kg]
n	normal que representa os eixos x, y e z	[m]
N	número de pontos de discretização	[]
P	pressão	[Pa]
Q	calor trocado	[W]
q	fluxo de calor	[W/m ²]
R	constante universal dos gases	[kJ/mol.K]
s	entropia específica	[kJ/kg.K]
S_g	entropia gerada	[kJ/kg.K]
s_h	termo de fonte de calor	[]
s_m	termo de fonte de massa	[]
s_v	percentual de retração volumétrica	[%]
t	tempo	[s]
T	temperatura	[K]
U	energia interna	[kJ]

u	energia específica	[kJ/kg]
v	volume específico	[m ³ /kg]
v_a	velocidade do ar	[m/s]
V	volume	[m ³]
W	trabalho	[W]
x	eixo x, geralmente atribuído ao comprimento	[m]
y	eixo y, geralmente atribuído à largura	[m]
z	eixo z, geralmente atribuído à altura	[m]

Símbolos gregos

α_h	coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² .K]
α_m	coeficiente de transferência de massa por convecção	[kg/m ² .s]
β_t	coeficiente de termomigração	[K ⁻¹]
δ	coeficiente de gradiente de temperatura	[K ⁻¹]
ε	razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade da madeira	[]
η	porosidade	[]
θ	calor de dessorção da água absorvida	[J/kg]
λ	calor latente de evaporação	[J/kg]
ρ	densidade	[kg/m ³]
ψ	eficiência exergética	[%]
ω	fração mássica	[]

Subscritos

a	ar no interior da estufa
$acu.$	acumulada
A	espécie A
B	meio B
c	centro da peça / cinética
C	em graus Celsius
e	entrada
$ef.$	efetivo
$eq.$	equilíbrio
f	fluido

<i>h</i>	calor
<i>i</i>	relativo ao espaço
<i>L</i>	paralelo
<i>m</i>	mássico
<i>M</i>	relativo ao material úmido
<i>o</i>	inicial
<i>p</i>	potencial
<i>P</i>	à pressão constante
<i>s</i>	superfície / saída
<i>T</i>	perpendicular
<i>V</i>	à volume constante
<i>VC</i>	volume de controle
<i>w</i>	relativo à água
<i>0</i>	anidro / relativo ao estado de referência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVO	23
2.1. OBJETIVO GERAL.....	23
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E SUAS PROPRIEDADES RELACIONADAS À SECAGEM.....	24
3.2. PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA	38
3.3. MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À SECAGEM DE MADEIRA.....	46
3.4. ANÁLISE EXERGÉTICA DE PROCESSOS DE SECAGEM	54
4. METODOLOGIA	58
4.1. DELINEAÇÃO DA ESPÉCIE ESTUDADA	58
4.2. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E OPERACIONAIS, CORRELAÇÕES E DADOS EXPERIMENTAIS	58
4.3. ADAPTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO E RESOLUÇÃO NUMÉRICA ..	59
4.4. ADMISSÃO DO CRONOGRAMA DE SECAGEM.....	63
4.5. PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	64
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1. EQUACIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO	65
5.1.1. Modelagem e discretização	65
5.1.2. Predição de propriedades termodinâmicas	70
5.1.3. Implementação dos cronogramas de secagem	74
5.2. ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DA MALHA.....	77
5.3. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	79
5.4. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES.....	84
5.4.1. Avaliação do tempo de secagem	84
5.4.2. Avaliação da variação da umidade e da temperatura em função do tempo para diferentes espessuras da peça	85
5.4.3. Avaliação da variação da umidade e da temperatura em função do tempo para diferentes valores de umidade inicial da peça de madeira	87
5.4.4. Avaliação da variação da umidade e da temperatura em função do tempo para diferentes valores de temperatura do ar no interior da estufa	90

5.4.5. Avaliação da variação dos gradientes de umidade e temperatura em função do tempo.....	90
5.4.6. Avaliação da variação da taxa de secagem	92
5.5. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO CRONOGRAMA DE SECAGEM.....	94
5.6. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	103
6. CONCLUSÕES	107
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1. INTRODUÇÃO

A madeira serve de matéria prima para a fabricação de pisos e painéis de madeira, papel e celulose, madeira serrada e carvão vegetal, entre outras aplicações.

O setor representado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) cresceu 13,1% em relação a 2017, alcançando uma receita total de R\$ 86,6 bilhões (IBÁ, 2019). O setor também se apresenta relevante nos dados econômicos nacionais, com uma participação de 1,3% do PIB e 6,9% do PIB industrial (IBÁ, 2019).

Ainda segundo o relatório do IBÁ (2019), as plantações de árvores brasileiras são as mais produtivas do mundo. Em 2018, o Brasil apresentou uma produtividade média de 36,0 m³/ha.ano para os plantios de eucalipto, enquanto a de pinus foi de 30,1 m³/ha.ano. A área total de árvores plantadas no Brasil alcançou 7,83 milhões de hectares em 2018, estável em relação ao ano de 2017. A geração de empregos diretos em 2018 cresceu quase 1%, chegando a 513 mil. A indústria madeireira de maneira geral contribui para o desenvolvimento socioeconômico e a dinamização da economia nacional.

Como material, a madeira apresenta a característica de ser um material higroscópico, ou seja, absorve e perde umidade em todos os seus estágios de uso. A umidade exerce significativa influência nas propriedades mecânicas, causando tensões, distorções, empenamentos e rachaduras no material. É importante que se mantenha um estado de equilíbrio higroscópico com as variáveis do ambiente (temperatura e umidade relativa do ar) para que não ocorram estes defeitos. Quando a distribuição da umidade varia com o tempo, podem ocorrer alterações em suas dimensões que se dão em proporções diferentes nos três sentidos anatômicos da madeira, o que a caracteriza também como um material anisotrópico (MORESCHI, 2014 (a)).

A água contida na madeira em seu estado verde é responsável em média por 60% da massa total do material, o que reflete diretamente no custo de transporte, inviabilizando que seu processamento seja feito a grandes distâncias da área de exploração. Para a maioria de suas aplicações, a madeira necessita ser seca, pois o processo confere ao material as propriedades que permitem que ele seja trabalhado, aumentando a resistência mecânica e a resistência à degradação por apodrecimento e desenvolvimento de fungos, além de aumentar também sua capacidade calorífica. Contudo a operação de secagem na indústria madeireira é um processo que demanda grande investimento devido ao alto consumo de energia e tempo.

Durante o processo de secagem, a distribuição não uniforme de temperatura e da umidade induzida podem causar estresse de contração resultando em possíveis danos ao produto. A operação de secagem da madeira pode levar de alguns dias até semanas, o que dificulta a obtenção de dados operacionais. No passado o procedimento de secagem era fortemente baseado no conhecimento prático da operação e o controle das variáveis operacionais determinado empiricamente (HORMAN; MARTINOVIĆ; HAJDAREVIĆ, 2009). Contudo, o desenvolvimento da tecnologia computacional e dos métodos numéricos possibilitou um avanço na automação e no controle de sistemas de secagem. A modelagem e a simulação da secagem da madeira permitiu obter informações sobre o que está acontecendo dentro de um produto carregado podendo auxiliar na definição das condições adequadas de secagem, assim, tornando possível reduzir o tempo de operação, os defeitos de secagem e, conseqüentemente, os custos do processo.

O transporte de calor promove a perda da umidade através de mecanismos de capilaridade e difusão, com a água se movendo do centro para a superfície da madeira. A madeira pode ser considerada um material poroso capilar e seu processo de secagem ocorre pela transferência simultânea de calor e massa. Assim, os gradientes de temperatura e umidade são correlacionados e descritos por um sistema de equações diferenciais parciais. Devido à complexidade desse tipo de problema, uma solução analítica geralmente não é alcançada, sendo comum o uso de técnicas numéricas para resolução dessas equações. As técnicas numéricas comumente aplicadas a esse tipo de problema são os métodos de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos (ELEOTÉRIO, 2009; SIMO-TAGNE *et al.*, 2016).

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral, realizar uma análise fenomenológica sobre o processo de transferência simultânea de calor e massa durante a secagem da madeira de *Pinus elliottii* em estufa convectiva convencional com renovação de ar, por meio da simulação computacional do sistema.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Adaptar um modelo matemático previamente descrito na literatura, considerando as especificidades dos parâmetros intrínsecos da espécie estudada;
- Validar os resultados da aplicação através da comparação com resultados experimentais da literatura;
- Realizar a simulação do sistema, avaliando as possíveis variações no comportamento da distribuição de calor e umidade na peça de madeira com modificações nos parâmetros operacionais do processo;
- Analisar o comportamento do processo quando cronogramas de secagem baseados em diferentes parâmetros operacionais são considerados;
- Avaliar a variação das propriedades termodinâmicas durante o processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E SUAS PROPRIEDADES RELACIONADAS À SECAGEM

Uma árvore madura, de madeira macia (conífera) ou de madeira dura (folhosa), geralmente consiste em uma haste coberta com uma camada de casca. Este tronco central é a principal fonte de material lenhoso para a fabricação de madeira e outros produtos. A madeira como material pode ser definida como um composto polimérico celular de baixa densidade. Considerando que toda a seção transversal do tronco cumpre a função de suporte, condução e armazenamento que são restritos à região externa do tronco conhecida como alburno. O alburno do tronco normalmente possui uma quantidade maior de água do que o cerne devido às variações das características anatômicas e transformações fisiológicas durante o desenvolvimento da planta. O cerne, assim como outras estruturas anatômicas do tronco de uma árvore, é ilustrado na Figura 1 (DINWOODIE, 2000; CUTLER; BOTHA; STEVENSON, 2007; MORESCHI, 2014 (a); BELGACEM; PIZZI, 2016).

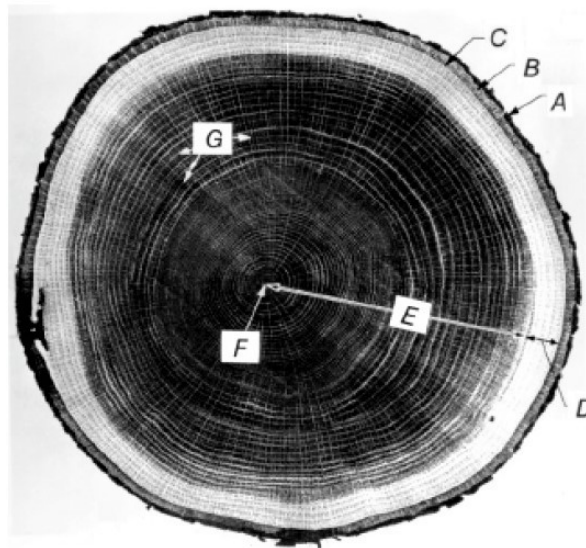


Figura 1 – Seção transversal do tronco de carvalho branco evidenciando sua estrutura anatômica: (A) casca exterior (tecido morto seco), (B) casca interior (tecido vivo), (C) cambium, (D) alburno, (E) cerne, (F) medula e (G) raios de madeira.

Fonte: FOREST PRODUCTS LABORATORY, p. 47, 1999.

Um tronco de árvore é composto por milhões de células lenhosas individuais. Essas células diferem em tamanho e forma, dependendo de seu papel fisiológico na árvore, sendo a maioria delas muito mais longa que ampla. Elas estão dispostas em padrões reconhecíveis de distribuição dentro da madeira, variando a organização com a espécie (RICHTER, 2015; BELGACEM; PIZZI, 2016). As células longas que são dispostas longitudinalmente formam a maior parte da madeira e fornecem "grãos" ao material. Devido a uma diferente distribuição de células nos três eixos principais e a orientação de micelas, fibrilas e fibras, a madeira incha e contrai desigualmente segundo os sentidos anatômicos tangencial, radial e longitudinal. A este fenômeno, denomina-se "anisotropia dimensional" (DINWOODIE, 2000; MORESCHI, 2014 (a)).

Moreschi (2014 (a)) afirma que, necessariamente, a retração longitudinal é bem maior que a retração na direção radial que por sua vez é maior que a retração tangencial. Por causa do fenômeno da anisotropia, ocorre o desenvolvimento de defeitos na madeira durante a fase de secagem ou de seu acondicionamento, tais como rachaduras, torções, empenamentos e abaulamentos, decorrentes de contrações diferenciadas.

A retração volumétrica também está relacionada com a densidade da madeira. Quanto maior a densidade da madeira, maior é o seu encolhimento volumétrico ou sua expansão volumétrica. A densidade é uma propriedade usada como referência na classificação e na determinação da qualidade de uma madeira, pois a maior parte de suas propriedades físicas e tecnológicas são dependentes de sua massa específica. Observa-se que madeiras mais densas são mais resistentes, elásticas e duras que as menos densas. Porém, em paralelo à estas vantagens, madeiras mais densas são mais difíceis de serem trabalhadas (MORESCHI, 2014 (a)).

Segundo Santini (1996), durante a secagem, a densidade da madeira é um dos fatores que influenciam o processo, pois um material de alta densidade possui cavidades celulares (lúmens das células) menores, e deste modo, tende a ter um valor de umidade menor do que uma madeira de menor densidade. Desta forma, a quantidade de água a ser transportada para a superfície e evaporada é proporcional a espessura da peça e inversamente proporcional à densidade da madeira.

Como uma regra aproximada, abaixo de 30% de umidade, a massa específica da madeira diminui em aproximadamente 0,5% para cada redução de 1,0% na umidade (DINWOODIE, 2000).

A presença de umidade na madeira não apenas aumenta sua massa, mas também resulta no inchaço da peça e, conseqüentemente, tanto a massa quanto o volume são afetados. A faixa de densidade da madeira é de 120 a 1200 kg/m³, correspondendo a volumes de poros de 92% a 18% (DINWOODIE, 2000).

Foelkel *et al.* (1975) descreveram que a densidade de amostras de *Pinus elliottii* jovens varia de 328 a 416 kg/m³, e para amostras de árvores mais maduras, os autores encontraram uma variação menos acentuada de 525 a 593 kg/m³. O *Forest Products Laboratory* (1999) cita que o *Pinus elliottii*, também conhecido como *slash pine*, possui massa específica média de 540 kg/m³ quando verde e de 590 kg/m³ a 12% de umidade. Santini, Haselein e Gatto (2000) compararam as propriedades físicas e mecânicas de três espécies de coníferas e encontraram para *Pinus elliottii*, valores de densidade entre 400 a 410 kg/m³.

Mellado (2007) trabalhou com madeira serrada de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, e verificou uma densidade média de 405 kg/m³ a 447 kg/m³ para o *Pinus elliottii*. Severo, Calonego e Sansígolo (2012) avaliaram a variação de propriedades físicas de amostras de madeiras de *Pinus elliottii* com idade de até 35 anos com o tratamento térmico e encontraram para as amostras de árvores mais jovens o valor de densidade de 377 kg/m³ e 584 kg/m³ para amostras mais maduras.

Arends, Barakat e Pel (2018) estudaram o transporte de umidade em madeira de pinheiro durante o aquecimento unilateral usando ressonância magnética nuclear e consideraram uma densidade igual a 470 kg/m³. De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP) (2018), a densidade média para *Pinus elliottii*, a uma umidade de 15%, é de 480 kg/m³.

No Quadro 1 são apresentadas correlações empíricas para a descrição da densidade da madeira proposta por diferentes autores.

Quadro 1 – Modelos para determinação da densidade da madeira.

Modelo	Fonte	Equação
$\rho = \frac{m_M}{V_M} = \frac{m_0(1 + 0,01M)}{V_0(1 + 0,01s_v)} = \rho_0 \left(\frac{1 + 0,01M}{1 + 0,01s_v} \right)$	Dinwoodie (2000)	(1)
Para $M < 30\%$ $\rho = \frac{\rho_0 \cdot (1 + 0,01M)}{1 - 0,47(0,3 - 0,01M)}$	Martinović; Horman e Demirdžić (2001)	(2)
Para $M \geq 30\%$ $\rho = \rho_0(1 - 0,01M)$		(3)
$\rho = \rho_0(1 + 0,01M)$	Avramidis e Hatzikiriakos (1995); Younsi <i>et al.</i> (2010); Kadem <i>et al.</i> (2011); Putranto <i>et al.</i> (2011).	(4)

Nas equações do Quadro 1, ρ é a densidade ($\text{kg}_{\text{sólido seco}}/\text{m}^3$); ρ_0 é a densidade de madeira seca ($\text{kg}_{\text{sólido seco}}/\text{m}^3$); M é o percentual de umidade a base seca (%); m_M é a massa da madeira com umidade M (kg); m_0 é a massa da madeira seca ($\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); V_M é o volume da madeira úmida (m^3); V_0 é o volume de madeira seca (m^3) e s_v é o percentual de retração volumétrica (%).

A madeira, como um condutor de seiva, está naturalmente saturada de umidade no momento da colheita da árvore onde é denominada de madeira no estado verde (ELEOTÉRIO, 2009; BELGACEM; PIZZI, 2016). A condução é realizada em células, conhecidas como vasos ou poros, que são geralmente curtas (0,2 – 1,2 mm) e relativamente largas (até 0,5 mm) e, quando situadas umas sobre as outras, formam um tubo condutor (DINWOODIE, 2000). A massa de água da madeira recém cortada pode inclusive ultrapassar a massa seca de madeira (ELEOTÉRIO, 2009).

A madeira possui três tipos de água em sua constituição (SANTINI, 1996; MELLADO, 2007; MORESCHI, 2014 (a)):

- (I) A água livre ou capilar é a água que preenche seus espaços capilares formados pelos lumens e espaços intercelulares. A água livre é retida por forças capilares e correspondem à cerca de 72% da umidade total da madeira. A remoção da água livre ocasiona a diminuição do peso da

madeira, porém não causa contração nem outras mudanças significativas nas propriedades físicas desse material.

- (II) A água de impregnação adsorvida ou água higroscópica é a água impregnada nos espaços submicroscópicos da parede celular em camadas polimoleculares, ligadas por forças elétricas polares (cerca de 22% da umidade). A sua remoção exige o fornecimento de calor de sorção além do calor latente de vaporização. Como alterações na madeira, decorrentes dessa dessorção, são observados o encolhimento e o aumento da resistência mecânica.
- (III) A água de adsorção química que se trata da água aderida às interfaces existentes entre moléculas de celulose e moléculas de hemicelulose por forças de valências secundárias monomoleculares, como as forças de van der Waals, e pontes de hidrogênio. Este tipo corresponde a 6% da umidade total.

Após o corte de toras, a madeira úmida, ao ser serrada e empilhada, tem sua umidade reduzida por evaporação. A partir deste momento, a água livre é o primeiro tipo de água a ser removida da madeira. Teoricamente, somente depois de toda água livre ou de capilaridade ser removida, começa a ocorrer perda da água de impregnação. Neste momento, a umidade da madeira corresponde ao ponto de saturação das fibras, que é de grande importância prática, uma vez que as variações dimensionais da madeira começam a se manifestar abaixo do mesmo (MORESCHI, 2014 (b)).

O Ponto de Saturação das Fibras (PSF) pode ser definido como o conteúdo de umidade da madeira no momento em que esta já perdeu toda a sua água livre (dos lumens e espaços intercelulares); porém, ainda mantém as paredes celulares saturadas de umidade. Tal ponto de saturação varia de espécie para espécie, sendo normalmente aceito generalizar que, para coníferas e folhosas com porosidade difusa, sem cerne distinto, este valor equivalendo a aproximadamente 32% a 35% de umidade, e para folhosas com porosidade em anel, ambas com cerne distinto, de aproximadamente 22% a 24% de umidade. Na prática, usualmente adota-se o valor médio de 28% como a umidade correspondente ao PSF para todas as espécies de madeira (SANTINI, 1996; MORESCHI, 2014 (a); BELGACEM; PIZZI, 2016).

A maioria das propriedades da madeira independe do seu conteúdo de umidade enquanto este se situa acima do PSF. No entanto, tais propriedades passam a ser bem relacionadas com a umidade quando esta se encontra abaixo do PSF, pois, a partir daí até 0% de umidade, a madeira se contrairá e, de forma geral, se tornará mais resistente (RICHTER, 2015). A retirada da água livre pouco altera a madeira além de seu peso próprio, uma vez que, somente esvazia os seus lumens e espaços intercelulares. Ao contrário, com a remoção da água de impregnação, que preenche os espaços submicroscópicos e separam os constituintes estruturais da parede celular, além de reduzir o peso da madeira, é responsável por importantes modificações deste material. Com a aproximação das micelas, das micro e microfibrilas durante a retirada da água de impregnação, a madeira adquire maior rigidez. Por essa razão, somente a variação do conteúdo da água contida na parede celular altera o volume e afeta a resistência da madeira. Abaixo do PSF (28% de umidade), ocorrem alterações no volume da madeira devido aos processos de dessorção e adsorção, afetando e limitando consideravelmente o seu uso (ELEOTÉRIO, 2009; MORESCHI, 2014 (a)).

Como a madeira é um material higroscópico, e por usualmente estar sujeita a alterações de umidade em função das variáveis do ambiente em que se encontra, ela está quase sempre perdendo ou ganhando umidade para atingir um estado de equilíbrio com a atmosfera. Quando isto ocorre, diz-se que a madeira está em “equilíbrio higroscópico” com o ambiente sendo dado ao se estabelecer um equilíbrio entre a pressão do vapor d’água contido no ar do ambiente em que a madeira se encontra e a pressão de vapor existente no interior do lenho (MORESCHI, 2014 (a)).

De acordo com Santini (1996) e Moreschi (2014 (b)), durante o processo de secagem, a água capilar e a água de impregnação são removidas, respectivamente, acima e abaixo do ponto de saturação da fibra. Desta forma, podem-se considerar dois tipos de fluxo de água importantes no processo de secagem: o movimento da água por difusão e o movimento da água por forças capilares. Durante o processo de secagem, os dois movimentos ocorrem de forma simultânea. Fatores como a temperatura, umidade relativa e condições de fluxo determinam qual deles será o movimento dominante. Geralmente acima do PSF, o movimento capilar é o dominante, e abaixo deste ponto, domina o movimento por difusão. Este último aumenta sensivelmente em temperaturas elevadas.

Qualquer movimento de água (ou outros líquidos e gases) na madeira envolve a permeabilidade da sua estrutura microscópica e submicroscópica. Segundo Kollmann e Côté (1968), acima do ponto de saturação da fibra, as forças de tração que controlam o movimento capilar dependem da tensão superficial do líquido e do raio dos capilares, seguindo assim a lei de Hagen-Poiseuille. Os capilares mais espessos estão preenchidos por líquido livre. As moléculas de água adjacentes às paredes dos capilares estão ligadas por quimissorção às paredes como ilustrado na Figura 2.

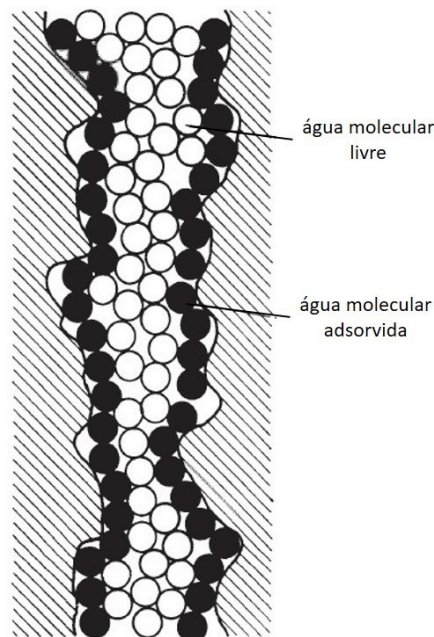


Figura 2 - Moléculas de água em um pequeno capilar.
Fonte: KOLLMANN; CÔTÉ, p. 220, 1968.

Nos tubos capilares preenchidos, o movimento da água higroscópica é produzido por gradientes de umidade e diferenças na tensão devido às forças superficiais nos meniscos dentro dos capilares. Siau (1984) afirma que as leis que descrevem as forças capilares consideram que, quanto maior o raio do capilar, maior é a tração da coluna de água no interior do mesmo e, devido a isso, menor a tensão capilar, o que resulta na redução do fluxo. De acordo com Santini (1996), o fluxo capilar é aproximadamente 50 vezes maior na direção longitudinal que na transversal (radial e tangencial), porque, neste sentido, existe um menor número de obstáculos e menor presença de substâncias que possam obstruir a passagem da água. O fator mais importante que afeta o fluxo capilar é a permeabilidade da madeira, que, de acordo com a lei de Darcy, é obtida através da relação entre o fluxo e o gradiente de pressão.

A difusão é o fluxo molecular de massa sob a influência de um gradiente de concentração, de tal forma que uma diferença na pressão estática não é necessária. Este é o principal fenômeno responsável pelo movimento da água na madeira abaixo do PSF (KOCAEFE *et al.*, 2006; RICHTER, 2015). A primeira lei de Fick representa a relação entre o fluxo e o gradiente de massa em condições estacionárias. Segundo Bird, Stewart e Lightfoot (2004), o fluxo mássico (j , kg/m².s) pode ser expresso segundo a Equação 5.

$$j = -\rho D_{AB} \left(\frac{\partial \omega_A}{\partial x} + \frac{\partial \omega_A}{\partial y} + \frac{\partial \omega_A}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Em que D_{AB} representa a difusividade efetiva do vapor (espécie A) na madeira (meio B) (m²/s); ω_A é a fração mássica de água contida na madeira; x , y e z são os comprimentos nas direções de fluxo (m) e ρ é a massa específica do sistema água-madeira (kg/m³).

O movimento da água ocorre não apenas como um líquido, mas também como um vapor. Os fenômenos de difusão do vapor de água através da estrutura de vazios e da difusão da água ligada através das paredes celulares ocorrem simultaneamente. Durante a secagem, a difusão ou o transporte de água na forma de vapor toma lugar nos espaços vazios da madeira, uma vez que, geralmente, existe um gradiente de pressão parcial de vapor. O transporte de vapor sempre é feito do lugar de maior para o de menor pressão parcial de vapor. O gradiente de umidade entre as paredes das células mais externas se desenvolve à medida que a umidade começa a evaporar das paredes das células próximas à superfície da peça de madeira. Como a madeira é um material higroscópico, as paredes celulares mais secas da superfície absorvem umidade das paredes mais úmidas, criando um fluxo de água das células internas da madeira para as externas. Além da massa específica e da permeabilidade da madeira, a temperatura também exerce influência na difusão (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

No entanto, a secagem de madeira é caracterizada por ser um processo transiente, onde o fluxo difusivo é variável com o tempo, desta forma, sendo melhor descrita pela segunda Lei de Fick, que se trata da combinação da primeira lei de Fick com a equação da continuidade, que, na forma tridimensional, e tendo a concentração de umidade como força motriz, é apresentada na Equação 6 (KEEY; LANGRISH; WALKER, 2000).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho D_{AB} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Onde t é o tempo (s).

O coeficiente de difusividade (D_{AB}) é um importante parâmetro na modelagem do transporte da umidade. Persson (2001) *apud*. Eleotério (2009) apresenta valores de para o coeficiente de difusividade para amostras de *Pinus sylvestris* como sendo entre $3,8.10^{-10}$ e $4,9.10^{-10}$ m²/s a 60°C. Arends, Barakat e Pel (2018) determinaram o coeficiente de difusão através do estudo do aquecimento unilateral e do transporte de umidade em madeira de pinheiro, e observaram experimentalmente que o coeficiente de difusão das amostras variava entre 5.10^{-7} a 5.10^{-6} m²/s.

Eleotério (2009), Tzempelikos *et al.* (2015), e Agrawal e Methekar (2017), citam que a dependência da difusividade com a temperatura pode ser descrita com a equação de Arrhenius (Equação 7).

$$D = D_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (7)$$

Onde D é a difusividade efetiva (m²/s), D_0 é fator de Arrhenius (m²/s), E_a é a energia de ativação da difusão (kJ/mol), T é a temperatura (K), e R é a constante dos gases ideais (kJ/mol.K).

Mellado (2007) estudou o efeito da umidade e da temperatura no coeficiente de difusão efetivo da madeira de pinus. Ele obteve um coeficiente de difusão efetivo ($k_{m_{ef}}$, m²/s) para uma amostra de *Pinus elliottii* de 36 mm de espessura em função da temperatura absoluta e a umidade da madeira sendo descrito pela Equação 8 onde observou que o coeficiente de difusão efetivo decresce com a redução da umidade e tende a ser constante acima do PSF, além de aumentar com o acréscimo da temperatura de secagem seguindo uma função exponencial.

$$D_{ef} = 8405,6. e^{\left(\frac{-2706,4}{T}\right)} (M^{0,263}) \quad (8)$$

Em que D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo (m²/s); T é a temperatura de secagem (K) e M é a umidade (kg_{água}/kg_{sólido seco}).

Outra abordagem comum para a solução de problemas de transporte de massa é feita ao considerar um parâmetro denominado coeficiente de transferência de massa (k_m), que relaciona o fluxo mássico como resultado de uma força motriz, no caso, a diferença de concentração de umidade.

Thomas, Lewis e Morgan (1979) assumiram coeficiente de transporte de umidade constante durante o processo de secagem, igual a $2,2 \cdot 10^{-8}$ kg/m.s. Martinović, Horman e Demirdžić (2001) definem o coeficiente de condução de massa na superfície da madeira (k_{ms}) como $4,5 \cdot 10^{-9}$ kg_{água}/m.s, e o para o centro (k_{mc}), como $5,175 \cdot 10^{-9}$ kg_{água}/m.s. Kocaefe *et al.* (2007), Kadem *et al.* (2011) e Simo-Tagne *et al.* (2016) admitiram a condutividade da umidade como $1,8 \cdot 10^{-8}$ kg/m.s.

Entretanto, observa-se que no processo de secagem da madeira, os coeficientes de difusão e de transferência de massa, dependendo da abordagem empregada, não sofrem variações significativas acima do PSF. A maior parte dos autores referenciados neste trabalho consideram esses parâmetros constantes ao modelar fenômeno de transporte de umidade na madeira.

O conhecimento das propriedades termo-físicas da madeira é de grande importância para a modelagem do fenômeno de secagem, pois está relacionado com a quantificação da energia necessária no processo e com o tempo necessário no desenvolvimento das etapas à conclusão do processo de secagem.

