



Universidade Federal do Oeste do Pará
Instituto de Engenharia e Geociências
Programa de Ciência e Tecnologia
Bacharelado Interdisciplinar

João Viana Figueira Filho
Rodrigo Lobo da Silva

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA MADEIRA
GOMBEIRA

Santarém - PA

2017

João Viana Figueira Filho
Rodrigo Lobo da Silva

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA MADEIRA
GOMBEIRA**



Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel, do Programa de Ciência e Tecnologia, do Instituto de Engenharia e Geociências, da Universidade Federal do Oeste do Pará.

Orientador: Prof.Dr Carlos Célio Cruz

Santarém - PA

2017

João Viana Figueira Filho
Rodrigo Lobo da Silva

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA MADEIRA
GOMBEIRA

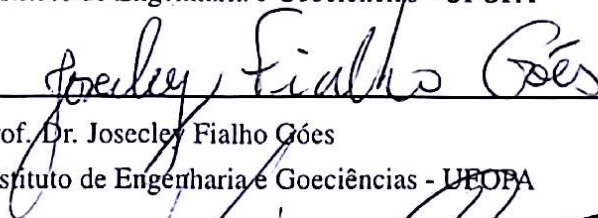
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel, do Programa de Ciência e Tecnologia, do Instituto de Engenharia e Geociências, da Universidade Federal do Oeste do Pará.

Aprovada em 16 de maio de 2017.

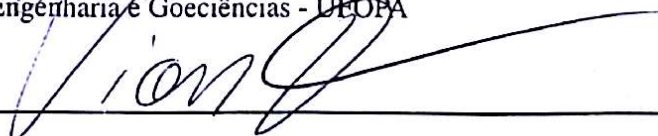
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Carlos Célio Cruz (Orientador)
Instituto de Engenharia e Geociências - UFOPA



Prof. Dr. Josecleo Fialho Góes
Instituto de Engenharia e Geociências - UFOPA



Prof. MSc. Vicente Moreira Rodrigues
Instituto de Engenharia e Geociências - UFOPA

Santarém - PA
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIGI/UFOPA

F475s Figueira Filho, João Viana
Simulação numérica da transferência de calor na madeira Gombeira./
João Viana Figueira Filho, Rodrigo Lobo da Silva. – Santarém, 2017.
47 fls.: il.
Inclui bibliografias.

Orientador Carlos Célio Cruz
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do
Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Curso de Bacharelado
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

1. Madeira Gombeira. 2. Secagem. 3. Aquecimento. I. Cruz, Carlos Célio, *orient.*
II. Título.

CDD: 23 ed. 674.3809811

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles utilizam o conhecimento para mudar o mundo.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente e ao orientador por conduzir o trabalho na direção correta.

A sabedoria comunica a vida a seus filhos
e acolhe os que a procuram.
Bíblia Sagrada. Eclo 4,12

RESUMO

Para a melhoria dos processos de secagem de madeira são necessários análises experimentais e o uso das leis físicas governadoras dos processos. Os modelos empregados no aquecimento, primeira fase da secagem, expressam problemas de condução de calor transiente e condições de contorno simplificadas, o que para tais casos possui soluções analíticas. Neste trabalho, foi realizada a modelagem matemática do aquecimento em regime transiente de uma tábua de madeira fazendo o uso de equações empíricas para o cálculo das propriedades térmicas do material. Para a solução do modelo, um algoritmo baseado no método de discretização de equações diferenciais parciais parabólicas é criado utilizando o método explícito. Obteve-se a distribuição de temperaturas no corpo de estudo ao longo do tempo. Simulou-se o aquecimento para diferentes espessuras, massas específicas e calculou-se alguns perfis de temperatura. Foi verificado que o método tem baixo erro e pode ser expandido para fomentar a tomada de decisões sobre o melhor jeito de efetuar o aquecimento inicial de um programa de secagem.

Palavras-chave: transferência de calor, aquecimento, resolução numérica, madeira Gombeira.

ABSTRACT

For improvement of the wood drying processes are needed experimental analyzes and the use of physical processes' governors laws. The models used in the initial heating, the first stage of drying, express transient heat conduction problems and simplified boundary conditions, which for simplified cases have analytical solutions. In this work, a mathematical modeling of the transient heating of a wood board was made using empirical equations to calculate the thermal properties of the material. For the solution of the model, an algorithm based on the discretization method of parabolic partial differential equations was created using the explicit method. The temperature distribution in the study body was obtained across the time. The heating was simulated for different thicknesses, specific masses and some temperature profiles were calculated. It was verified that the method has low error and can be expanded to foment the decision about program of drying program.

Keywords: heat transfer, heating, numerical resolution, Gombeira wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Madeira serrada sólida e usada como piso.	14
Figura 2 -	Condução térmica em regime estacionário.	19
Figura 3 -	Lei de Fourier em forma vetorial.	20
Figura 4 -	Convecção natural.	21
Figura 5 -	Volume de controle diferencial.	22
Figura 6 -	Valor da derivada na superfície à temperatura constante representada pela equação 13 (condição de contorno de primeira espécie)	24
Figura 7 -	Valor da derivada na superfície com fluxo térmico constante e não nulo representado pela equação 14 (condição de contorno de segunda espécie)	24
Figura 8 -	Valor da derivada na superfície com fluxo térmico nulo representado pela equação 15 (condição de contorno de segunda espécie)	25
Figura 9 -	Lei de Fourier igual à lei de resfriamento de Newton para superfície sujeita a convecção como mostrado na equação 16 (condição de contorno de terceira espécie)	25
Figura 10 -	Geometria da tábua de madeira.	30
Figura 11 -	Balço de energia na geometria.	31
Figura 12 -	Primeira parte do fluxograma.	35
Figura 13 -	Segunda parte do fluxograma.	36
Figura 14 -	Resultado do algoritmo.	37
Figura 15 -	Comparação do modelo numérico com o SS-T-Conduct	38
Figura 16 -	Distribuição de temperaturas na superfície, a 2/5 da superfície e no meio.	40
Figura 17 -	Perfil de temperaturas da amostra para tempos diversos.	41
Figura 18 -	Comportamento para diferentes espessuras.	41
Figura 19 -	Comportamento para diferentes valores de massa específica.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Propriedades físicas de algumas madeiras comerciais	15
Tabela 2 -	Médias dos testes realizados na espécie <i>Swartzia laurifolia</i> em comparação à espécie <i>Zollernia paraensis</i> , à 12 % de umidade.	15
Tabela 3 -	Coefficientes convectivos de transferência de calor(h).	29
Tabela 4 -	Dados de entrada.	34
Tabela 5 -	Dados de saída do programa.	34
Tabela 6 -	Refinamento de malha espacial	39

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	12
1	OBJETIVOS	13
1.1	Objetivo Geral	13
1.1.1	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	A madeira Gombeira	14
2.2	A secagem de madeira	16
2.2.1	Os programas de secagem de madeira	16
2.3	Transferência de Calor	18
2.3.1	Condução	19
2.3.2	Convecção	20
2.3.3	Equação da difusão do calor (difusão térmica)	21
2.4	Condição inicial e condições de contorno	23
2.5	Propriedades termofísicas da madeira	26
2.5.1	Condutividade térmica	26
2.5.2	Calor específico	26
2.5.3	Difusividade térmica	27
2.6	Número adimensionais	27
2.6.1	O número de Biot	27
2.6.2	Número de Fourier	28
2.7	Coeficiente convectivo de transferência de calor	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Análise do problema	30
3.2	Discretização da equação de difusão do calor	31
3.3	Discretização da condição inicial e discretização das condições de contorno	32
3.3.1	Condição inicial	32
3.3.2	Condições de contorno	32
3.3.3	Solução por algoritmo computacional	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Validação do modelo numérico	38
4.1.1	Análise de convergência	39
4.2	Simulação do aquecimento	39
4.2.1	Perfil de temperaturas	40
4.2.2	Comportamento com a variação da espessura	40
4.2.3	Comportamento com a variação da massa específica	42
5	CONCLUSÃO	43

REFERÊNCIAS	44
--------------------------	----

*

INTRODUÇÃO

A madeira é um material presente nas aplicações humanas desde os primórdios dos tempos, isso se deve muito em função de sua versatilidade, a qual é muito bem percebida em características como leveza, grande plasticidade e trabalhabilidade, adaptável a uma variedade de formas, e entre outras peculiaridades (PAOLIELLO, 2001). Isso tudo a leva a ser um dos materiais mais apreciados pela humanidade, marcando presença em todas as culturas e povos, desde os mais avançados tecnologicamente aos mais primitivos, e isso se estendendo até os dias atuais (BATISTA, 2009).

Os processos de aplicação e mercado da madeira expandiram-se ao longo dos anos, para os quais foram exigidos tratamentos cada vez mais refinados e precisos visando à qualidade do produto final. Situação que se encaixa muito bem no cenário industrial atual. Dentro desse setor, a secagem na madeira entra como um dos processos mais importantes, pois a maioria das aplicações requer madeira seca exigindo grandes investimentos e custos elevados. Assim, para que questões de viabilidade sejam atingidas, justifica-se o grande interesse na busca de eficientes meios otimizadores do processo de secagem (MELLADO, 2007).

