

**LAUDELINO PONTES FERNANDES**

**MODELO MATEMÁTICO PARA SECAGEM DE MADEIRA  
EM ESTUFAS – FASE DE AQUECIMENTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Ijuí, 22 de agosto de 2006**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL**  
**DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA**  
**DeTEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO-SENSU EM MODELAGEM**  
**MATEMÁTICA**

A comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação

**“MODELO MATEMÁTICO PARA SECAGEM DE MADEIRA**  
**EM ESTUFAS – FASE DE AQUECIMENTO”**

Elaborada por

**LAUDELINO PONTES FERNANDES**

Como requisito para a obtenção do grau de mestre em modelagem matemática.

Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Gilberto Carlos Thomas – Orientador - DeFEM

---

Prof. Dr. Valdeci José Costa – Co-Orientador - UNIPLAC

---

Prof. Dr. Jonas Cordazzo – UFSC

---

Prof. Dr. Gilmar de Oliveira Veloso - DeFEM

Ijuí, 22 de agosto de 2006

**LAUDELINO PONTES FERNANDES**

**MODELO MATEMÁTICO PARA SECAGEM DE MADEIRA  
EM ESTUFAS – FASE DE AQUECIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Matemática – Área de concentração: Modelagem Matemática, da Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul (RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS NO DOMÍNIO DA MODELAGEM MATEMÁTICA.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Carlos Thomas

Co-Orientador: Prof. Dr. Valdeci José Costa

## AGRADECIMENTOS

À minha família, meus filhos Larissa, Analu e Felipe e em especial a minha esposa Dilma, pela compreensão e paciência que teve nos momentos em que não estive presente.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. Valdeci Jose Costa o qual propôs a realização deste projeto, obrigado pela orientação, estímulo, ajuda e acompanhamento constante o qual foi essencial para a realização deste trabalho.

Aos professores funcionários e bolsistas do Centro de Ciências Exatas e tecnológicas da UNIPLAC, pelo pronto atendimento dispensado quando da realização da parte experimental deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Dr. Gilberto Carlos Thomas, por ter acreditado e me incentivado, acreditando sempre no bom andamento de nosso trabalho.

À coordenação do curso pelo pronto atendimento e pela cordialidade e amizade e tivemos.

Aos professores do curso de Mestrado em Modelagem Matemática pelo empenho em suas aulas, o que possibilitou a socialização de significativos conhecimentos.

Aos meus colegas de mestrado, pelo convívio, pela amizade que compartilhamos e também pelo incentivo e sociabilidade nos momentos de estudo.

Aos Professores e funcionários do DeFEM - Departamento de Física Estatística e Matemática pelo pronto atendimento que sempre dispensaram.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>RESUMO</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1 Delimitação do problema.....	17
1.2 Escopo do trabalho.....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>3. MODELO MATEMÁTICO</b> .....	36
3.1. Equações de Transporte e Conservação .....	36
3.2 Discretização das Equações Governantes .....	37
3.3 Solução do Sistema de Equações .....	43
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	45
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	47
5.1 Pesquisas Experimentais .....	47
5.2 Pesquisas numéricas .....	55
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	82
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	85

## LISTA DE SIMBOLOS

### Subscritos , Sobrescritos e símbolos arábicos

$PV$	Massa da madeira verde [kg];
$PS$	Massa da madeira seca [kg];
$j$	Fluxos de massa, ar e energia;
$\langle qm \rangle$	Fluxo de vapor [kg/s];
$u$	Teor de umidade da madeira;
$c$	Calor especifico $\left[ \frac{cal}{g^{\circ}C} \right]$ ;
$k$	Condutibilidade térmica $\left[ \frac{kcal}{mh^{\circ}C} \right]$ ;
$h_{tot}$	Entalpia total específica [kJ / kg];
$h$	Entalpia termodinâmica específica [kJ / kg];
$V$	Volume [ $m^3$ ];
$s$	Superfície de integração [ $m^2$ ];
$dn_j$	Componentes cartesianas diferenciais do vetor área, externo à superfície;
$ipn$	Pontos de integração;
$\dot{m}_p$	Fluxo discreto de massa pela superfície do volume de controle [kg/s];
$T$	Temperatura

### Símbolos gregos

$\psi_i$	Quantidade conservada;
$\rho_u$	Massa específica da madeira úmida [kg/m <sup>3</sup> ];
$\rho_o$	Massa específica da madeira verde [kg/m <sup>3</sup> ];
$\alpha$	Difusividade térmica $\left[ \frac{kgm^2}{s} \right]$ ;
$\rho,$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ];
$\lambda$	Condutividade térmica $\left[ \frac{kJ}{m.s.K} \right]$ ;
$\Delta t$	Passo de tempo [s];

**Abreviaturas**

CCET	Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Uniplac;
NIPLAC	Universidade do Planalto Catarinense
UM	Malha não estruturada;
SM	Malha estruturada;
CV	Volume de controle;
TA	Temperatura ambiente da estufa;
Tmad	Temperatura no interior da madeira;
TA-seca	Temperatura da madeira seca;
TA-verde	Temperatura da madeira verde;
Tmad_seca	Temperatura da madeira seca obtida numericamente na simulação;
Tmad_verde	Temperatura da madeira verde obtida numericamente na simulação;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: (a) Estufa hipotética utilizada nos testes para duas pilhas transversais ao fluxo .....	18
(b) Estufa hipotética utilizada para estabelecer os perfis de temperatura e velocidade em uma estufa com geometria semelhante a uma estufa real .....	18
Figura 3.1: Volume finito superficial.....	38
Figura 3.2: Elemento da malha .....	39
Figura 3.3: Elemento hexaédrico de uma malha qualquer.....	41
Figura 4.1: Corpo de prova mostrando a localização da perfuração e conseqüente inserção do termopar.....	45
Figura 5.1: Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 80 °C, para madeira seca e para madeira verde .....	53
Figura 5.2: Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 90 °C, para madeira seca e para madeira verde .....	54
Figura 5.3: Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 100 °C, para madeira seca e para madeira verde .....	54
Figura 5.4: Design da estufa utilizada nos primeiros casos testes. Oito tábuas foram dispostas em duas pilhas paralelas de maneira transversal a um escoamento de velocidade 0,5 m/s.	
Figura 5.5: Malha gerada para uso nos casos 1, 2 e 3.....	60
Figura 5.6: Linhas de corrente obtidas para o caso 1 depois de 15 minutos de iniciado o processo para uma velocidade de escoamento de 0,5 m/s.....	61
Figura 5.7: Distribuição de temperaturas (global) no canal e nas peças com 15 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1. ....	61

Figura 5.8: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 15 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1. ....	62
Figura 5.9: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 30 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1. ....	62
Figura 5.10: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 45 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1. ....	63
Figura 5.11: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 60 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1. ....	63
Figura 5.12: Curvas de distribuição de temperaturas (global) nas peças com 15 min de exposição; caso 1. ....	64
Figura 5.13: Curvas de distribuição de temperaturas (global) nas peças com 30 min de exposição; caso 1. ....	64
Figura 5.14: Curvas de distribuição de temperaturas (global) nas peças com 60 min de exposição; caso 1. ....	65
Figura 5.15: Comportamento da temperatura em um ponto central da tábua de madeira. Comparação entre resultados numéricos e experimentais para uma temperatura ambiente de 80 °C. Caso 2. ....	65
Figura 5.16: Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 15 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2. ....	66
Figura 5.17: Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 30 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2. ....	66
Figura 5.18: Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 60 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2. ....	67
Figura 5.19: Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 90 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2. ....	67
Figura 5.20: Curvas de distribuição de temperaturas (local) nas peças com 15 min de exposição; caso 2. ....	68
Figura 5.21: Curvas de distribuição de temperaturas (local) nas peças com 30 min de exposição; caso 2. ....	68
Figura 5.22: Curvas de distribuição de temperaturas (local) nas peças com 60 min de exposição; caso 2. ....	69