A condutividade térmica (k_h) é a medida da taxa de fluxo de calor através de uma unidade de espessura em um material submetido a um gradiente de temperatura e, usualmente, é obtida experimentalmente. Em sólidos porosos, a condutividade térmica é fortemente dependente da porosidade, do tamanho do poro e do fluido retido nos poros. Sólidos porosos secos são fracos condutores de calor e são, deste modo, bons isolantes térmicos (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

Segundo Dinwoodie (2000) e Mellado (2007), a condutividade térmica da madeira aumenta com o aumento da densidade, da umidade, da temperatura e da concentração de extrativos. Além disso, também é afetada por variações na direção de grão e irregularidades estruturais. Seu valor é praticamente o mesmo nas direções radial e tangencial; porém, é 1,5 a 2,8 vezes maior no sentido longitudinal em relação às outras direções na madeira.

Desta forma, a condutividade no sentido paralelo às fibras pode ser determinada a partir da condutividade no sentido perpendicular, como demonstrado na Equação 9 (ELEOTÉRIO, 2009).

$$k_{hL} = 2,15 \cdot k_{hT} \quad (9)$$

Onde k_{hL} é a condutividade efetiva paralela às fibras (cal/(cm.s.°C)) e k_{hT} é a condutividade efetiva no sentido perpendicular às fibras (cal/(cm.s.°C)).

Diversos autores apresentam modelos para predição da condutividade térmica da madeira como demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Modelos para determinação da condutividade térmica da madeira.

Modelo	Fonte	Observação	Equação
$k_h = 1,163 \cdot k_M \left\{ 1 - \left[(1,1 - 9,8 \cdot 10^{-4} \rho_0) \left(\frac{27 - (T_c + 273)}{100} \right) \right] \right\}$ <p>Sendo $k_M = k_1 \{ 1 - 0,0125 [10 - (T_{Mo} + 273)] \}$ e $k_1 = 1,68 \cdot 10^{-4} \rho_M + 0,022$</p>	Kollmann e Côté (1968)		(10)
$k_q = (0,138 + 0,0019M + 0,00022T + 0,000011MT)(0,105 + 2,03\rho_0)$	Steinhagen e Lee (1988)		(11)
$k_{hT} = \left(\frac{0,65}{100 \cdot M} + 0,0932 \right) \cdot (3,55 + 3,65 \cdot T) \cdot (0,986 + 2,695 \cdot M) \cdot 10^{-3}$	Perré e Degiovanni (1990)	para umidade acima de 40%	(12)
$k_{hT} = (0,129 - 0,049 \cdot M) \cdot [1000 + (2,05 + 4 \cdot M)(T - 273)] \cdot (0,986 + 2,695 \cdot M) \cdot 10^{-3}$		para umidade abaixo de 40%	(13)
$k_h = 0,13 + 3 \cdot 10^{-4} T_c$	Koufopoulos <i>et al.</i> (1991)		(14)
$k_h = 4,18 [0,45(5,18 + 0,096M) + 0,57V_a]^{-2}$	Avramidis e Hatzikiriakos (1995)	Condutividade térmica na direção transversal	(15)
$V_a = 1 - 0,46(0,667 + 0,01M)$			(16)
$k_h = \rho(B_2 + B_3M) + B_1$ <p>Onde $B_1 = 0,01864$, $B_2 = 0,1941$ e $B_3 = 0,004064$</p>	FPL (1999)	Para densidade acima de 300kg/m ³ , temperaturas em torno de 24°C e valores de umidade abaixo de 25%	(17)
$k_h = 1,36(0,088 + 0,000709T + 0,00181C_mM)$	Martinović; Horman e Demirdžić (2001)		(18)
$k_{q2} = k_{qy} = \rho_0(0,1941 + 0,004064M) + 0,01864$ <p>onde $(k_{qx} = 2k_{qy} = 2k_{q2})$</p>	Stanish, Schajer e Kayihan (1986); Younsi <i>et al.</i> (2010) e	k_{qx} é condutividade térmica na direção longitudinal e k_{qy} e k_{qz} nas direções radial e	(19)

	Kadem <i>et al.</i> (2011)	transversal respectivamente	
$k_h = \frac{\rho_0}{\rho_w} (0,2003 + 0,00548M) + 0,02378M$	Simo-Tagne <i>et al.</i> (2016)		(20)
$k_h = 0,4615e^{(0,8113M)} e^{(-608,6/T)}$	Zhao <i>et al.</i> (2016)		(21)
$k_h = \frac{1 - 0,9044\sqrt{\eta}}{5,0556 - 7,3544\sqrt{\eta} + 4,5738\eta}$	Zhang <i>et al.</i> (2017)		(22)
$\eta = 1 - \rho(0,6536 + 0,3464M). 10^{-3}$			(23)

Onde, k_{hT} é a condutividade efetiva perpendicular às fibras (W/(m.K)); M é a umidade em base seca (%); T a temperatura (K); k_h é a condutividade térmica da madeira (J/m.s.K); k_l é o valor referencial a 10% de umidade; ρ_M é a densidade aparente (kg/m³) a 10% de umidade; k_M é o valor referencial à umidade inicial (T_{Mo}) da madeira (%); T_C é a temperatura ambiente (°C); ρ_0 é a densidade da madeira seca (kg/m³); ρ_w é a densidade da água (kg/m³); η é a porosidade; C_m é a umidade específica (kg_{água}/kg_{sólido seco}).

Thomas, Lewis e Morgan (1979) ao modelarem a secagem de madeira de uma espécie de abeto, consideraram o coeficiente de condutividade térmica (k_h) constante, sendo igual a 0,65 W/m.K. Segundo *Forest Products Laboratory* (1999), a condutividade térmica para madeira de coníferas com umidade de 12% varia na faixa de 0,1 a 1,4 W/m.K. Para o *Pinus elliottii*, é citado para a condutividade térmica a 12% de umidade, 0,17 W/m.K e 0,14 W/m.K, à 0% de umidade (FPL, 1999). Arends, Barakat e Pel (2018) consideraram a condutividade térmica constante na secagem de madeira de pinheiro assumindo 0,12 W/m.K.

Outra propriedade relevante na consideração de um modelo matemático para o fenômeno de transporte de calor na secagem de madeira é o calor específico, definido como a quantidade de energia necessária para aumentar, em uma unidade, a temperatura de uma substância de massa conhecida (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

O calor específico da madeira independe da espécie, densidade e posição na árvore, mas aumenta significativamente com o aumento da temperatura, assim como outros materiais orgânicos, e aumenta com a umidade, pois, o calor específico da água é maior do que o da madeira seca. Acima do PSF, o calor específico total da peça de madeira corresponde à soma do calor específico da madeira, mais o calor específico da água, mais

um fator que considera a energia adicional da água de impregnação na madeira (FPL, 1999).

A madeira possui um valor de calor específico relativamente alto em relação a outros materiais. Isto significa que, ao se aplicar uma determinada quantidade de calor à madeira, ela se aquecerá muito menos que os materiais possuidores de menor calor específico, como metais, concreto, tijolos, etc.

A literatura apresenta diversos modelos para descrever a variação do calor específico da madeira durante o processo de secagem como demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3 – Modelos para determinação do calor específico da madeira.

Modelo	Fonte	Observações	Equação
$C_p = 1112 + 4,85.T_c$	Koufopoulos <i>et al.</i> (1991)		(24)
$C_p = 467. [C_m. M. (100 + T)]^{0,2}$	Martinović; Horman e Demirdžić (2001)		(25)
$C_p = \frac{(C_{p0} + 0,01. M. C_{pw})}{1 + 0,01. M} + A_c$	FPL (1999); Younsi <i>et al.</i> (2010); Kadem <i>et al.</i> (2011); Putranto <i>et al.</i> (2011); Simo-Tagne <i>et al.</i> (2016).	Alguns autores empregam este modelo considerando C_{pw} constante (4,186 kJ/kg.K)	(26)
$C_{p0} = 0,1031 + 0,003867. T$			(27)
$C_{pw} = -2. 10^{-12}. T^5 + 4,39. 10^{-9}. T^4 - 3,56. 10^{-6}. T^3 + 1,4327. 10^{-3}. T^2 - 285,6. 10^{-3}. T + 26,776$ $A_c = M. (-0,06191 + 2,36. 10^{-4}. T - 1,33. 10^{-4}. M)$			(28)
$C_p = 2000 + 8,71. M + 4,98. T$	Steinhagen e Lee (1988); Zhao <i>et al.</i> (2016)		(29)
$C_p = \frac{1229,4 + 6,714. T + 41,87. M}{1,0 + 0,01. M}$	Lin <i>et al.</i> (2015); Zhang <i>et al.</i> (2017)		(30)
			(31)

Em que C_p é o calor específico da madeira (kJ/kg.K); C_{p0} é o calor específico da madeira anidra (kJ/kg.K); C_{pw} é o calor específico da água (kJ/kg.K); T é a temperatura (K); T_c é a temperatura (°C); M a umidade em base seca (%); A_c é um fator de ajuste; C_m é a capacidade de umidade (kg_{água}/kg_{sólido seco}).

Outros autores fazem uso do parâmetro considerando-o constante. Pečenko, Svensson e Hozjan (2015), ao realizarem a modelagem da transferência de calor e umidade em madeira exposta ao fogo, consideraram o calor específico da madeira seca como sendo 1,5 kJ/kg.K. Thomas, Lewis e Morgan (1979) e Zadin *et al.* (2015) também consideraram o calor específico constante; porém, igual a 2,5 kJ/kg.K.

Para a solução de problemas de transferência de calor em regime transiente é natural iniciar pelo cálculo do número de Biot (Bi) que se trata de um parâmetro adimensional que indica o quanto a espessura de um material influencia no gradiente de temperatura da superfície ao interior no corpo. O número de Biot pode ser definido como mostrado na Equação 32 (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

$$Bi = \frac{\alpha_h L_c}{k_h} \quad (32)$$

Onde α_h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2.K$); L_c é o comprimento característico dado em metros, definido como sendo a razão entre o volume do corpo (m^3) pela área da superfície do corpo (m^2); k_h é o coeficiente de condutividade térmica do material ($W/m.K$).

Para sua interpretação, considera-se que corpos com valor de $Bi \leq 0,1$ a variação da temperatura com a localização dentro do corpo é pequena e pode ser razoavelmente aproximada como sendo uniforme. Valores de $Bi > 0,1$ indicam que a descrição da distribuição de temperatura variante no tempo não é espacialmente uniforme no interior deste corpo (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

No processo de secagem da madeira como um material poroso, dois efeitos relacionados à transferência simultânea de calor e massa devem ser considerados. A contribuição do gradiente de temperatura com o fluxo de umidade durante um processo de secagem é denominada efeito Soret. Já a interferência no transporte de calor causada por um gradiente de concentração é chamada de efeito Dufour (KOCAEFE *et al.*, 2006).

Cremasco (2002) define o efeito Soret como sendo o fluxo mássico, de uma espécie presente no meio, devido à presença de um gradiente de temperatura, em uma situação em que há transporte de calor em nível molecular. O fluxo deste soluto é denominado difusão térmica.

Eleotério (2009) explica que a determinação do coeficiente relacionado ao efeito Soret exige um aparato experimental e é possível ser demonstrada em condições estacionárias. Martinović, Horman e Demirdžić (2001), Younsi, D. Kocaefe e Y. Kocaefe (2006) e Horman, Martinović e Hajdarević (2009) utilizaram o valor de $0,02 \text{ kg}_{\text{água}}/(\text{kg}.K)$, e Kocaefe *et al.* (2006), o valor de $0,025 \text{ kg}_{\text{água}}/(\text{kg}.K)$, para o coeficiente relacionado a esse efeito. Trcala (2012) mostrou que o efeito Soret na distribuição de

umidade era importante no início do processo de secagem, que diminui progressivamente para o período entre 20.000 e 50.000 segundos, desaparecendo após esse período.

Cremasco (2002) define a termodifusão ou efeito Dufour como sendo a observação de um gradiente de temperatura causado pela presença de um gradiente de concentração.

Comumente o efeito Dufour é desconsiderado por apresentar dimensões muito pequenas. Kang *et al.* (2008) assumem que o efeito da termodifusão na taxa de transferência de calor pode não ser significativo porque a difusão de calor é mais rápida que a difusão de umidade.

3.2. PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA

A secagem da madeira pode ser definida como o balanço entre a transferência de calor do ar para a superfície do material e a transferência de massa do interior da peça para a superfície e desta para a corrente de ar (MELLADO, 2007).

Durante a secagem, a água na madeira se transfere de zonas de alta umidade para zonas de baixo conteúdo de umidade, o que significa que, para a umidade ser removida, a superfície da madeira deve ser mais seca do que o interior (SANTOS, 2002). Durante o processo de secagem ocorrem os fenômenos simultâneos de movimento da água do interior para a superfície da madeira e evaporação da água da superfície. As fibras da superfície da maioria das espécies atingem o equilíbrio de umidade com o ar circundante logo após o início da secagem. Este é o começo do desenvolvimento de um típico gradiente de umidade, isto é, a diferença no conteúdo de umidade entre as porções interna e externa de uma placa (SIMPSON, 1991; MUNIZ, 1993; SANTINI, 1996).

Alguns autores (SIAU, 1984; MUNIZ, 1993; FPL, 1999; MELLADO, 2007; MORESCHI, 2014 (b)) defendem que a taxa na qual a umidade se move na madeira depende da umidade relativa do ar circundante e da temperatura da madeira. Quanto menor a umidade relativa, maior o fluxo capilar. A baixa umidade relativa também estimula a difusão, diminuindo o conteúdo de umidade na superfície, aumentando o gradiente de umidade e aumentando a taxa de difusão. Quanto maior a temperatura da madeira, mais rapidamente a umidade se moverá do interior mais úmido para a superfície mais seca. Se a umidade relativa estiver muito baixa nos estágios iniciais de secagem,

poderá ocorrer encolhimento excessivo resultando em perdas devido a retração do material.

Segundo Jankowsky, Santos e Andrade (2000), Santos (2002) e Mellado (2007), o processo de secagem convencional ocorre em três fases caracterizadas pela variação da taxa de secagem, como observado na Figura 3.

Na primeira fase, ainda com a superfície acima do ponto de saturação da fibra, a taxa de evaporação é proporcional à diferença de temperatura entre o ar e a superfície da madeira e também proporcional à diferença de pressão de vapor entre o ar e a superfície desta. A pressão de vapor de uma superfície úmida corresponde à pressão de saturação e à temperatura do ponto de orvalho. Ainda de acordo com Santos (2002) e Mellado (2007), neste estágio a taxa de secagem é constante e a temperatura da superfície saturada corresponde à temperatura de bulbo úmido. Logo todo o calor sensível conduzido à madeira é usado para evaporar a umidade da superfície. Depois de um certo tempo, a velocidade de difusão da água proveniente do interior da madeira diminui, enquanto a velocidade de evaporação permanece constante. Alcança-se então o ponto de saturação das fibras, onde o filme de água na superfície não pode mais ser mantido.

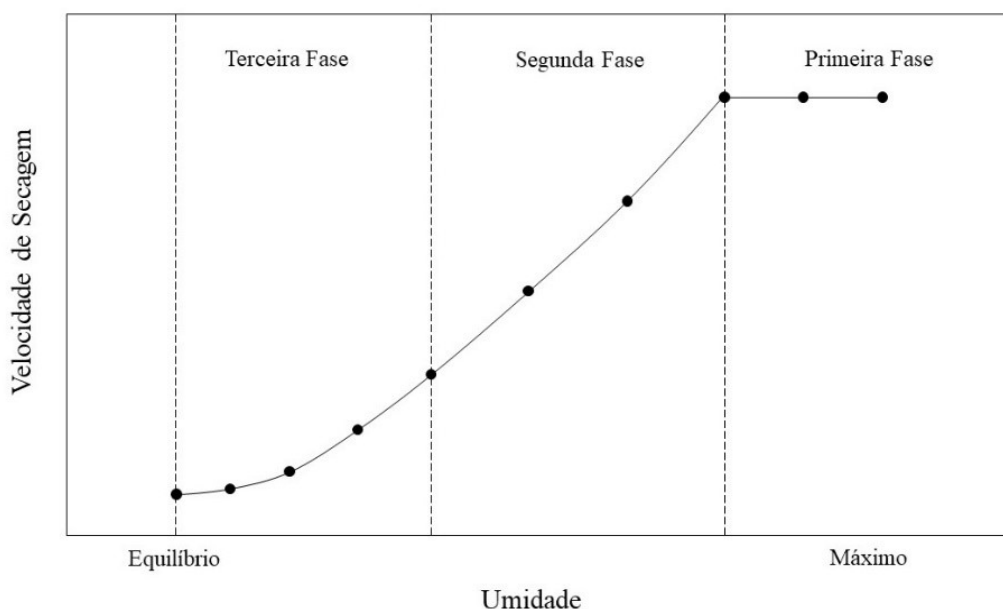


Figura 3 – Diagrama dos estágios da secagem convencional de madeira.
Fonte: MELLADO, 2007 (adaptado).

Na segunda fase, a umidade da superfície está logo abaixo do PSF, enquanto a zona interior ainda contém água livre. Mellado (2007) explica que a umidade da madeira, no ponto de transição do período constante para o período decrescente, é denominada

umidade crítica. As condições externas exercem um grande efeito sobre o processo nesse estágio, controlando a taxa de secagem desse período. O movimento difusivo da água do interior à superfície se inicia devido ao gradiente de umidade gerado pela vaporização da água da superfície, a qual também é influenciada pelo fluxo de calor que ocorre no sentido inverso. Com a remoção da umidade da madeira, sua temperatura passa para valores acima da temperatura de bulbo úmido e, em tese, só alcançará o equilíbrio higroscópico com o meio, quando a madeira chegar no mesmo valor da umidade do ar ambiente.

Na terceira e última fase, a taxa de evaporação se mantém decrescente, o material se encontra no domínio higroscópico e a linha de evaporação da água se restringe ao centro da peça. Não há mais água livre e a taxa de secagem é regulada pelas características do material submetido ao processo, até que a umidade de equilíbrio seja alcançada (SANTOS, 2002).

A secagem de madeira é geralmente realizada por meio de uma combinação de secagem natural (ao ar) e secagem em estufa. O objetivo principal da secagem natural é evaporar o máximo de água possível antes do uso final ou transferir para um forno seco. Essa secagem prévia tende a melhorar a permeabilidade da madeira, reduzir o tempo de secagem na estufa e, conseqüentemente, economizar energia (SEVERO, 1998). A secagem natural geralmente se estende até que a umidade da madeira chegue à 30% a 25%, quando a madeira é transferida para a estufa, se for necessária a secagem final para uma umidade mais baixa. Porém, como Santos (2002) afirma, a secagem natural apresenta dependência com fatores da própria espécie de madeira, do pátio de secagem e das condições climáticas.

Na secagem em estufa, temperaturas mais altas e circulação de ar mais rápida são usadas para aumentar consideravelmente a taxa de secagem. As temperaturas de operação usadas estão na faixa de 35 a 90°C. Programações específicas de estufa são desenvolvidas para controlar a temperatura e a umidade relativa de acordo com a umidade e a tensão de retração na madeira, minimizando as perdas por envergamento e rachaduras (FPL, 1999; SANTOS, 2002; HORMAN; MARTINOVIĆ; HAJDAREVIĆ, 2009).

As estufas ou câmaras de secagem são projetadas considerando a amplitude térmica de operação, a produção esperada, a fonte de energia e as limitações de componentes como compressores e motores elétricos (BATISTA, 2009). As estufas convencionais de secagem de madeira, como a apresentada na Figura 4, usualmente, possuem uma câmara

fechada contendo um sistema de ventilação que promove a circulação do ar pela superfície das tábuas de madeira serrada a velocidades que variam entre 60 a 120 m/min (1 a 2 m/s). Este tipo de equipamento também dispõe de um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar e um conjunto de *dampers* ou janelas que permite a troca de ar entre o interior do secador e o meio externo. As temperaturas na câmara no início do processo variam entre 40 a 80°C e as temperaturas no final do ciclo, de 65 a 95°C (SANTOS, 2002; BATISTA, 2009; OUMAROU; KOCAEFE; KOCAEFE, 2014).

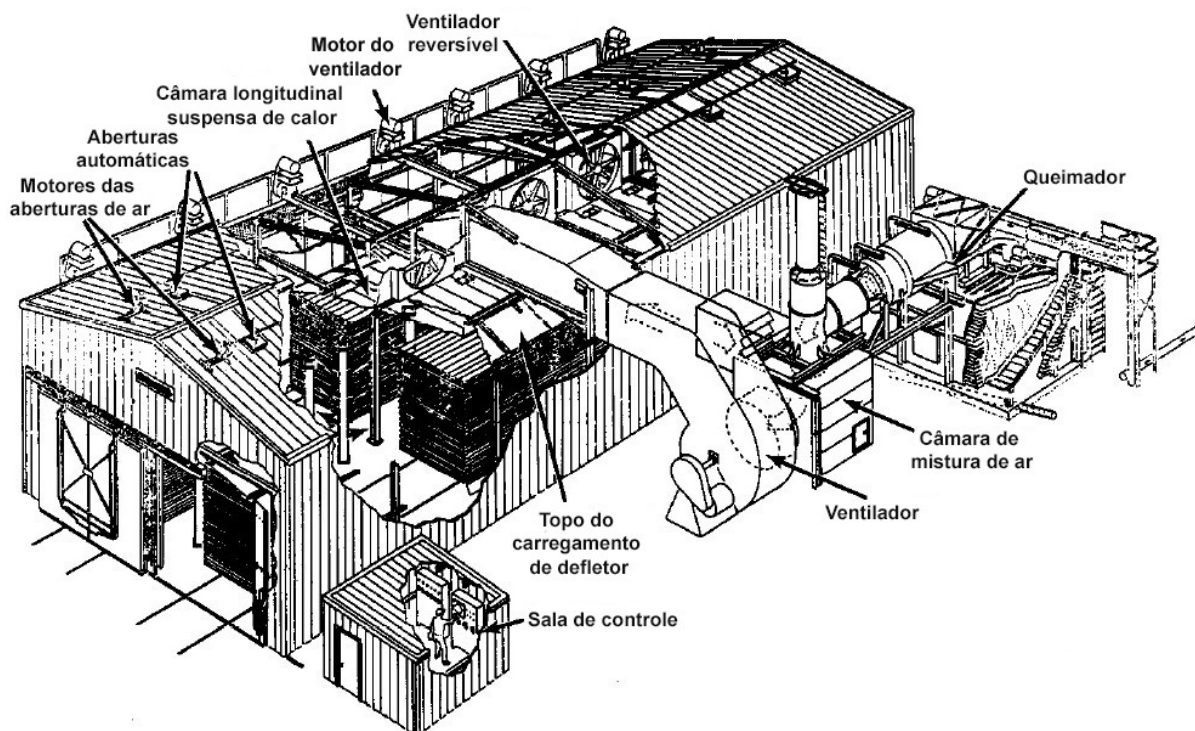


Figura 4 – Estufa convencional de secagem de madeira com forno de queima direta e trilho duplo, no qual produtos de combustão são descarregados diretamente na corrente de ar que circula dentro do forno.

Fonte: SIMPSON, p. 45, 1991 (adaptado).

A maioria das estufas de secagem são compartimentos termicamente isolados, projetados para um processo de batelada em que a estufa é completamente carregada com madeira em uma operação e a madeira permanece imóvel durante todo o ciclo de secagem. A temperatura e a umidade relativa são mantidas tão uniformes quanto possível em toda a câmara e podem ser controladas em uma ampla faixa. A temperatura e a umidade relativa são alteradas à medida que a madeira seca com base em um cronograma que leva em conta a umidade e/ou a taxa de secagem da madeira. Todas as estufas convectivas de secagem usam algum tipo de circulação de ar forçado, com o ar se movendo através da madeira perpendicular ao comprimento das peças e paralelo aos espaçadores (adesivos) que separam cada camada de madeira em uma pilha, como ilustrado na Figura 5 (FPL, 1999).

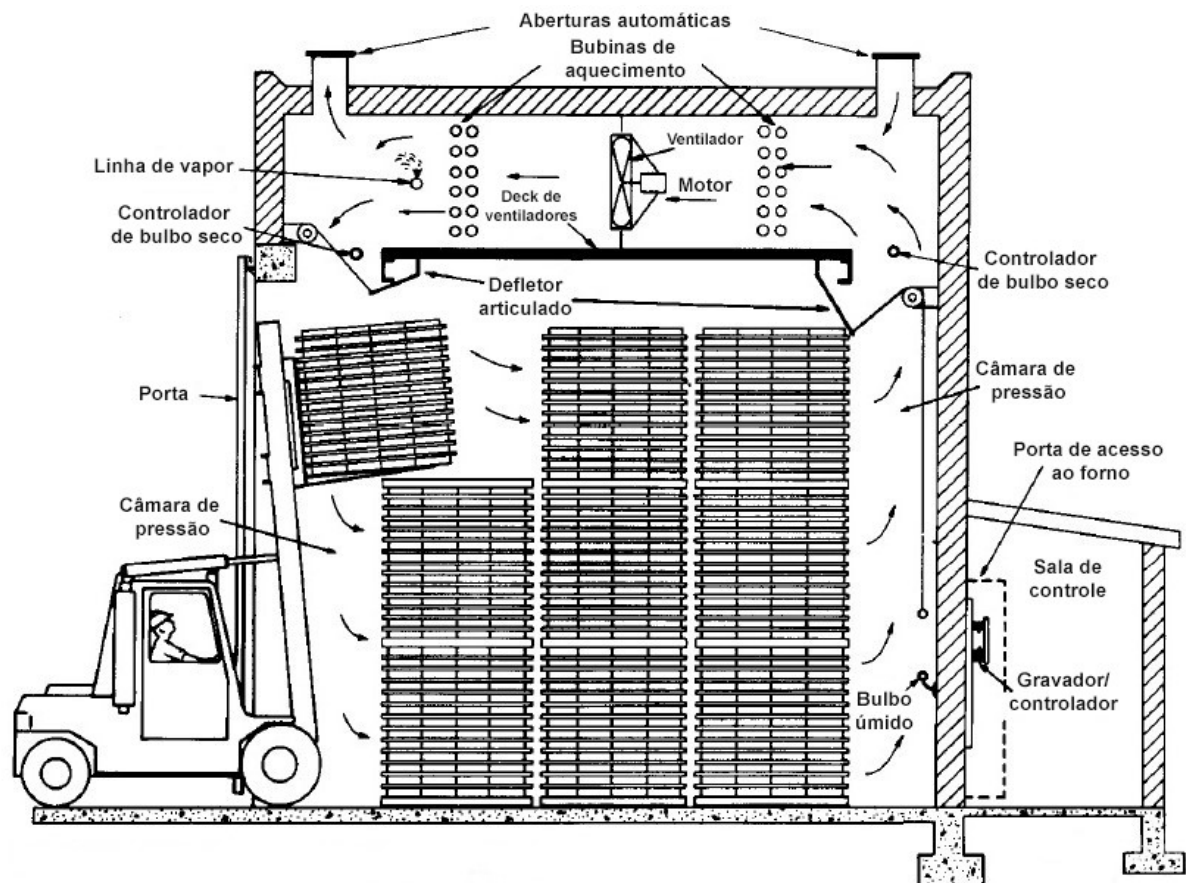


Figura 5 – Disposição dos palets de madeira serrada dentro do forno e circulação do ar no interior do forno durante o processo de secagem.
 Fonte: SIMPSON, p. 46, 1991 (adaptado).

O movimento uniforme do ar é um dos pré-requisitos da secagem bem-sucedida. O fluxo de ar deve ser realizado considerando-se o transporte de calor e de massa e à cinética de secagem para obter a descrição final do processo. O transporte de umidade no ar é fortemente influenciado pelo transporte de calor (ZADIN *et al.*, 2015). Os parâmetros operacionais diretamente ligados ao movimento do ar no interior do forno são: a velocidade do ar no forno e os coeficientes transferência de massa e calor por convecção. Zadin *et al.* (2015) ao fazer investigações paramétricas da dinâmica de secagem indicaram velocidades de ventilação ótimas de 5 a 6 m/s para projetos de fornos de secagem convencionais.

Para o coeficiente de transferência de calor por convecção na interface ar-superfície da madeira (α_h), Thomas, Lewis e Morgan (1979) assumiram com sendo $22,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Martinović, Horman e Demirdžić (2001), adotaram o valor de $40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para o coeficiente de transferência de calor por convecção, usando uma velocidade do ar (v_a) de

2 m/s. Simo-Tagne *et al.* (2016) empregaram o coeficiente de transferência de calor (α_h) como 9,2 W/m².K.

Eleotério (2009) ao propor a modelagem e a simulação do processo de secagem de madeiras serradas de espécies tropicais brasileiras, usa o coeficiente convectivo de transferência de calor constante assumindo 19 W/m².K a uma velocidade de ar na estufa de 0,019 m/s, e justifica essa consideração devido à pouca variação nas condições analisadas e pelo alto número de Biot mássico, que minimizaria a importância deste fator.

Para o coeficiente de transferência de massa por convecção na interface ar-superfície da madeira (α_m), Thomas, Lewis e Morgan (1979), utilizaram como sendo 2,5.10⁻⁶ kg/m².s. Martinović, Horman e Demirdžić (2001) consideraram o valor de 1,8.10⁻⁶ kg/m².s para esse coeficiente. Simo-Tagne *et al.* (2016) assumiram o coeficiente convectivo de transferência de massa (α_m , m/s) como uma função da velocidade do ar na estufa (v_a , m/s), dada pela Equação 33, e em sua simulação, consideraram uma velocidade do ar na estufa de 0,25 m/s.

$$\alpha_m = 9,454.10^{-3}v_a^{0,5003} \quad (33)$$

Parâmetros operacionais são comumente considerados em modelos de difusão aplicados à secagem de madeira em fornos. Martinović, Horman e Demirdžić (2001) assumem, em seu modelo de difusão, o calor de mudança de fase (λ) como constante, valendo 2,3.10⁶ J/kg. Contudo, outros autores consideram a sua variação durante o processo, como observado no Quadro 4.

Quadro 4 – Modelos para determinação do calor latente de evaporação (λ).