Em suma, a secagem de madeira é um método que abrange transferência de calor e massa em seu interior. Convecção e transferência de massa na superfície das peças também são importantes, com isso o conhecimento dessas etapas é necessário para o aprimoramento do processo, além claro de outras variáveis, como informações sobre o controle de remoção da umidade da peça, dependência de temperatura do processo, teor de umidade inicial e umidade relativa do ambiente, entre outras características (FRANÇA, 2011).

Vale mencionar que o Programa de Secagem é dividido em três etapas: aquecimento inicial, secagem propriamente dita e condicionamento. O aquecimento inicial pode ser determinado como um a fase que visa a transmissão de calor do ar para a madeira, impedindo que haja transferência de massa da madeira para o ar, e assim manter o ar saturado de vapor de água (FRANÇA, 2011).

Ainda no contexto da melhoria do processo de secagem, França (2011) também nos diz que recorrer ao campo da simulação matemática é um mecanismo interessante a ser adotado, pois possibilitaria reduzir gasto energético, tempo e incidência de defeitos de secagem, sendo uma ferramenta útil na decisão dos processos industriais, contribuindo ainda mais para a viabilidade de todo o processamento.

Por fim, destaca-se que este trabalho ficará encarregado da simulação da etapa de aquecimento inicial, que será aplicada na madeira *Swartzia laurifolia* Benth, conhecida popularmente como Gombeira, sendo esta uma madeira com grande potencial de ser incluída no comércio madeireiro brevemente, tendo em vista a escassez de algumas espécies de madeiras atualmente comercializadas.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Simular numericamente o aquecimento de uma tábua de madeira do tipo Gombeira utilizando o método de diferenças finitas.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Simular o aquecimento de tábuas em diferentes espessuras e massas específicas fazendo o uso de equações para o cálculo dos coeficientes das propriedades térmicas da madeira Gombeira;
- Comparar os resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos com o *Steady State and Transient Heat Conduction(SS-T CONDUCT)*.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A madeira Gombeira

Com o passar dos anos e com a expansão do setor madeireiro, a exploração de espécies de maior valor econômico tornou-se intensa na região amazônica. Isso por sua vez, refletiu na escassez dessas espécies levando ao risco de extinção das mesmas (CARDOSO et al., 2011). Com isso, abriu-se a possibilidade de se pesquisar novas espécies que apresentem características similares ou até melhores, comercialmente, em relação às tradicionalmente exploradas. Dados referentes às características anatômicas, físicas e mecânicas e seus possíveis usos, são indispensáveis no levantamento desse tipo de pesquisa.

Figura 1 - Madeira serrada sólida e usada como piso.



Fonte: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/07/66/81/076681f1e4e38cab08271a7bad00a871.jpg>. Acesso em 30/09/2016

Nesse cenário, surge a *swartzia laurifolia* Benth, popularmente conhecida como Gombeira, a qual é uma madeira ainda não comercializada, mas que apresenta boa disponibilidade e frequência regional.

As principais características que a torna interessante aos setores do mercado madeireiro são a alta massa específica e resistência mecânica, as quais são favoráveis a aplicações como atividades de impacto, fabricação de móveis, pisos e assoalhos, montagem de treliças e encaixes, atividades da construção civil, entre outras (CARDOSO et al., 2011). Essa

madeira apresenta valores de densidade anidra, básica e verde de $1,13 \text{ g/cm}^3$, $0,97 \text{ g/cm}^3$ e $1,27 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Os valores são próximos aos das espécies *Dipterix odorata*, *Aniba canelilla* e *Zollernia paraensis*, com densidades entre $0,91$ a $0,97 \text{ g/cm}^3$, respectivamente (CARDOSO et al., 2011).

A qualidade da madeira é representada pelo Fator ou Coeficiente Anisotrópico (C.A) (CARDOSO et al., 2011). Ao comparar as características da madeira estudada com as espécies comercializadas pode-se observar proximidades como mostrado na tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas de algumas madeiras comerciais .

Grupo	Espécie	Densidade Básica	C.A
Cumarú	<i>Dipterix odorata</i>	0,91	1,6
Pau-Santo	<i>Zollernia paraensis</i>	0,97	1,9
Preciosa	<i>Aniba canelilla</i>	0,92	1,3

Legenda: C.A: coeficiente anisotrópico

Fonte: Adaptado de Cardoso et al. (2011)

A flexão estática, compressão perpendicular e paralela, tração perpendicular, cisalhamento e dureza Janka para a espécie *Swartzia laurifolia* apresentou valores significativos (tabela 2) quanto à resistência se comparados aos da espécie *Zollernia paraensis* (CARDOSO et al., 2011) .

Tabela 2 - Médias dos testes realizados na espécie *Swartzia laurifolia* em comparação à espécie *Zollernia paraensis*, à 12 % de umidade.

Testes realizados	<i>Swartzia laurifolia</i> (Kgf)	<i>Zollernia paraensis</i> (Kgf)
Flexão MOR	2.163	1.915
Compressão Perpendicular	377,34	275
Compressão Paralela	1.114,47	974
Tração Perpendicular	58,28	47
Cisalhamento	206,8	188
Dureza Extremos	2.129,17	1490
Dureza Janka-Faces	2.534,38	1479

Legenda: Média de Kgf

Fonte: Adaptado de Cardoso et al. (2011)

Além disso, a *Swartzia laurifolia* apresenta características anatômicas que a configuram como uma madeira sem brilho nas superfícies longitudinais, com cheiro imperceptível, dura

ao corte manual, com limites dos anéis de crescimento sem distinção, etc (CARDOSO et al., 2011).

2.2 A secagem de madeira

Segundo Mellado (2007), a madeira é um material higroscópico que estabelece relações dinâmicas o ambiente como absorver ou ceder água. Isso se deve à umidade do ar e do próprio material em questão. Além disso, pode-se resumir que a água se desloca de regiões de alto para as de baixo teor de umidade. Do ponto de vista físico, a secagem pode ser compreendida como um balanço entre a transferência de calor à superfície da madeira e transferência de massa do interior à superfície e desta para a corrente de ar. Oliveira (2011) ainda nos diz que a madeira pode sofrer basicamente secagem de dois modos: solar, realizada à baixa temperatura (<50°C) e convencional que é feita por estufas ou secadores onde possam operar com temperaturas entre 40°C e 90 °C.

Uma eficiente secagem madeireira, para Klitzke (2007) citado por França (2011) é necessária para reduzir os custos de produção e aumentar a qualidade do produto final. Tendo em vista as crescentes exigências do mercado consumidor como beneficiamento e boa bitolagem. Andrade (2000) ainda relata que os principais problemas em uma secagem ineficiente seriam: empenos, rachaduras, colapso e endurecimento superficial.

As tensões que se desenvolvem na madeira são a causa básica dos insucessos na secagem, porém não únicos, pois determinados problemas estão ligados a característica d da peça em si, sendo eles explicitados durante a perda de umidade e posteriormente agravados ou não durante o processo de secagem (ANPM,ESALQ/USP E XYLEMA, 2013). Por isso, recomenda-se tomar algumas precauções antes de secar a madeira, tais como secar uma única espécie por vez ou espécies muito semelhantes que possam se submeter ao mesmo processo; carga de peças com a mesma espessura; evitar cargas com peças muito úmidas e muito secas; entre outras.

2.2.1 Os programas de secagem de madeira

Pode-se entender programa de secagem como um plano para se aplicar a combinação adequada de temperatura e umidade relativa à madeira para que a mesma chegue à um teor pré-definido de umidade interna, com o mínimo de defeitos(Galvão e Jankowsky ,1985 citado por Andrade,2000). Nesse raciocínio, Batista (2009) citando Simpson (1991) afirma que um programa de secagem é um compromisso trabalhado visando à rapidez do processo bem como a qualidade do mesmo. É uma série de temperaturas de bulbo seco e úmido que estabelecem a temperatura e umidade relativa do ar dentro da câmara.

Para Andrade (2000), os principais fatores envolvidos na escolha do programa são: es-

pécie da madeira, umidade final e inicial, espessura do material, o uso a que se destinará, e os equipamentos a disposição. Visto que cada espécie requer uma combinação diferente dos fatores citados, ou seja, é um processo que a primeiro passo deve analisar as peculiaridades de cada espécie a fim de se obter um resultado mais preciso.

Elaborar um programa de secagem é uma tarefa simples, tendo em vista diversas bibliotecas de programas na literatura especializada, desde que certos cuidados sejam tomados (ANPM,ESALQ/USP E XYLEMA, 2013). Isso se deve ao fato dos modelos literários serem padrões, isto é, visam atender diferentes tipos de secadores, terem práticas operacionais nem sempre adequadas, e muitas vezes, são aplicados a diferentes espécies que possuem o mesmo nome comercial. Sistemas de controle requerem diferentes formatos para a modelagem, logo, necessita-se adaptar o programa padrão para o modelo específico. Sem falar nos diferentes resultados que ocorrerão em razão do modelo do secador e práticas operacionais efetuadas.

Além disso, Andrade (2000) explica que os programas de secagem podem ser baseados no tempo de secagem (programa tempo-temperatura) ou no teor de umidade da madeira (programa umidade-temperatura), que por sua vez, são os mais utilizados na secagem convencional, abrangendo três fases distintas: aquecimento inicial, secagem propriamente dita e condicionamento.