Figura 5.23: Aproximação polinomial para a temperatura na entrada da estufa (em preto), a partir de valores reais extraídos da estufa experimental do CCET (em vermelho).....	69
Figura 5.24: Linhas de corrente no interior da estufa para um escoamento totalmente desenvolvido. Caso 3. ....	70
Figura 5.25: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 30 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3. ....	70
Figura 5.26: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 60 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3. ....	71
Figura 5.27: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 90 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3. ....	71
Figura 5.28: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 120 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.....	72
Figura 5.29: Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 150 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.....	72
Figura 5.30: Distribuição de temperaturas (global) no canal e nas peças com 180 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3. ....	73
Figura 5.31: Curva de distribuição da temperatura local nas peças com 30 min de exposição, numa visão da entrada da estufa; caso 3. ....	73
Figura 5.32: Curva de distribuição da temperatura local nas peças com 90 min de exposição, numa visão da entrada da estufa; caso 3. ....	74
Figura 5.33: Curva de distribuição da temperatura global nas peças com 180 min de exposição; caso 3. ....	74
Figura 5.34: (a) Estufa em miniatura com oito tábuas em seu interior. Os dutos de entrada estão indicados com as setas brancas e os dutos de saída com as setas azuis. (b) Linhas de corrente para uma velocidade de 30 m/s na entrada da estufa com temperatura do ar igual a 80 °C.....	75
Figura 5.35: Distribuição de temperatura global num plano transversal à pilha de madeira: (a) 0,1 s. (b) 0,2 s. (c) 0,4 s. (d) 1 s. (e) 5 s. (f) 10min e 10 s.....	76
Figura 5.36: Distribuição de temperatura global num plano transversal à pilha de madeira: (a) 20 min e 10 s. (b) 30min e 10 s. ....	77

- Figura 5.37: (a) Isolinhas de velocidade obtidas com “swirl” na entrada e temperatura do ar igual a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , depois de  $0,2\text{ s}$  de iniciado o processo de entrada de ar quente dentro da estufa. (b) Isolinhas de velocidade depois de 6 horas de instalação do fluxo de ar a  $90^{\circ}\text{C}$ . ..... 79
- Figura 5.38: Distribuição local de temperatura com o tempo para: (a) 15 min (b) 30 min (c) 45 min (d) 1 hora (e) 2 horas (f) 6 horas. Temperatura do ar na entrada é  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  ..... 80
- Figura 5.39: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para madeira verde e seca com os valores numéricos obtidos para a madeira verde..... 81

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 5.1: Resultados experimentais obtidos para uma tábua seca a uma temperatura ambiente de 80 °C durante 420 minutos. Valores dispostos a cada 30 minutos. ....	47
Tabela 5.2: Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde a uma temperatura ambiente de 80 °C durante 840 minutos. Valores dispostos a cada 30 minutos. ....	48
Tabela 5.3: Resultados experimentais obtidos para uma tábua seca a uma temperatura ambiente de 90 °C durante 300 minutos. Valores dispostos a cada 30 minutos. ....	49
Tabela 5.4: Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde a uma temperatura ambiente de 90 °C durante 780 minutos. Valores dispostos a cada 30 minutos ....	50
Tabela 5.5: Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde e uma tábua seca a uma temperatura ambiente de 100 °C durante 720 minutos. Valores dispostos a cada 30 minutos.....	51
Tabela 5.6: Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde e uma tábua seca, na estufa CONTRACO, a uma temperatura ambiente de 90 °C durante 540 minutos. Valores dispostos a cada 30 minutos.....	52
Tabela 5.7: Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações numéricas.....	56
Tabela 5.8: Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações de madeira verde.....	78
Tabela 5.9: Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações de madeira seca.....	78

## RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de fazer uma investigação sobre a secagem controlada de madeira em estufa, estudando suas propriedades físicas e geométricas, focalizando o processo de aquecimento das tábuas.

Foram efetuados vários testes experimentais de aquecimento de peças de madeira com diferentes teores umidade inicial. As temperaturas da estufa foram estabelecidas para 80 °C, 90 °C e 100 °C. Para 100 °C, os ensaios foram feitos com duas peças de madeira, uma seca e uma verde. Os intervalos de tempo para cada ensaio também foram diferentes. As temperaturas foram monitoradas por um termopar colocado em uma perfuração cilíndrica exatamente no centro da peça e outros três termopares foram dispostos no ambiente da estufa. No monitoramento foi utilizado um thermo-couple da MARRARI, modelo fitosanitário, e os registros das temperaturas foram feitos a cada 5 minutos, durante um intervalo de tempo estabelecido. Verificou-se que a taxa de aquecimento da madeira depende inversamente de seu teor de umidade. A taxa de aquecimento da madeira seca é rápida, levando em média 35 minutos para atingir 56 °C, ao passo que a madeira verde leva horas para atingir a mesma temperatura.

Numericamente foram feitas simulações para várias geometrias de estufas, resolvendo o problema térmico e fluidodinâmico utilizando o software comercial CFX. Os principais fenômenos envolvidos no processo de transferência de calor e massa foram considerados. Um modelo matemático foi constituído para diferentes condições de entrada de ar na estufa. Uma expressão polinomial foi obtida a partir de dados experimentais para a temperatura no interior da estufa e este valor foi atribuído à temperatura na entrada de uma estufa do tipo duto. Resultados foram obtidos para duas pilhas de madeira transversais ao escoamento. A segunda pilha mostrou ter taxas de aquecimento superiores à primeira pilha. Foi também modelado um escoamento com swirl nos dutos de entrada de ar quente, com a finalidade de simular a existência de ventiladores no interior da estufa. Mesmo utilizando o swirl, os resultados numéricos apresentam boa concordância com os resultados experimentais apenas nos primeiros 70 minutos. Este fato ocorre devido à variação das propriedades físicas, principalmente a difusividade térmica.

## ABSTRACT

This work was developed with the objective of perform an investigation on the controlled wood drying in kiln, studying physical and geometric properties, focusing the process of heating of the boards.

Experimental tests of heating of wood pieces were made with different initial wood moisture content. The temperatures of the chamber were established for 80 °C, 90 °C and 100 °C. For 100 °C, the dry run was made with two wood pieces, one dried and one green. The intervals of time for each rehearsal were also different. The temperatures were monitored by a thermocouple placed exactly in a cylindrical gap in the center of piece and other three thermocouples were disposed inside the kiln. In monitoring a thermocouple of MARRARI was used, fitosanitary model, and the temperatures registration were made every 5 minutes, during an interval of established time. It was confirmed that the heating rate of the wood depends inversely of its moisture content. The heating rate of the wood dried is fast, taking on the average 35 minutes to reach 56 °C, to the step that the green wood takes hours to reach the same temperature.