Modelo	Fonte	Equação
$\lambda = 2,792.10^6 - 160T - 3,43T^2$	Younsi <i>et al.</i> (2010); Kadem <i>et al.</i> (2011)	(34)
$\lambda = (3335 - 2,91T) . 10^3$	Simo-Tagne <i>et al.</i> (2016)	(35)

Em que λ é o calor latente de evaporação (J/kg) e T é a temperatura em (K)

Thomas, Lewis e Morgan (1979) e Martinović, Horman e Demirdžić (2001) empregaram o coeficiente de gradiente de temperatura na madeira (δ) como sendo igual a 2 K⁻¹. Thomas, Lewis e Morgan (1979) consideraram a razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade da madeira (ϵ) também constante, assumindo 0,3. Entretanto, Martinović, Horman e Demirdžić (2001) consideraram o parâmetro variável com o tempo, adotando 0,1 para os primeiros 60 min

de secagem, 0,5 para o tempo maior que 60 min e menor que 3660 min, e 1,0 para tempos maiores ou iguais a 3660 min.

Simo-Tagne *et al.* (2016), ao caracterizarem o comportamento de sorção e as propriedades de transferência de massa de quatro madeiras tropicais da África Central, consideraram a relação entre o coeficiente de difusão de vapor e o coeficiente de difusão de umidade total no interior do material (ε) como sendo igual a 3, e o coeficiente de gradiente térmico (δ , K⁻¹) como 0,025 K⁻¹.

Um cronograma de secagem (também chamado de programa de secagem) é uma série de temperaturas e umidades relativas que são aplicadas em vários estágios do processo de secagem. Na maioria dos intervalos de tempo, a temperatura é gradualmente aumentada e a umidade relativa diminui. Porém, de acordo com Santos (2002) e Oumarou, D. Kocaefe e Y. Kocaefe (2014), a redução do tempo é limitada pelas características de cada espécie de madeira, sendo que muitas só apresentam bons resultados quando submetidas a cronogramas de secagem lenta. Andrade (2000) cita que os principais fatores envolvidos na escolha de um programa de secagem são: espécie de madeira (massa específica, permeabilidade, contração, etc.); umidade inicial e final; espessura do material; uso a que se destina; e equipamento de secagem.

Segundo *Forest Products Laboratory* (1999), o cronograma deve ser desenvolvido para que as tensões de secagem não excedam a resistência da madeira em qualquer temperatura e umidade. Caso contrário, a madeira rachará na superfície ou internamente, ou será esmagada por forças que colapsam as células da madeira. Como mencionado anteriormente, a madeira geralmente se torna mais forte à medida que a umidade diminui e, em menor escala, torna-se mais fraca à medida que a temperatura aumenta. O resultado líquido é que à medida que a madeira seca torna-se mais forte devido à diminuição da umidade e pode tolerar temperaturas de secagem mais altas e umidade relativa mais baixa sem apresentar rachaduras (RICHTER, 2015; ZHANG *et al.*, 2017).

Os intervalos de tempo de secagem variam de acordo com a espécie, espessura e uso final da madeira. Existem dois tipos gerais de programações de estufa: agendamentos baseados no conteúdo de umidade e agendamentos baseados no tempo de secagem. A maioria das espécies de madeira dura é seca por programações do tipo umidade-temperatura, onde a temperatura do ar no interior do secador e a umidade relativa são alteradas de acordo com a umidade média da madeira submetida ao processo. Um

cronograma típico de madeira pode começar a 49°C e 80% de umidade relativa quando a madeira é verde. Quando a madeira atinge 15% de umidade, a temperatura chega a 82°C (FPL, 1999; Andrade, 2000; Santos *et al.*, 2017).

Martinović, Horman e Demirdžić (2001) variaram a temperatura do ambiente interno do forno (T_a , K) em função do tempo de secagem, seguindo o esquema representado na Equação 36.

$$T_a = \begin{cases} 28; & 0 \leq t < 10 \text{ min} \\ 0,35 \cdot t + 24,5; & 10 \leq t < 70 \text{ min} \\ 49; & t \geq 70 \text{ min} \end{cases} \quad (36)$$

Para a umidade ambiente do interior do forno (M_a), Thomas, Lewis e Morgan (1979) usaram uma umidade ambiente igual a 8%, aquecendo o forno progressivamente até atingir 110°C. Martinović, Horman e Demirdžić (2001) assumiram uma umidade relativa do ambiente do forno de 10,5% em suas simulações.

Métodos de monitoramento da umidade durante a secagem são necessários para os cronogramas baseados na variação da umidade. Um método comum é o uso de amostras sendo pesadas periodicamente. Alternativamente, eletrodos são embutidos em amostras para detectar a mudança na condutividade elétrica com a variação da umidade. Porém este sistema é limitado a valores de umidade inferiores a 30% (FPL, 1999; SANTOS, 2002).

3.3. MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À SECAGEM DE MADEIRA

Para simular o processo de secagem na microestrutura da madeira, vários modelos possíveis podem ser utilizados. Baronas, Ivanauskas e Sapagovas (1999), Mellado (2007), Pečenko, Svensson e Hozjan (2015) e Zadin *et al.* (2015) descrevem que o modelo de difusão assume que a transferência de massa na madeira é controlada apenas pela difusão; para isso, consideram o fenômeno ocorrendo com umidade abaixo do PSF. O modelo multifásico, como demonstrado por Eriksson, Ormarsson e Petersson (2006), Kocaef *et al.* (2007) e Oumarou, D. Kocaefe e Y. Kocaefe (2014), pressupõe a presença de todas as fases possíveis - água livre, água ligada, vapor de água e madeira. Na abordagem de Luikov, a madeira é modelada como um meio poroso capilar e é assumida como sendo isotrópica e homogênea (LUIKOV, 1975; KOCAEFE *et al.*, 2007; ZADIN *et al.*, 2015; SIMO-TAGNE *et al.*, 2016).

Kocafe *et al.* (2007) compararam os diferentes modelos para o tratamento térmico de madeira a alta temperatura (Difusão, Luikov e Multifase). Os autores mostraram que os modelos demonstram um desempenho bastante similar, fornecendo uma descrição espacial detalhada do balanço de massa (umidade) durante o processo de secagem. No entanto, embora essas abordagens forneçam informações detalhadas sobre o processo, elas estão restritas a sistemas de pequena escala. Oumarou, D. Kocafe e Y. Kocafe (2014) citam que, se a secagem em todo o forno é considerada, tais modelos podem ser computacionalmente muito exigentes, necessitando uma representação geométrica precisa do material e levando a malhas excessivamente complexas, e devido a isso, concluem que o modelo de difusão foi o mais útil para aplicações industriais.

Mellado (2007) recomenda modelos difusivos para os casos onde o gradiente de temperatura é menor em relação ao gradiente de umidade, havendo baixa taxa de secagem e alta difusividade térmica.

De acordo com Eleotério (2009), um modelo ideal seria capaz de prever o comportamento da madeira em diversos aspectos além da umidade; porém, um modelo com estas características exige a determinação de muitos parâmetros associados, e torna a sua solução mais desafiante. Dessa forma, os modelos matemáticos apresentados na literatura são ajustados para situações específicas, trazendo usualmente uma abordagem fenomenológica.

O modelo de difusão é usualmente empregado para espécies impermeáveis, onde a secagem é muito lenta. Thomas, Lewis e Morgan (1979) apresentaram o modelo de equações diferenciais que descrevem a transferência de calor (Equação 37) e massa (Equação 38) na secagem de madeira de uma espécie de conífera em coordenadas retangulares.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_h \nabla^2 T + \varepsilon \lambda \rho C_m \frac{\partial M}{\partial t} \quad (37)$$

$$\rho C_m \frac{\partial M}{\partial t} = k_m \nabla^2 M + k_m \delta \nabla^2 T \quad (38)$$

Em que M é a umidade ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); T é a temperatura (K); t é o tempo (s); k_h é o coeficiente de condução de calor ($\text{W}/\text{m.K}$); k_m é o coeficiente de difusão de umidade ($\text{kg}/\text{m.s}$); ρ é a massa específica da madeira (kg/m^3); C_p é o calor específico da madeira ($\text{J}/\text{kg.K}$); C_m é a umidade específica do meio ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); δ é o coeficiente de

gradiente térmico (K^{-1}); λ é o calor latente (J/kg); e ε é a razão do coeficiente de difusão de vapor com o coeficiente de difusão total de umidade.

Usando um conjunto geral de condições de contorno em que a Equação 39 considera fluxo de calor na fronteira e a Equação 40 relaciona a fronteira submetida a um fluxo de umidade.

$$k_h \frac{\partial T}{\partial n} + q + \alpha_h(T - T_a) + (1 - \varepsilon)\lambda\alpha_m(M - M_a) = 0 \quad (39)$$

$$k_m \frac{\partial M}{\partial n} + j + k_m \delta \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha_m(M - M_a) = 0 \quad (40)$$

Sendo α_h o coeficiente convectivo de transferência de calor (W/m.K); α_m o coeficiente convectivo de transferência de massa (kg/m.s); q o fluxo de calor (W/m².s), e j o fluxo de massa (kg/m².s), T_a a temperatura no interior da estufa (K), M_a a umidade do ar de secagem (%).

Thomas, Lewis e Morgan (1979) compararam os dados obtidos na simulação do processo de secagem de uma espécie de abeto serrado com os dados experimentais de Keylwerth (1952). Considerando a direção radial, determinou a variação de temperatura e da umidade na superfície e no interior da peça através do método de elementos finitos. Thomas, Lewis e Morgan (1979) consideraram todos os parâmetros constantes. Partindo de uma umidade de 86% a 10°C, observaram um tempo de 16,6 horas para alcançar os equilíbrios higroscópico e térmico com o ambiente da estufa.

Como explicado por Tzempelikos *et al.* (2015), o processo de secagem é regido pelo forte acoplamento entre o transporte de calor e massa, tanto dentro do material como na interface com o ar de secagem, sendo afetado por vários parâmetros, incluindo as propriedades do material e as condições externas de secagem, como a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do fluxo de ar quente.

Outro exemplo de modelo difusivo é apresentado por Martinović, Horman e Demirdžić (2001) representado nas Equações 41 e 42 usadas na determinação dos perfis transientes de temperatura e umidade, respectivamente, em coordenadas retangulares, afim de avaliar a influência dos parâmetros do ar ambiente durante o processo de secagem de amostras de madeira de faia.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = -\frac{\partial q}{\partial x} + \rho s_h \quad (41)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_m M) = -\frac{\partial j}{\partial x} + \rho s_m \quad (42)$$

Onde t é o tempo (s); ρ é a massa específica (kg/m^3); C_P é o calor específico (J/kg.K); C_m é a umidade específica ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); q é o fluxo de calor (W/m^2); x é o eixo considerado; s_h é um termo de fonte de energia; s_m é o termo fonte de massa; T é a temperatura (K); M é a umidade em base seca (%); e j é o fluxo de massa ($\text{kg/m}^2.\text{s}$).

Martinović, Horman e Demirdžić (2001) apresentam os fluxos de massa, incluindo o efeito Soret, e de energia através das Equações 43 e 44.

$$j = -k_m \frac{\partial M}{\partial x} - \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} \quad (43)$$

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \lambda j = -(k_h + \varepsilon \lambda \delta k_m) \frac{\partial T}{\partial x} - \varepsilon \lambda k_m \frac{\partial M}{\partial x} \quad (44)$$

Sendo k_h a condutividade efetiva (W/m.K); k_m a difusividade efetiva ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{m.s}$); ε é a razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade; λ é o calor latente de vaporização (J/kg); e δ é o coeficiente do gradiente de temperatura (K^{-1}).

Martinović, Horman e Demirdžić (2001) modelaram o processo de secagem e aplicaram o método de volumes finitos considerando a variação de parâmetros que sofrem interferência das mudanças de umidade e temperatura durante o processo de secagem. Partindo de uma temperatura inicial de 21°C e umidade de 75%, observaram o equilíbrio térmico a partir de 25 horas de secagem e o equilíbrio higroscópico mais tardio apenas após 7 dias de secagem (166,67 h). Em seu estudo foi admitido um programa de secagem onde a temperatura era progressivamente aumentada até o valor máximo de 49°C . A validação do modelo foi realizada a partir da comparação com dados experimentais usando um secador em escala laboratorial com uma concordância favorável com os valores previstos pelo modelo.

Eleotério (2009) usou o modelo proposto por Martinović, Horman e Demirdžić (2001) para descrever a secagem da madeira serrada de três espécies de folhosas tropicais, através do método dos volumes finitos. Em seu trabalho, verificou cerca de 101 horas para chegar ao equilíbrio higroscópico usando uma temperatura de 70°C para madeira de andiroba, que possui densidade próxima do *Pinus elliottii* (548 kg/m^3) com 40 mm de espessura a 55,5% de umidade inicial em atmosfera com 7,6% de umidade. Seus

resultados foram validados experimentalmente e verificou-se estreita relação entre os dados obtidos.

Como exposto por Tzempelikos *et al.* (2015), em modelos não conjugados o acoplamento da equação de calor com a equação de difusão de umidade é frequentemente resolvido, introduzindo um termo adicional nas condições de contorno da equação do calor para considerar o calor consumido para a evaporação da água; uma abordagem bastante razoável e preferível do ponto de vista das considerações físicas. Nesses modelos, a transferência de calor e massa na interface ar-produto é simplificada pela aplicação dos coeficientes de transferência convectivos correspondentes nas condições de contorno.

Como exemplo de modelo multifásico, Pang (1996) interpretou o processo de secagem como uma transferência simultânea de calor e massa bidimensional e dinâmica, com equilíbrio termodinâmico em cada ponto da madeira, considerando o movimento de cada fase da umidade e as propriedades físicas da madeira em seu modelo representado pelas Equações 45 e 46.

$$C_P \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \Delta \lambda_{wv} \left(\frac{\partial j_{vy}}{\partial y} + \frac{\partial j_{vz}}{\partial z} \right) \quad (45)$$

$$-\rho \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} \quad (46)$$

Onde C_P é o calor específico da madeira (J/kg.K); ρ é a densidade básica da madeira (kg/m³); T é a temperatura (K); t o tempo de secagem (s); y a coordenada de espaço na direção da largura (m); z é a coordenada de espaço na direção da espessura (m); k_h é a condutividade térmica da madeira úmida (J/m.K); λ_{wv} é o calor de vaporização da água (J/kg); j_y é o fluxo total de umidade na largura (y) que é a soma do fluxo de água livre (j_{fy}) com o fluxo de água absorvida (j_{by}) e o fluxo de vapor (j_{vy}) (kg/m².s); j_z é o fluxo total de umidade na espessura (z) que é a soma do fluxo de água livre (j_{fz}) com o fluxo de água absorvida (j_{bz}) e o fluxo de vapor (j_{vz}) (kg/m².s); e M a umidade local (kg_{água}/kg_{sólido seco}).

Seu modelo foi aplicado à secagem de amostras de madeira de *Pinus radiata* com dimensões de 100 x 50 x 600 mm em um secador de túnel, congeladas durante a noite e depois cortadas em fatias para determinação da umidade. Para a resolução do modelo, foi aplicada a técnica numérica de volumes finitos e verificado através da comparação com

dados experimentais. Os resultados obtidos possuem concordância com os observados experimentalmente.

Kocaeffe *et al.* (2006) apresentaram um modelo tridimensional, representado pelas Equações 47 e 48, para o fenômeno de transferência simultânea de calor e massa para o tratamento de madeira a alta temperatura. A validação do modelo foi realizada através da comparação dos resultados com dados experimentais de amostras de álamo com dimensões de 3,5 x 3,5 x 20 cm sob uma taxa de aquecimento conhecida até 120°C e mantida constante por 30 minutos. O modelo usa as equações de Luikov assumindo a variabilidade das propriedades, e encontraram uma boa concordância com os dados experimentais.

Para a transferência de calor e a transferências de massa, seguem as Equações 47 e 48, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 C_P T] = \bar{\nabla} \left[\left(k_h + \frac{\varepsilon \lambda k_m \delta}{C_m} \right) \bar{\nabla} T + \frac{\varepsilon \lambda k_m}{100 C_m} \bar{\nabla} M \right] \quad (47)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\rho_0 M}{100} \right] = \bar{\nabla} \left[\left(\frac{k_m \delta}{C_m} \right) \bar{\nabla} T + \frac{k_m}{100 C_m} \bar{\nabla} M \right] \quad (48)$$

Onde t é o tempo (s), ρ_0 é a densidade da madeira seca (kg/m^3), C_P é o calor específico da madeira ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$), T é a temperatura (K), k_h é a condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), λ calor latente de evaporação ($\text{J}/\text{kg}_{\text{água}}$), ε é a razão entre o coeficiente de difusão do vapor e o coeficiente de difusão total de umidade, k_m é a condutividade de umidade ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{m}\cdot\text{s}$), δ coeficiente de gradiente térmico ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}\cdot\text{K}$), C_m é a umidade específica ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$) e M é a umidade ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$).

As condições de contorno assumidas são representadas pelas Equações 49 e 50.

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_h (T - T_a) + \frac{(1 - \varepsilon) \lambda \alpha_m}{100 C_m} (M - M_a) \quad (49)$$

$$-\frac{k_h}{100 C_m} \frac{\partial M}{\partial n} = \left(\frac{k_m \delta}{C_m} \right) \frac{\partial T}{\partial n} + \frac{\alpha_m}{100 C_m} (M - M_a) \quad (50)$$

Onde n é a direção espacial (x, y, z), α_h é o coeficiente de transferências de calor convectivo ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), α_m é o coeficiente de transferências de massa convectivo ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), T_a é a temperatura interna do forno (K) e M_a é a umidade interna do forno ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$).

Oumarou, D. Kocafe e Y. Kocafe (2014) estudaram a transferência transiente de calor e massa durante o tratamento térmico da madeira a altas temperaturas, estabelecendo um modelo matemático tridimensional para a conservação de calor e massa. Em seu modelo, as equações médias de Navier-Stokes e equações de concentração, foram acopladas às equações de conservação de energia e massa para a madeira. O sistema foi resolvido numericamente através do software comercial ANSYS CFX-10 e como uso de uma sub-rotina baseada no método de diferenças finitas desenvolvida em FORTRAN. As equações usadas em seu modelo para a transferência de calor e massa na interface fluido-madeira estão representadas pela Equações 51 e 52, respectivamente.

$$\left[k_h \frac{\partial T}{\partial n} \right] = \Delta \lambda_{lv} D \frac{\partial C_f}{\partial n} + k_{hf} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (51)$$

$$\left[\rho_0 D_m \frac{\partial M}{\partial n} \right] = D \frac{\partial C_f}{\partial n} \quad (52)$$

Onde n é a normal que representa os eixos (x, y, z) , k_h é a condutividade térmica da madeira (W/m.K), T é a temperatura (K), $\Delta \lambda_{lv}$ é o calor latente de evaporação (J/kg), D é o coeficiente de difusão do vapor de água no fluido (m^2/s), C_f é a concentração do fluido (kg/m^3), k_{hf} é a condutividade térmica do fluido (W/m.K), ρ_0 densidade da madeira seca (kg/m^3), D_m é o coeficiente de difusão da madeira (m^2/s) e M é a umidade ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$).

Oumarou, D. Kocafe e Y. Kocafe (2014) concluíram que é necessário um tempo de aquecimento suplementar para remover a quantidade desejada de umidade quando o material de madeira tem alta densidade ou alto conteúdo de umidade inicial; porém, essa prática pode aumentar o fornecimento de energia e os custos do processo de aquecimento.

Simo-Tagne *et al.* (2016) modelaram a transferência de calor e massa simultânea na secagem de madeiras tropicais a partir do método de diferenças finitas. Foram usadas amostras de 30 mm de espessura com umidade inicial de 75%. Aplicando uma variação de temperatura de 10 a 33,5°C, verificaram que seriam necessárias pouco mais de 150 horas para chegar a uma umidade de 10%. Em seu modelo, representado pelas Equações 53 e 54, utilizaram alguns parâmetros termofísicos obtidos experimentalmente e outras propriedades obtidas da literatura.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \beta_t D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (53)$$

$$\rho_0 C_P \frac{\partial T}{\partial t} = (k_h + \beta_t \rho (\theta + \lambda) D) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho (\theta + \lambda) D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (54)$$

As condições de contorno as Equações 55 e 56 são:

$$D \frac{\partial M}{\partial x} = h_m (M_{eq} - M) \quad (55)$$

$$k_h \frac{\partial T}{\partial x} = h_c (T_a - T) + \rho_0 \lambda D \frac{\partial M}{\partial x} \quad (56)$$

Onde M é a umidade ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$), t é o tempo de secagem (s), D é o coeficiente de difusão de umidade na madeira (m^2/s), x é a espessura (m), T é a temperatura da madeira (K), β_t é o coeficiente de termomigração ou coeficiente de efeito Soret (K^{-1}), ρ_0 densidade da madeira seca (kg/m^3), ρ densidade da madeira na umidade M (kg/m^3), C_P é a calor específico da madeira ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$), k_h é o condutividade térmica da madeira molhada ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), θ é o calor de dessorção da água absorvida (J/kg), λ é o calor latente de vaporização da água líquida (J/kg), h_m é o coeficiente global de transferência de massa (m/s), M_{eq} é a umidade no equilíbrio ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$), h_c é o coeficiente de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), e T_a é a temperatura do ar (K).

A validação do modelo de Simo-Tagne *et al.* (2016) foi realizada através da comparação dos resultados numéricos com dados obtidos através do modelo de Luikov e dados experimentais. A análise dos resultados demonstrou concordância entre os dados comparados.

De fato, pouquíssimos autores tratam a anisotropia ao modelarem o transporte de calor e umidade durante o processo de secagem de madeira. Essa característica é tida como um fator que dificulta a modelagem, e devido a isso, os autores, em sua maioria, tendem a simplificar o modelo ao ponto de desprezá-la, em alguns casos. É mais comum encontrar trabalhos que tratam da influência da anisotropia na análise da distribuição de tensões mecânicas na madeira durante o seu processo de secagem.

3.4. ANÁLISE EXERGÉTICA DE PROCESSOS DE SECAGEM

A secagem está entre as operações unitárias com maior consumo de energia, devido ao alto calor latente da vaporização e à inerente ineficiência da aplicação de ar quente como o meio de secagem, sendo mais comumente aplicado. Desta forma, os principais interesses da tecnologia de secagem é aumentar a eficiência térmica dos sistemas de secagem, reduzir o consumo de combustíveis e eletricidade e minimizar as emissões de gases de efeito estufa e demais impactos ambientais mantendo uma boa qualidade dos produtos secos (MUJUMDAR, 2006; AGHBASHLO *et al.*, 2013).

A análise energética é uma abordagem básica e tradicional no projeto de vários processos de conversão de energia. No entanto, ela não fornece informações sobre os aspectos de irreversibilidade dos processos termodinâmicos. A análise exergética fornece uma visão mais ampla pois avalia as diferentes formas de energia, e explica a localização das irreversibilidades do processo (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013; TERHOVICS; VEIDENBERGS e BLUMBERGA, 2017).

A exergia é definida com a quantidade máxima de trabalho que pode ser obtida de um fluxo de matéria, calor ou trabalho quando alguma matéria é levada a um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do ambiente natural (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013; AGHBASHLO *et al.*, 2013).

O principal objetivo da análise exergética dos sistemas de secagem é quantificar as fontes de ineficiência, distinguir a qualidade do consumo de energia, selecionar as condições ideais de secagem e reduzir o impacto ambiental dos sistemas de secagem (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013; HATAMI; PAYGANEH; MEHRPANAHI, 2020).

A Figura 6 ilustra a relação entre a exergia, a sustentabilidade e o impacto ambiental. Observa-se que o aumento da eficiência da exergia diminui o impacto ambiental e aumenta a sustentabilidade do processo.

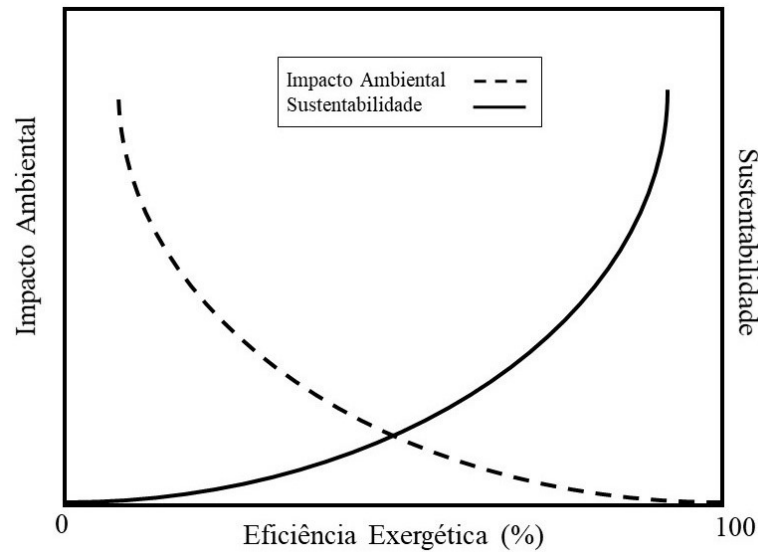


Figura 6 – Ilustração qualitativa da relação entre o impacto ambiental, a sustentabilidade de um processo e sua eficiência exergética.
 Fonte: AGHBASHLO *et al.* 2013 (adaptado).

Aghbashlo e colaboradores (2013) citam que secadores industriais consomem uma parcela importante da energia total utilizada nos processos de fabricação. Uma resposta interessante a esse fato é a tendência ao uso dos conceitos associados à exergia visando a melhoria da qualidade de produtos secos com menor consumo de energia e custo de capital, otimizando os processos de secagem e reduzindo seu impacto ambiental.

Borgnakke e Sonntag (2013) definem a exergia como o valor máximo de trabalho disponível em um dado estado de massa. Sua expressão tem origem nas equações de acúmulo de energia e entropia.

O acúmulo de energia escrito em termos de entalpia (h) é dado pela Equação 57:

$$\frac{dh}{dt} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s + \sum \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} \quad (57)$$

O trabalho no volume de controle é uma função do calor trocado com o ambiente (\dot{Q}_0^{rev}) e o trabalho de eixo (\dot{W}^{rev}) como mostra a Equação 58:

$$-\dot{W}_{VC} = \dot{Q}_0^{rev} - \dot{W}^{rev} \quad (58)$$

O subscrito “0” se refere ao estado morto, e será usado aqui como um estado de referência. As propriedades no estado de referência são constantes. Substituindo a Equação 58 na Equação 57, chegamos à Equação 59:

$$\frac{dh}{dt} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s + \sum \dot{Q}_j + \dot{Q}_o^{rev} - \dot{W}^{rev} \quad (59)$$

Se isolarmos o calor trocado com o ambiente (\dot{Q}_o^{rev}) e desconsiderarmos o trabalho de eixo (\dot{W}^{rev}), que não se aplica ao processo de secagem, temos a Equação 60:

$$\dot{Q}_o^{rev} = -\frac{dh}{dt} + \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{Q}_j \quad (60)$$

A taxa de variação de entropia pode ser descrita pela Equação 61:

$$\frac{ds}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_g \quad (61)$$

Por definição, a entropia gerada (\dot{S}_g) é dada pela Equação 62:

$$\dot{S}_g = \frac{\dot{Q}_o^{rev}}{T_o} \quad (62)$$

Substituindo a Equação 62 na Equação 61 e multiplicando pela temperatura no estado morto (T_o), temos a Equação 63:

$$T_o \frac{ds}{dt} = \sum \dot{m}_e T_o s_e - \sum \dot{m}_s T_o s_s + \sum T_o \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{Q}_o^{rev} \quad (63)$$

Substituindo a Equação 60 na Equação 63, chegamos à Equação 64:

$$T_o \frac{ds}{dt} = \sum \dot{m}_e T_o s_e - \sum \dot{m}_s T_o s_s + \sum T_o \frac{\dot{Q}_j}{T_j} - \frac{dh}{dt} + \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{Q}_j \quad (64)$$

Fazendo as manipulações matemáticas pertinentes chegamos à Equação 67:

$$-\frac{dh}{dt} + T_o \frac{ds}{dt} = -\sum \dot{m}_e h_e + \sum \dot{m}_e T_o s_e + \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_s T_o s_s + \sum T_o \frac{\dot{Q}_j}{T_j} - \sum \dot{Q}_j \quad (65)$$

$$\frac{dh}{dt} - T_o \frac{ds}{dt} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_e T_o s_e - \sum \dot{m}_s h_s + \sum \dot{m}_s T_o s_s + \sum \dot{Q}_j - \sum T_o \frac{\dot{Q}_j}{T_j} \quad (66)$$

$$\frac{d}{dt}(h - T_o s) = \sum \dot{m}_e (h_e - T_o s_e) - \sum \dot{m}_s (h_s - T_o s_s) + \sum \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \quad (67)$$

Considerando a Equação 68:

$$ex = h - T_o s \quad (68)$$

Substituindo na Equação 67 chegamos à expressão que representa o balanço de exergia no sistema, (Equação 69).

$$\frac{dex}{dt} = \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_s ex_s + \sum \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \quad (69)$$

Na descrição do balanço de exergia no processo de secagem de madeira a geração de entropia foi considerada nula ($\dot{S}_g = 0$) pois o processo é considerado reversível. Além disso, o sistema é descrito somente em termos de exergia física, desconsiderando qualquer influência da exergia química associada ao processo.

A eficiência de exergia (ψ) da câmara de secagem ou a eficiência racional de exergia pode ser calculada usando a Equação 70:

$$\psi = 1 - \frac{Ex_s}{Ex_e} \quad (70)$$

Dincer e Sahin (2004) definiram a eficiência de exergia do processo de secagem como a razão entre o uso de exergia (investimento) na secagem do produto e a exergia do ar de secagem fornecido ao sistema como ilustrado na Equação 71.

$$\psi = \frac{\text{Investimento em exergia na evaporação da umidade do produto}}{\text{Exergia fornecida pelo ar de secagem}} \cdot 100 \quad (71)$$

Mujumdar (2006) explica que a análise exérgica de processos e sistemas de secagem pode ser categorizada com base em diferentes aspectos. Um agrupamento pode ser derivado dos critérios de classificação dos secadores, incluindo modo de operação, tipo de entrada de calor, estado do material no secador, pressão operacional, meio de secagem, temperatura de secagem, movimento relativo entre o meio de secagem e os sólidos de secagem, número de estágios e tempo de secagem. A secagem convencional de madeira é realizada em uma câmara isolada de aquecimento sob um processo intermitente o que a classifica como uma secagem em lote.