Estes dois autores abordam que a secagem propriamente dita caracteriza-se pela retirada de umidade do material, as características do meio da secagem são ajustadas de acordo com o teor de umidade da madeira. Já Uniformização e condicionamento, última fase, visa reduzir a variação no teor de umidade entre as peças, eliminar o gradiente de umidade interno da peça e reduzir as tensões de secagem pelo reumidecimento das camadas superficiais.

Já para o processo de aquecimento inicial, Galvão e Jankowsky (1985) citado por França (2011) esclarecem que nessa fase a madeira é aquecida sem iniciar o processo de secagem propriamente dito, sendo que o ar é aquecido até alcançar a temperatura do bulbo seco almejada, evitando-se a secagem superficial, para isso utilizam-se umidades relativas acima de 85%. Bem como, evitar diferenças de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido maiores que 2°C, pois a madeira poderia começar a secar antes de estar totalmente aquecida. Dessa forma, pode-se compreender o aquecimento inicial como uma fase preliminar da secagem da madeira, portanto, trata-se de uma característica de fundamental importância para o processo de secagem como um todo, visto que dimensionamento equivocado dessa etapa poderá comprometer os procedimentos restantes do mesmo, os quais fatalmente poderão refletir em um produto fora do esperado.

Este trabalho refere-se à primeira fase do Programa de Secagem de Madeira: o aquecimento inicial. Neste, calcula-se a temperatura em todos os pontos dentro do corpo antes que o último perca umidade para o ambiente, pois assim iniciaria a secagem propriamente dita.

2.3 Transferência de Calor

Incropera et al. (2008) define transferência de calor como energia térmica em trânsito ocasionada por uma diferença de temperatura. Se a transferência de calor ocorrer em um ambiente estacionário com gradiente de temperatura, denomina-se condução, se ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento a diferentes temperaturas, o processo chama-se convecção. Mais especificamente, resume-se que a transferência de calor ocorre por meio de atividades atômicas e moleculares, em que partículas mais energéticas transferem energia para as menos energéticas em função de interações entre as mesmas.

De posse desses conceitos, Andrade (2000) resume a secagem na madeira como um balanço dinâmico entre a transferência de calor da corrente de ar para a madeira, a evaporação superficial e difusão de umidade na madeira e fluxo de massa capilar. Nesse contexto, a transferência é dada pela passagem de calor do meio secante (ar) para a superfície, ou seja, através da movimentação do fluido, caracterizando assim um processo de convecção. Após o aquecimento da superfície, o calor é transferido ao interior, neste caso, por condução. Além disso, Andrade (2000) também ressalta que no início da secagem, isto é, quando a umidade é maior, a transferência de calor do meio para a superfície é o fator mais importante, porém quando a umidade vai se dissipando, a transferência de calor da superfície para o interior se torna o fator limitador. Deste modo, explica-se porque altas velocidades do ar têm mais relevância na primeira etapa da secagem do que na final. As quais favoreceriam uma secagem mais rápida inicialmente.

Para Klitzke (2007) citado por França (2011) quanto maior a temperatura do ar, maior será a taxa de saída de umidade interna da madeira para a superfície da mesma. Dentro disso, também enfatiza que o calor é indispensável para a ocorrência do processo de evaporação, assim como, a velocidade de evaporação mantém dependência com a quantidade de energia (calor) disposta por unidade de tempo e da eficiência do meio (ar) absorver a umidade da madeira. Nesse raciocínio, Galvão e Jankowsky (1985) citados por Andrade (2000), complementam informando de que a transferência de calor e a evaporação superficial são controladas por condições externas enquanto que o movimento de umidade interno até a superfície da madeira é motivado por propriedades específicas da madeira como permeabilidade e massa específica.

Para a simulação do aquecimento inicial, é necessário modelar o problema com bases na lei física de transferência de calor. Tal lei é conhecida como Lei de Fourier, que deu origem à equação de difusão do calor. Esta equação, mostrada na próxima seção, será utilizada para a determinação da variação da temperatura unidimensional no tempo para uma peça de madeira sujeita ao aquecimento por convecção.

Um dos objetivos da análise de condução de calor é determinar o campo de temperaturas em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras (INCROPERA et al., 2008). A difusão do calor ocorre por condução, convecção e irradiação, sendo as duas primeiras de interesse desse trabalho. A distribuição de temperaturas pode ser determinada pela aplicação

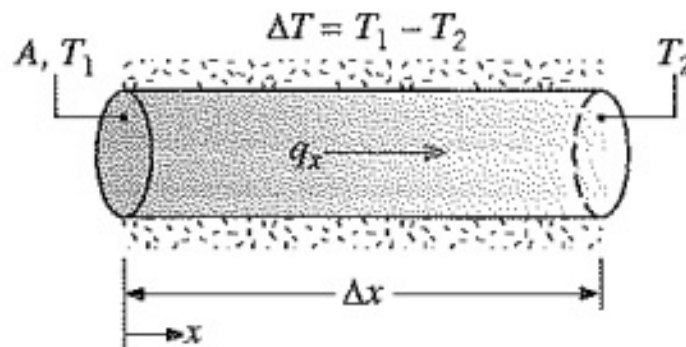
da exigência da conservação de energia (SIMPSON, 1991) em um volume de controle.

2.3.1 Condução

Existem inúmeros exemplos de transferência de calor por condução. A extremidade oposta de uma colher de metal imersa em uma xícara de café ficará aquecida após certo tempo. É possível quantificar esse processo de troca de energia térmica em trânsito através das equações de taxas apropriadas (INCROPERA et al., 2008). Para a condução térmica, o tipo de equação utilizado é conhecido como Lei de Fourier (INCROPERA et al., 2008).

A Lei de Fourier é fenomenológica, isto é, ela foi desenvolvida a partir de fenômenos observados ao invés de ter sido derivada de princípios fundamentais (INCROPERA et al., 2008). Considere o cilindro da figura 2 com as superfícies laterais isoladas em quanto as duas faces restantes são mantidas a diferentes temperaturas com $T_1 > T_2$.

Figura 2 - Condução térmica em regime estacionário.



Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

A taxa de transferência de calor q_x depende das variáveis: ΔT , a diferença de temperaturas; Δx , o comprimento do cilindro e A a área de seção transversal. A variável q_x é diretamente proporcional a A e inversamente proporcional a Δx (INCROPERA et al., 2008).

Assim, escreve-se :

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Onde:

k: condutividade térmica do material do cilindro (w/mk);
A: área da seção transversal (m^2);
 ΔT : diferença de temperaturas($^{\circ}C$);
 Δx : distância entre as faces transversais(m).

Levando q_x ao infinito, obtemos:

$$q_x = kA \frac{dT}{dx}$$

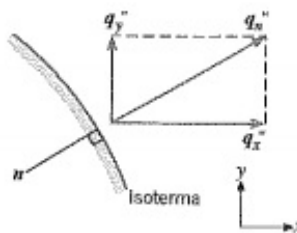
ou pelo fluxo de calor

$$q_x^n = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

A Lei de Fourier descrita na equação 2 ,pelo sinal negativo indica que o fluxo térmico é um grandeza direcional na direção da diminuição da temperatura (INCROPERA et al., 2008). Sendo a equação 2 uma grandeza vetorial ela pode ser escrita de forma mais geral na equação 3 e figura 3 .

$$\vec{q}^n = -k\nabla T = -k\left(\hat{i}\frac{\partial T}{\partial x} + \hat{j}\frac{\partial T}{\partial y} + \hat{k}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (3)$$

Figura 3 - Lei de Fourier em forma vetorial.



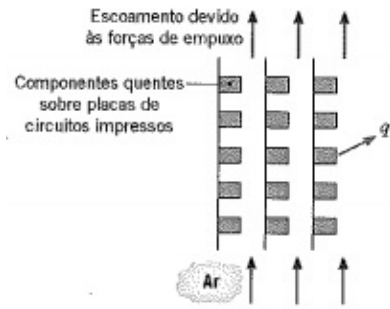
Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

2.3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre no interior de um fluido devido aos efeitos combinados da condução e do escoamento global ou macroscópico do fluido como na figura 4 (INCROPERA et al., 2008).

Independente da natureza específica do processo de transferência de calor por convec-

Figura 4 - Convecção natural.



Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

ção, a equação apropriada para a taxa de transferência possui a forma:

$$q = h * (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Onde:

q'' : é o fluxo de calor por convecção (W/m^2);

$(T_s - T_\infty)$: diferença entre a temperatura da superfície (T_s) e do fluido (T_∞) ambos em $^\circ C$;

Esta expressão é conhecida como Lei do Resfriamento de Newton (INCROPERA et al., 2008) e qualquer estudo da convecção se reduz a procedimentos aos quais o coeficiente convectivo (h) pode ser determinado.

O coeficiente convectivo é usado para definir as condições de contorno de secagem (PANG, 1996) como também do aquecimento. As condições de contorno são usadas para definir o que ocorre em toda a fronteira do meio condutor analisado (BEJAN, 2004 citado por MELLADO, 2007).