Numerically was made simulations for several kilns geometries, solving the thermal and fluid-dynamic problem using the commercial software CFX. The main phenomena included in the process of heat and mass transfer were considered. A mathematical model was established for different conditions in entrance of air in kiln. A polynomial expression was obtained starting from experimental data for the temperature inside the kiln and this value was assigned to the temperature in entrance of kiln of the channel kind. Results were obtained for two transverse wood piles on the flow. The second pile showed to have superior heating rates in relation to first pile. It was also modeled a swirl in the entry of hot air, with the purpose of simulating the existence of fans inside the kiln. Same using the swirl, the numeric results just present good agreement with the experimental results in the first 70 minutes. This fact happens due to the variation of the physical properties, mainly thermal diffusivity.

## 1. INTRODUÇÃO

A secagem da madeira é um dos processos mais importantes na fase de industrialização da mesma. A agregação de valor pela secagem adequada tem sido alvo de pesquisa ao longo dos anos. Sua secagem apresenta importantes vantagens (Keine, 1997):

- Substancial redução de peso, com conseqüente redução nos custos de transporte;
- Aumento da resistência a fungos, bolores e insetos;
- As contrações que acompanham o processo de secagem ocorrem antes da madeira ser transformada em seu produto final;
- Melhora suas propriedades mecânicas, facilita a união com pregos, parafusos ou colas, favorece o recebimento de pinturas e outros acabamentos;
- Passa a ser isolante térmico e elétrico;
- Pode ser facilmente torneada, fresada, lixada, etc.

No passado acreditou-se que o plástico iria substituir os artefatos de madeira, contudo nunca se produziu tanta madeira serrada como na atualidade (Keine, 1997). Neste cenário, uma rápida transformação de árvore em produto final deve ser cada vez mais exigida. Por isto a utilização da secagem artificial, via emprego de estufas, tem recebido especial atenção e aplicação de vultosas somas por parte das indústrias madeireiras da região serrana do estado de Santa Catarina. A secagem a céu aberto além de requerer um longo tempo, de várias semanas, e exigir grandes espaços físicos, expõe a madeira ao ataque de fungos que iniciam o processo de deterioração das camadas mais externas, produzindo manchas e outros problemas que reduzem o valor comercial das peças atacadas.

Até o momento existem vários problemas relativos ao processo de secagem artificial controlada que ainda não foram resolvidos adequadamente. Ocorre que, tanto a fabricação das estufas, quanto seu uso pelas empresas, é efetuado, tendo como base, o conhecimento empírico adquirido pela prática dos técnicos envolvidos na operação da secagem. O tempo de secagem, grandeza fundamental no processo, é estabelecido empiricamente e tem sido motivo de discussão. Outro fator importante no processo é o chamado “banho”, onde água a temperatura ambiente é injetada para o interior da estufa em intervalos regulares e tem como objetivo a homogeneização da umidade no interior da madeira. Não se encontrou na literatura pesquisada, nenhum trabalho que apontasse estudos recomendando quando efetuar o “banho”

e a quantidade ideal de água a ser injetada. Outra variável importante é a circulação de ar dentro da estufa. Os efeitos convectivos provocados pelas correntes de ar afetam diretamente a velocidade do processo de secagem, por isto merecem atenção e estudo.

Como podemos perceber, existem inúmeras lacunas no conhecimento dos parâmetros de operação das estufas secadoras de madeira que merecem estudo e dedicação dos pesquisadores da área de transferência de calor e mecânica dos fluidos.

As dificuldades de um estudo aprofundado no processo de secagem residem na complexidade e acoplamento de fenômenos físicos importantes: transferência de calor e massa na superfície da madeira, difusão da umidade no interior da extensa rede porosa, anisotropia da madeira, altas razões de permeabilidade, além de outros (Turner e Ferguson (I), 1995). Paralelamente, as dificuldades ligadas à modelagem do processo exigem alto grau de conhecimento das equações matemáticas que descrevem acopladamente estes fenômenos.

Em virtude desta complexidade, existem na literatura poucos trabalhos dedicados ao estudo teórico e experimental da secagem de madeira. Os modelos matemáticos encontrados, normalmente, limitam-se a uma avaliação paramétrica qualitativa, deixando de lado a questão da validação experimental dos resultados encontrados numericamente. Além disto, as simplificações efetuadas vêm reduzir a confiabilidade dos resultados.

Por isto estabelecer modelos matemáticos mais realísticos e confiáveis e que estejam suportados pela experimentação são de grande interesse para a comunidade científica e para a indústria que ainda não possui boas ferramentas computacionais que possibilitem simular o fenômeno da secagem da madeira.

De acordo com a revisão bibliográfica e pesquisas preliminares determinou-se que o estudo da secagem de madeira deve iniciar pela fase de aquecimento, uma vez que as características iniciais do escoamento e o desenvolvimento do campo de temperaturas desempenham papel fundamental no processo.

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é formular um modelo matemático tridimensional que possibilite estudar teórica e experimentalmente o fenômeno da secagem de madeira – fase de aquecimento – em um ambiente convectivo a temperaturas elevadas; de modo a estabelecer relação entre o modelo matemático e os resultados obtidos experimentalmente nas estufas do CCET da UNIPLAC.

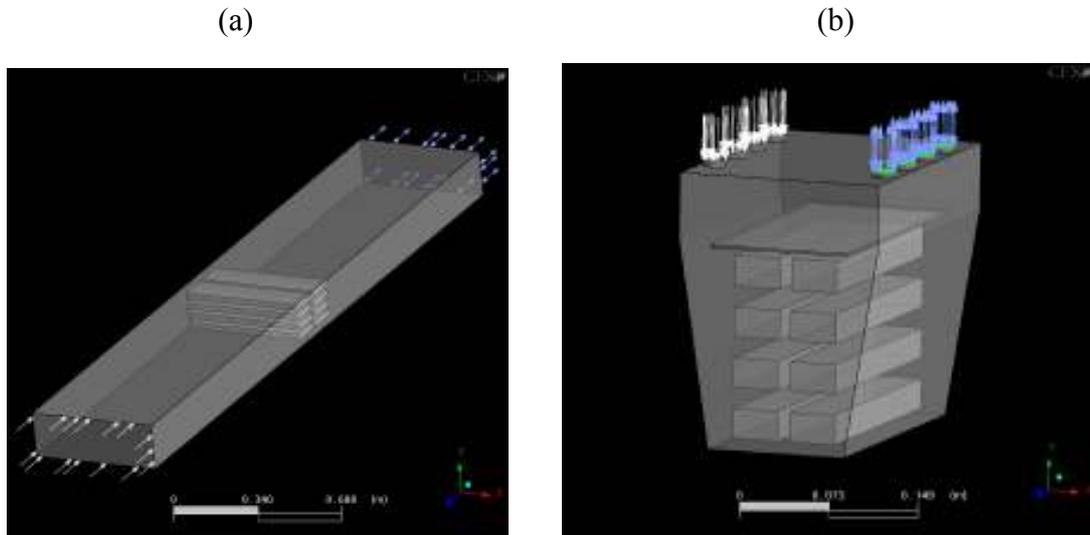
## 1.1 Delimitação do problema

Vários trabalhos publicados têm se dedicado a simular a secagem de madeira (Turner e Ferguson ( I ), 1995, Turner e Ferguson ( II ), 1995, Johansson et al., 1997, Fyhr e Rasmuson, 1997, Perré et al., 1999, Di Blasi et al., 2003, Di Blasi, 1998, Dietl et al, 1998, Nijdam et al., 2000, Pel et al., 2002, Awadalla et al., 2004, Krabbenhofft et al 2003, Simpson, 1999, Pang, 2002). No entanto, como já citado anteriormente, as dificuldades inerentes à complexidade da física do processo, e a necessidade de adequadas ferramentas computacionais no mercado, têm impedido que se obtenham resultados numéricos concordantes com resultados experimentais e que possam produzir os resultados esperados pela indústria, de modo a reduzir custos e otimizar o processo como um todo. Por isto gerar um modelo capaz de simular eficientemente o processo de aquecimento de madeira é o problema em questão. Como objetivos específicos deste trabalho podem-se citar:

- 1) Determinar os perfis de temperatura do escoamento e da tábua de madeira.
- 2) Determinar as isolinhas de velocidade e sua influência na distribuição energética dentro da estufa.
- 3) Estudar, do ponto de vista experimental, a validade da IN04 editada pelo ministério da agricultura legitimando a norma fitossanitária ISPMS N° 15 editada pela FAO (Food and Agricultural Organization).
- 4) Estabelecer a influência da implantação de um “swirl” nas características do escoamento, de modo a simular a presença de ventiladores no interior da estufa.

A formulação matemática será constituída a partir do estabelecimento das equações de conservação que relacionam energia com velocidade, massa, pressão, e demais variáveis necessárias à solução do problema. Uma formulação tridimensional, multifásica e turbulenta será utilizada. As equações diferenciais serão discretizadas pelo método dos volumes finitos e o sistema de equações algébricas resultante será resolvido por método de decomposição LU.

Outras equações serão usadas de modo a calibrar o modelo. Adequadas condições iniciais e de contorno serão estabelecidas a cada caso teste. Duas estufas hipotéticas serão usadas nos testes. Um esboço das mesmas pode ser observado na Fig. 1.1



**Figura 1.1:** (a) Estufa hipotética utilizada nos testes para duas pilhas transversais ao fluxo. (b) Estufa hipotética utilizada para estabelecer os perfis de temperatura e velocidade em uma estufa com geometria semelhante a uma estufa real.

Experimentalmente serão realizados testes da evolução da temperatura para tábuas secas e com alto teor de umidade. Duas estufas experimentais do CCET serão utilizadas na obtenção dos dados. Uma de capacidade  $0,25 \text{ m}^3$  e outra com capacidade de  $2 \text{ m}^3$ . Diferentes níveis de temperatura e umidade serão testados.

## 1.2 Escopo do trabalho

Neste primeiro capítulo foi introduzido a arte trabalho, onde dissertou-se acerca da importância da secagem da madeira na sua industrialização e acerca das dificuldades existentes no estudo deste processo.

O capítulo II é dedicado à revisão bibliográfica. São apresentados trabalhos relevantes produzidos em diferentes países sobre a secagem de madeira. Relatam-se resultados experimentais e numéricos, procedimentos e novas técnicas pesquisadas, bem como algumas conclusões consideradas importantes no avanço do conhecimento científico global do processo de secagem.

No capítulo III é estabelecido o modelo matemático a ser empregado neste trabalho e aplicado ao processo de transferência de calor e quantidade de movimento à peças de madeira expostas a um ambiente convectivo. São estabelecidas equações de conservação da massa, de

momento e de energia, além de outras necessárias a completude do mesmo. A forma de solução também é explicitada.

No capítulo IV, com a finalidade de calibrar o modelo matemático e estabelecer parâmetros de interesse, faz-se um relato dos experimentos realizados nas estufas do CCET, onde foram estabelecidas as taxas de aquecimento de tábuas verdes e secas. Através de um monitoramento contínuo foi traçada a evolução da temperatura em um ponto central das peças.

O capítulo V dedica-se a relatar os resultados obtidos numérica e experimentalmente para a fase de aquecimento das peças de madeira. Efetua-se uma análise destes resultados, numa tentativa de avançar no conhecimento deste importante processo.

No capítulo VI são efetuadas as considerações finais do trabalho realizado. São evidenciadas as contribuições obtidas nos procedimentos numéricos e experimentais. Este trabalho termina apresentando algumas propostas para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Secagem é a remoção de líquido de um material via tratamento térmico. A madeira “verde” possui uma grande quantidade de água, normalmente superior a 30% de sua massa. Para que possa ser utilizada comercialmente, faz-se necessário sua secagem. Matematicamente, o teor de umidade é calculado por

$$u = \frac{PV - PS}{PS} \quad (2.1)$$

Onde PV é a massa da madeira verde. PS é a massa da madeira seca.

O processo de secagem requer uma grande quantidade de energia, por isto é importante executá-la de maneira eficiente. A energia necessária à evaporação pode ser transferida de diferentes formas: por condução, convecção, radiação.

O processo de secagem é dividido em dois regimes: o período com taxa de secagem constante, onde o processo é determinado pelas condições externas, e o período de taxa de secagem decrescente, onde a migração interna da umidade limita a taxa de secagem.

O trabalho teórico de Johansson et al. (1997) está focado na secagem de cavacos de madeira com ar e vapor superaquecido. Um estudo comparativo é realizado. A utilização do vapor superaquecido apresenta algumas vantagens: incremento na eficiência energética total pela possibilidade de reutilizar o calor latente de evaporação; a “ausência” de oxigênio elimina os riscos de explosões e vapor é de mais simples controle do que ar quente. Por outro lado existem problemas quando aparecem materiais sensíveis ao vapor superaquecido; aparecem dificuldades na obtenção de um baixo grau de umidade e uma condensação inicial que pode aumentar o tempo total de secagem.

No modelo estabelecido por Johansson et al. (1997) a influência de condições externas como temperatura, pressão, velocidade do escoamento, umidade e taxa de secagem são avaliados. Além disso, umidade, pressão e temperatura dentro da partícula também são avaliadas. Seus resultados mostram que a secagem via ar quente apresenta uma significativa vantagem sobre a secagem via vapor superaquecido.

Já Turner e Ferguson (I) (1995) desenvolveram um modelo matemático aplicável a secagem de tábuas de madeira. Na primeira parte deste trabalho, o modelo foi simplificado para o caso de um material poroso isotrópico. Foi então resolvido numericamente usando uma técnica conhecida como UM-CV: volume de controle com malha não-estruturada com

avaliação no centro da célula. Foram utilizados modelos com dois e quatro nós, e foram estabelecidas comparações entre os dois casos com relatos de vantagens e desvantagens de um sobre o outro. O modelo matemático utiliza equações diferenciais parciais da conservação da massa de água, energia total, massa de ar, fluxo gasoso, de líquido livre, de líquido confinado, de vapor e de ar, temperatura e pressão. Estas equações são bastante complexas e altamente não-lineares, e representam a física do problema, de difícil modelagem matemática.

Um método clássico para discretização de equações (SM-CV) baseado em um volume de controle “cell-centered” em malha estruturada, foi usada originalmente por Patankar. Foi utilizado na simulação de uma ampla classe de problemas de condução de calor e transferência de massa em meio poroso, incluindo a secagem de tijolos e de madeira. Uma das limitações deste método é que ele é restrito para solução de problemas com malhas ortogonais, contudo a sua principal vantagem é que ele fornece propriedades conservativas.