4. METODOLOGIA

4.1. DELINEAÇÃO DA ESPÉCIE ESTUDADA

Para a delimitação de qual espécie de madeira deveria ser considerada objeto de estudo neste trabalho assumiu-se, inicialmente, o volume de aplicação e o consumo de espécies em território nacional. Verificou-se que, segundo a Sociedade Brasileira de Silvicultura (2018), das espécies mais exploradas no Brasil, dentre as folhosas, destacam-se os *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus grandis*, e dentre as coníferas, os *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, sendo Minas Gerais o estado brasileiro com maior área total de florestas plantadas, em torno de 1.364.538 ha de eucalipto e 37.252 ha de pinus, de acordo com o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (2019). Diferente da madeira de eucalipto, geralmente usada pela indústria carvoeira, papel e celulose, e como lenha industrial, a madeira de pinus é, em sua grande maioria, destinada à indústria madeireira onde é matéria prima na produção de portas, marquises, móveis, pisos, entre outras aplicações.

Devido à abundância de dados de propriedades da madeira de *Pinus elliottii* e também por ser, entre as espécies de coníferas cultivadas no Brasil, a que apresenta maior percentual de exportação e consumo, optou-se por delimitar o trabalho ao estudo de seu processo de secagem.

4.2. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS TERMOFÍSICOS E OPERACIONAIS, CORRELAÇÕES E DADOS EXPERIMENTAIS

Dentre as propriedades intrínsecas da madeira, destacam-se, a densidade, o coeficiente de transferência de massa, a condutividade térmica e o calor específico, necessárias na aplicação do modelo matemático a ser usado. Outros fatores são relacionados às condições operacionais como os coeficientes de transferência de calor e de massa por convecção. As seções 3.1 e 3.2 deste trabalho trazem diversas considerações e correlações no que diz respeito a esses fatores, mostrando que há autores que, em determinadas situações, as consideram constantes no decorrer do processo de secagem. Porém, como discutido nas seções anteriores, a maioria destas propriedades são dadas como funções da temperatura e da umidade do sistema. Aplicou-se, em um primeiro momento, valores constantes para tais propriedades, afim de simplificar sua aplicação e testar o método proposto.

Em um segundo momento, após a verificação da eficiência da metodologia, adotou-se a capacidade térmica como dependente das condições do sistema; assim, refinando os resultados e aproximando o modelo da realidade. Além disso, através desta abordagem se torna possível a predição de propriedades termodinâmicas, como a entalpia e a entropia do processo.

Para uma melhor identificação dos resultados dos testes realizados nas diferentes fases do trabalho, as etapas serão referenciadas como Simulação 1, Simulação 2 e Simulação 3, como sintetizado no Quadro 5.

Quadro 5 – Organização das etapas do trabalho.

Etapa	Denominação	Descrição
Primeira	Simulação 1	Série de simulações realizadas com algoritmo que considera constante os valores das propriedades e dos parâmetros operacionais.
Segunda	Simulação 2	Série de simulações realizadas com algoritmo capaz de prever propriedades termodinâmicas ao considerar C_p variável e os demais valores das propriedades e dos parâmetros operacionais constantes.
Terceira	Simulação 3	Série de simulações realizadas com algoritmo que admite parâmetros operacionais variáveis ao considerar diferentes cronogramas de secagem.

Diversas fontes da literatura (PLUMB *et al.*, 1984; MELLADO, 2007; BATISTA, 2009; ELEOTÉRIO, 2009; SILVA *et al.*, 2010; LOPES *et al.*, 2011; PRIADI; HIZIROGLU, 2012; SEVERO; CALONEGO; SANSÍGOLO, 2012; SUSIN, 2012; POLETTO; ORNAGHI; ZATTERA, 2014; PERTUZZATTI *et al.*, 2016; MENDES, 2017) reportam dados experimentais de suas espécies estudadas e serviram como base para a validação do modelo empregado neste trabalho.

4.3. ADAPTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO E RESOLUÇÃO NUMÉRICA

Este trabalho aborda o fenômeno de transferência simultânea de calor e massa como intrinsecamente difusivo, sem desconsiderar as condições externas de secagem, como a temperatura e a umidade relativa do fluxo de ar no interior da estufa.

Na seção 3.3, são apresentados alguns modelos aplicados ao processo de secagem de madeira e suas devidas considerações. Dentre os modelos apresentados o que melhor se adequa com a proposta deste trabalho é o modelo apresentado por Martinović, Horman e Demirdžić (2001). Contudo foram necessárias considerações e adaptações para que os objetivos deste estudo fossem alcançados.

Para o equacionamento matemático do processo as seguintes considerações foram assumidas:

(i) A madeira é um meio poroso capilar que consiste principalmente de uma matriz de um compósito polimérico celular de baixa densidade, água livre, água ligada e vapor de água.

(ii) O processo de secagem da madeira é caracterizado pelo fluxo difusivo transiente, sendo este o único mecanismo de transporte de água dentro do sólido e sendo regido pelo gradiente de umidade.

(iii) Foi considerada a transferência de calor e massa ocorrendo somente ao longo da espessura, com o fluxo de umidade ocorrendo na direção do centro para a superfície da peça e o fluxo de calor na direção da superfície ao centro.

(iv) Durante a secagem, o tamanho e a estrutura interna da madeira não se alteram, desconsiderando, desta forma, alterações no fluxo devido às retrações volumétricas e variações da densidade da madeira durante o processo de secagem.

(v) A temperatura do ambiente interno da estufa, assim como a velocidade e a umidade relativa do ar não se alteram com a temperatura e umidade da madeira.

A equação de balanço de energia é descrita na Equação 72:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = -\frac{\partial q}{\partial x} \quad (72)$$

O fluxo de energia é definido pela soma de um primeiro termo relacionado à condução segundo a Lei de Fourier e outro relacionado ao consumo de energia ao evaporar a parcela da massa que se difunde na forma de vapor como observa-se na Equação 73.

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \lambda j \quad (73)$$

Onde k_h é condutividade térmica (W/m.K), ε é a razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade, λ é o calor latente de vaporização (J/kg) e j é o fluxo de massa (kg/m².s).

A Equação 74 descreve o balanço de massa para o processo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_m M) = -\frac{\partial j}{\partial x} \quad (74)$$

O fluxo de massa (j) é dado pela Equação 75 onde apresenta um primeiro termo relacionado à difusão de acordo com a primeira Lei de Fick e um segundo relacionado à difusão térmica; este último como resultado do efeito Soret.

$$j = -k_m \frac{\partial M}{\partial x} - \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} \quad (75)$$

Sendo k_m o coeficiente de transferência de massa ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{m.s}$) e δ o coeficiente do gradiente de temperatura (K^{-1}).

A descrição do processo de transferência de calor e massa na secagem da madeira parte então das equações de balanço de energia e de massa para o sistema representado pelas Equações 76 e 77 respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = -\frac{\partial q}{\partial x} \quad (76)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_m M) = -\frac{\partial j}{\partial x} \quad (77)$$

Onde t é o tempo (s), ρ é a densidade da madeira em base seca (kg/m^3), C_p é o calor específico ($\text{J}/\text{kg.K}$), T é a temperatura (K), q é o fluxo de calor (W/m^2), x é a direção espacial contemplada pelo modelo (m), C_m é a umidade específica ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$), M é a umidade em base seca ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); e j é o fluxo de massa ($\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$).

Substituindo a equação do fluxo de massa (Equação 75) na equação do fluxo de calor (Equação 73), se têm:

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \lambda \left(-k_m \frac{\partial M}{\partial x} - \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (78)$$

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} - \varepsilon \lambda k_m \frac{\partial M}{\partial x} - \varepsilon \lambda \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} \quad (79)$$

$$q = -(k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m) \frac{\partial T}{\partial x} - \varepsilon \lambda k_m \frac{\partial M}{\partial x} \quad (80)$$

Substituindo a equação do fluxo de calor (Equação 80) na equação do balanço de energia (Equação 72) e considerando constante os demais parâmetros com exceção da umidade M e da temperatura T , chega-se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = -\frac{\partial}{\partial x} \left[-(k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m) \frac{\partial T}{\partial x} - \varepsilon \lambda k_m \frac{\partial M}{\partial x} \right] \quad (81)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \lambda k_m \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (82)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = (k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \lambda k_m \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (83)$$

Inserindo a expressão para o fluxo mássico (Equação 75) na equação do balanço de massa (Equação 74), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_m M) = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_m \frac{\partial M}{\partial x} - \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (84)$$

$$\rho C_m \frac{\partial M}{\partial t} = k_m \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \delta k_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (85)$$

Para resolução dos modelos de transferência de energia (Equação 83) e massa (Equação 85), condições iniciais e de contorno são necessárias. Para as condições iniciais, em $t = 0$, considera-se que o conteúdo de umidade e a temperatura são uniformes em toda a amostra e são definidos como iguais à umidade inicial conhecida e temperatura inicial da madeira, podendo serem expressos nas Equações 86 e 87.

$$T(0, x) = T_0 \quad (86)$$

$$M(0, x) = M_0 \quad (87)$$

Para todos os valores de t em $x = L$ (a superfície da madeira), as condições de contorno da transferência de calor e umidade são expressas pelas Equações 88 e 89.

$$k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_h (T - T_a) + (1 - \varepsilon) \lambda \alpha_m (M - M_a) = 0 \quad (88)$$

$$k_m \frac{\partial M}{\partial x} + \alpha_m (M - M_a) + \delta k_m \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (89)$$

Na Equação 88, o calor que chega à superfície por convecção é conduzido para dentro do material ou é consumido para evaporar a umidade na superfície. Na Equação 89, a umidade que chega à superfície por difusão e pelo efeito Soret é removida por convecção.

Para o centro da peça de madeira ($x = 0$), considera-se a condição de simetria representada pelas Equações 90 e 91.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (90)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (91)$$

Assim, o modelo matemático proposto consiste num sistema de equações diferenciais parciais acopladas (Equações 92 e 93) e não possui solução analítica.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(k_h + \varepsilon \lambda \delta k_m) \partial^2 T}{\rho C_p} + \frac{\varepsilon \lambda k_m \partial^2 M}{\rho C_p} \\ \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{k_m \partial^2 M}{\rho C_m} + \frac{\delta k_m \partial^2 T}{\rho C_m} \end{array} \right. \quad (92)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(k_h + \varepsilon \lambda \delta k_m) \partial^2 T}{\rho C_p} + \frac{\varepsilon \lambda k_m \partial^2 M}{\rho C_p} \\ \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{k_m \partial^2 M}{\rho C_m} + \frac{\delta k_m \partial^2 T}{\rho C_m} \end{array} \right. \quad (93)$$

A solução do modelo é obtida através da aplicação do método numérico de diferenças finitas descrito por Chapra e Canale (2016) e apresentado na seção 5.1.

A validação do modelo adaptado para a simulação foi realizada através da comparação com dados da literatura, restringindo a trabalhos que estudaram espécies de madeira com propriedades similares e que usaram condições operacionais semelhantes às consideradas neste estudo. Os resultados da validação podem ser conferidos na Seção 5.3.

4.4. ADMISSÃO DO CRONOGRAMA DE SECAGEM

A admissão do cronograma de secagem foi realizada considerando dois tipos comuns de programações de estufa: o agendamento baseado na umidade média da madeira e o agendamento baseado no tempo de secagem.

Na elaboração dos cronogramas de secagem foram consideradas condições típicas encontradas no processo convencional de secagem. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os cronogramas admitidos nas simulações. As etapas de uniformização e condicionamento não foram consideradas por dependerem da umidade final desejada e por influenciarem em parâmetros que não são complementados na modelagem utilizada. Os programas foram construídos baseando-se nas informações apresentadas por Andrade (2000), Elustondo, Oliveira e Avramidis (2010) e Santos *et al.* (2017).

Para os programas testados foi considerado que a ventilação interna da câmara foi mantida constante no decorrer do processo sob uma velocidade de 2 m/s.

Os modelos matemáticos usados na descrição dos programas de secagem, assim como a implementação desses para a realização da simulação computacional são explicadas na Seção 5.1.3 e seus resultados podem ser consultados na Seção 5.5.

Tabela 1 – Cronograma de secagem baseado na umidade média da peça.

Etapa	Temperatura (°C)		Umidade (%)	
	Bulbo Seco	Bulbo Úmido	Relativa	Equilíbrio
Aquecimento	56	55	99,9	24,5
100 – 80	60	58	73,5	11,3
80 – 70	64	58	60,1	8,3
70 – 60	68	57	46,8	6,2
60 – 50	72	57	38,6	5,1
50 – 40	76	56	30,1	4
40 – 30	80	56	25	3,3
30 – 20	84	55	19,6	2,7
20 – 10	88	54	15,3	2,1
10 – 5	92	62	24,7	3

Tabela 2 – Cronograma de secagem baseado no tempo.

Etapa	Temperatura (°C)		Umidade (%)	
	Bulbo Seco	Bulbo Úmido	Relativa	Equilíbrio
0 - 8h	56	60	99,9	24,5
8 - 16h	60	58	73,5	11,3
16 - 28h	64	58	60,1	8,3
28 - 40h	68	57	46,8	6,2
40 - 52h	72	57	38,6	5,1
52 - 64h	76	56	30,1	4
64 - 76h	80	56	25	3,3
76 - 88h	84	55	19,6	2,7
88 - 94h	88	54	15,3	2,1
94 – 100h	92	62	24,7	3
100 - 120h	92	42	17,4	2,9

4.5. PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Para a análise termodinâmica foram considerados como componentes das equações de balanço os dados de temperatura, entalpia e entropia associados ao centro e a superfície da peça de madeira, tendo como estado de referência a pressão e a temperatura ambiente (101,325 kPa e 25°C). O balanço de exergia no sistema é calculado a partir da Equação 69. Sua análise foi realizada avaliando seu comportamento em relação a admissão dos dois

tipos de cronograma de secagem testados neste trabalho, o cronograma baseado na umidade média da madeira e o cronograma baseado no tempo de secagem, comparando-os com o comportamento observado no processo na ausência de um cronograma e secagem.

A eficiência exergética foi calculada através da Equação 70, assim como admitido por Colak e Hepbasli (2007) e Corzo *et al.* (2008) definida com base na utilidade do processo. Isto é, a quantidade de exergia fornecida foi a produtividade utilizada para a evaporação da umidade dos produtos que estão sendo secos, como explicado por Dincer (2011).

Os modelos e equações utilizados para essa análise foram apresentados na Seção 3.4 e seus resultados podem ser consultados na Seção 5.6.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. EQUACIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

5.1.1. Modelagem e discretização

Como demonstrado na Seção 4.3 o modelo matemático é dado por um sistema de equações diferenciais parciais acopladas, representado pelas Equações 92 e 93.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(k_h + \varepsilon\lambda\delta k_m)}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon\lambda k_m}{\rho C_p} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \end{array} \right. \quad (92)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{k_m}{\rho C_m} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\delta k_m}{\rho C_m} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \end{array} \right. \quad (93)$$

Para solução do modelo aplica-se o método das linhas que se baseia na discretização parcial (somente das derivadas espaciais) e na integração das derivadas de primeira ordem em função do tempo. A solução numérica é obtida através da discretização das equações diferenciais parciais na direção espacial pelo Método de Diferenças Finitas com aproximações por diferenças finitas centrais de segunda ordem aplicando a Equação 94 às equações do modelo como descrito por Chapra e Canale (2016).

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{y_{i+1,j} - 2y_{i,j} + y_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (94)$$

Aplicando a Equação 94 às Equações 92 e 93 obtém-se o modelo discretizado representado pelas Equações 95 e 96.

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{(k_h + \varepsilon\lambda\delta k_m)}{\rho C_p} \left(\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{\varepsilon\lambda k_m}{\rho C_p} \left(\frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (95)$$

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{k_m}{\rho C_m} \left(\frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{\delta k_m}{\rho C_m} \left(\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (96)$$

Estas equações podem ser diretamente empregadas nos pontos centrais ($i = 2$ a $i = N-1$) sendo N o número de pontos de discretização na direção espacial e neste trabalho assumido como $N = 41$, baseado na análise de convergência de malha. Para o tratamento do contorno, foram empregados pontos fictícios, conforme apresentado na Figura 7.

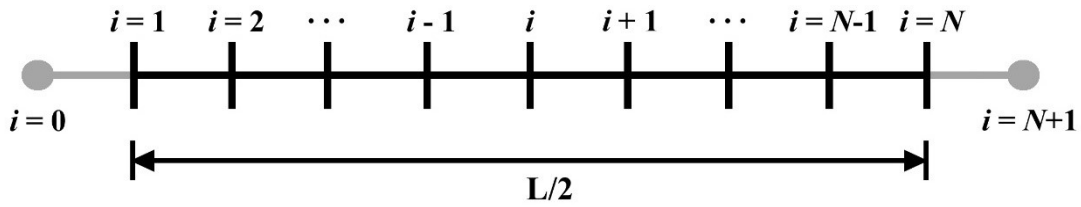


Figura 7 – Representação da malha considerada.
Fonte: Acervo próprio, 2019.

Para as equações das condições de contorno, foi aplicado o método de diferenças finitas centrais de primeira ordem representado pela Equação 97.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1,j} - y_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (97)$$

Para as Equações 88 e 89 com derivadas espaciais no ponto $i = N$, considerando pontos fictícios, como ilustrado na Figura 7, aplica-se a Equação 97 obtendo assim as Equações 98 e 99 que expressam os valores de temperatura e umidade na superfície da peça.

Para $i = N$

$$T_{N+1} = T_{N-1} - 2\Delta x \left[\frac{\alpha_h}{k_h} (T_N - T_a) + \frac{(1 - \varepsilon)\lambda\alpha_m}{k_h} (M_N - M_a) \right] \quad (98)$$

$$M_{N+1} = M_{N-1} - 2\Delta x \left[\frac{\alpha_m}{k_m} (M_N - M_a) + \delta \left(\frac{T_{N+1} - T_{N-1}}{2\Delta x} \right) \right] \quad (99)$$

Os valores calculados para T_{N+1} e M_{N+1} pelas Equações 98 e 99 são substituídos nas equações 95 e 96 e tem-se as expressões para as derivadas temporais no ponto $i = N$.

Para as condições de contorno no centro da peça, representadas pelas Equações 90 e 91, um ponto fictício, de índice $i = 0$, localizado antes do ponto central é admitido, como ilustrado na Figura 7. A discretização das Equações 90 e 91 por diferenças finitas para as derivadas espaciais resulta nas igualdades 100 e 101.

Para $i = 1$

$$T_{i=0} = T_2 \quad (100)$$

$$M_{i=0} = M_2 \quad (101)$$

A substituição dessas igualdades nas Equações 95 e 96 gera as equações para derivadas temporais no ponto central ($i = 1$).

O algoritmo para resolução do problema foi implementado no software MATLAB[®]. O sistema de equações diferenciais ordinárias, obtido pela discretização das Equações 92 e 93, foi integrado no tempo através do uso da função *ode23*. Um fluxograma resumindo o algoritmo é apresentado na Figura 8. Os fluxogramas apresentados neste trabalho para representar os algoritmos foram montados seguindo as instruções da ISO 5807:1985 (E) para normatização de diagramas de blocos e pseudocódigos de programação.

Na Figura 8 o fluxograma representa os passos que o algoritmo segue para simulação do problema. O algoritmo é composto por duas funções. A primeira (à esquerda na Figura 8) é a função responsável por definir as condições e os parâmetros do processo a ser simulado, criar a matriz para armazenar os dados, integrar as equações resultantes da segunda função ao longo do tempo e imprimir os resultados na forma de gráficos. A segunda função é responsável pela aplicação do método de diferenças finitas no modelo matemático.

Partindo da primeira função do algoritmo, inicialmente é declarado o número de pontos de discretização (N) para o procedimento numérico. Como será mostrado na seção 5.2 o valor admitido para as simulações foi de 41 pontos de acordo com a análise de convergência da malha. Em seguida inicia-se uma estrutura de repetição condicional do tipo “*for*” onde as condições iniciais do processo são declaradas e é proposta uma matriz inicial para armazenamento dos dados da simulação. Seguindo o fluxograma, temos a definição das condições iniciais da peça de madeira (temperatura e umidade iniciais e

espessura) e também dos parâmetros operacionais. No próximo passo definimos o tempo (t) de secagem admitido na simulação, o número de passos no tempo e a tolerância da função de integração (*ode23*), para essa, por sua vez, foi usada a função *odeset* responsável por determinar os valores de 10^{-5} para tolerância relativa (Reltol) e 10^{-6} para a tolerância absoluta (Adstol). Neste ponto, há comunicação com a segunda função (à direita na Figura 8) onde o modelo discretizado é solucionado. Os dados da discretização no espaço e da integração no tempo preenchem, então, a matriz de dados e são apresentados na forma de gráficos ou se o usuário desejar, no formato de uma matriz.

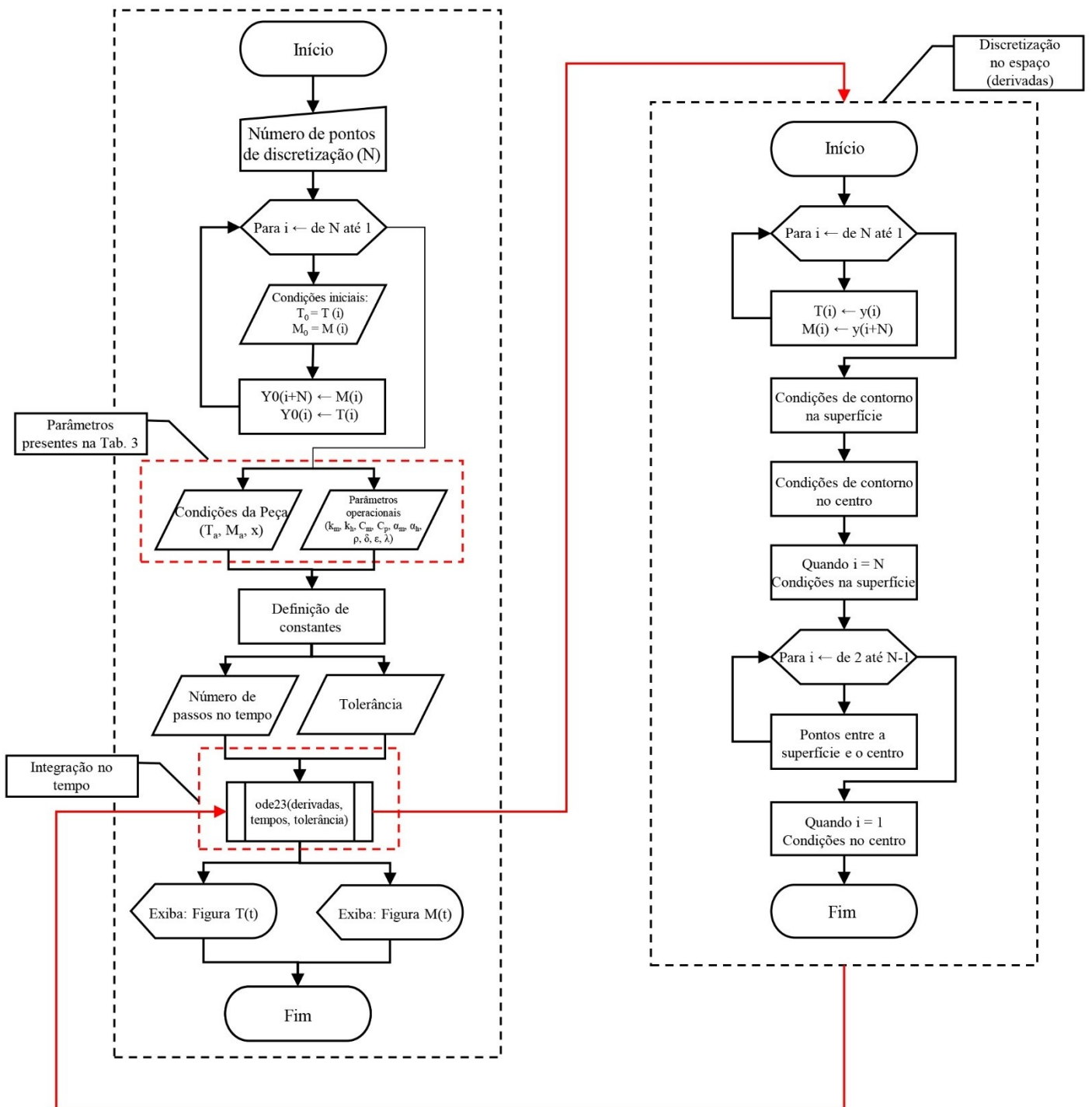


Figura 8 – Fluxograma do algoritmo da Simulação 1.
 Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.1.2. Predição de propriedades termodinâmicas

Muitas propriedades físicas da madeira são dependentes das condições de temperatura e umidade as quais o material se encontra. Alguns parâmetros apresentam variações em escalas tão pequenas que sua alteração ao longo do processo não interfere nos resultados. Porém, outros apresentam variações que podem interferir na acurácia das predições realizadas. Na intenção de superar essa limitação e aproximar os resultados da realidade foi considerada a variação da capacidade térmica da madeira. Logo, torna-se possível também prever as variações de propriedades termodinâmicas da madeira, como a entalpia, a entropia e a exergia no decorrer do processo.

Partindo do modelo para transferência de energia dado pela Equação 102.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = (k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \lambda k_m \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (102)$$

Considerando como constantes C_m , ρ , k_h , ε , λ , k_m e δ e tendo como variáveis no processo T , M e C_p , chega-se à Equação 103.

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_p T) = \frac{(k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m)}{\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \lambda k_m}{\rho} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (103)$$

Substituindo $(C_p T)$ por h tem-se a Equação 104.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{(k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m)}{\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \lambda k_m}{\rho} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (104)$$

O calor específico (C_p) da madeira é uma função da umidade e da temperatura como foi mostrado nas Equações 26 a 29 do Quadro 3.

Fazendo as substituições pertinentes, chega-se à expressão algébrica:

$$C_p = \left(\frac{1}{1 + 0,01M} \right) [(0,1031 + 0,003867T) + 0,01M(-2 \cdot 10^{-12}T^5 + 4,39 \cdot 10^{-9}T^4 - 3,56 \cdot 10^{-6}T^3 + 1,4327 \cdot 10^{-3}T^2 - 285,6 \cdot 10^{-3}T + 26,776)] + [M(-0,06191 + 2,36 \cdot 10^{-4}T - 1,33 \cdot 10^{-4}M)] \quad (105)$$

Podemos chegar à expressão que define a entalpia (h) ao integrarmos o calor específico (C_p) em função da temperatura (T), com na Equação 106.

$$\Delta h = h^{ref} + \int_{T_{ref.}}^{T_0} C_p(T, M) dT \quad (106)$$

A entalpia de referência ($h^{ref.}$) pode ser considerada como zero uma vez que se deseja apenas analisar o comportamento da entalpia no decorrer do processo. Logo, substituindo C_P pela expressão que o define.

$$\Delta h = \int_{T_{ref.}}^{T_0} \left(\frac{1}{1 + 0,01M} \right) [(0,1031 + 0,003867T) + 0,01M(-2 \cdot 10^{-12}T^5 + 4,39 \cdot 10^{-9}T^4 - 3,56 \cdot 10^{-6}T^3 + 1,4327 \cdot 10^{-3}T^2 - 285,6 \cdot 10^{-3}T + 26,776)] + [M(-0,06191 + 2,36 \cdot 10^{-4}T - 1,33 \cdot 10^{-4}M)] dT \quad (107)$$

Resolvendo a integral obtém-se:

$$\Delta h = \left(\frac{1}{1 + 0,01.M} \right) \{0,1031(T_0 - T_{ref.}) + 0,0019335(T_0^2 - T_{ref.}^2) + 0,01M[26,776(T_0 - T_{ref.}) + 0,1428(T_0^2 - T_{ref.}^2) + 4,7757 \cdot 10^{-4}(T_0^3 - T_{ref.}^3) + 8,9 \cdot 10^{-7}(T_0^4 - T_{ref.}^4) + 8,78 \cdot 10^{-10}(T_0^5 - T_{ref.}^5) - 3,3 \cdot 10^{-12}(T_0^6 - T_{ref.}^6)]\} + 10^{-6}M(T_0 - T_{ref.})[-133M + 118(T_0 - T_{ref.}) - 61910] \quad (108)$$

Desta forma o modelo é dado pelas duas equações diferenciais parciais para descrição da transferência simultânea de energia e massa, respectivamente, e pela expressão algébrica que define a variação de entalpia, compondo um modelo dado por um sistema de equações algébrico-diferenciais como mostrado nas Equações 109, 110 e 111.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{(k_h - \varepsilon \lambda \delta k_m)}{\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \lambda k_m}{\rho} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (109)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{k_m}{\rho C_m} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (110)$$

$$\Delta h = \left(\frac{1}{1 + 0,01.M} \right) \{0,1031(T_0 - T_{ref.}) + 0,0019335(T_0^2 - T_{ref.}^2) + 0,01M[26,776(T_0 - T_{ref.}) + 0,1428(T_0^2 - T_{ref.}^2) + 4,7757 \cdot 10^{-4}(T_0^3 - T_{ref.}^3) + 8,9 \cdot 10^{-7}(T_0^4 - T_{ref.}^4) + 8,78 \cdot 10^{-10}(T_0^5 - T_{ref.}^5) - 3,3 \cdot 10^{-12}(T_0^6 - T_{ref.}^6)]\} + 10^{-6}M(T_0 - T_{ref.})[-133M + 118(T_0 - T_{ref.}) - 61910] \quad (111)$$

Um processo semelhante pode ser realizado se optarmos por analisar a variação da entropia. Partindo da Equação 112:

$$\Delta s = s^{ref.} + \int_{T_{ref.}}^{T_0} \frac{C_P(T, M)}{T} dT \quad (112)$$

A entropia de referência ($s^{ref.}$) também pode ser considerada como zero, assim como fizemos com a entalpia de referência, pois desejamos apenas analisar o comportamento da entropia no decorrer do processo. Logo, substituindo C_P pela expressão que o define.

$$\Delta s = \int_{T_{ref.}}^{T_0} \left(\frac{1}{1 + 0,01M} \right) [(0,1031 + 0,003867T) + 0,01M(-2 \cdot 10^{-12}T^5 + 4,39 \cdot 10^{-9}T^4 - 3,56 \cdot 10^{-6}T^3 + 1,4327 \cdot 10^{-3}T^2 - 285,6 \cdot 10^{-3}T + 26,776)] + [M(-0,06191 + 2,36 \cdot 10^{-4}T - 1,33 \cdot 10^{-4}M)] \frac{dT}{T} \quad (113)$$

Resolvendo a integral, obtemos:

$$\Delta s = \left(\frac{1}{1 + 0,01M} \right) \left\{ 0,1031 \left(\ln \frac{T_0}{T_{ref.}} \right) + 0,003867(T_0 - T_{ref.}) + 0,01M \left[-4 \cdot 10^{-13}(T_0^5 - T_{ref.}^5) + 1,1 \cdot 10^{-9}(T_0^4 - T_{ref.}^4) - 1,19 \cdot 10^{-6}(T_0^3 - T_{ref.}^3) + 7,16 \cdot 10^{-4}(T_0^2 - T_{ref.}^2) - 285,6 \cdot 10^{-3}(T_0 - T_{ref.}) + 26,779 \left(\ln \frac{T_0}{T_{ref.}} \right) \right] \right\} - 0,06191M \left(\ln \frac{T_0}{T_{ref.}} \right) + 2,36 \cdot 10^{-4}M(T_0 - T_{ref.}) - 1,33 \cdot 10^{-4}M^2 \left(\ln \frac{T_0}{T_{ref.}} \right) \quad (114)$$

Formulação do algoritmo (Simulação 2)

A resolução do modelo também se dá através da aplicação do método das linhas. No algoritmo para resolução do problema, implementado em MATLAB®, o sistema de equações algébrico-diferenciais, obtido pela discretização das Equações 109, 110 e 111 ou 114, é solucionado no tempo através do uso da função *ode15i*. Foram criadas duas versões do algoritmo para a Simulação 2, uma para predição da variação da entalpia e outra para predição da variação da entropia. Um fluxograma resumindo os algoritmos usado para a Simulação 2 é apresentado na Figura 9.