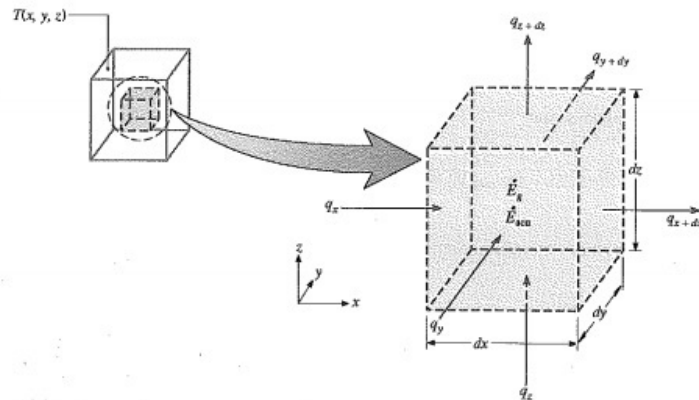
2.3.3 Equação da difusão do calor (difusão térmica)

Inicialmente, considera-se um meio homogêneo no interior do qual não há advecção e a distribuição de temperaturas $T(x,y,z)$ está representada em coordenadas cartesianas. Um volume de controle diferencial $dx dy dz$ é definido conforme figura 5 (INCROPERA et al., 2008). As taxas de transferência por condução podem ser definidas por uma expansão em série de Taylor das equações 5 .

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (5)$$

No interior pode haver uma termo referente à taxa de geração de energia térmica dado

Figura 5 - Volume de controle diferencial.



Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

pela equação 6 (INCROPERA et al., 2008).

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (6)$$

Na ausência de mudança de fase, o termo referente ao acúmulo de energia poder ser escrito como (INCROPERA et al., 2008) :

$$\dot{E}_{acu} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (7)$$

Onde $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de variação com o tempo da energia sensível do material por unidade de volume (INCROPERA et al., 2008). Utilizando a Primeira Lei da Termodinâmica, faz-se um balanço de energia no meio pela equação 8 utilizando as séries de Taylor da equação 5.

$$\dot{E}_{acu} = \dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sai} \quad (8)$$

E obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

Essa equação é chamada de Equação da Difusão do calor (INCROPERA et al., 2008)].

Sua resolução, a partir das condições de contorno do problema obtém a distribuição de temperaturas $T(x,y,z)$ como função do tempo.

Para meios onde a condutividade térmica (k) é constante e não há geração de energia interna ($\dot{q} = 0$), a equação 9 do calor será (INCROPERA et al., 2008):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Para o caso unidimensional :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

Em que

$$\alpha = \frac{K}{C * \rho} \quad (12)$$

Onde:

T: temperatura;

x,y,z: coordenadas espaciais;

t: tempo;

α : difusividade térmica;

k: condutividade térmica;

C: calor específico;

ρ : massa específica;

2.4 Condição inicial e condições de contorno

É necessário resolver a forma correta da equação da difusão de calor. Tal solução depende das condições físicas existentes nas fronteiras do meio e se a situação variar com o tempo, a solução também depende das condições existentes em algum instante inicial.

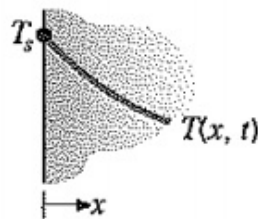
A equação do calor é de segunda ordem em relação às coordenadas espaciais e são definidas condições de contorno neste caso. A equação é de primeira ordem em relação à variável

temporal requerendo também uma condição inicial.

As condições de contorno ocorrem quando: temperatura constante na superfície (equação 13); superfície com calor sensível constante (equações 14 e 15); fluxo de calor por convecção (equação 16).

$$T(0, t) = T_s \quad (13)$$

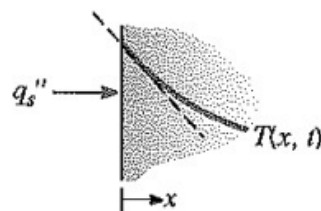
Figura 6 - Valor da derivada na superfície à temperatura constante representada pela equação 13 (condição de contorno de primeira espécie)



Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_x^0 \quad (14)$$

Figura 7 - Valor da derivada na superfície com fluxo térmico constante e não nulo representado pela equação 14 (condição de contorno de segunda espécie)

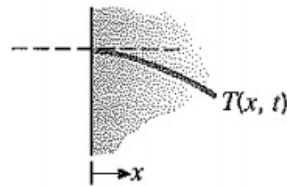


Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (15)$$

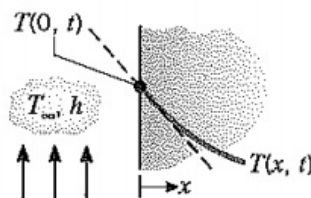
$$-K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h[T_\infty - T(0, t)] \quad (16)$$

Figura 8 - Valor da derivada na superfície com fluxo térmico nulo representado pela equação 15 (condição de contorno de segunda espécie)



Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

Figura 9 - Lei de Fourier igual à lei de resfriamento de Newton para superfície sujeita a convecção como mostrado na equação 16 (condição de contorno de terceira espécie)



Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

As condições estão especificadas para um sistema unidimensional na superfície em $x=L$. A transferência de calor está no sentido positivo de x com a distribuição de temperaturas que pode ser função do tempo e espaço, designada por $T(x,t)$. A primeira condição corresponde à situação na qual a temperatura é mantida a uma temperatura fixa, a segunda e terceira ocorrem quando há fluxo constante de calor sensível a quarta acontece quando há fluxo de calor por convecção.

A terceira condição de contorno ocorre quando há simetria no problema onde acontece um máximo ou mínimo do valor da derivada parcial em relação ao espaço. Esta situação é verdadeira na posição central de um corpo sujeito a aquecimento, pois neste local o fluxo de calor é nulo, justificando o valor zero, como na condição mostrada pela equação e15.

A quarta condição de contorno também é de especial interesse para o aquecimento de qualquer corpo. Logo, a transferência de calor ocorre em regime transiente como dado pela equação 17.

$$h(T_{\infty} - T) + K * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

2.5 Propriedades termofísicas da madeira

As propriedades térmicas são relevantes para a secagem da madeira porque estão relacionadas à quantidade de energia e tempo requerido para aquecer a madeira até a temperatura de secagem (SIMPSON, 1991).

2.5.1 Condutividade térmica

Esta importante propriedade dos materiais é definida pela Lei de Fourier (INCROPERA et al., 2008). Na madeira enquanto material de engenharia é afetada pela massa específica, teor de umidade, teor de extrativos, direção do grão, irregularidades estruturais tais como fendas (MELLADO, 2007). A condutividade térmica é aproximadamente a mesma nas direções radial e tangencial (SIMPSON, 1991)

Para a madeira como material de engenharia a condutividade térmica(aparente) é (KOLLMAN; CÔTÉ, 2012) :

$$K1 = 1,68 * 10^{-4} * \rho_u + 0,022$$

$$Ku = k1 * [1 - 0,0125 * (10 - T_{ui})]$$

$$K = 1,163 * Ku * [1 - [(1,1 - 9,8 * 10^{-4} * \rho_o) * (\frac{27 - T}{100})]] \quad (18)$$

Onde:

K: condutividade térmica da madeira(J/ms⁰C);

K1: valor referente a 10% de teor de umidade;

ρ_u : massa específica aparente (kg/m³) a 10% de umidade;

Ku: valor referente a umidade inicial(%);

T:temperatura ambiente(^aC);

ρ_u massa específica anidra(kg/m³);

2.5.2 Calor específico

O calor específico é uma propriedade termodinâmica da matéria condizente ao estado de equilíbrio de um sistema. É a quantidade de energia necessária para alterar a temperatura de uma substancia de massa conhecida. Essa propriedade na madeira que contém água é maior que o da mesma seca. Acima do ponto de saturação das fibras, essa característica corresponde

ao calor específico da madeira somado ao calor específico da água (SIMPSON, 1991).

Para a madeira como material de engenharia o calor específico(aparente) é (KOLLMAN; CÔTÉ, 2012):

$$C = 4186,8 * \left(\frac{0,01 * T_{ui} + 0,324}{1 + 0,01 * T_{ui}} \right) \quad (19)$$

Onde:

C: calor específico da madeira(J/Kg°C).

T_{ui} : teor de umidade inicial da madeira(%).

2.5.3 Difusividade térmica

Em análises de transferência de calor, a razão entre a condutividade térmica e o produto $C * \rho_{av}$, chamado capacidade calorífica, é chamada difusividade térmica(aparente). A difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir energia térmica (INCROPERA et al., 2008):

$$\alpha = \frac{K}{C * \rho_{av}} \quad (20)$$

Onde:

α : difusividade térmica da madeira(m²/s);

C: calor específico da madeira (J/Kg °C);

ρ_{av} : massa específica da madeira verde(kg/m³);

K: condutividade térmica da madeira(J/ms°C);

2.6 Número adimensionais

2.6.1 O número de Biot

O número de Biot é um parâmetro adimensional que desempenha um papel importante nos problemas de condução que envolvem efeitos convectivos em superfícies. O número de Biot fornece uma medida da queda de temperatura no sólido em relação a diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido (INCROPERA et al., 2008) .