O principal objetivo de Turner e Ferguson (I) (1995) foi estender a técnica de (UM-CV) para (SM-CV) consistindo em perfis poligonais de ordem superior. Uma das vantagens do código que adota esta filosofia é a capacidade em trabalhar com geometrias complexas e pelo uso de um maior número de faces no volume de controle para a conservação dos fluxos. O principal benefício do uso de volume de controle é que o método numérico é conservativo, não somente no domínio do cálculo, mas em cada volume de controle do domínio computacional. Isto resulta após a convergência, na conservação do balanço de massa e energia.

O conceito de malha não estruturada em célula centrada para volume de controle, foi discutido anteriormente por estudiosos em mecânica dos fluidos e em modelagem de reservatórios de petróleo. Estes autores acreditam ser o método bastante preciso, de fácil implementação e que reduz os custos computacionais, possuindo ainda uma formulação mais simples, se comparada à técnica dos elementos finitos. Turner e Ferguson (I) (1995) afirmam ainda, que o método por eles desenvolvido pode ser aplicado à secagem de madeira a altas temperaturas. O método foi testado usando discretização em dois e quatro nós, em uma ampla série de malhas com diferentes volumes de controle poligonais.

Ainda Turner e Ferguson (I) (1995), afirmam que os resultados obtidos indicam que o método de discretização descreve adequadamente a física do complexo fenômeno de troca de calor e massa que ocorre durante o processo de secagem. O estudo é usado posteriormente para avaliar a secagem de materiais anisotrópicos como a madeira.

As rígidas condições numéricas que são estabelecidas pelo elevado teor de umidade, e gradientes de pressão, alcançadas durante a secagem a altas temperaturas, fornecem sempre uma excelente medida do desempenho da técnica numérica empregada na solução do problema.

As dificuldades envolvidas na modelagem dos processos de secagem de tábuas de madeira são acentuadas pelo fato da madeira ser não-homogênea, a higroscopia; que é um alto grau de anisotropia (com razão entre a permeabilidade longitudinal e transversal da ordem de  $10^2$  a  $10^4$ ) e encolhimento, reduzindo as dimensões e ocasionando tensões internas.

Quanto ao modelo matemático desenvolvido por Turner e Ferguson (I) (1995), de acordo com seu relato, foi necessário analisar o transporte de líquido e gás através do meio, bem como prever tempo, análise da distribuição de umidade, temperatura, pressão, capacidade térmica e capilaridade do meio poroso para com isto conseguir resultados adequados.

O modelo foi utilizado para simular uma variedade de materiais como tijolo, cimento e madeira, além de outros. As equações governantes são escritas na sua forma conservativa como

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} + \nabla \cdot j_i = 0 \quad i = 1,2,3$$

Onde  $\psi_i$  são as quantidades conservadas, e  $j_i$  os fluxos. (2.2)

São usadas duas formulações durante a discretização das equações: formulação dois nós e formulação quatro nós, de acordo com os pontos usados na avaliação dos fluxos. Para ambas as formulações, o sistema UM-CV resultante para cada elemento da malha computacional pode ser escrito como

$$A_p \bar{u}_p = \sum_{i=1}^{NB} A_{nbi} \bar{u}_{nbi} + b$$

Onde o vetor  $b$  e  $\bar{u}$  têm ordem  $3 \times 1$  e as matrizes  $A_p$  e  $A_{nb}$  tem ordem  $3 \times 3$ . Normalmente este é um enorme sistema de equações algébricas, altamente não lineares, cujo método de solução emprega fatores de relaxação (SOR) e passo no tempo adaptativo.

Turner e Ferguson (I) (1995) usaram o método numérico descrito anteriormente para simular o processo de secagem convectiva de uma amostra de madeira serrada na direção tangencial e radial da árvore. Nestas direções as propriedades são similares e podem ser tratadas como isotrópicas. Durante a investigação experimental foi utilizada uma estufa industrial com as seguintes condições de operação: Temperatura de bulbo seco  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  e

temperatura do bulbo úmido 80 °C; velocidade do ar 2 m/s, e as dimensões da amostra são de 5 cm na direção longitudinal (na direção do escoamento) e 50 cm na direção tangencial (perpendicular ao escoamento). O que implica num domínio computacional de 2,5 x 25 cm com umidade inicial de 150% e temperatura de 30°C. A espécie escolhida foi um tipo de pinho (*softwood*), cujos dados como capilaridade, pressão, permeabilidade e difusividade foram obtidas na literatura.

Como resultados deste trabalho, Turner e Ferguson (I) (1995), obtiveram para simulações com discretização em dois nós, algumas discrepâncias em relação a outras malhas não estruturadas antes apresentadas. No caso da malha hexagonal, os elementos têm duas faces paralelas na direção transversa, o que provoca uma redução na migração do líquido nesta direção. Isto faz com que as simulações em dois nós o processo de secagem se torne muito lento produzindo resultados não realísticos. Para quatro nós, as discrepâncias em relação a dois nós são reduzidas, pois a versatilidade do (UM-CV) permite uma maior precisão numérica. Isto é, devido ao fato que a aproximação para o fluxo da face CV não é submetido à instabilidade inerente à orientação e ortogonalidade da malha; fato observado para o método dois nós.

As conclusões do trabalho de Turner e Ferguson (I) (1995) são inerentes a questões numéricas:

- a) O conceito de malha não estruturada em célula centrada para volume de controle é absolutamente estável e de fácil discretização.
- b) A formulação para dois nós é simples e reduz o tempo computacional, comparado com outros métodos, mas não produz resultados realísticos.
- c) A precisão para formulação dois nós pode ser seriamente afetada pela orientação da malha.
- d) A formulação para quatro nós apresenta maior precisão, mas exige maior esforço computacional.
- e) A dependência da malha não tem o mesmo impacto na formulação quatro nós quanto ao impacto na formulação para dois nós.
- f) Em ambos os métodos as condições de contorno são facilmente acomodadas ao método.
- g) O método UM-CV permite que geometrias complexas sejam analisadas por uso de malhas não estruturadas.

- h) O método é conservativo em todo o domínio de cálculo e em cada volume de controle da malha computacional.
- i) A secagem de material isotrópico a alta temperatura é bem representado pelo método UM-CV.

Turner e Feguson (II) (1995) fizeram uma complementação do estudo iniciado como método de quatro nós em um meio isotrópico, aplicando o referido método para um meio anisotrópico, especificamente para secagem de madeira. Nesta segunda parte da pesquisa, eles constataram que o processo exige rígidas condições numéricas para sua operacionalização, devido ao excessivo gradiente de umidade causado pela alta temperatura, condição aplicada para problemas complexos. As dificuldades encontradas para secagem de madeira, são pelo fato de ser esta composta por uma estrutura higroscópica, isto é: possui um alto grau de anisotropia, tendo uma razão entre o fluxo transverso e longitudinal de permeabilidade da ordem de  $10^2$  a  $10^4$ . Também o caso das contrações provocadas pelo gradiente de pressão e pelo gradiente de umidade durante a secagem, é um fenômeno que causa empenamentos e rachaduras. Estes fatos indicam a exigência de uma formulação numérica flexível e conservativa, capaz de ser implementada em geometrias complexas e permitir a simulação da distribuição das tensões internas, requisitos necessários para o material anisotrópico. No trabalho de Turner e Ferguson (II) (1995), foi usada uma técnica (SM-CV) (structured mesh control volume) para volume de controle em malha estruturada. Segundo os autores, os resultados foram precisos e eficientes usando uma malha retangular refinada. As condições iniciais e de contorno foram as mesmas do trabalho (I). Como conclusão, os mesmos citam que a formulação quatro nós proporciona uma precisa representação dos fluxos nas faces do volume de controle para o material anisotrópico; entretanto exige um elevado esforço computacional na geração dos coeficientes das matrizes do sistema. A orientação dos elementos dentro da malha podem ter impacto na convergência da solução. Pois os elementos das faces dos eixos paralelo e longitudinal oferecem melhores propriedades de solução.