O algoritmo apresentado na Figura 9 é similar ao apresentado da Figura 8, porém com algumas adaptações como a mudança na posição da estrutura “*for*”, responsável pela geração e alocação de matrizes, para uma posição posterior à definição dos parâmetros operacionais, o que, dentro da estrutura do código, fez com que reduzisse o tempo de processamento do programa. Houve também a inserção de um termo que amplia o tamanho da matriz de dados para admitir os dados de entalpia ou entropia. A função *ode23* foi substituída pela função *ode15i* usada como solucionador de equações algébrico-diferenciais de índice 1. Na segunda função (representada à direita na Figura 9) foram adicionados os termos e equações associados à determinação da variação da entalpia ou entropia.

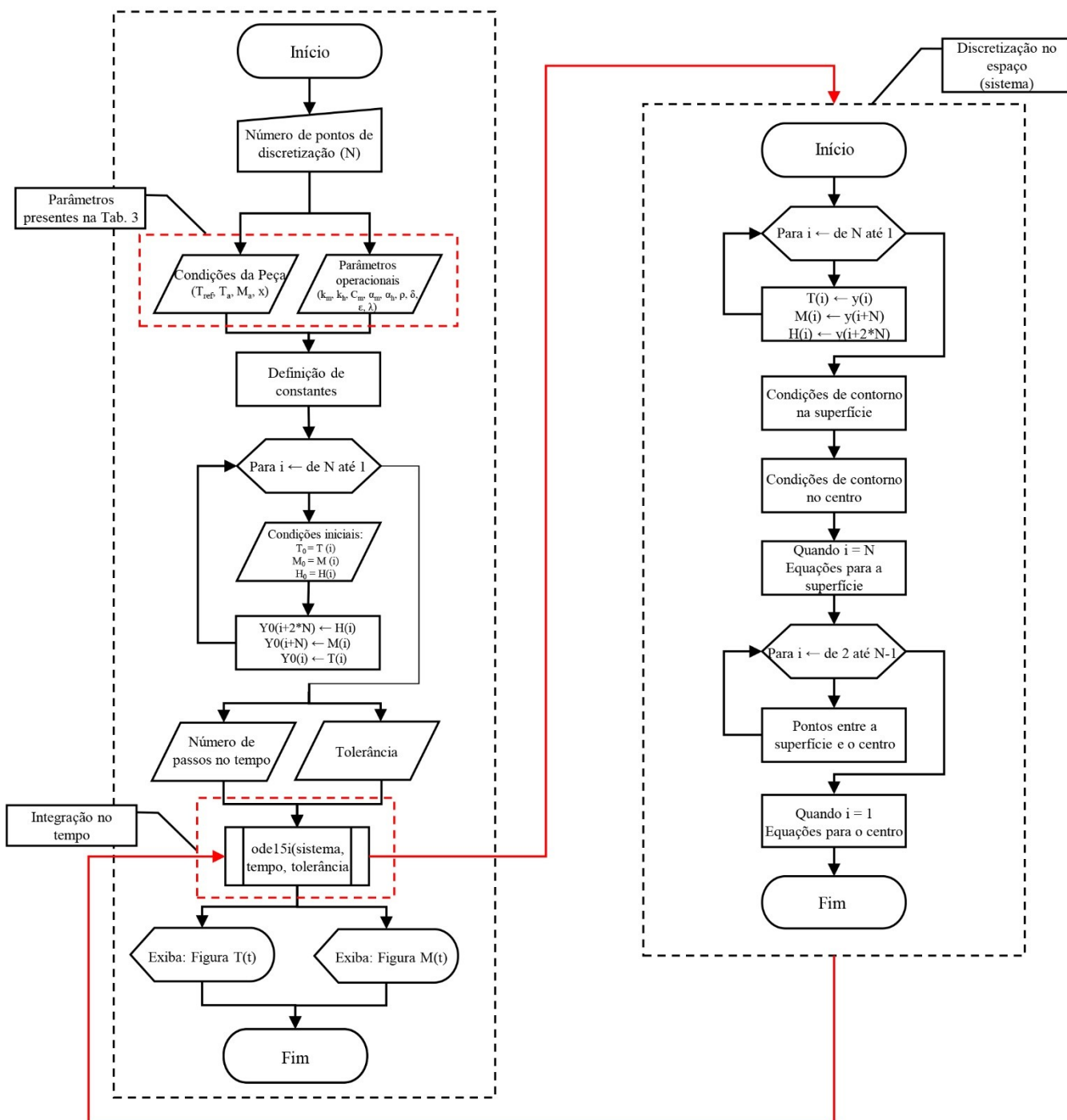


Figura 9 – Fluxograma do algoritmo da Simulação 2 para obtenção dos dados de entalpia ou entropia. Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.1.3. Implementação dos cronogramas de secagem

Por definição, um cronograma de secagem trata-se da variação de parâmetros operacionais, no caso a temperatura (T_a) e a umidade (M_a) do ar no interior da estufa, em função de algum parâmetro base. Como explicado na Seção 4.3, este trabalho admitiu dois tipos de cronogramas de secagem: um que considera como parâmetro base para a variação das condições operacionais a umidade média da madeira (M_m); e outro que considera como parâmetro base o tempo (t) de secagem.

O algoritmo calcula, para cada passo no tempo, valores de umidade para N pontos no espaço entre o centro e a superfície da peça de madeira. No algoritmo baseado na umidade média (M_m), a mesma é calculada a partir da Equação 115.

$$M_m = \left[\frac{M_1 + M_N}{2} + \sum_{i=2}^{N-1} M_i \right] / (N - 1) \quad (115)$$

Como apresentado da Tabela 1, no cronograma de secagem, para cada intervalo de umidade média é estabelecido um valor para a temperatura e para a umidade do ar no interior da estufa. A Tabela 1 possui 10 intervalos de valores de referência de umidade média e estabelece as condições operacionais do ar para cada um desses intervalos.

No algoritmo, a transição da T_a e da M_a entre cada intervalo de umidade média é definida através da implementação das Equações 116 e 117.

$$T_a(M_m) = T_i + (T_{i+1} - T_i) \cdot \frac{(M_m - M_j)}{(M_{j+1} - M_j)} \quad (116)$$

$$M_a(M_m) = M_i + (M_{i+1} - M_i) \cdot \frac{(M_m - M_j)}{(M_{j+1} - M_j)} \quad (117)$$

Com i e j nas Equações 116 e 117 variando de 1 a 10 de acordo com os valores pré-estabelecidos na Tabela 1 para as condições operacionais em cada intervalo de umidade média da peça de madeira, onde o índice j refere-se ao valor de referência da M_m e o índice i refere-se à condição operacional atribuída àquele intervalo.

Para o cronograma baseado no tempo (t) de secagem a Tabela 2 apresenta as condições operacionais do ar para cada um dos 11 intervalos de tempo considerados. A variação da T_a e da M_a na transição de um intervalo para outro é dada pelas Equações 118 e 119.

$$T_a(t) = T_i + (T_{i+1} - T_i) \cdot \frac{(t - t_{j+1})}{(t_{j+1} - t_j)} \quad (118)$$

$$M_a(t) = M_i + (M_{i+1} - M_i) \cdot \frac{(t - t_{j+1})}{(t_{j+1} - t_j)} \quad (119)$$

Com i e j nas Equações 118 e 119 variando de 1 a 11, onde o índice j refere-se ao intervalo de tempo considerado e o índice i refere-se à condição operacional atribuída àquele intervalo de tempo.

Formulação do algoritmo (Simulação 3)

Para implementação do cronograma de secagem no algoritmo foram criadas duas novas funções, sendo uma estabelecendo a variação da umidade do ar no interior da estufa (M_a) e outra para a variação da temperatura interna da câmara de secagem (T_a). Essas funções foram aplicadas em duas versões do algoritmo, uma tendo M_a e T_a em função do tempo (t) e outra em função da umidade média da peça de madeira (M_m). O algoritmo aciona essas funções ao fazer uso das condições de contorno da superfície na resolução do modelo discretizado. Um algoritmo típico das funções do cronograma é ilustrado na Figura 10 na forma de um fluxograma.

No fluxograma apresentado na Figura 10 é possível observar que é realizado um teste do tipo “if” para cada valor de t admitido do decorrer da simulação, atribuindo um valor para as condições operacionais T_a e M_a no intervalo de tempo contido na estrutura do código e promovendo uma variação gradativa desses parâmetros. O mesmo raciocínio é usado no algoritmo para o cronograma baseado na umidade média da madeira.

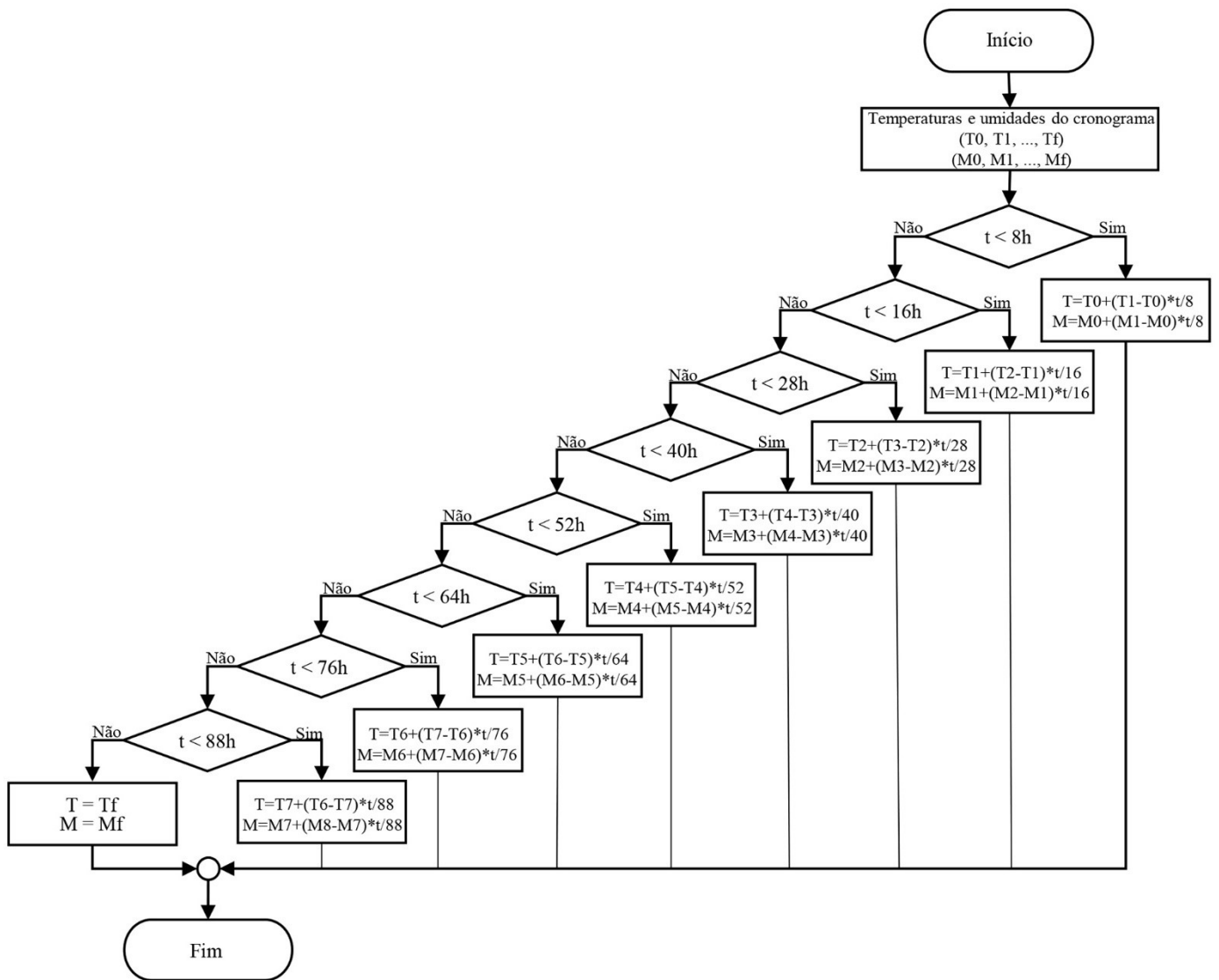


Figura 10 – Fluxograma do algoritmo do cronograma de secagem em função do tempo.
Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.2. ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DA MALHA

Para a simulação, foram consideradas amostras de madeira de *Pinus elliottii* serrada em geometria retangular com espessura padrão de 4 cm por 20 cm de comprimento e 20 cm de largura. A densidade média considerada foi de 480,4 kg/m³. Assumiu-se também que as amostras teriam passado previamente por um processo de secagem natural, considerando que esse processo teria sido capaz de remover a umidade das peças até o teor médio de 30% em base seca (b.s.), onde então as peças seriam encaminhadas à secagem por estufa convencional. Os parâmetros operacionais assumidos são referentes aos encontrados em condições típicas de secagem neste tipo de equipamento e foram inicialmente considerados constantes durante o processo assim como as propriedades intrínsecas da madeira. Os valores assumidos para os parâmetros e propriedades estão indicados na Tabela 3. O uso inicial dos parâmetros como constantes teve a finalidade de testar o método e simplificar o modelo.

Tabela 3 – Parâmetros considerados na simulação.

Parâmetro (símbolo)	Valor e unidade	Fonte
Densidade (ρ)	480,4 kg _{sólido seco} /m ³	IPT-SP (2018)
Umidade inicial (b.s.)(M _o)	30%	Santos (2002)
Temperatura inicial (T _o)	300,15 K (27°C)	Eleotério (2009)
Umidade do ar no interior do forno (b.s.)(M _a)	8%	Martinović; Horman e Demirdžić (2001)
Temperatura do forno (T _a)	343,15 K (70°C)	Oumarou, Kocaefe e Kocaefe (2014)
Espessura da peça (L)	0,04 m	Mellado (2007)
Capacidade de Umidade (C _m)	0,01 kg _{água} /kg _{sólido seco}	Simo-Tagne <i>et al.</i> (2018)
Calor Específico (C _p)	2500,0 kJ/kg.K	Zadin <i>et al.</i> (2015)
Coefficiente de difusividade (k _m)	1,8.10 ⁻⁸ kg/m.s	Simo-Tagne <i>et al.</i> (2018)
Coefficiente de condutividade térmica (k _h)	0,5675 W/m.K	Arends, Barakat e Pel (2018)
Coefficiente de transferência de massa por convecção (α_m)	2,15.10 ⁻⁶ kg/m ² .s	Martinović; Horman e Demirdžić (2001)
Coefficiente de transferência de calor por convecção (α_h)	22,675 W/m ² .K	Eleotério (2009)
Coefficiente de gradiente de temperatura (δ)	2,0 K ⁻¹	Martinović; Horman e Demirdžić (2001)
Calor latente de evaporação (λ)	2,32.10 ⁶ J/kg	Simo-Tagne <i>et al.</i> (2018)
Razão entre a difusividade mássica do vapor de água e a difusividade mássica total de umidade (ϵ)	0,5	Martinović; Horman e Demirdžić (2001)

Inicialmente foi realizada a análise da convergência da malha. O objetivo desta análise é verificar qual o número de pontos de discretização seria necessário para alcançar um equilíbrio satisfatório entre a precisão dos resultados da simulação e o uso dos recursos computacionais. Para isso usaram-se, como base, os dados de variação da umidade (b.s.) no centro da peça de madeira em função do tempo por demonstrarem maior sensibilidade ao aumento do número de pontos de discretização (N) quando comparados aos dados de temperatura ou aos dados de umidade em outros pontos.

As simulações foram feitas usando 6, 11, 21, 41, 81 e 161 pontos, como ilustrado na Figura 11. Ressalta-se que estes números de pontos foram escolhidos de modo que o número de intervalos de discretização (igual a $N-1$) fosse dobrado a cada aumento do número de pontos. A Figura 11 mostra que, a partir de 41 pontos, não há alterações significativas nos valores dos resultados obtidos, apresentando uma diferença média na ordem de 10^{-3} entre os valores de associados à 41 e 81 pontos de discretização. As curvas praticamente se sobrepõem, indicando que a malha converge para um número de pontos superior. Desta forma, pode-se considerar como adequado, para os fins desta pesquisa, o número de pontos de discretização (N) igual a 41 uma vez que, a partir deste nível de refinamento da malha, admite-se que a solução obtida estará toleravelmente próxima da que poderia ser considerada exata, porém sem exigir um alto custo computacional para seu processamento.

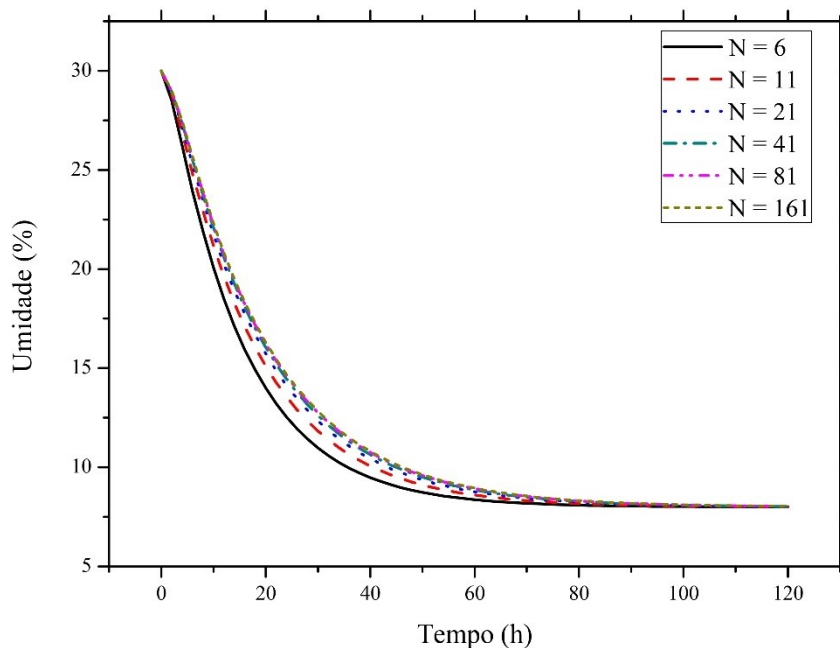


Figura 11 – Análise da convergência da malha.
Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.3. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação dos resultados foi estabelecida através da análise comparativa dos dados experimentais de três trabalhos com os dados simulados através dos algoritmos desenvolvidos, considerando as mesmas condições descritas nos artigos. Os resultados obtidos estão de acordo com os dados experimentais de Martinović; Horman e Demirdžić (2001), Zhao *et al.* (2016) e Simo-Tagne *et al.* (2016).

Martinović; Horman e Demirdžić (2001) em seus experimentos, usaram amostras de madeira de faia (*Fagus sylvatica*) de 50 mm de espessura e densidade média de 545 kg/m³ expostas ao fluxo uniforme de ar em um secador de laboratório com um controle automático dos parâmetros do ar ambiente. A acurácia dos instrumentos utilizados no experimento foi de 0,01°C para a temperatura e 0,1% para a umidade. A análise comparativa entre os dados experimentais de Martinović; Horman e Demirdžić (2001) e os dados simulados de temperatura e umidade pode ser observada nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

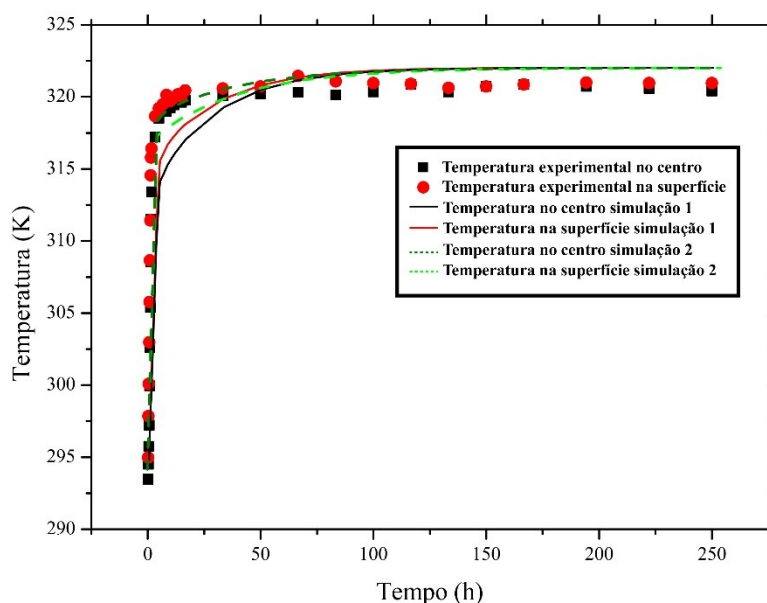


Figura 12 – Comparação dos resultados das simulações para temperatura no centro e na superfície da madeira comparados com os dados experimentais de Martinović; Horman e Demirdžić (2001).

Fonte: Acervo próprio, 2019.

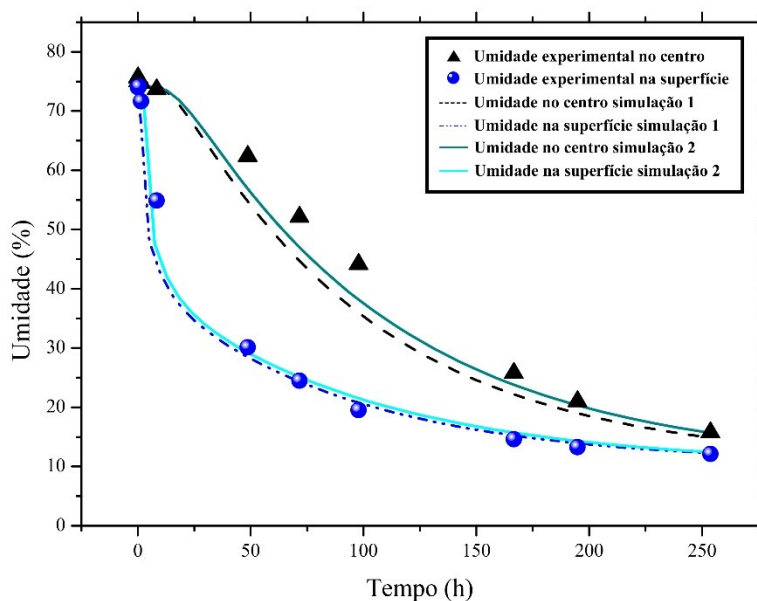


Figura 13 – Comparação dos resultados das simulações para umidade no centro e na superfície da madeira comparados com os dados experimentais de Martinović; Horman e Demirdžić (2001).
Fonte: Acervo próprio, 2019.

A avaliação dos resultados foi realizada através análise do coeficiente de determinação (R^2) relacionando os dados experimentais aos resultados das simulações. A análise em relação aos dados experimentais de Martinović; Horman e Demirdžić (2001) está organizada na Tabela 4, apresentando uma diferença na ordem de 10^{-4} entre os resultados das duas simulações.

Tabela 4 – Coeficientes de correlação (R^2) para a validação com os dados de Martinović; Horman e Demirdžić (2001).

Simulação	R^2
Temperatura simulação 1	0,87515
Temperatura simulação 2	0,87565
Umidade simulação 1	0,95314
Umidade simulação 2	0,95355

Zhao *et al.* (2016), para obtenção dos dados experimentais, usaram amostras de lariço (*Larix gmelinii*) com 40 mm de espessura e densidade média de 405 kg/m^3 , submetidas à secagem em uma câmara de condicionamento com velocidade do ar interno de 2 m/s e condições operacionais controladas. A incerteza encontrada para os dados de temperatura foi de $0,5^\circ\text{C}$ e de 1,06% para umidade. A validação das simulações com os dados experimentais colhidos por Zhao *et al.* (2016) é ilustrada nas Figuras 14 e 15.

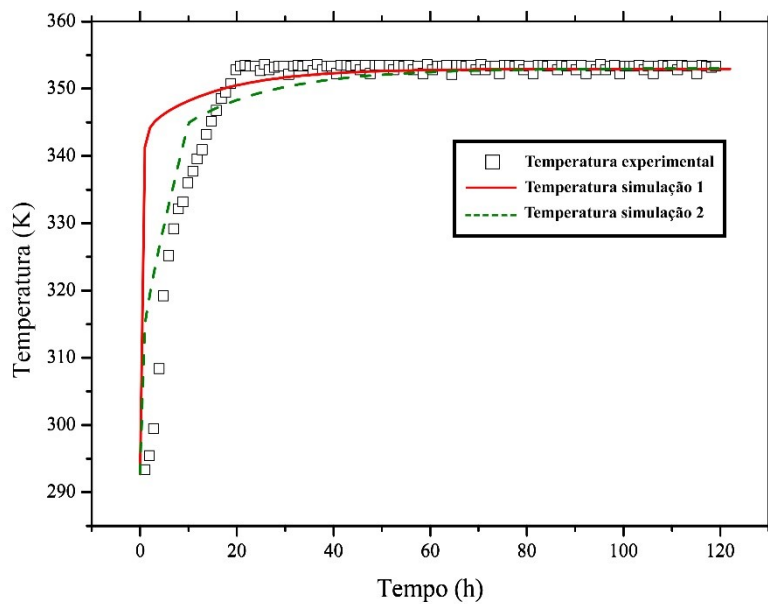


Figura 14 – Comparação dos resultados das simulações para temperatura média da madeira comparados com os dados experimentais de Zhao *et al.* (2016).
Fonte: Acervo próprio, 2019.

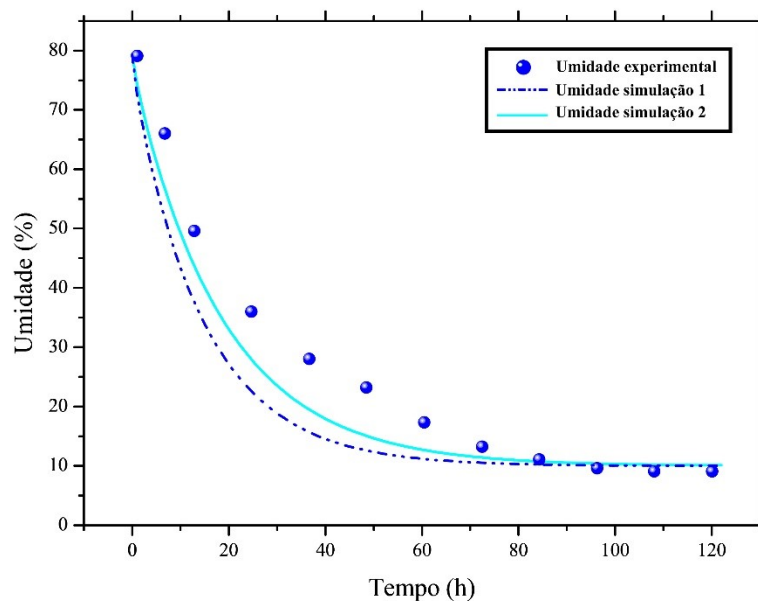


Figura 15 – Comparação dos resultados das simulações para umidade média da madeira comparados com os dados experimentais de Zhao *et al.* (2016).
Fonte: Acervo próprio, 2019.

Os valores de R^2 em relação aos dados experimentais de Zhao *et al.* (2016) podem ser conferidos na Tabela 5 onde observa-se que, assim como na validação feita a partir dos dados de Martinović; Horman e Demirdžić (2001), houve uma melhoria, na ordem de 10^{-3} , na acurácia da simulação ao considerar a variação da capacidade calorífica (C_p) da madeira durante o processo de secagem, em especial para os dados de umidade.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação (R^2) para a validação com os dados de Zhao *et al.* (2016).