O número de Biot é dado por:

$$Bi = \frac{hL}{K} \quad (21)$$

Onde:

Bi: número de Biot;

h: coeficiente convectivo do ar (J/s m² °C);

K: condutividade térmica da madeira (J/s m°C);

2.6.2 Número de Fourier

O número de Fourier é um tempo que, com o número de Biot, caracteriza problemas de condução transiente. O número de Fourier é a razão entre a taxa de condução e a taxa de retenção de calor, num elemento de volume. Por isso, quanto maior o número de Fourier, menor é o gradiente de temperaturas num sólido durante um intervalo de tempo (ÔZISK, 1990). O número de Fourier é calculado por:

$$F_o = \frac{t * \alpha}{L^2} \quad (22)$$

Onde:

F_o : número de Fourier;

t: tempo adimensional;

α : difusividade térmica da madeira (m²/s);

L: espessura adimensional da madeira.

2.7 Coeficiente convectivo de transferência de calor

Na tabela 3 (TREMBLAY et al,2000 citados por MELLADO,2007) encontram-se os valores de coeficiente convectivo para diversas condições de aquecimento inicial.

Tabela 3 - Coeficientes convectivos de transferência de calor(h).

AUTOR	Condição de Aquecimento	h
PERRÉ(1987)	Tbs 80°C,Tbu 68°C ,var= 5m/s	23 w/m ² k
BENNASRALLAH e PERRÉ(1988)	Tbs 80°C,Tbu 68°C	14 w/m ² k

Legenda: Tbs: temperatura de bulbo seco; Tbu: tempera de bulbo úmido.

Fonte: Adaptado de Mellado (2007)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

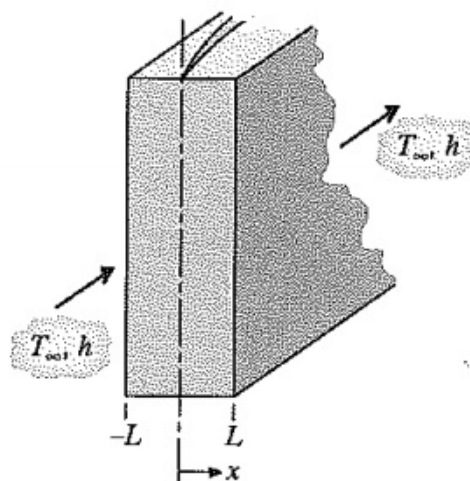
3.1 Análise do problema

O problema analisado neste trabalho refere-se à primeira etapa de qualquer programa de secagem de madeira: **o aquecimento inicial**. Trata-se da transferência de calor para o corpo de estudo com objetivo de aquecê-lo a determinada temperatura sem que este perca umidade para o ar circuncidante.

É análise da transferência de calor por condução tendo como fonte uma superfície do corpo em análise sujeita à convecção natural. As seguintes considerações foram feitas:

1. **Dados:** o ar circuncidante à tábua de madeira aquecido a 80°C transfere calor para as superfícies do corpo por convecção natural; as propriedades termofísicas dadas pelas equações 18, 19 e 20 referem-se a valores aparentes; o coeficiente convectivo (h) é dado pela tabela 3.
2. **Achar:** A distribuição de temperaturas $T(x,y,z)$ ao longo do tempo.
3. **Esquema e considerações:**

Figura 10 - Geometria da tábua de madeira.

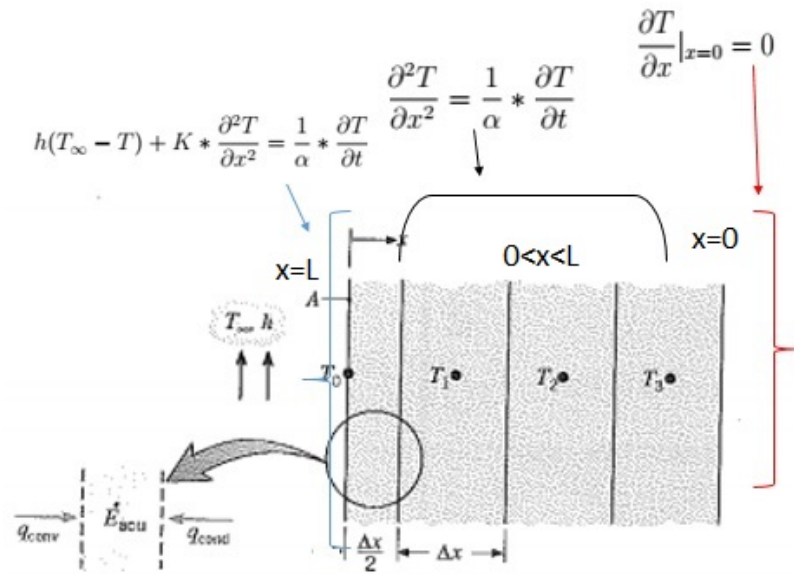


Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

Na figura 10 o aquecimento será simulado na dimensão x de 0 a L espelhando o resultado para 0 a $-L$. Considera-se as demais dimensões z e y muito maiores que x e por isso o

aquecimento nestas direções é desprezado. Os efeitos de vértices e arestas também são considerados desprezíveis.

Figura 11 - Balanço de energia na geometria.



Fonte: Adaptado de Incropera et al. (2008)

A figura 11 mostra o balanço de energia feito para a modelagem matemática do problema. Na superfície ($x=L$) somou-se a energia recebida por convecção (q_{conv}) na superfície da geometria com a perda por condução ao difundir calor para o interior do corpo dando origem à equação 17. Nos pontos entre 0 e L será utilizada a equação 11. Em $x=0$ utilizou-se a equação 15.

3.2 Discretização da equação de difusão do calor

A equação diferencial de regime transiente para o fluxo de calor unidirecional é de segunda ordem parabólica. O método de resolução utilizado é o método das diferenças finitas que discretiza a parte de segunda ordem por uma diferença centrada como mostrado na equação 23.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} = \frac{T_{i+1}^l - 2T_i^l - T_{i-1}^l}{\Delta x^2} \quad (23)$$

Onde:

Δx : distância entre dois pontos discretos;

i : índice referente a coordenada temporal;

l: índice referente a coordenada espacial;

T:i-ésima temperatura;

Uma diferença progressiva mostrada na equação 24 é utilizada para obter a aproximação da derivada no tempo.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{l+1} - T_i^l}{\Delta t} \quad (24)$$

Δt : diferença temporal;

Substituindo as equações 23 e 24 na equação 11, temos que:

$$\frac{T_{i+1}^l - 2T_i^l - T_{i-1}^l}{\Delta x^2} = \frac{1}{\alpha} * \frac{T_i^{l+1} - T_i^l}{\Delta t}$$

Que pode ser reescrita como:

$$T_i^{l+1} = T_i^l + Fo(T_{i+1}^l - 2T_i^l + T_{i-1}^l) \quad (25)$$

A equação 25 calcula a distribuição de temperaturas pelo método explícito.

3.3 Discretização da condição inicial e discretização das condições de contorno

3.3.1 Condição inicial

A condição inicial é a distribuição das temperaturas ao longo do corpo no instante inicial de aquecimento (INCROPERA et al., 2008). Logo, temos que a condição inicial é:

$$T_0^l = T_i \quad (26)$$

3.3.2 Condições de contorno

As condições de contorno são determinadas pela discussão na seção 2.4. Para o ponto central da madeira, a condição de contorno é:

$$T_0^{l+1} = T_0^l + Fo(2T_1^l - 2T_0^l - \frac{\partial T}{\partial x} 2\Delta x)$$

Como $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ no ponto central por não haver fluxo de calor , então:

$$T_0^{l+1} = T_0^l + Fo(2T_1^l - 2T_0^l) \quad (27)$$

Para todos instantes no ponto central da madeira.

Para a superfície sujeita a convecção, discretizando a equação 17 , temos que:

$$h(T_\infty - T_0^l) + \frac{K}{\Delta x}(T_1^l - T_0^l) \simeq \rho C \frac{\Delta x}{2} \frac{T_0^{l+1} - T_0^l}{\Delta t}$$

Reconhecendo que $(2h\Delta t / \rho c \Delta x) = 2(h\Delta x / k)(\alpha \Delta t / \Delta x^2) = 2BiFo$ e agrupando T_0^l , segue-se que :

$$T_{N+1}^{l+1} = 2Fo(T_N^l Bi T_\infty) + (1 - 2Fo - 2BiFo)T_0^l \quad (28)$$

N: número de pontos internos espaciais;

A forma em diferenças finitas do número de Biot é:

$$Bi = \frac{h\Delta x}{K} \quad (29)$$

O critério de estabilidade para as equações 25 e 28 é(INCROPERA et al., 2008) :

$$1 - 2Fo - 2BiFo \geq 0$$

ou

$$Fo(1 + Bi) \leq \frac{1}{2} \quad (30)$$

3.3.3 Solução por algoritmo computacional

Um algoritmo no MAtrix Laboratory(MATLAB) utilizando o método explícito de resolução numérica foi desenvolvido para 40 pontos internos de espessura e 32400 segundos(9 horas) pontos temporais. Licença estudantil concedida à Universidade Federal do Oeste do Pará.

As variáveis de entrada estão mostradas na tabela 4. Utilizou-se os fluxogramas das

figuras 12 e 13 para o cálculo das variáveis da tabela 5.

Tabela 4 - Dados de entrada.