Em seus dois trabalhos, Turner e Ferguson (1995) têm grande preocupação com a natureza numérica da solução do problema, contudo, menor atenção foi dada à modelagem dos fenômenos físicos.

Fyhr e Rasmunson (1997) desenvolveram pesquisa sobre secagem de cavacos de madeira usando vapor superaquecido, considerando transferência de calor por convecção para a evaporação da água. O ar é o meio mais utilizado e eficiente para este tipo de secagem,

contudo os autores sugerem que a utilização de vapor poderia facilitar o estudo do comportamento das propriedades internas de transporte nos referidos cavacos.

Neste trabalho, eles apresentaram além de aspectos sobre a secagem e como os mecanismos internos de transporte servem como referência para análise das condições do processo, a existência de neutralidade atmosférica, fator importantíssimo, principalmente quando se trata de segurança de materiais inflamáveis, ou para esterilização quando usado para secagem de gêneros alimentícios.

Na secagem, o cavaco é tratado como sendo um corpo estacionário. São considerados três pontos diferentes para o comportamento da temperatura: um no vértice e dois na superfície. Também são consideradas quanto a umidade, três fases: líquido livre ou água capilar, água nos poros (higroscópica) e vapor d'água. O modelo é bidimensional, nas direções transversal e longitudinal, com tratamento acoplado quanto ao fluxo de água, ar e vapor. É utilizada a lei de Darcy. A difusão da água capilar é modelada pela lei de Fick.

Foi usado um completo sistema de equações de transporte. O balanço de calor foi feito, considerando os fenômenos de convecção e condução. Eles observaram que quando a espessura do cavaco dobra seu valor, o tempo necessário para a secagem também dobra. Foi observado que a pressão máxima está no centro da peça e é maior para a peça pequena. A explicação para este fato é que: a distância para o transporte do calor da superfície até o centro é dividida ao meio e que a principal liberação de pressão ocorre na direção longitudinal. Se a dimensão na longitudinal é duplicada, a pressão máxima é incrementada por um fator dois ou mais. O tempo total de secagem não é sensível ao comprimento e sim à espessura e é linearmente crescente com o crescimento da espessura, pois a entrada de calor se dá pela face. Os autores ainda fazem uma análise comparativa entre uma formulação uni e bidimensional, mostrando que existem grandes discrepâncias entre as duas formulações. Neste sentido caberia uma formulação tridimensional, não efetuada pelos autores.

Um detalhado estudo da transferência de umidade na secagem a altas temperaturas de partículas de madeira foi desenvolvido por Di Blasi (1998). A formulação matemática é unidimensional e resolve equações de conservação da energia, massa e quantidade de movimento para as fases sólida, líquida e gasosa. Fenômenos de transporte incluem a convecção e difusão de vapor d'água, convecção da água capilar nos poros da partícula e difusão da água na matriz sólida. Outras considerações de natureza física ainda são efetuadas. As equações de conservação estão assim formuladas: (1) água capilar; (2) água higroscópica;

(3) vapor de água; (4) massa total de gás; (5) entalpia total; (6 e 7) fluxos da fase gás e fase líquida são descritos pela lei de Darcy .

Como conclusões, eles relatam que a taxa de aquecimento exerce importante papel na dinâmica da secagem e características do processo global. Como são utilizadas temperaturas ambientes relativamente altas, superiores a 400 K, os regimes de rápida ou lenta secagem são dominados pelas características físicas da madeira.

Perré et al. (1999) desenvolveram um modelo matemático, com solução 2-D, para secagem com vaporização interna de um meio anisotrópico. Este modelo já está mais envolvido com a física do problema. Algumas hipóteses são adotadas de modo a possibilitar a descrição do campo de pressões por uma expressão analítica. Desta forma o modelo obtido é semi-analítico. Também são resolvidas: a equação da energia e a equação para migração líquida. Outras hipóteses simplificadoras são adotadas.

Segundo Perré et al. (1999) a condução de calor e transferência de massa ocorrem durante a secagem com vaporização interna, as quais envolvem mecanismos físicos complexos, resultando em sistemas de equações não lineares que são resolvidos por métodos computacionais. Geralmente os modelos encontrados são de difícil uso devido sua complexidade, e a maior problemática é a falta de conhecimento com certa profundidade, relativo ao processo, pois a maioria dos trabalhos relatados usam dados obtidos de forma empírica. Ainda segundo os autores, não existem evidências de uso de modelos experimentais adequados à uma formulação geral expressa para escala completa de secagem. O que motivou seu trabalho foi ajudar a construir uma ligação entre modelos mais simples e modelos mais compreensivos e rigorosos em sua modelagem, isto é, é uma tentativa intermediária entre modelos macroscópicos de transferência de calor e massa e modelos em que o meio de secagem é tratado como uma caixa preta.

Mantendo a atenção para a complexidade juntamente com a transferência de calor e massa, que ocorre durante a secagem, e tendo-se claramente a interpretação do modelo analítico baseado nas simplificações que segue, o desafio do autor neste estudo foi estabelecer uma forma tal que: de uma de um lado superar as dificuldades em resolver equações governantes, e de outro lado as configurações do modelo.

Para Perré et al. (1999), de acordo com a configuração, as condições de secagem podem ser estabelecidas como uma relação entre o fluxo de vapor e o fluxo de calor fazendo um

balanço da entalpia. O líquido se propaga somente na espessura da amostra. Isto significa que as forças capilares são muito maiores do que as forças geradas pelo gradiente de pressão. Um perfil de umidade unidimensional resulta desta hipótese e tem a forma quadrática.

Na solução do sistema não linear de equações foi utilizado o método de Newton-Raphson. Afirmam os autores deste trabalho, que como um primeiro exame sobre a possibilidade de uso deste modelo, duas situações foram analisadas: ambas representam secagem convectiva à temperatura de 140°C com vapor superaquecido. Os casos diferem apenas em madeira branca para a primeira e madeira de lei para a segunda. Apenas as propriedades físicas, permeabilidade e valor de umidade inicial são diferentes.

Para este modelo foi desenvolvida uma solução analítica, motivada por uma alta razão de anisotropia que se torna crescente com o processo de secagem. O modelo foi calibrado com uso dos primeiros resultados experimentais, ajustados aos parâmetros das propriedades físicas como: condutividade térmica, permeabilidade, coeficiente de migração do líquido, razão de anisotropia e coeficiente de troca de calor. Depois disto o modelo de Perré et al. (1999) foi usado, com boa aproximação através de uma ampla série de condições de secagem. Na realidade, a intenção é que as condições de secagem deste modelo sejam capazes de prever o conceito de dimensão de curva de secagem. Particularmente, esta curva depende do material a ser secado, mas também depende das condições de secagem; o que poderá trazer diferentes resultados para o mesmo material.