Simulação	R^2
Temperatura simulação 1	0,97174
Temperatura simulação 2	0,98002
Umidade simulação 1	0,94771
Umidade simulação 2	0,97766

Simo-Tagne *et al.* (2016) usaram amostras de madeira de ayous (*Triplochiton scleroxylon*) e de frake (*Terminalia superba*) com espessuras de 25 cm e 24 cm respectivamente. As densidades das amostras foram de 431,5 kg/m³ para a madeira de ayous e de 450,6 kg/m³ para a madeira de frake. Foram submetidas a condições idênticas de secagem em um secador piloto. Dois ventiladores centrífugos e uma bomba de água fornecem condições homogêneas dentro da câmara mantendo a velocidade do ar em 0,25 m/s, temperatura de bulbo úmido em 25°C, temperatura de bulbo seco em 33,5°C e umidade relativa em 50%. Os parâmetros de secagem são fixados por um controlador PID de loop duplo conectado a um computador pessoal. Os autores não forneceram a incerteza encontrada para os dados experimentais. As Figuras 16 e 17 mostram a comparação entre os dados empíricos de Simo-Tagne *et al.* (2016) e os dados das simulações deste trabalho para a variação da umidade da amostra de madeira de de ayous e frake, respectivamente.

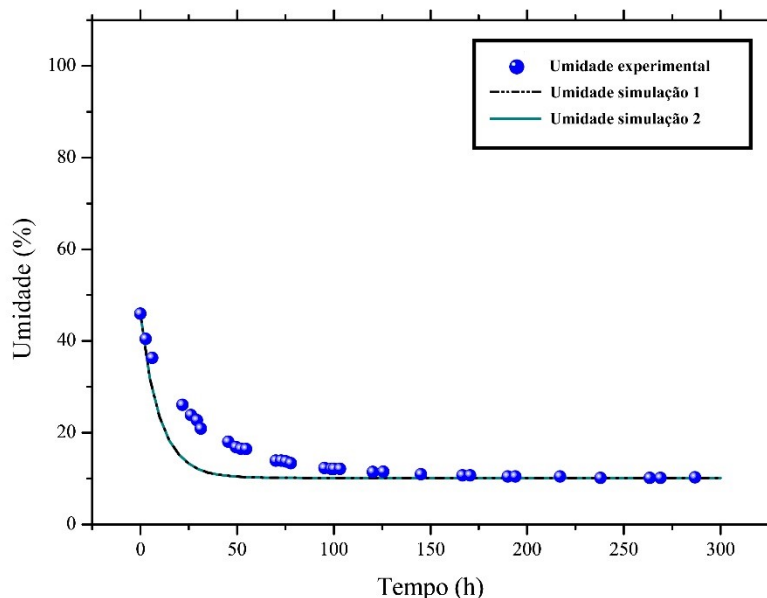


Figura 16 – Comparação dos dados de simulação para valores de variação de umidade média da madeira de Ayous comparados com os resultados experimentais de Simo-Tagne *et al.* (2016).

Fonte: Acervo próprio, 2019.

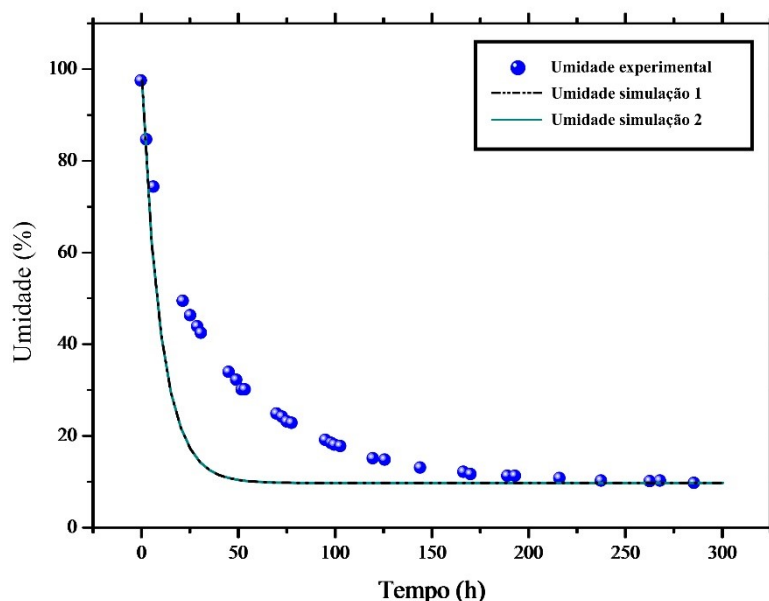


Figura 17 – Comparação dos dados de simulação para valores de variação de umidade média da madeira de Frake comparados com os resultados experimentais de Simo-Tagne *et al.* (2016).

Fonte: Acervo próprio, 2019.

O coeficiente de determinação para os dados de simulação frente aos dados experimentais de Simo-Tagne *et al.* (2016) estão reunidos na Tabela 6 e mostram a existência de uma pequena melhoria entre as Simulações 1 e 2, na ordem de 10^{-4} .

Tabela 6 – Coeficientes de correlação (R^2) para a validação com os dados de Simo-Tagne *et al.* (2016).

Simulação	R^2
Umidade da madeira de ayous simulação 1	0,85110
Umidade da madeira de ayous simulação 2	0,85145
Umidade da madeira de frake simulação 1	0,80288
Umidade da madeira de frake simulação 2	0,80310

Os resultados confirmam a adequação do modelo para a simulação do processo de secagem de madeira em estufa convencional. Contudo, é possível inferir que o modelo é sensível à espessura da peça considerada, atingindo resultados menos precisos para maiores espessuras.

Observa-se também que os resultados das simulações que consideram a variação da capacidade calorífica (C_p) no decorrer do processo (Simulação 2) apresentam uma pequena melhoria na acurácia em comparação aos resultados das simulações que admitiram esse parâmetro como constante (Simulação 1).

Ao analisar o coeficiente de determinação entre os resultados das duas simulações encontra-se um valor de 0,9927 para R^2 mostrando que, apesar dos resultados da Simulação 2 serem mais próximos dos resultados experimentais, não há uma diferença significativa entre os resultados das duas simulações. Por tanto, não justifica a repetição e comparação de todos os testes para ambos algoritmos.

Optou-se então por, a partir daqui, realizar as simulações usando o algoritmo que apresentou a melhor aproximação com os dados experimentais nas validações, no caso o algoritmo da Simulação 2.

5.4. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Neste trabalho, uma vez validado o modelo, foram analisadas variações operacionais como a temperatura da estufa, o tempo de secagem, a umidade inicial e a espessura da peça submetida à secagem, obtendo curvas para a variação da temperatura e da umidade em função do tempo para o interior e para a superfície da peça.

5.4.1. Avaliação do tempo de secagem

Para análise do tempo de secagem, considerando as condições descritas na Tabela 3 para os parâmetros operacionais, realizou-se a primeira simulação analisando o período de permanência da madeira durante o processo de secagem na estufa. As evoluções temporais da umidade e da temperatura são apresentadas na Figura 18. A umidade média tem um valor inicial de 30% (b.s.) e a temperatura inicial é de 300 K (27°C). A Figura 18 mostra que o fluxo do calor se dá de maneira mais rápida na peça que o fluxo de massa. A temperatura da madeira sobe rapidamente a 340 K nos primeiros 7.200 s (2 h) e atinge o equilíbrio térmico com a temperatura ambiente em aproximadamente 244.800 s (68 h) de aquecimento. Percebe-se também uma diminuição gradual da taxa média de secagem. Após aproximadamente 360.000 s (100 h) chega-se ao valor de umidade no centro de 8,29% e de 8,14% na superfície da peça de madeira, onde pode-se considerar que alcançou o equilíbrio higroscópico (umidade de equilíbrio), obtendo-se desta forma, uma taxa de secagem média de 0,705 %kg_{H2O}/h.

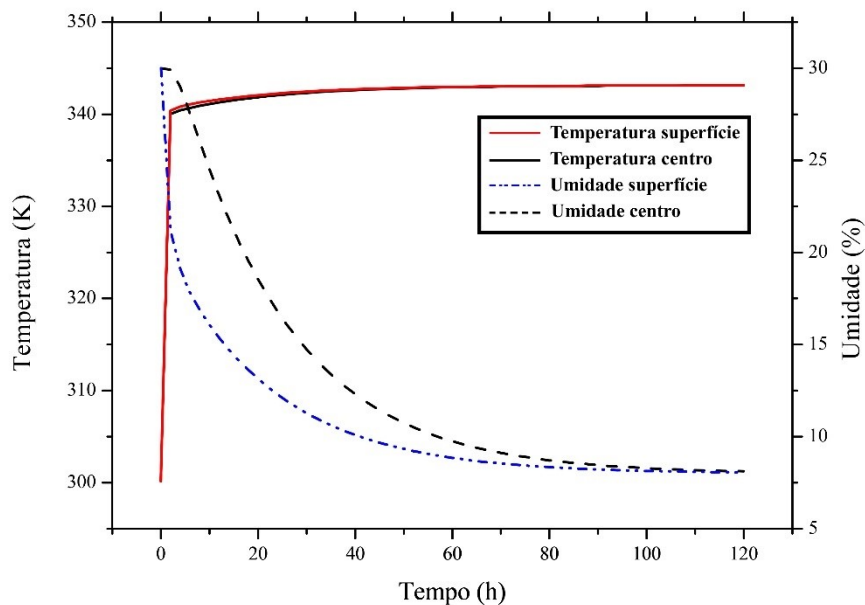


Figura 18 – Variação da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo.
 Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.4.2. Avaliação da variação da umidade e da temperatura em função do tempo para diferentes espessuras da peça

O conjunto de diagramas representado na Figura 19 ilustra a análise da variação da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo para diferentes espessuras da peça de madeira submetida à secagem. Nota-se que, durante o processo de secagem, a temperatura aumenta e o conteúdo médio de umidade diminui com o tempo, devido à influência da temperatura da atmosfera interna da estufa. A evaporação da umidade ocorre a partir da superfície da amostra de madeira, absorvendo o calor da vaporização. A umidade se propaga para as superfícies externas da madeira por meio do fluxo capilar sob a influência do gradiente de umidade. Observa-se um aumento na resistência à remoção da umidade no centro da madeira com o aumento da espessura da peça, concluindo-se que, assim como citado por Andrade (2000), o processo de secagem convencional é inadequado para peças espessas.

Entende-se que com a redução da espessura ocorre uma diminuição da resistência à difusão de umidade e à transferência de calor, corroborando com Santos *et al.* (2017) onde observaram que a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* tende a ser inversamente proporcional à espessura das peças.

Ao se calcular o número de Biot para as diferentes espessuras testadas encontra-se valores entre 0,8 a 7,9, o que mostra que a resistência interna ao transporte de calor no sólido, representada pela baixa condutividade térmica, é mais substancial que a resistência convectiva do fluxo de calor na superfície. Entretanto, em espessuras menores que 5 cm, o material apresenta um gradiente térmico interno pequeno, o que significa que a influência da transferência convectiva de calor na superfície passa a ter papel predominante no transporte de calor na peça.

No período de 0 s a 6.840 s (0 h a 1,9 h) a temperatura da superfície aumenta rapidamente próximo da temperatura ambiente do bulbo úmido e a umidade média aumenta levemente, como pode ser observado mais nitidamente na Figura 19c. Durante este estágio, a madeira não apenas recebe calor de convecção, mas também absorve o calor liberado pela condensação do vapor de água em água líquida, porque a densidade do vapor de água da superfície é menor que a do vapor de água do ambiente e devido a isso observa-se um pequeno aumento na curva de umidade no centro da peça (ZHAO *et al.*, 2016).

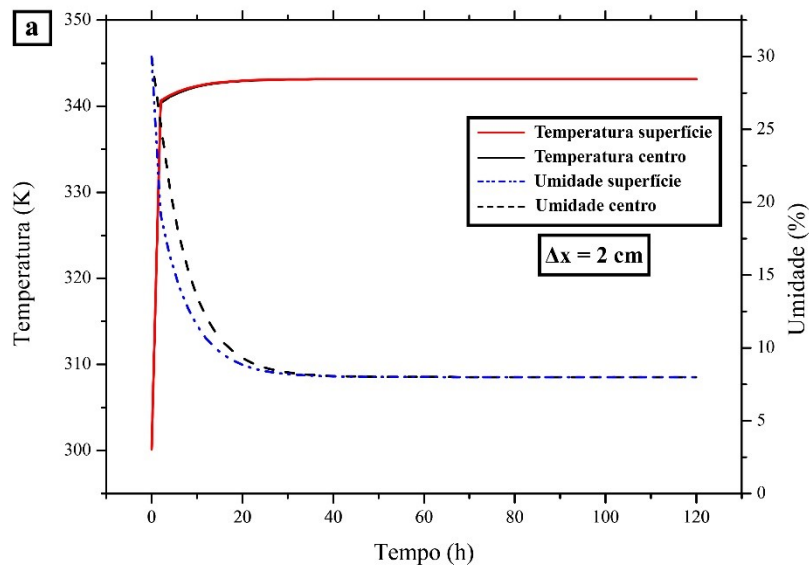


Figura 19 – Variação da umidade e temperatura no centro e na superfície da peça de madeira em função do tempo para diferentes espessuras: (a) 2 cm; (b) 5 cm; (c) 10 cm; (d) 20 cm.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

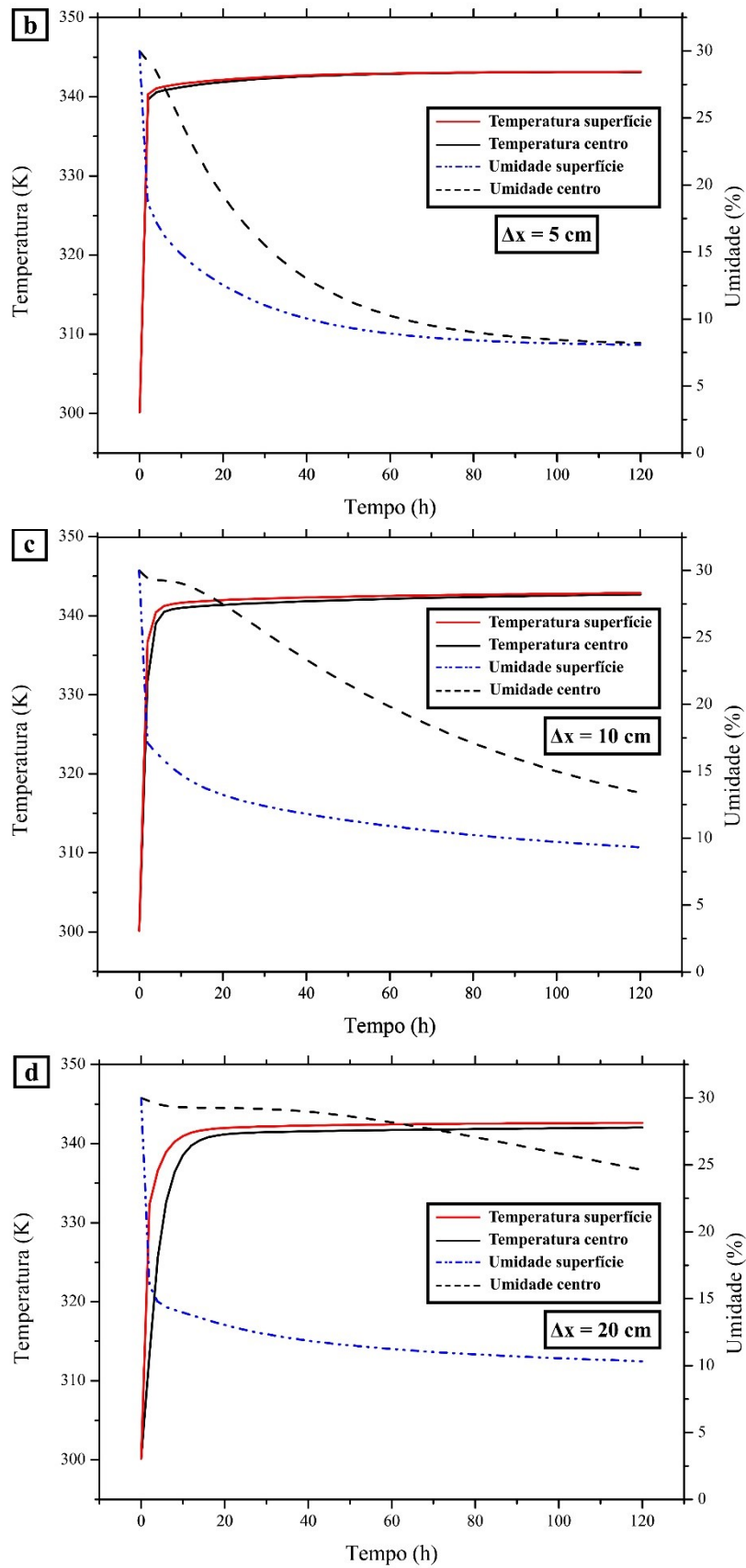


Figura 20 – Variação da umidade e temperatura no centro e na superfície da peça de madeira em função do tempo para diferentes espessuras: (a) 2 cm; (b) 5 cm; (c) 10 cm; (d) 20 cm (continuação).
 Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.4.3. Avaliação da variação da umidade e da temperatura em função do tempo para diferentes valores de umidade inicial da peça de madeira

Foi analisada também a simulação para diferentes valores iniciais de umidade da peça. Considerando que é comum uma secagem prévia da madeira antes de submetê-la à secagem na estufa, os resultados podem ser observados na Figura 20. Assim como esperado, quanto menor o valor da umidade inicial, menor o tempo para se alcançar o equilíbrio higroscópico com o ambiente da estufa. Também é possível inferir através da análise dos gráficos da Figura 20, que os perfis de temperatura no centro e na superfície não sofreram grande influência pela umidade inicial considerada, ou ainda, percebe-se que os efeitos da termodifusão (efeito Dufour) não são expressivos devido à grande diferença de velocidade entre as taxas de transferência de calor e transferência de massa.

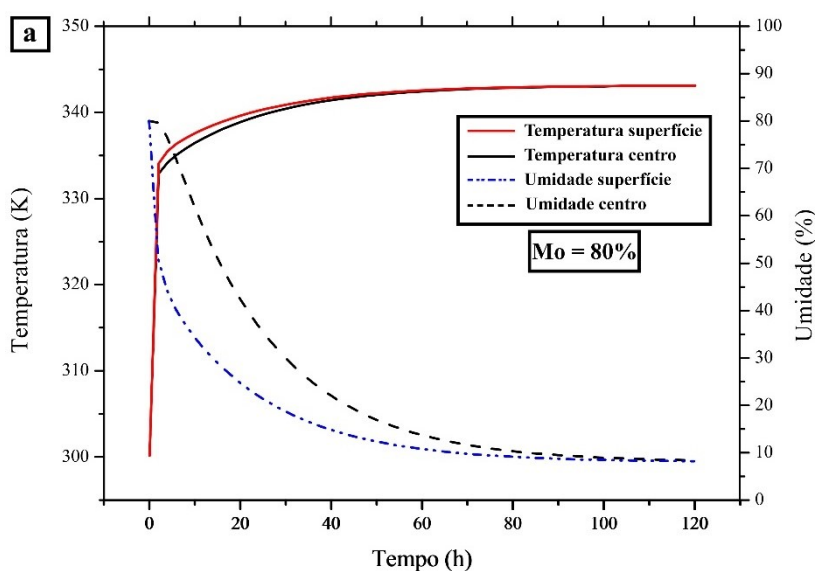


Figura 21 – Variação da umidade e temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo para diferentes valores iniciais de umidade da madeira: (a) 80%; (b) 60%; (c) 40%; (d) 20%.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

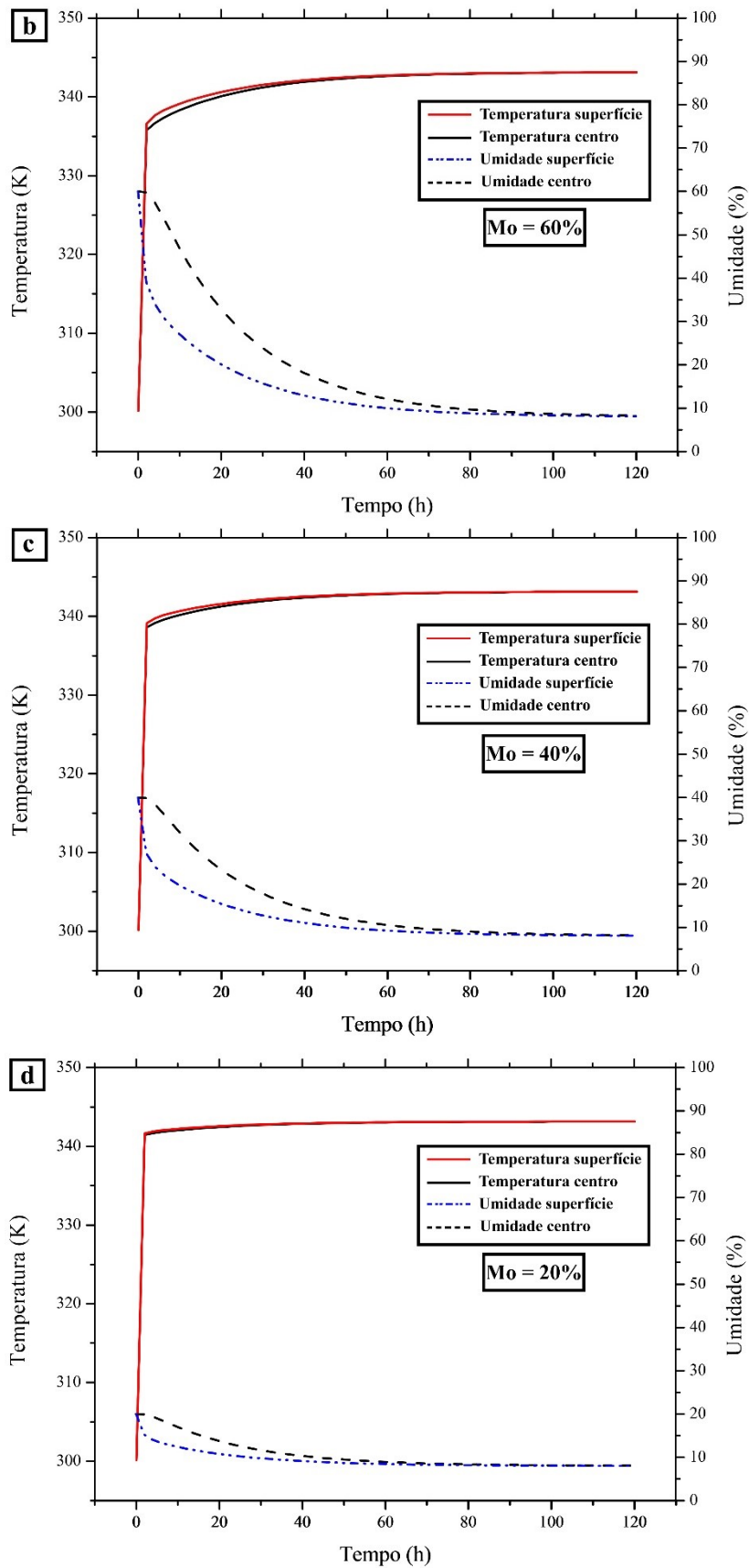


Figura 22 – Variação da umidade e temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo para diferentes valores iniciais de umidade da madeira: (a) 80%; (b) 60%; (c) 40%; (d) 20% (continuação).
 Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.4.4. Avaliação da variação da umidade e da temperatura em função do tempo para diferentes valores de temperatura do ar no interior da estufa

A Figura 21 ilustra a análise da variação da umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo para diferentes temperaturas internas do forno. Como pode ser observado, a Figura 21 não apresenta variações significativas no comportamento da remoção da umidade com o aumento da temperatura interna do forno. Nota-se também que, independente da faixa de temperatura de trabalho da estufa, não há uma diferença substancial entre a temperatura no centro da peça e a temperatura na superfície, ou seja, a temperatura no interior da peça permanece praticamente uniforme no decorrer do processo, resultando em um gradiente de temperatura pequeno se comparado ao gradiente de massa. Este comportamento foi observado experimentalmente por Plumb, Brown e Olmstead (1984) e por Mellado (2007). Os autores citam que, diferente da transferência de massa que é intrinsecamente difusiva, a transferência de calor é altamente influenciada pelo coeficiente convectivo de calor. Por tanto, o efeito Soret, caracterizado pela contribuição do gradiente de temperatura no fluxo de massa, é minimizado ao ponto de sua influência poder ser ignorada. Além disso, com um gradiente de temperatura tão pequeno o processo pode ser considerado isotérmico nas condições admitidas para os testes.

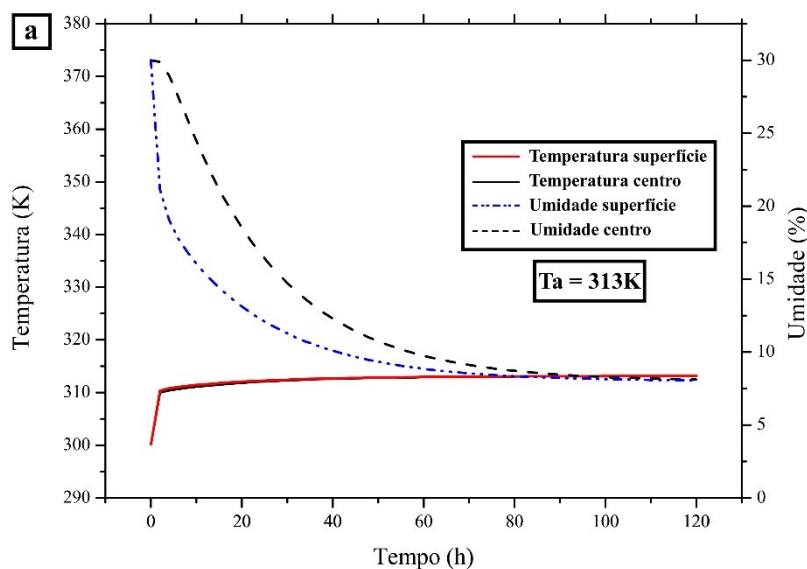


Figura 23 – Variação do teor de umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo em diferentes temperaturas de aquecimento da estufa: (a) 313 K (40°C); (b) 333 K (60°C); (c) 353 K (80°C); (d) 373 K (100°C).

Fonte: Acervo próprio, 2019.

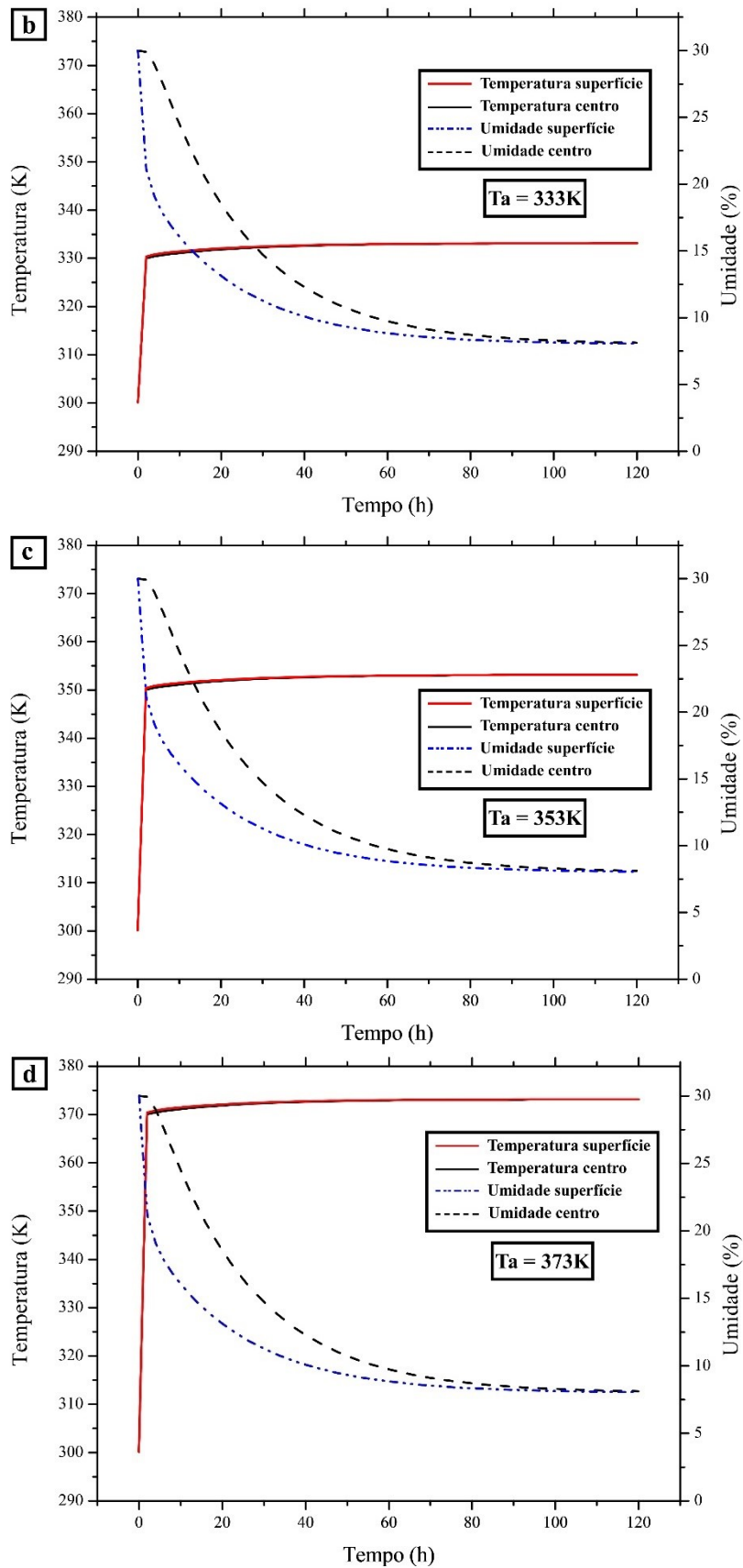


Figura 24 – Variação do teor de umidade e da temperatura no centro e na superfície da peça em função do tempo em diferentes temperaturas de aquecimento da estufa: (a) 313 K (40°C); (b) 333 K (60°C); (c) 353 K (80°C); (d) 373 K (100°C) (continuação).