Dados inseridos	Significado	Valor
pu	densidade aparente (10% de teor de umidade)(kg/m ³)	1270
tui	teor de umidade inicial(%)	81
po	densidade anidra(kg/m ³)	1113
pav	massa específica da madeira verde(kg/m ³)	970
h	coeficiente convectivo(w/m ² °c)	14
tamb	temperatura ambiente(°c)	80
ti	temperatura inicial(°c)	20
imax	tempo de simulação(s)	32400
jmax	número de pontos espaciais	40
L	distância x=0 e x=L(m)	0.04

Utilizou para a validação dos resultados o *Steady State and Transient Heat Conduction*(SS-T CONDUCT) desenvolvido por Ghajar e seus colaboradores disponível no centro on-line de aprendizado (www.mhhe.com/cengel) para instrutores e estudantes. O software é de interface amigável e pode ser usado para para resolver muitos problemas de condução de calor com geração de energia interna uniforme em geometrias triangulares para uma ou duas dimensões.

Tabela 5 - Dados de saída do programa.

Dados calculados	Significado	Valor
k1	valor referencial a 10% de umidade	0.2354
ku	valor referente ao teor de umidade inicial da madeira(%)	0.6531
kmad	condutividade térmica da madeira(j/ms°c)	0.7633
cmad	calor específico da madeira(j/kg°c)	2.631*10e-3
amad	difusividade térmica (m ² /s)	2.999*10e-9
T	matriz de distribuição de temperaturas	matriz 32400 x 40

A matriz temperatura da solução foi utilizada para a determinação da distribuição de temperaturas em todos os pontos da espessura em cada instante. Deste modo, foram traçadas curvas de aquecimento para pontos específicos.

A figura 14 mostra as equações utilizadas para o cálculo das condições de contorno: azul para superfície sujeita a convecção(3ª espécie) e vermelho para superfície adiabática(2ª espécie). A equação da difusão do calor baseada na Lei de Fourier é representada pela seta preta.

Figura 12 - Primeira parte do fluxograma.

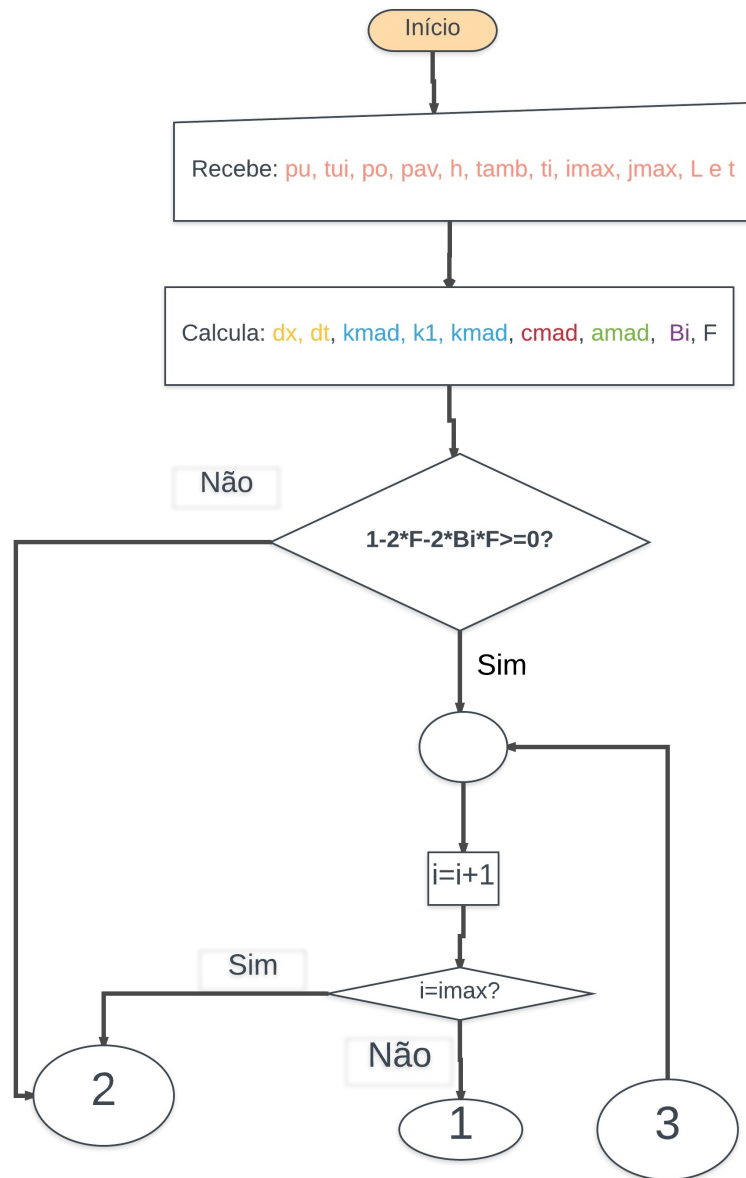


Figura 13 - Segunda parte do fluxograma.

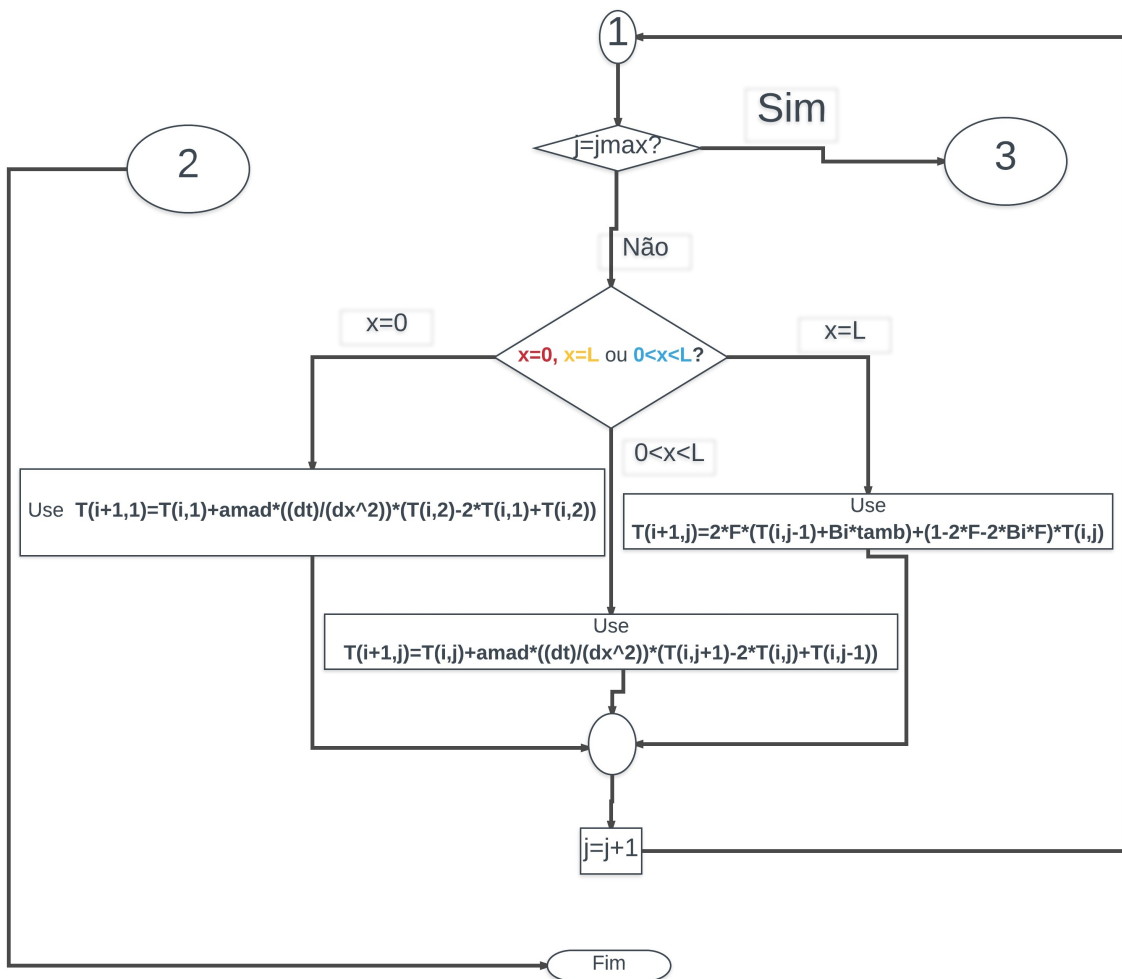
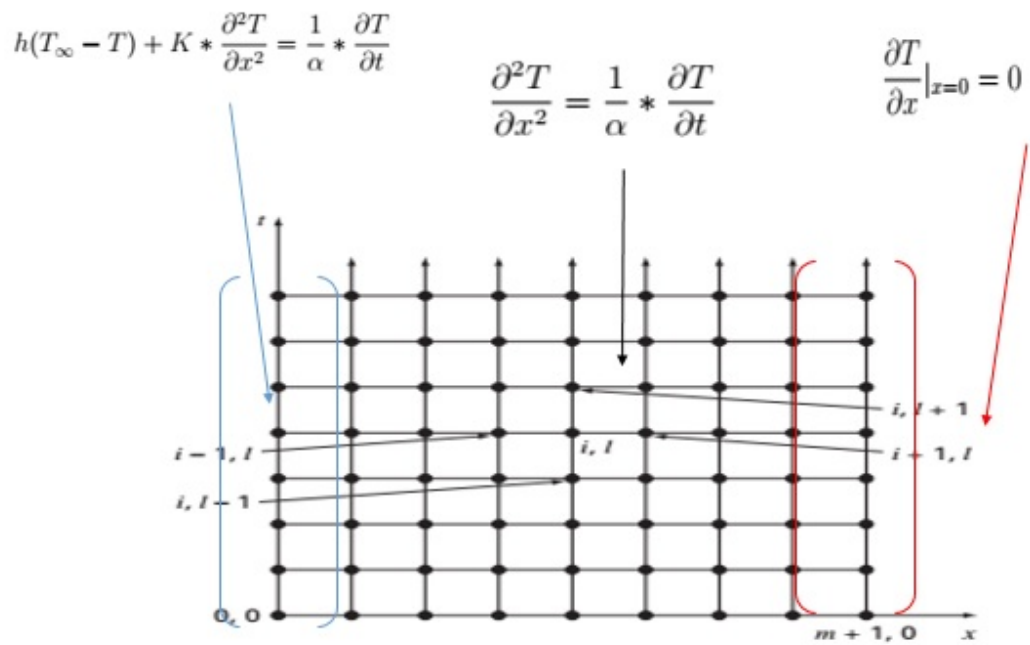


Figura 14 - Resultado do algoritmo.