Simpson (1999) relata estudo feito sobre procedimentos que devem ser adotados no processo de industrialização e secagem da madeira e ainda, manejo, armazenamento, e controle após a secagem. A qualidade da madeira e o teor de umidade aceitável pode variar de acordo com a finalidade a que se destina: como por exemplo, a madeira utilizada como caixaria e escoras na construção civil, não exige o mesmo rigor quanto sua qualidade e teor de umidade que a madeira para construção de móveis e artefatos onde se demandam melhores acabamentos.

De acordo com o autor, a retirada de parte da umidade da madeira verde, recém serrada, antes que seja feita a secagem convencional, economiza tempo e custos de secagem. Esta pré-secagem, através de ventilação forçada entre as pilhas de madeira, poderá reduzir o teor de umidade para a faixa entre 20 a 25%, desta forma reduzindo o tempo necessário para a secagem convencional em estufa.

Simpson (1999) também faz um estudo sobre embutidos da madeira, como laminados e compensados e o teor médio de umidade recomendado para estes produtos. Um detalhado estudo também foi realizado sobre os danos provocados durante a secagem, causados principalmente por contrações e rachaduras, e a minimização destes problemas através da busca de programas de estufas desenvolvidos com o compromisso entre a necessidade de secagem rápida e a eficiência dos resultados obtidos.

Pang (2002) testou três modelos matemáticos diferentes para simular a secagem de madeira em estufas. Um modelo para única tábua, outro aplicado a uma estufa e um terceiro que considera o estudo das tensões aplicadas à madeira durante as trocas de calor e massa com o meio. Ele conclui que massa específica, conteúdo de umidade e outras propriedades físicas desempenham papel fundamental no controle do processo de secagem. Paralelamente padrões de serragem, velocidade do ar secante, o formato das pilhas, a espécie da madeira também exercem influência no resultado do processo.

O modelo que estuda as tensões foi desenvolvido para prever a evolução da secagem até as condições de evaporação final e o tratamento após a secagem, neste caso, considerando as contrações e outras alterações que possam ocorrer, provocados pelo efeito da temperatura durante a secagem. Para simular o movimento da umidade e transferência de calor em uma tábua, Pang (2002) desenvolveu um modelo matemático uni e bidimensional.

O teor de umidade depois da secagem é uma combinação de resultados das propriedades da madeira tais como: massa específica, teor de umidade inicial, padrões de serragem e gradeamento; e condições de secagem: temperatura do ar e velocidade do mesmo. No entanto, o tempo de secagem também depende da proporção de alburno e cerne (alburno é a parte da madeira branca formada pelas camadas mais externas, cerne é a parte formada pelas camadas internas de cor mais escura e é mais densa) e da espessura das tábuas. Alburno é a parte externa da madeira, ou a parte branca, a qual tem menor densidade. Cerne é a parte composta pelas camadas mais internas ou centrais do tronco da madeira, é mais densa e tem uma cor mais escura.

Durante a secagem, as tensões dentro da madeira são provocadas por uma taxa de encolhimento, causado pelo gradiente do conteúdo de umidade ou diferenças no coeficiente de contração. Propriedades da madeira são ligadas ao modelo de estudo das tensões por meio do desenvolvimento da temperatura e do teor de umidade.

Excelente trabalho acerca das taxas de aquecimento de peças cilíndricas de madeira foi desenvolvido por Di Blasi et al, (2003). Num trabalho numérico-experimental, eles estabeleceram perfis de temperatura no interior dos cilindros, tanto radial quanto axialmente. O tempo de secagem reproduz tendência já conhecida: dependência das condições de aquecimento e teor inicial de umidade. Experimentalmente, eles demonstraram que para a madeira verde, ocorre um atraso no tempo de aquecimento de 3 a 5 vezes se comparado a madeira seca. Foram obtidos resultados numéricos que se aproximam significativamente dos resultados experimentais para o comportamento da temperatura no interior das peças, durante todo o processo de aquecimento e secagem.

Paralelamente aos métodos convencionais, outras formas de secagem têm sido estudadas. Awadalla et al. (2004) desenvolveram um modelo matemático para otimização da secagem de madeira a base de energia solar. É efetuada análise numérica e experimental. As estantes no interior da câmara de secagem de madeira são divididas em colunas, em direção ao fluxo de ar. Para cada coluna, cada tabua é dividida em segmentos da superfície para o centro, enquanto o volume de ar da secagem entre as tabuas nas colunas é dividido em dois segmentos. A mudança de temperatura e umidade da madeira em cada coluna é unidimensional, pois a espessura é pequena se comparada com a largura da tábuas. A mudança de temperatura do ar seco entre as tábuas na estante é unidimensional na direção do fluxo, enquanto é constante em cada coluna. A energia específica de coesão da água da madeira pode ser desprezada. A taxa do fluxo de ar seco é uniformemente distribuída entre as tábuas, isto é, o volume do fluxo de ar entre as tábuas é o mesmo. A densidade do ar secante em cada coluna é constante. A temperatura do ar em cada coluna é igual, supostamente, à temperatura do ar de secagem nesta coluna no passo precedente de tempo. A temperatura inicial da madeira é constante e igual à temperatura ambiente. Como a espessura da madeira é pequena, se comparada à sua largura, a condução de calor e transferência de massa entre o ar seco e as paredes laterais, pode ser negligenciada.

Com estas hipóteses, Awadalla et al. (2004) desenvolveram vários experimentos, com a finalidade de estabelecer relação entre teoria e prática. Contudo, o tempo necessário obtido, para que o processo de secagem ocorresse, foi demasiadamente longo: em torno de 15 dias. Vários testes foram efetuados com o auxílio do programa TRNSYS, e dados experimentais sobre secagem de madeira foram obtidos no Wood Research Institute of Munich.

Soluções das equações que governam a secagem a ar de madeira são obtidos pelo

programa TRANSYS, usando métodos de elementos finitos. Um passo de tempo de 15 s é usado no modelo computacional.

Apesar de alguns significativos resultados obtidos por Awadalla et al. (2004), estes utilizam hipóteses simplificadoras que comprometem a precisão da modelagem do mesmo.

Krabbenhoft e Damkilde (2004) estudaram a possibilidade de aplicar método da dupla porosidade e permeabilidade no problema de infiltração de água na madeira. Tradicionalmente, um maior volume de trabalhos estuda a retirada da água, e não o problema inverso, que é a infiltração da água na madeira. Foi mostrado que o modelo de dupla porosidade pode capturar anomalias comumente reportadas, infiltração/absorção e dependência de parâmetros de transferência com as dimensões da amostra. Iniciando com o modelo de dupla porosidade, várias outras situações são discutidas e um comportamento possível do modelo é estabelecido. Encerram seu trabalho ajustando resultados experimentais com uma precisão razoável ao modelo de dupla permeabilidade. Em todos os testes realizados por Krabbenhoft e Damkilde (2004), as equações foram resolvidas numericamente pelo método dos elementos finitos.

Os modelos mais completos de transporte são baseados nos teoremas que calculam a média clássica do fluxo para meios porosos, (Whitaker, 1997), através dos quais, o transporte de calor e massa é descrito por um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas e tem como referência uma escala macroscópica, onde o fluxo pode ocorrer por meios irregulares. Esta aproximação é também amplamente aceita e aplicável para o transporte de calor e massa para outros materiais porosos, mais notavelmente para solos. (Lewis e Schrefler, 2000).