Fonte: Acervo próprio, 2019.

Deve-se pontuar que as condições admitidas neste teste não são praticáveis, tendo sido consideradas com o intuito de avaliar o modelo. Andrade (2000) cita que, após as amostras de controle atingirem 15% de umidade, temperaturas de até 94°C podem ser empregadas sem danos à madeira, exceto por uma pequena diminuição da resistência mecânica. Moreschi (2014 (a)) afirma que acima de 100°C, inicia-se lentamente a deterioração térmica da madeira; desta forma, não sendo recomendado secagens nestas condições.

5.4.5. Avaliação da variação dos gradientes de umidade e temperatura em função do tempo

A Figura 22 ilustra a variação do gradiente de umidade e de temperatura em função do tempo para a Simulação 1 (Fig. 22a) e para a Simulação 2 (Fig. 22b), nas condições operacionais citadas na Tabela 3. A Simulação 1 apresentou um valor máximo do gradiente de umidade entre o centro e a superfície da peça de aproximadamente 509,55%/m ocorrendo no início do processo de secagem, em torno dos 10800 segundos (3 h) de aquecimento como ilustra a Figura 22a, a Simulação 2 apresenta um valor máximo menor para o gradiente de umidade (496,85%/m), ocorrendo um pouco mais tarde aos 16200 segundos (4,5 h) de aquecimento. Como mostrado por Silva *et al.* (2010), é importante a determinação da diferença entre o conteúdo de umidade no centro e na superfície da peça, pois, a dimensão desse gradiente indica a possibilidade de causar estresses que podem danificar a madeira.

A Figura 22 também mostra a variação do gradiente de temperatura em função do tempo. Para a Simulação 1 o valor máximo de 167,78 K/m, sendo atingido com apenas 210 segundos de aquecimento e reduzindo brucamente nas próximas horas. Infere-se que a taxa de transferência de energia ocorre de maneira significativamente mais rápida quando comparada à transferência de massa. Contudo, a Simulação 2 que considera a variação da capacidade térmica da madeira com o processo de secagem, não exibe o mesmo pico de gradiente térmico. A taxa de transferência de energia ocorre de maneira similar e acompanha a taxa de transferência de massa, apesar de ocorrer em escala substancialmente menor, apresentando um valor máximo de 20,35 K/m. Além disso, tal pico ocorre em um tempo similar ao do gradiente de umidade, após 4,5 horas de

aquecimento. Isso possivelmente ocorre devido ao modelo adotado na Simulação 2, ao assumir a capacidade térmica como uma função da temperatura e da umidade.

Como discutido anteriormente na seção 5.4.4., a variação da temperatura na espessura da peça é pequena, por tanto o processo pode ser considerado isotérmico, não havendo desta forma, influência do gradiente de temperatura no fluxo de umidade.

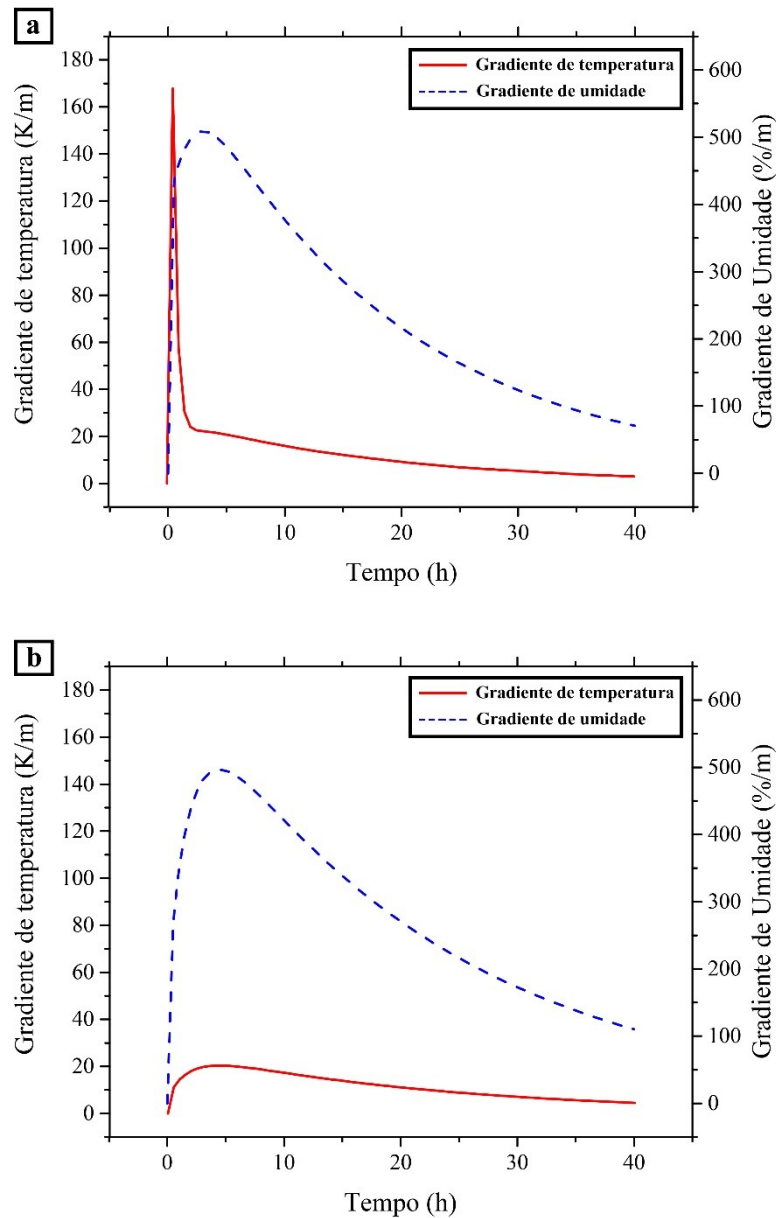


Figura 25 – Variação do gradiente de umidade e de temperatura em função do tempo para a Simulação 1 (a) e para Simulação 2 (b).
Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.4.6. Avaliação da variação da taxa de secagem

Na Figura 23 é feita uma comparação entre as variações na taxa de secagem durante o processo para as Simulações 1 e 2, considerando as condições operacionais citadas na Tabela 3. A comparação é feita tendo a taxa de secagem em função do tempo de secagem (Fig. 23a) e em função da umidade média da peça (Fig. 23b).

Observa-se que, mantendo a temperatura da estufa constante durante o processo, a remoção de umidade da madeira é mais proeminente nas 5 primeiras horas de secagem, corroborando com o verificado na análise do gradiente de umidade. Entretanto, após esse período inicial, a taxa de secagem cai gradativamente. Esse comportamento de regressão da taxa de secagem pode estar relacionado à progressiva redução da diferença de umidade entre as porções interna e externa da peça, enfraquecendo assim a força motriz responsável pelo processo de secagem.

Além disso, como defendido por alguns autores (SIAU, 1984; MUNIZ, 1993; FPL, 1999; MELLADO, 2007; MORESCHI, 2014 (b)), a taxa na qual a umidade se move na madeira está dependente da umidade relativa do ar circundante e da temperatura da madeira. A baixa umidade relativa estimula a difusão, diminuindo o conteúdo de umidade na superfície, aumentando o gradiente de umidade e, assim, aumentando a taxa de difusão.

As Simulações consideram condições agressivas de secagem, ou seja, um valor baixo de umidade para o ar no interior da estufa (M_a) e um valor alto para a temperatura do ar (T_a), e os mantêm constantes durante todo o processo. O que certamente são condições não aconselhadas tendo em vista que, se a umidade relativa estiver muito baixa nos estágios iniciais de secagem, poderá ocorrer encolhimento excessivo resultando em perdas devido a retração do material.

Uma forma de evitar que a taxa de secagem fique tão baixa durante o processo e de que se forme gradientes de umidade tão altos, seria iniciar o processo em condições mais brandas, e reduzir a umidade relativa do ar progressivamente à medida que também se aumenta a temperatura do ar no interior da estufa. Esse tipo de manejo das condições operacionais é conseguido aderindo à um cronograma de secagem.

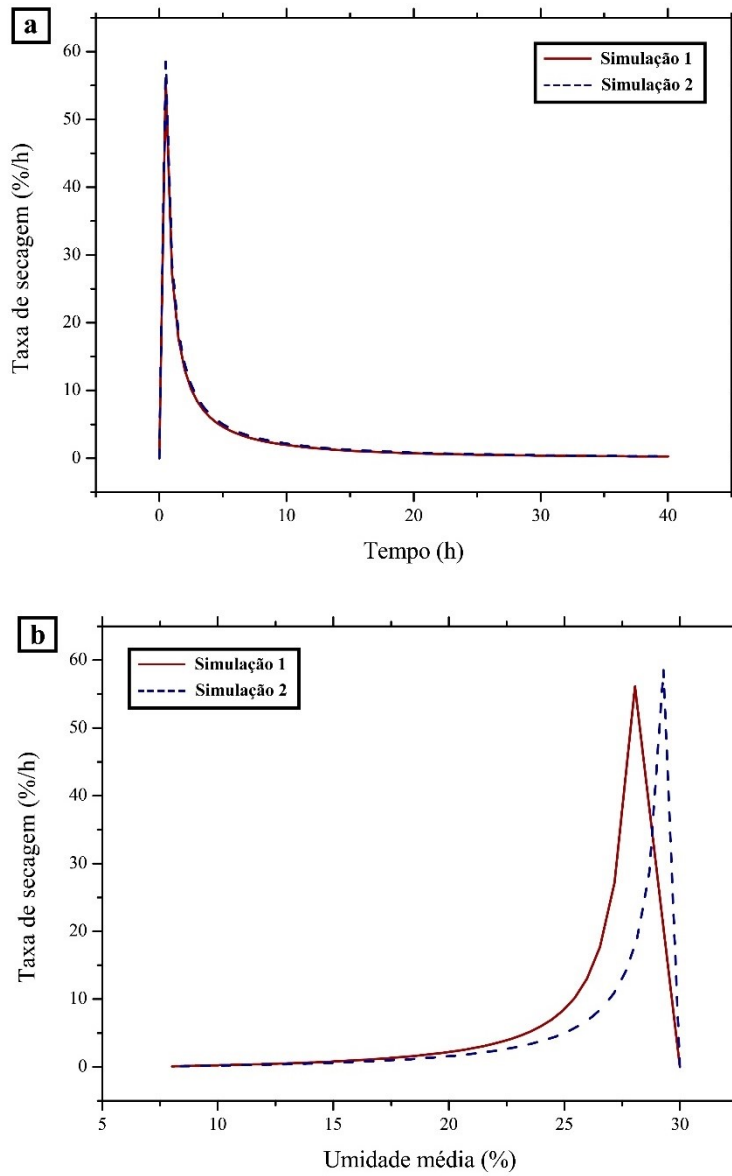


Figura 26 – Comparação da variação da taxa de secagem em função do tempo (a) e em função da umidade média da peça (b) entre a Simulação 1 e a Simulação 2.
 Fonte: Acervo próprio, 2019.

5.5. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO CRONOGRAMA DE SECAGEM

As contribuições atribuídas à implementação de um agendamento de alteração das condições operacionais (T_a e M_a) em função de um parâmetro base (Mm ou t) nas variações da transferência de calor e umidade na madeira durante o processo de secagem foram estudadas através de simulações computacionais

Os modelos matemáticos, criados para simular os cronogramas de secagem, trabalham com a variação gradativa da umidade e da temperatura do ar interno da estufa em função de um parâmetro base como descrito anteriormente na seção 5.1.3, onde também traz um fluxograma (Figura 10) ilustrando o algoritmo utilizado na simulação dos cronogramas de secagem. Os algoritmos avaliam o comportamento do transporte de calor e massa no decorrer do processo de secagem de madeira considerando a variação das condições operacionais (T_a e M_a) porém, mantendo constante as demais propriedades da madeira, com exceção do calor específico. Os valores de tais propriedades podem ser consultados na Tabela 3 da seção 5.2.

Através das equações descritas na Seção 5.1.3 obtiveram-se os gráficos da Figura 24 que ilustram o comportamento da temperatura (Fig. 24a) e da umidade (Fig. 24b) do ar do interior da estufa no decorrer do processo para as diferentes condições testadas.

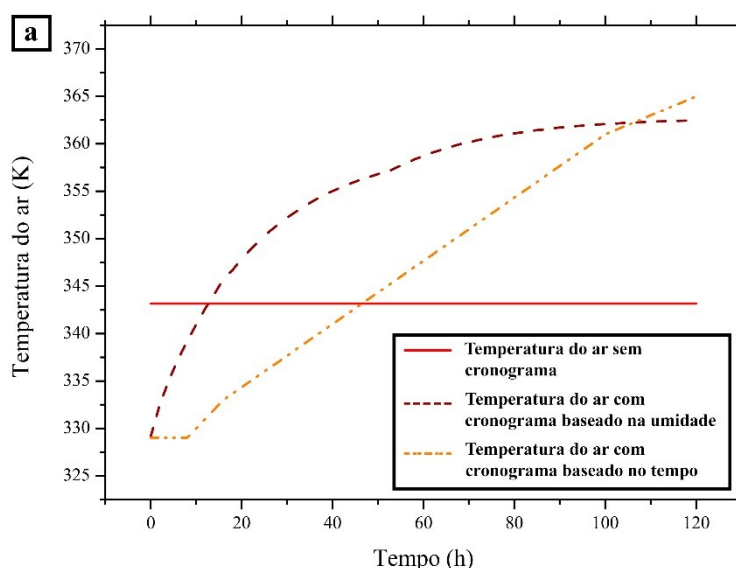


Figura 27 - Comportamento da temperatura do ar (a) e da umidade de equilíbrio (b) no interior da estufa para simulações do processo sem um cronograma de secagem, com cronograma baseado da umidade média da madeira e com cronograma baseado no tempo.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

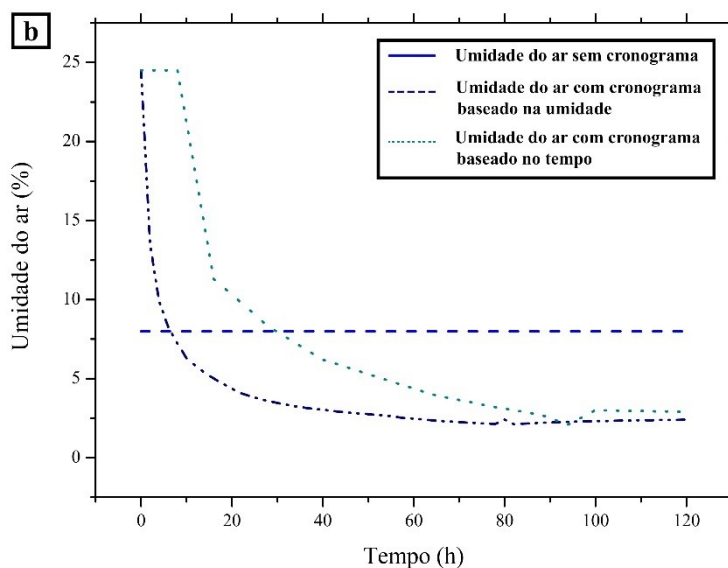


Figura 28 - Comportamento da temperatura do ar (a) e da umidade de equilíbrio (b) no interior da estufa para simulações do processo sem um cronograma de secagem, com cronograma baseado da umidade média da madeira e com cronograma baseado no tempo (continuação).

Fonte: Acervo próprio, 2019.

A Figura 25 traz um conjunto de diagramas onde é possível comparar o processo na ausência de um cronograma de secagem com as diferentes condições testadas para o cronograma baseado na umidade média. Para esse cronograma, observa-se que tanto o comportamento da variação da umidade quanto da temperatura é similar ao observado na simulação que não considera o uso de um cronograma de secagem (no caso, considera T_a e M_a constantes no processo, Fig. 25a), contudo o cronograma admite temperaturas maiores que a considerada nos testes com T_a constante (Fig. 25a e 25c).

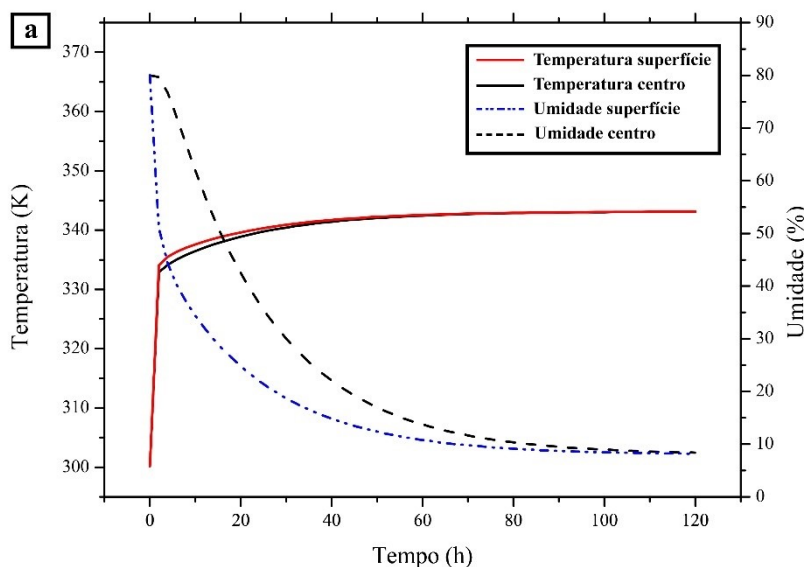


Figura 29 - Comparação da variação da temperatura e da umidade em função do tempo para simulações que consideram (a) T_a e M_a constantes durante o processo; (b) T_a e M_a variáveis; (c) T_a constante e M_a variável; (d) T_a variável e M_a constante, para o cronograma em função da variação de M_m da madeira.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

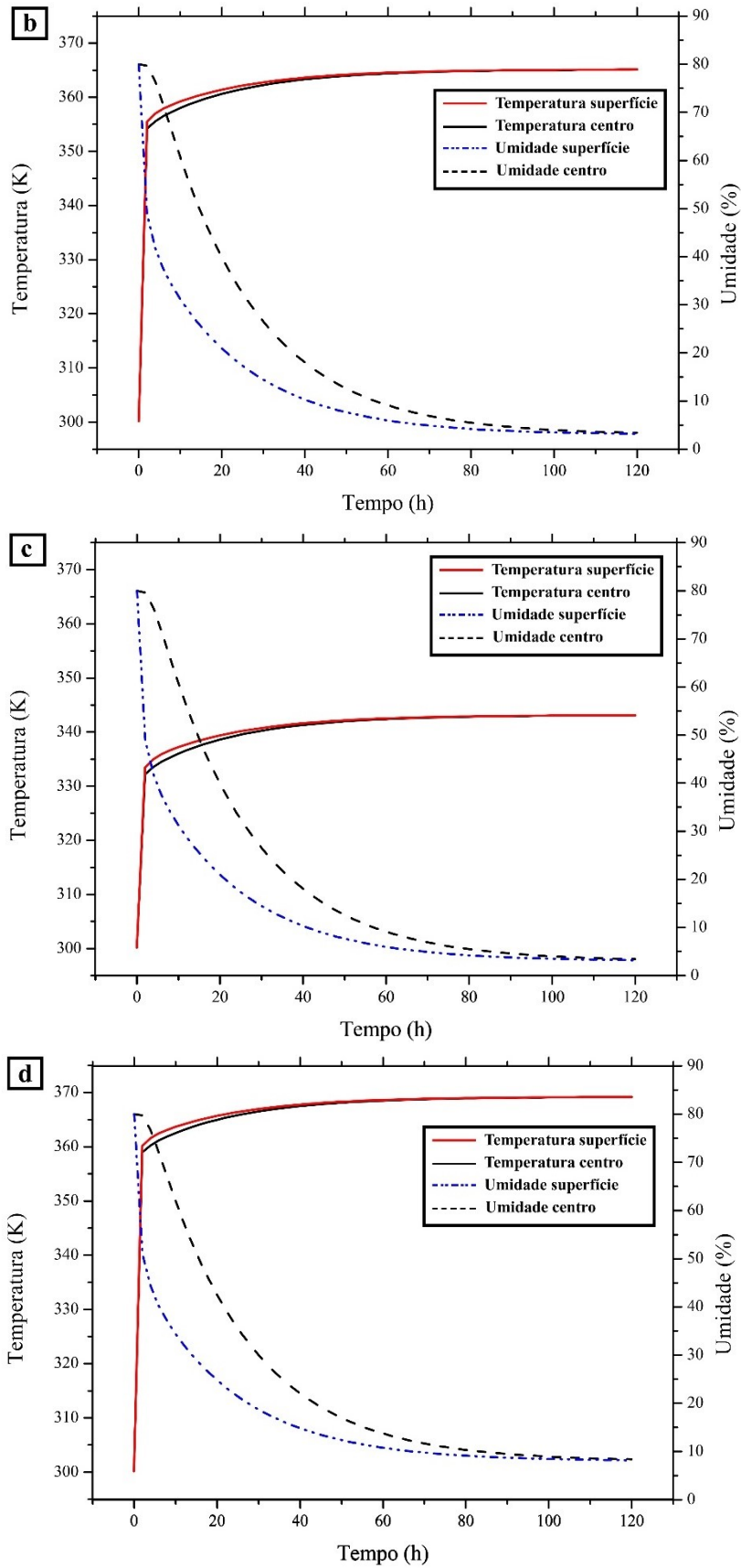


Figura 30 - Comparação da variação da temperatura e da umidade em função do tempo para simulações que consideram (a) T_a e M_a constantes durante o processo; (b) T_a e M_a variáveis; (c) T_a constante e M_a variável; (d) T_a variável e M_a constante, para o cronograma em função da variação de M_m da madeira, (continuação). Fonte: Acervo próprio, 2019.

O uso do cronograma de secagem baseado na umidade aumentou significativamente a eficiência do processo em ambos os testes que consideraram a variação da umidade de equilíbrio do ar (Fig. 25b e 25c). A taxa de secagem apresentada na simulação sem o cronograma de secagem (Fig. 25a) foi de 0,577 %/h, nos testes representados nas Figuras 25b e 25c foi de aproximadamente 1,198 %/h, obtendo um aumento de 107,6% na taxa de secagem, porém esse aumento de eficiência não foi observado ao se manter constante a umidade de equilíbrio como observa-se na Fig. 25d onde também foi obtido uma taxa de secagem de 0,577 %/h.

Foi testado também um cronograma de secagem em função do tempo. O mesmo foi testado de três formas distintas. As Figuras 26a, 26b e 26c permitem uma comparação das três condições testadas entre si.

Observa-se que o comportamento da variação da umidade não sofre alterações significativas com as considerações dos programas. Contudo ao se considerar somente a umidade do ar variável durante o processo (Fig. 26b) observa-se que o comportamento da variação da temperatura é levemente influenciado, se comportando de maneira similar ao observado no processo com ausência de cronograma de secagem (Fig. 25a). Ao admitir o aumento da temperatura do ar no interior da estufa em função do tempo de secagem (Fig. 26a e 26c) nota-se que a variação de temperatura na peça de madeira se comporta como uma única “rampa”, isso confere um aquecimento mais ameno e possivelmente proporcionando um menor índice de tensões estruturais o que acarretaria em menos perdas de material por defeitos de secagem, sendo esse processo mais indicado para coníferas que são mais suscetíveis a esses defeitos por possuírem uma madeira mais porosa.

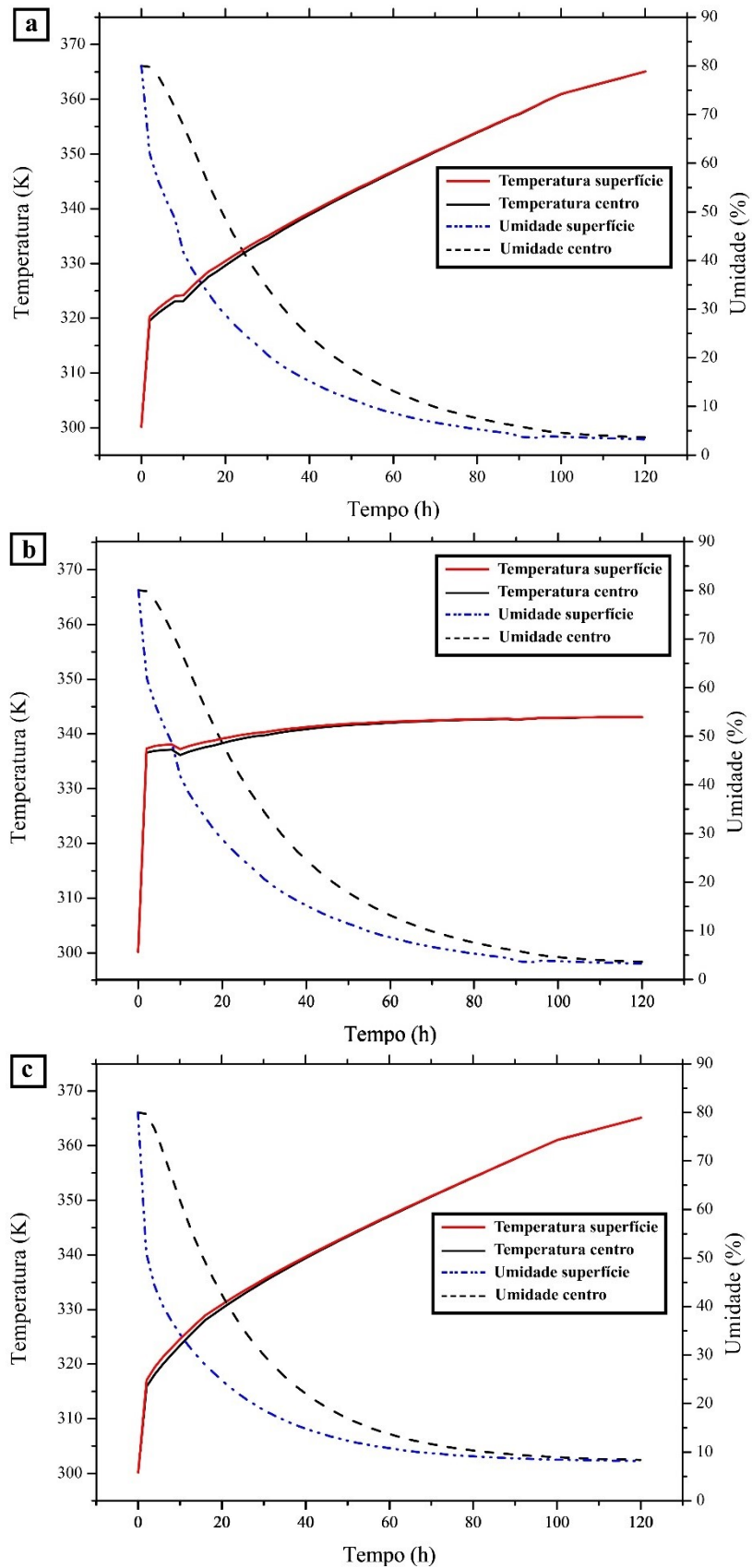


Figura 31 - Comparação da variação da temperatura e da umidade em função do tempo para simulações que consideram (a) T_a e M_a variáveis; (b) T_a constante e M_a variável; (c) T_a variável e M_a constante, para o cronograma em função do tempo de permanência na estufa de secagem.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

A eficiência do processo de secagem também foi melhor com o uso do cronograma baseado no tempo de secagem, obtendo uma taxa de secagem de 0,978 %/h para os testes com M_a variável, o que significa uma melhoria de 69,5% neste parâmetro, porém, assim como o cronograma baseado na umidade média da madeira, os testes com M_a constante obtiveram uma taxa de secagem parecida de 0,577 %/h.

Em comparação com o cronograma anterior, o cronograma baseado no tempo é mais brando devido a um aquecimento menos agressivo, o que pode ter contribuído para a taxa de secagem menor. Contudo, observa-se que, em todos os casos, a implementação de um cronograma de secagem com T_a e M_a variáveis contribuiu com a eficiência na secagem da madeira.

Avaliando a variação dos gradientes de temperatura (Figura 27a) e umidade (Figura 27b) durante os processos de secagem percebe-se que o gradiente de temperatura se comporta de maneira semelhante ao gradiente de umidade, apresentando valores máximos de 66,8 K/m para o processo sem o uso de um cronograma, 71,35 K/m para os processos com cronograma baseado na umidade média da madeira e 53,95 K/m para os processos com cronograma baseado no tempo.

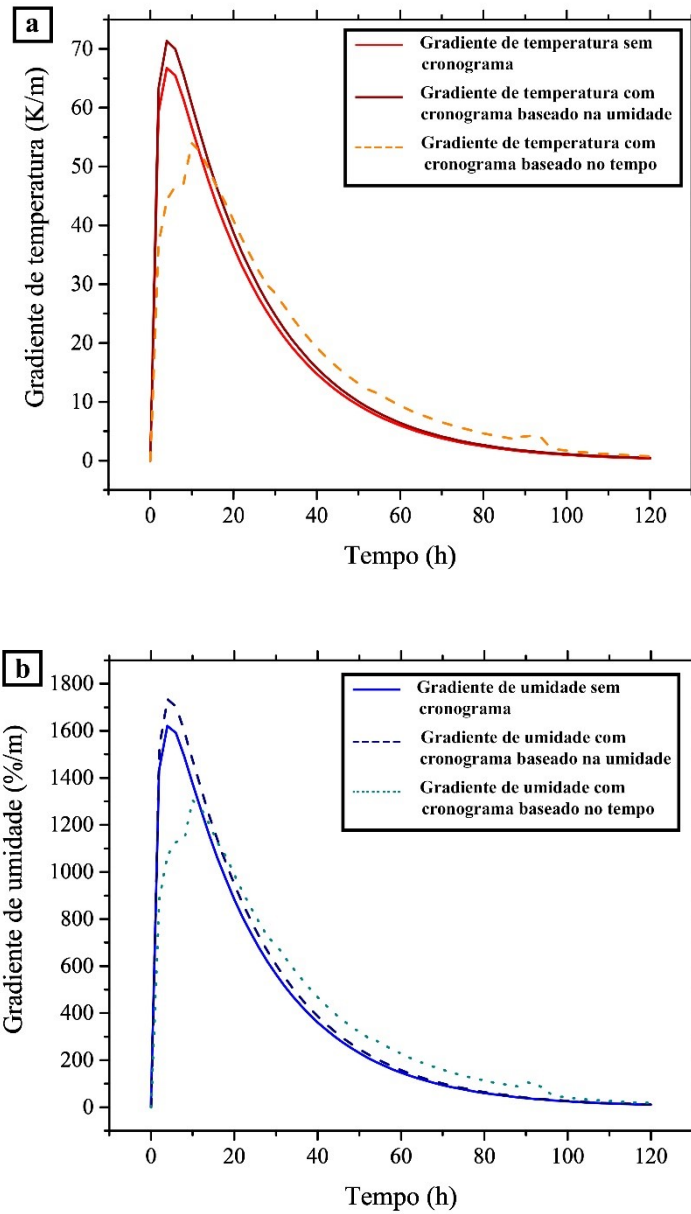


Figura 32 – Comparação das variações dos gradientes de temperatura (a) e umidade (b) em função do tempo para simulações do processo sem um cronograma de secagem, com cronograma baseado da umidade média da madeira e com cronograma baseado no tempo.
 Fonte: Acervo próprio, 2019.