Fonte: Adaptado de Chapra e Canale (2011)

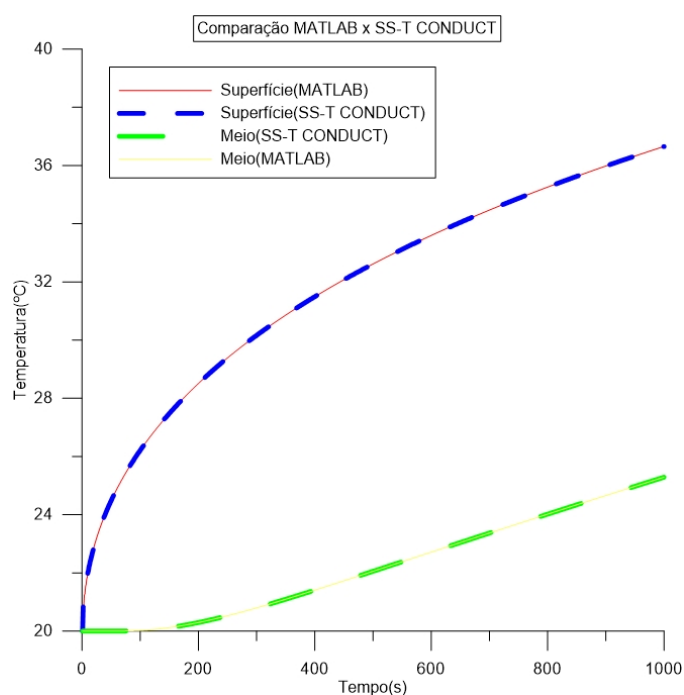
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação do modelo numérico

Com o modelo numérico executado foi feita a comparação entre os dados do *SS-T-Conduct* e os dados numéricos gerados pelo algoritmo criado, sem ajuste do coeficiente convectivo (h), obtido da tabela 3.

Para a geração dos dados, foi utilizado h igual a $14 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e para o cálculo da madeira *Gombeira* foram utilizados valores de massa específica de 970 kg/m^3 (CARDOSO et al., 2011), calor específico igual a $2620 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$ e condutividade térmica igual a $0,7633 \text{ w/m}^\circ\text{C}$.

Figura 15 - Comparação do modelo numérico com o SS-T-Conduct



Na figura 15, considerando as demais dimensões muito maiores que a da superfície sujeita a convecção, encontram-se as curvas de aquecimento entre 20°C e 80°C de uma tábua de madeira de 4 cm ($x=0.04$) de espessura. Foi calculada a distribuição de temperaturas ao longo do tempo por simulação numérica, discretizando a espessura em 9 horas e 50 pontos internos, para as posições interna, no meio e na superfície.

Observa-se na figura 15 que o modelo coincide com o SS-T CONDUCT. Este software, por limitações, é capaz de calcular apenas 16 minutos e 36 segundos minutos de aquecimento para o tamanho da malha espacial utilizada.

4.1.1 Análise de convergência

Utilizou-se uma malha espacial de tamanho 10 e o valor foi progressivamente elevado até 45, levando em conta o critério de estabilidade dado pela equação 30 do método explícito de discretização de equações diferenciais parciais parabólicas. A tabela 6 mostra a análise convergência em $x=0$ e $x=L$ após 4 horas de aquecimento.

Tabela 6 - Refinamento de malha espacial

Número de pontos	$x=0$	$x=L$
10	69,1246°C	71,9212°C
15	68,2349°C	71,3445°C
20	67,7889°C	71,0597°C
25	67,5211°C	70,8901°C
30	67,3425°C	70,7776°C
35	67,2149°C	70,6975°C
40	67,1192°C	70,6376°C
45	67,0448°C	70,5911°C

Pode-se verificar na tabela 6 que para as posições $x=0$ e $x=L$, que os resultados apresentaram uma boa taxa de convergência alcançada com dois dígitos significativos e um valor máximo de 45 pontos da malha.

4.2 Simulação do aquecimento

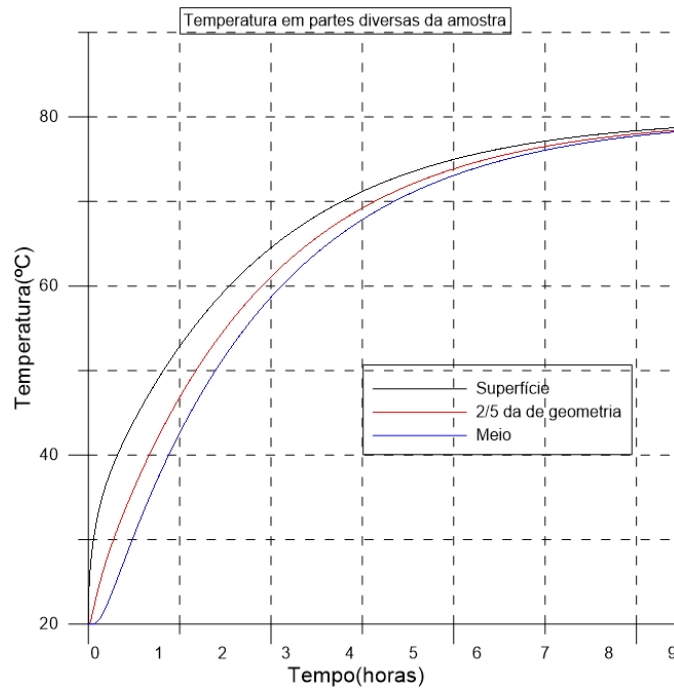
Apenas problemas com geometrias simples possuem soluções analíticas. Com o modelo numérico validado, é possível utilizar as equações apresentadas por Kollman e Côté (2012) para simular o aquecimento da madeira *Gombeira*.

Buscou-se utilizar os mesmos dados empregados na curva entre 20°C e 40 °C calculada com o SS-T CONDUCT. Foi utilizado h igual a 14 $w/m^2°C$ e discretizou-se a espessura de 4 cm em 50 pontos internos no espaço e 32400(segundos, ou 9 horas) no tempo. Para o cálculo da difusividade térmica foram utilizados as equações 18 e 19 com o valor de 970 kg/m^3 para a massa específica básica.

Na figura 16 encontra-se o comportamento simulado da distribuição de temperaturas em uma tábua de madeira *Gombeira*, calculado por simulação numérica na superfície, em 2/5 de espessura e no interior da peça. Foi simulado o aquecimento entre 20°C e 80°C, com base nos valores de coeficiente convectivo igual a 14 $w/m^2°C$, massa específica básica de igual a 970 kg/m^3 e teor de umidade inicial igual a 70 %.

A superfície demorou 3 horas e 51 minutos para atingir a temperatura de 70°C, demoraram 4 horas e 14 minutos e 4 horas e 37 minutos para que 2/5 da espessura e o interior da peça

Figura 16 - Distribuição de temperaturas na superfície, a 2/5 da superfície e no meio.



atingissem a mesma temperatura, respectivamente.

4.2.1 Perfil de temperaturas

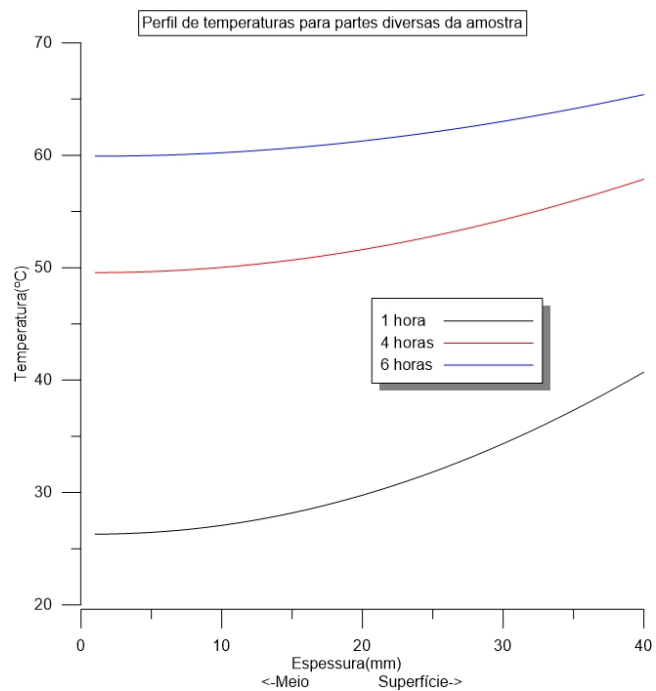
Na figura 17 encontra-se o perfil de temperaturas do centro até a superfície de uma tábua em diferentes instantes do aquecimento fazendo uso dos valores do coeficiente convectivo igual a $14 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{c}$ e massa específica básica igual a 970 kg/m^3 .