Tendo o gradiente de umidade como um parâmetro indicador da qualidade da madeira, o processo com o uso do cronograma de secagem baseado na umidade média da peça, apresenta um leve aumento neste parâmetro (cerca de 6,4%) quando comparado ao processo sem o cronograma de secagem, em especial em testes que consideraram a variação da umidade de equilíbrio do ar (M_a) como os representados nas Figuras 25b e 25c, apresentando um valor de 1733,5 %/m para o gradiente de umidade contra 1621 %/m para os processos que consideram M_a constante (Fig. 25a e 25d). Essa diferença pode ser observada na Figura 27b.

O cronograma baseado no tempo de secagem apresentou um gradiente de umidade máximo significativamente menor, de 1305,7 %/m, isso se dá devido às variações menos agressivas das condições operacionais, como pôde ser observado nas Figuras 24a e 24b. Como explica Andrade (2000), mudanças suaves nas condições de operacionais mantêm a taxa e o potencial de secagem aproximadamente constantes, diminuindo a probabilidade de ocorrência de defeitos.

A Tabela 7 a seguir resume as comparações entre os principais parâmetros dos diferentes cronogramas.

Tabela 7 – Parâmetros dos cronogramas de secagem.

Teste	Cronograma	Grad. T máx. (K/m)	Grad. M máx. (%/m)	Taxa de Secagem (%/h)
Ta e Ma const.	sem cron.	66,8263	1620,806	0,577063
Ta e Ma var.	Mm	71,34975	1734,042	1,197974
	tem	53,9763	1305,632	0,9784
Ta const. e Ma var.	Mm	71,46635	1733,326	1,197647
	tem	53,77565	1305,892	0,978531
Ta var. e Ma const.	Mm	66,69905	1621,681	0,577118
	tem	67,04605	1620,38	0,576978

O cronograma de secagem também é avaliado através de seu potencial de secagem, que se trata da razão entre a umidade da madeira e a umidade do ar. A Figura 28 traz a variação do potencial de secagem no decorrer do processo.

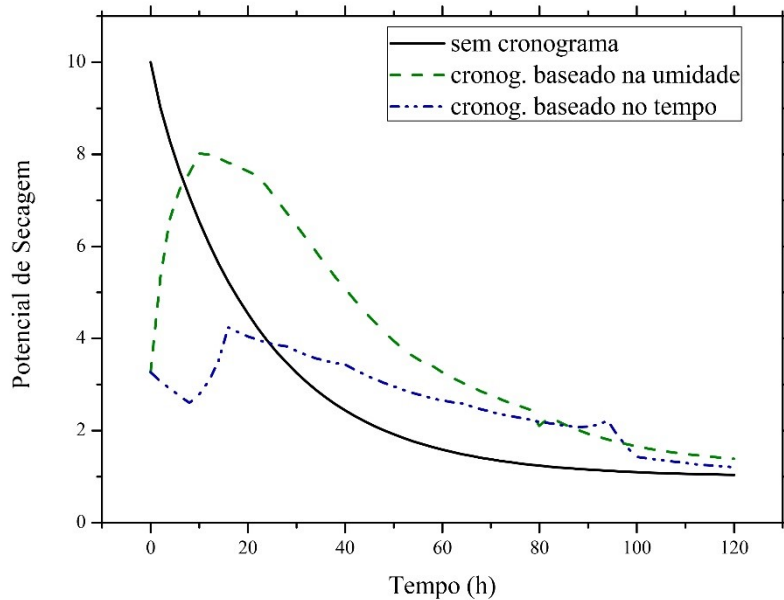


Figura 33 – Variação do potencial de secagem no decorrer do processo para os testes sem o uso de um cronograma de secagem, com cronograma baseado da umidade média da madeira e com cronograma baseado no tempo.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

Observa-se que o cronograma baseado no tempo é, dentre as opções testadas, o que apresenta a menor variação nos valores de potencial de secagem no decorrer do processo, o que o caracteriza como mais suave dentre as opções. Neste aspecto, apesar de possuir uma taxa de secagem 22% menor que o cronograma baseado na umidade, oferece condições para que as tensões resultantes da secagem não excedam a resistência da madeira, desta forma evitando a ocorrência de defeitos.

5.6. AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

A Figura 29 reúne diagramas onde é possível comparar a variação da entalpia (Fig. 29a) e da entropia (Fig. 29b) no decorrer do processo para os testes na ausência de um cronograma de secagem, com o cronograma baseado na umidade média da madeira e com o cronograma baseado no tempo de secagem.

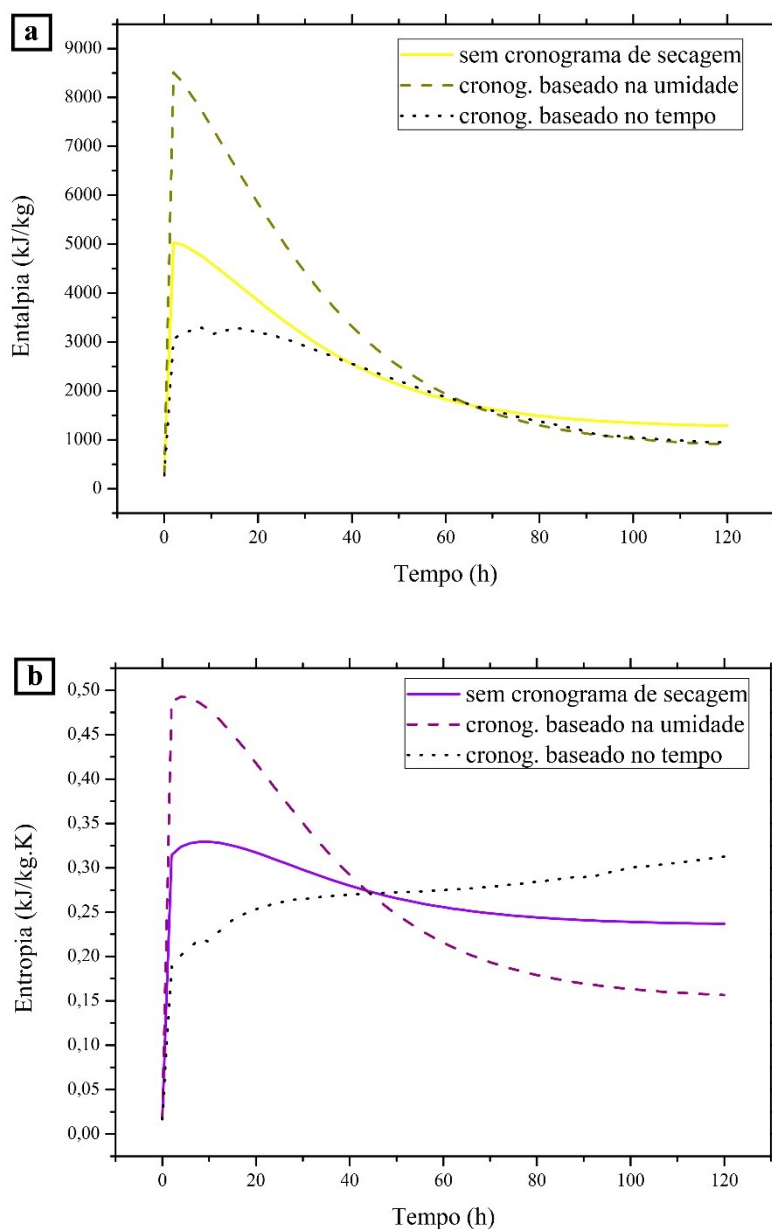


Figura 34 – Variação da (a) entalpia em função do tempo; (b) entropia em função do tempo para processo sem um cronograma de secagem, com o cronograma baseado na umidade média da madeira e com o cronograma baseado no tempo de secagem.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

Observa-se que, para o processo com cronograma baseado na umidade média da madeira, as propriedades termodinâmicas são predominantemente influenciadas pelo aumento da temperatura nas primeiras 2 horas de secagem até que o equilíbrio térmico seja atingido, depois a influência da umidade passa a ser mais substancial, especialmente na variação da entalpia.

Para o processo com cronograma baseado no tempo de secagem, as propriedades termodinâmicas apresentam valores aproximadamente 60% menores em comparação com o outro cronograma. A influência da redução da umidade da madeira no decorrer do processo parece ser menos significativa, especialmente na entropia que, diferente do processo anterior, segue aumentando no decorrer da secagem, seguindo o aumento da temperatura.

A transferência de calor teve um efeito predominante na geração de entropia e na correspondente irreversibilidade geral, enquanto a transferência de massa fica em segundo plano, assim como observado por Vaughan *et al.* (2007). A influência da transferência de momento e da convecção não pôde ser avaliada devido à velocidade do ar ter sido considerada constante no modelo proposto.

Para a taxa de variação de exergia envolvida nos processos, calculada através da Equação 69, tem-se a Figura 30.

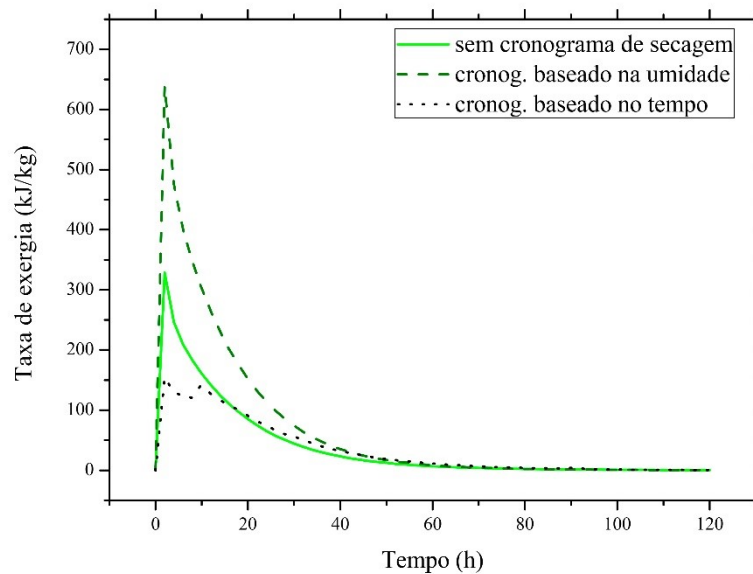


Figura 35 – Taxa de variação da exergia em função do tempo para os processos sem um cronograma de secagem e com os cronogramas baseados na umidade média da madeira e no tempo de secagem.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

Analisando a exergia do processo, notamos que ela aumenta durante a etapa de aquecimento da peça, porém diminui com o avanço do tempo de secagem, esse mesmo comportamento também foi registrado por Colak e Hepbasli (2007) e por Corzo *et al.* (2008). Após a peça se aproximar do equilíbrio térmico com o ambiente a exergia fornecida pelo ar circundante passa a ser utilizada na vaporização da umidade do produto e esse uso diminui no decorrer do processo, sendo a exergia destruída até o final do processo de secagem. Isto significaria que parte da exergia fornecida na câmara de secagem é desperdiçada pelo ar exaurido como citado por Colak e Hepbasli (2007), o que pode ser identificado como uma possível ineficiência termodinâmica da operação simulada.

A Figura 31 ilustra a variação da eficiência exérgica no decorrer dos processos analisados, calculada a partir da aplicação da Equação 70.

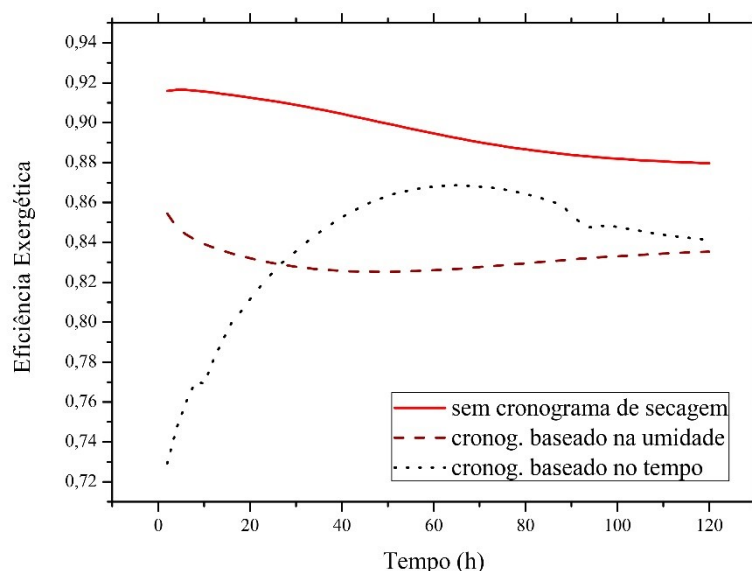


Figura 36 – Variação da eficiência exérgica em função do tempo para os processos sem um cronograma de secagem e com os cronogramas baseados na umidade média da madeira e no tempo de secagem.

Fonte: Acervo próprio, 2019.

Analisando a Figura 31 nota-se que a eficiência exérgica aumenta com o aumento da temperatura do ar no interior da estufa, assim como observado experimentalmente por Colak e Hepbasli (2007) e por Corzo *et al.* (2008). Porém, em contrapartida, a eficiência exérgica tende a diminuir em decorrência ao tempo de secagem, isso possivelmente se dá devido ao fato de que, quanto mais seco o produto menor o gradiente de umidade e, por tanto, mais difícil se torna sua secagem e consequentemente menor seria sua

eficiência exergética. A Figura 31, por tanto, ilustra a influência da combinação desses dois fatores na eficiência exergética do processo.

Modificações operacionais nas condições termodinâmicas, como cronogramas de secagem mais brandos com alterações mais lineares na umidade de equilíbrio e na temperatura de bulbo seco, seriam possíveis formas para melhorar a eficiência exergética do processo de secagem e diminuir os custos operacionais. Contudo essas condições operacionais devem ser cuidadosamente definidas para se obter resultados apropriados, mantendo a eficiência do processo.

6. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo indicam que o modelo difusivo representa adequadamente os valores experimentais, permitindo predizer com acurácia aceitável o comportamento do transporte de calor e massa ao longo do processo de secagem da madeira de *Pinus elliottii* em um forno convencional, dentro das condições empregadas neste estudo.

Ao admitir a variação de parâmetros do processo e considerar a dependência das variações da temperatura e da umidade do sistema, o modelo foi aprimorado alcançando resultados mais próximos aos experimentais.

O modelo se mostrou sensível à espessura considerada para a peça de madeira, fornecendo resultados melhores ao se admitir valores menores que 10 cm para a espessura. Além disso, também foi possível inferir que o processo de secagem por estufa convencional não é indicado para peças muito espessas, apresentando baixo rendimento.

A influência da termodifusão nos resultados do transporte de calor não é expressiva devido a diferença de velocidade entre as taxas de transferência de calor e massa no processo. Também não se observou uma influência significativa do efeito Soret no transporte de massa, devido ao baixo gradiente de temperatura em relação ao valor de gradiente de massa.

A admissão de um cronograma de secagem baseado no tempo de secagem teve efeitos positivos nos parâmetros de qualidade e eficiência do processo, diminuindo o gradiente de umidade e aumentando a taxa de secagem.

O cronograma baseado no tempo, apesar de possuir uma taxa de secagem 22% menor que o cronograma baseado na umidade média da madeira, oferece condições para que as tensões resultantes da secagem não excedam a resistência da madeira, desta forma evitando a ocorrência de defeitos e, sendo assim, o mais indicado para o uso em madeira de coníferas.

O uso de temperaturas mais baixas e umidades relativas mais altas pode ser proposto como forma de reduzir a destruição da exergia, diminuindo a transferência brusca de calor e massa. Contudo esse tipo de alteração operacional é limitada, pois reduz

a eficiência de secagem e aumenta tempo da operação. O uso de cronogramas mais brandos é indicado.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma limitação do modelo está em não considerar a variação da velocidade do ar no interior da estufa. Para fazer isso, no entanto, seria necessário expandir o volume de controle considerado para além da fronteira madeira-ar, admitindo assim a massa de ar e umidade que entra em contato com a superfície da peça.

O modelo também desconsidera o aumento típico da densidade da madeira durante o processo de secagem. Para admiti-lo, porém, seria preciso considerar uma malha numérica variável no tempo, o que aumentaria consideravelmente o grau de complexidade do problema e talvez não melhoraria a acurácia do modelo de forma apreciável.

Para considerar a anisotropia do sistema seria necessário admitir mais de uma dimensão espacial no modelo, isso, no entanto, requereria dados de propriedades difíceis de serem mensuradas, como os coeficientes de difusão de massa e condutividade térmica em cada direção do material, por exemplo. E novamente se chegaria à conclusão de que, um modelo mais complexo não significa necessariamente uma melhoria significativa na precisão dos resultados.

No decorrer dos testes e simulações foi possível observar que o modelo é sensível a variações da densidade da madeira submetida ao processo. Sugere-se realizar também simulações para as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus grandis*; desta forma, explorando diferentes densidades e porosidades de espécies economicamente relevantes no mercado madeireiro nacional.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. **Indicação de programas para secagem convencional de madeiras**. 2000. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- AGHBASHLO, M.; MOBILI, H.; RAFIEE, S.; MADADLOU, A. A review on exergy analysis of drying processes and systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 22, p. 1-22, 2013.
- AGRAWAL, S. G.; METHEKAR, R. N. Mathematical model for heat and mass transfer during convective drying of pumpkin. **Food and Bioproducts Processing**, v. 101, p. 68–73, 2017.
- ARENDS, T.; BARAKAT, A. J.; PEL, L. Moisture transport in pine wood during one-sided heating studied by NMR. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Eindhoven, v. 99, p. 259–271, 2018.
- AVRAMIDIS, S.; HATZIKIRIAKOS, S. G. Convective heat and mass transfer in nonisothermal moisture desorption. **Holzforschung**, vol. 49, p. 163-167, 1995.
- BARONAS, R.; IVANAUSKAS, F.; SAPAGOVAS, M. Modelling of wood drying and an influence of lumber geometry on drying dynamics. **Nonlinear Anal. Model. Control**, v. 4, p. 11–22, 1999.
- BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero *Eucalyptus***. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- BELGACEM, M. N.; PIZZI, A. **Lignocellulosic fibers and wood handbook: renewable material for today's environment**. 1 ed. New Jersey: Wiley, 2016.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentals of thermodynamics**. 8 ed. Michigan: Wiley, 2013.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4 ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2012.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. 7 ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2016.

COLAK, N.; HEPBASLI, A. Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer. **Journal of Food Engineering**, vol. 80 (4), p. 1188–93, 2007.

CORZO, O.; BRACHO, N.; VASQUEZ, A.; PEREIRA, A. Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. **Journal of Food Engineering**, vol. 86 (2), p. 151–61, 2008.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. 3 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2015.

CUTLER, D. F.; BOTHA, T.; STEVENSON, D. W. **Plant anatomy: an applied approach**. 1 ed. Blackwell, 2007.

DINCER, I.; SAHIN, A. Z. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 47, p. 645–652, 2004.

DINCER, I. Exergy as a potential tool for sustainable drying systems. **Sustainable Cities and Society**, vol. 1, p. 91–96, 2011.

DINWOODIE, J. M. **Timber: its nature and behavior**. 2 ed. Nova York: E & FN Spon. 2000.

ELEOTÉRIO, J. R. **Modelagem e simulação do processo de secagem de madeiras serradas de espécies tropicais brasileiras**. 2009. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ELUSTONDO, D. M.; OLIVEIRA, L.; AVRAMIDIS, S. New methodology to optimize sorting in wood drying. **Maderas ciencia y tecnologia**, v. 12, n. 2, p. 79-91, 2010.

ERIKSSON, J.; ORMARSSON, S.; PETERSSON, H. Finite-elements analysis of coupled nonlinear heat and moisture transfer in wood. **Numerical Heat Transfer**, vol. 50, p. 851-864, 2006.

FOELKEL, C. E. B.; FERREIRA, M.; NEHRING, J. H; ROLIM, M. B. Variabilidade no sentido radial de madeira de *Pinus elliottii*. **IPEF**, n.10, p.1-11, 1975.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (FPL), **Wood handbook**: wood as an engineering material. Washington, DC: USA Forest Service. Forest Products Laboratory, 1999.

HATAMI, S.; PAYGANEH, G.; MEHRPANAHI, A. Energy and exergy analysis of an indirect solar dryer based on a dynamic model. **Journal of Cleaner Production**, vol. 244, 2020.

HORMAN, I.; MARTINOVIĆ, D.; HAJDAREVIĆ, S. Finite volume method for analysis of stress and strain in wood. **Drvna Industrija**, Hrvatska, v. 60, n. 1, p.27-32, 2009.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual**. São Paulo, 2019.

IPT-SP - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.ipt.br/>. Acessado em: 06 de nov. 2018.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. **XV Jornadas Forestales de Entre Rios**, Concordia, AR, 2000.

KADEM, S.; LACHEMET, A.; YOUNSI, R.; KOCAEFE, D. 3D-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.38, p.717–722, 2011.

KANG, W.; CHUNG, W. Y.; EOM, C. D.; YEO, H. Some considerations in heterogeneous nonisothermal transport models for wood: a numerical study. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 54, p. 267-277, 2008.

KEEY, R. B; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. **Kiln-drying of lumber**. 1 ed. Berlin: Springer Verlag, 2000.

KOCAEFE, D.; YOUNSI, R.; CHAUDRY, B.; KOCAEFE, Y. Modeling of heat and mass transfer during high temperature treatment of aspen. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 40, n. 5, p.371-391, 2006.

KOCAEFE, D.; YOUNSI, R.; PONCSAK, S.; KOCAEFE, Y. Comparison of different models for the high-temperature heat-treatment of wood, **Int. J. Therm. Sci.**, v. 46, p. 707–716, 2007.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ Jr., W. A. **Principles of wood sciences and technology: I - solid wood**. 1 ed. New York: Springer-Verlag, 1968.

KOUFOPANOS, C. A.; PAPAYANNAKOS, N.; MASCHIO, G.; LUCCHESI, A. Modelling of the pyrolysis of biomass particles: studies on kinetics, thermal and heat transfer effects. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, vol. 69, p. 907-915, 1991.

LIN, M.; YANG, Q. X.; RAO, J. P.; XIE, Y. Q.; LIAO, Y. Q.; WEI, W. Derivation of a new expression for wood thermophysics parameters and comparison to experimental value. **J Fujian Agric Forest Univ**, vol. 44(6): p. 646 - 50, 2015.

LOPES, C. S. D.; NOLASCO, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S. PANSINI, A. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

LUIKOV, A.V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review), **Int. J. Heat Mass Transf**, v. 18, p. 1–14, 1975.

MARTINOVIĆ, D.; HORMAN, I.; DEMIRDŽIĆ, I. Numerical and experimental analysis of a wood drying process. **Wood Science and Technology**, Sarajevo, v. 35, p.143-156, 2001.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de *Pinus***. 2007. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MENDES, G. M. P. **Caraterização de proveniências de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* para instalação de ensaios de proveniências**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior Agrária de Coimbra, 2017.

MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da Madeira**. Universidade Federal do Paraná, UFPR. 2014 (a).

MORESCHI, J. C. **Relação Madeira-Água e sua Secagem**. 2^a ed. Universidade Federal do Paraná, UFPR. 2014 (b).

MUNIZ, G. I. B. **Caracterização e desenvolvimento de métodos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** 1993. 252 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 3 ed. New York: Marcel Dekker; 2006.

OUMAROU, N.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y. 3D-modelling of conjugate heat and mass transfers: effects of storage conditions and species on wood high temperature treatment. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Chicoutimi, v. 79, p. 945–953, 2014.

PANG, S. Moisture content gradient in a softwood board during drying: simulation from a 2-D model and measurement. **Wood Science and Technology**, New York, v. 30, p. 165-178, 1996.

PEČENKO, R.; SVENSSON, S.; HOZJAN, T. Modelling heat and moisture transfer in timber exposed to fire. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 87, p. 598–605, 2015.

PERRÉ, P.; DEGIOVANNI, A. Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Orlando, Fl, v. 33, n. 11, p.2463-2478, nov. 1990.

PERTUZZATTI, A.; MISSIO, A. L.; CONTE, B.; SOUZA; S. C.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Propriedades físicas da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* termorretificada sob diferentes atmosferas. **Brazilian Journal of Wood Science**, v.7, n.1, p.7-15, 2016.

PLUMB, O. A.; BROWN, C. A.; OLMSTEAD, B. A. Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine. **Wood Science and Technology**, New York, v. 18, p. 187-204, 1984.

- POLETTI, M.; ORNAGHI JÚNIOR, H. L.; ZATTERA, A. J. Native cellulose: structure, characterization and thermal properties. **Materials**, v.7, p.6105-6119, 2014.
- PRIADI, T. HIZIROGLU, S. Characterization of heat treated wood species. **Materials and Design**, v. 49, p. 575–582, 2013.
- PUTRANTO, A.; CHEN, X. D.; XIAO, Z.; WEBLEY, P. A. Modeling of high-temperature treatment of wood using the reaction engineering approach. **Bioresource Technology**, vol. 102, p. 6214-6220, 2011.
- RICHTER, C. **Wood characteristics: description, causes, impact on use and technological adaptation**. 1 ed. New York: Springer, 2015.
- SANTINI, E. J. **Alternativas para monitoramento e controle do processo de secagem da madeira serrada em estufa**. 1996. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.
- SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.1, p. 85-93, 2000.
- SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis***. 2002. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Madeiras). Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2002.
- SANTOS, J. C. H.; SILVA, F. J. T.; LILGE, D. S.; MACHADO, S. F.; FERREIRA, M. D. Avaliação do programa de secagem e determinação da taxa de secagem de *Pinus elliottii engelm*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA. 2017, Florianópolis. **Anais do Terceiro Congresso Brasileiro de Ciência da Tecnologia da Madeira**. Florianópolis: 2017.
- SEVERO, E. T. D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid**. 1998. 216 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Physical and chemical changes in juvenile and mature woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification. **Eur. J. Wood Prod**, v. 70, p. 741–747, 2012.

SIAU, J. F. **Transport Process in Wood**. 1 ed. New York: Springer, 1984.

SILVA, W. P.; SILVA, L. D.; SILVA, C. M. D. S.; NASCIMENTO, P. L. Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature. **Wood Sci Technol**, Campina Grande, v. 45, p. 787-800, 2010.

SIMO-TAGNE, M.; RÉMOND, R.; ROGAUME, Y.; ZOULALIAN, A. Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods. **International Journal of Thermal Sciences**, Epinal, v. 109, p. 299-308, 2016.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Agriculture Handbook, n. 188, p. 1-274, 1991.

SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2012.

STANISH, M. A.; SCHAJER, G. S.; KAYIHAN, F. A mathematical model of drying for hygroscopic porous media. **AIChE Journal**, vol. 32, n. 8, p. 1301-1311, 1986.

STEINHAGEN, H. P.; LEE, H. W. Enthalpy method to compute radial heating and thawing of logs. **Wood and Fiber Science**, vol. 20, n. 4, p. 415-421, 1988.

TEREHOVICS, E.; VEIDENBERGS, I.; BLUMBERGA, D. Energy and exergy balance methodology: wood chip dryer. **Energy Procedia**, vol. 128, p. 551-557, 2017.

THOMAS, H. R.; LEWIS, R. W.; MORGAN, K. An application of the finite element method to the drying of timber. **Wood and Fiber Science**, vol. 11, p. 237-243, 1979.

TRCALA, M. A 3D transient nonlinear modelling of coupled heat, mass and deformation fields in anisotropic material, **Int. J. Heat Mass Transfer**, v.55, p.4588–4596, 2012.

TZEMPELIKOS, D. A.; MITRAKOS, D.; VOUIROS, A. P.; BARDAKAS, A. V.; FILIOS, A. E.; MARGARIS, D. P. Numerical modeling of heat and mass transfer during

convective drying of cylindrical quince slices. **Journal of Food Engineering**, v. 156, p. 10–21, 2015.

VAUGHAN, G. L.; CARRINGTON, C. G.; SUN, Z. F. Exergy analysis of a wood-stack during dehumidifier drying. **International Journal of Exergy**, vol. 4, n. 2, p. 151–67, 2007.

YOUNSI, R.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y. Threedimensional simulation of heat and moisture transfer in wood, **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 11-12, p. 1274-1285, 2006.

YOUNSI, R.; KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; KOCAEFE, Y. Computational and experimental analysis of high temperature thermal treatment of wood based on ThermoWood technology. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, vol. 37, p. 21–28, 2010.

ZADIN, V.; KASEMÄGI, H.; VALDNA, V.; VIGONSKI, S.; VESKE, M.; AABLOO, A. Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns. **Applied Mathematics and Computation**, Tartu, v. 267, p. 465–475, 2015.

ZHANG, J.; QU, L.; WANG, Z.; ZHAO, Z.; HE, Z.; YI, S. Simulation and validation of heat transfer during wood heat treatment process. **Results in Physics**, vol. 7, p. 3806-3812, 2017.

ZHAO, J.; FU, Z.; JIA, X.; CAI, Y. Modeling conventional drying of wood: inclusion of a moving evaporation interface. **Drying Technology**, Harbin, v. 34, n. 5, p. 530-538, 2016.