De acordo com os resultados numéricos obtidos, o perfil de temperaturas da figura 17 mostra que a diferença entre a superfície sujeita a convecção e o meio da peça de madeira diminui com o tempo, situação também mostrada pela figura 16. Isto ocorre porque a temperatura tem tendência, sob condições ideais, a tornar-se uniforme. Comportamento também observado por França (2011) para a madeira *Pinus*.

4.2.2 Comportamento com a variação da espessura

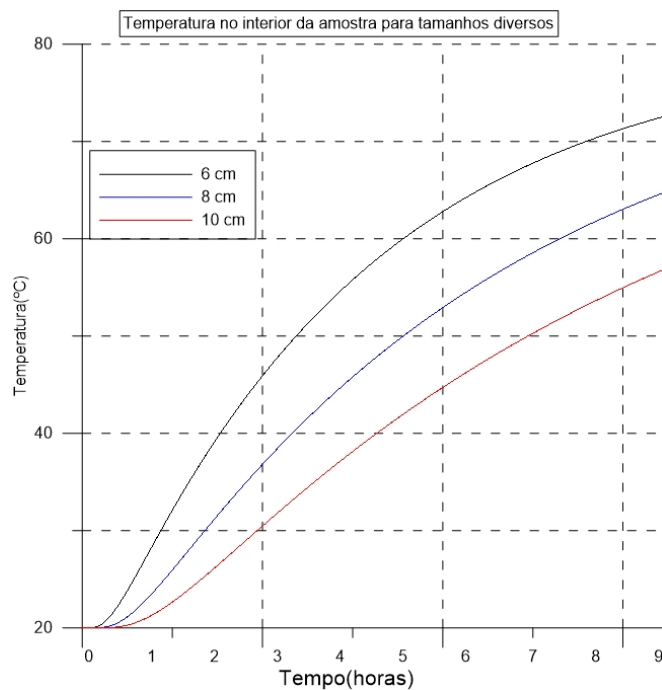
Com base nos valores de coeficiente de h igual a $14 \text{ w/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$, teor de umidade inicial igual a 70%, massa específica básica igual a 970 kg/m^3 , foi simulado o aquecimento entre 20 e 80°C de uma peça de madeira *Gombeira* com diferentes espessuras. A discretização foi de 50 pontos internos. Calculou-se o tempo necessário para o interior de uma peça de madeira atingir

Figura 17 - Perfil de temperaturas da amostra para tempos diversos.



70°C com diferentes espessuras. Na figura 18 encontra-se o comportamento da temperatura no interior da peça de madeira *Gombeira* com diferentes espessuras.

Figura 18 - Comportamento para diferentes espessuras.



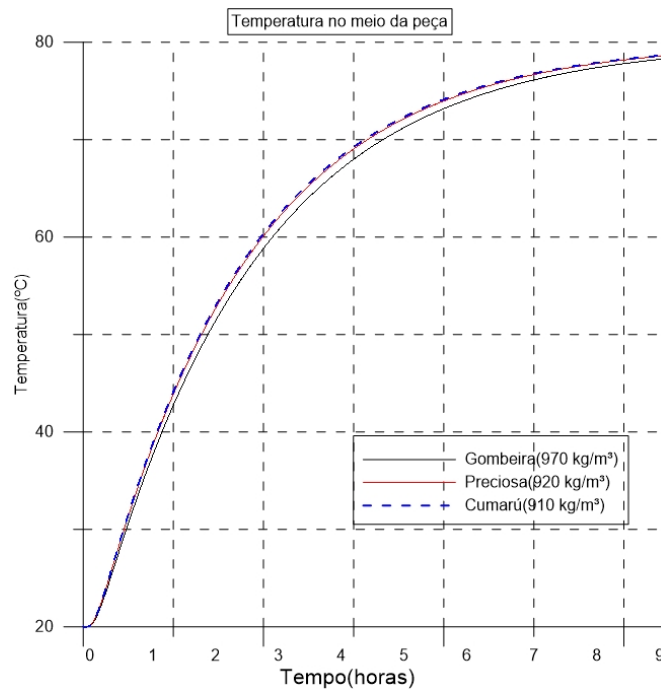
De acordo com os resultados numéricos obtidos, o interior da peça, em 8 horas, foi aquecido até 67 graus celsius com 6 cm de espessura, até 60 graus com 8 cm de espessura, até

57 graus com 10 cm de espessura. Notou-se que quanto mais espessa a tábua de madeira, maior o tempo necessário para o aquecimento. Este resultado também foi observado por França (2011) para a madeira *Pinus*. Galvão e Jankowsky (1985) citado por França (2011) afirmaram que a duração do aquecimento é diretamente proporcional à espessura da peça de madeira.

4.2.3 Comportamento com a variação da massa específica

Com base nos valores de coeficiente de h igual a 14 w/m^2 , teor de umidade inicial igual a 70%, foi simulado o aquecimento entre 20 e 80°C de uma peça de Gombeira, Preciosa e Cumarú, utilizando os valores da tabela 1. O resultado pode ser observado na figura 19.

Figura 19 - Comportamento para diferentes valores de massa específica.



Pode-se concluir da figura 19 que no meio da peça, em 8 horas atingiu 78 graus celsius para uma madeira de 970 kg/m^3 , 79 graus celsius para 920 kg/m^3 e 78,9 graus celsius para 910 kg/m^3 . Portanto, a análise dos resultados mostrou que quanto maior a massa específica mais tempo será necessário para o aquecimento. Visto que existe uma relação de dependência entre condutividade térmica, massa específica e calor específico (FRANÇA, 2011).

5 CONCLUSÃO

Validou-se o algoritmo criado pela discretização da equação do calor unidimensional em comparação com os resultados obtidos pelo SS-T CONDUCT . Verificou-se ser possível a simulação do aquecimento de tábuas de madeira.

O tempo de aquecimento é diretamente proporcional ao aumento da espessura das tábuas e suas massas específicas.

É possível ampliar o estudo para a determinação da difusão do calor em duas ou mais dimensões. O modelo unidimensional proposto neste trabalho serve como ponto de partida para melhorias ou futuros trabalhos apoiados pela experimentação.

O ajuste das equações representativas das propriedades intrínsecas da peça de madeira tais como condutividade térmica, bem como dos coeficientes representativos das condições ambientais de secagem, como o coeficiente convectivo podem ser realizados em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Ariel. *Indicação de Programas Para A Secagem Convencional de madeiras*. 2000. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) — Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- ANPM – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE PISOS DE MADEIRA AND ESALQ/USP – ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ / UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO AND XYLEMA SERVIÇOS E COMÉRCIO DE EQUIPAMENTOS PARA INDÚSTRIA DA MADEIRA LTDA. *SECAGEM DE MADEIRAS*. São Paulo, 2013. 39 p.
- BATISTA, Djeison Cesarl. *Qualidade Da Secagem Convecional Conjunta da Madeira de Nove Clones Do Gênero Eucalyptus*. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Floresta) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- CARDOSO, C.C et al. Análise tecnológica da espécie (swartzia laurifolia), com potencial madeireiro, na região de santarém,pa. *ResearchGate*, Santarém, n. 1124, Janeiro 2011.
- CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. *Métodos Numéricos para a Engenharia*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 825 p.
- FRANÇA, F.J.N. *Modelagem da transferência de calor em madeira de Pinus sp.* 2011. 36 29. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) — Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.
- GALVÃO, A.P.M; JANKOWSKY, I.P. *Secagem racional da madeira*. São Paulo: LTC, 1985.
- INCROPERA, Frank P. et al. *Fundamento de Transferência de Calor e de Massa*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 645 p.
- KLITZKE, R.J. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. *Suprema*, Jerônimo Monteiro, p. 271–342, 2007.
- KOLLMAN, Franz F.P; CÔTÉ, Willfred A. *Principles of wood science and technology I : Solid Wood*. New York: Springer-Varlag, 2012. 592 p.
- MELLADO, Emanuel Carlos. *Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus*. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- OLIVEIRA, Leonardo Jonathan Guisolphi Gomes. *Secagem convencional de madeira serrada de Pinus taeda L. buscando atender a indústria moveleira do sul do Brasil*. 2014. 38 29. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) — Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2011.
- PANG, S. External heat and mass transfer coefficients for kiln drying of timber. *Drying Technology*, p. 859–871, 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/07373939608917128>>.

PAOLIELLO, Carla. *Análise Biomecânica Da Estrutura De Cadeiras De Madeira*. 2001. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SIMPSON, William Thomas. *Dry kiln operator's manual*. [S.l.]: Madison: Forest Products Laboratory, 1991. 188 p.

ÔZISK, M.Necati. *Transferência de calor*. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 1990. 661 p.