Importante fator a ser considerado no processo de secagem da madeira é a variação de propriedades físicas com a secagem, tais como: massa específica, calor específico, condutibilidade térmica e difusividade térmica.

Kollmann e Côté (1968) fazem um minucioso relato da variação da massa específica com a umidade. Segundo os autores, a massa específica varia com a umidade de acordo com a expressão

$$\rho_u = \frac{1+u}{1+0,84\rho_o u} \quad (2.4)$$

Que tem validade num intervalo de 0 a 25% de umidade, mas pode ser usada sem grandes erros até 40%. Na eq. (2.4),  $\rho_u$  é a massa específica da madeira úmida,  $u$  é o teor de umidade e  $\rho_o$  é a massa específica da madeira seca.

Segundo Kollmann e Côté (1968), o calor específico da madeira varia com o teor de umidade e com a temperatura. Sua variação com a temperatura é dada pela expressão,

$$c_p = 0,266 + 0,00116T \left[ \frac{cal}{g^{\circ}C} \right] \quad (2.5)$$

Experimentalmente, o calor específico médio é dado como sendo  $0,324 \frac{cal}{g^{\circ}C}$ . De acordo com o teor de umidade, o calor específico varia com a expressão,

$$c_u = \frac{u + 0,324}{1 + u} \left[ \frac{cal}{g^{\circ}C} \right]. \quad (2.6)$$

A madeira e outros materiais celulósicos não são bons condutores de calor. A condutibilidade térmica varia com a direção do fluxo de calor, com a densidade, com o tipo e quantidade de extrativos, com os defeitos e especialmente com o teor de umidade. Segundo Kollmann e Côté (1968), a condutibilidade térmica da madeira na direção radial é aproximadamente 5 a 10% maior do que na direção tangencial e a condutibilidade térmica na direção longitudinal é 2,25 a 2,75 vezes maior que através da fibra.

Estes valores são confirmados na revisão bibliográfica feita por Steinhagen (1977).

MacLean (1941) estabeleceu um modelo que descreve o incremento da condutibilidade térmica com a umidade e com a massa específica, e é dado por:

$$k = (1,39 + 0,028u)\rho + 0,165 \left[ \frac{kcal}{mh^{\circ}C} \right]. \quad (2.7)$$

Este modelo é usado até hoje e vale para teores de umidade menores que 40%.

Para um material sólido, a taxa de aquecimento é regida pela equação

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

Se  $k$  for considerado constante, então a eq. (8) pode ser escrita na forma

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.9)$$

Onde  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$  é a difusividade térmica. (2.10)

Tanaka (2001) mostra que a difusividade térmica, para seis tipos de diferentes espécies de madeiras japonesas, é incrementada com a redução da massa específica e com o teor de umidade.

Importantes trabalhos experimentais na área na condutibilidade térmica da madeira têm sido publicados. Fotsing e Takan (2004) apresentam um minucioso estudo a respeito da condutibilidade térmica de uma espécie local chamada *sapelli*. Respeitáveis resultados experimentais são obtidos para a variação da condutibilidade térmica com a umidade. Um modelo matemático para este caso é apresentado.

Gu (2001) realizou uma análise teórica onde estimou valores para a condutibilidade térmica radial e tangencial de várias espécies de madeira úmida. Seus resultados são similares àqueles apresentados por Kollmann e Côté (1968). Foi realizada uma análise da estrutura interna da madeira para estabelecer correlações de comportamento da condutibilidade térmica.

### **2.1. Medida fitossanitária para peças de madeira**

Com o intuito de checar a validade da IN04/2004, este trabalho contempla, além da experimentação, uma intensa revisão bibliográfica, numa tentativa de buscar subsídios que sustentem a hipótese dos 56 °C durante 30 minutos como medida fitossanitária para peças de madeira.

Os insetos são organismos invertebrados que, devido a sua capacidade de vôo, apresentam uma distribuição muito ampla pelo globo terrestre, em seus diversos ambientes. Atualmente estima-se uma quantidade de 800.000 espécies de insetos – 66,7% dos animais terrestres são insetos (BUZZI, 1993).

Grande parte dos insetos sofre metamorfose durante o seu ciclo de vida – dos ovos eclodem a larva e posterior transformação no inseto adulto. Durante a fase larval, esse organismo se alimenta ativamente para sofrer a metamorfose, transformando-se assim no inseto adulto. Isso permite que a larva e o inseto adulto vivam em ambientes distintos.

Quando se tratam de pragas de madeira, em geral, as duas fases são causadoras de danos ao homem. O principal dano provocado por esses organismos é a construção de galerias para abrigo ou alimento. Alguns insetos têm atividade tão intensa que alguns chegam a atacar a árvore ainda viva. Alguns grupos de insetos podem ser diferenciados pelo tipo de substrato

(características da madeira) que estão atacando – madeiras úmidas, madeiras secas, árvores recém-derrubadas ou até árvores vivas.

Os que vivem no interior da madeira úmida são dependentes dessa condição, pois o alimento das larvas são fungos simbiotes cultivados no interior das galerias escavadas pelas próprias larvas. Assim, se a umidade da madeira for muito baixa (abaixo de 20%), esses fungos não têm condições de sobrevivência.

Já os insetos habitantes de madeiras secas conseguem o desenvolvimento nessa condição, pois desenvolveram mecanismos adaptativos para obtenção de alimento a partir da própria madeira.

Nas duas condições descritas, os insetos podem permanecer no interior de madeira durante longo período de tempo, levando até um ano para completar seu ciclo. Se tal material infectado for transportado, dar-se-á um novo ciclo de vida nesse novo habitat, caso as condições climáticas sejam favoráveis, por isso deve-se ter cuidado com o transporte da madeira.

O comércio internacional de produtos, incluindo a madeira, é uma das atividades que está em franca expansão. Isso se deve principalmente a globalização de mercados e a facilidade de transporte intercontinental. Porém, isso traz alguns problemas para os países. O principal deles é o comércio inconsciente de organismos vivos entre nações ou continentes. Esses organismos, ao encontrar condições adequadas para o seu desenvolvimento, iniciam seus ciclos reprodutivos. Porém, como geralmente não encontram inimigos naturais nesses novos locais, o processo transcorre de forma desordenada e fora de controle. Isso incorre em prejuízos financeiros imensos para as nações atacadas, pois espécies animais ou vegetais nativas podem ser dizimadas.

Frente à problemática internacional que pode ser causada pela migração desses organismos entre países diferentes, a FAO (Food and Agriculture Organization) elaborou uma série de normalizações internacionais de medida fitossanitária (NIMFs) entre 1997 e 2002. Dessa série de 17 medidas, a de número 15 (NIMF 15 - 2002) é destacada como a de maior importância para o setor exportador, pois é a que define as diretrizes para a regulamentação de embalagens, suportes e escoras de madeira utilizadas no comércio internacional.

Essa normalização oferece aos seus países signatários normas, diretrizes e recomendações para harmonizar as medidas fitossanitárias em âmbito internacional, evitando assim o uso indevido de barreiras comerciais. Ela traz, dentre outras medidas fitossanitárias, os sistemas

denominados de tratamento térmico, os quais devem contemplar o aquecimento do centro das peças da madeira a uma temperatura mínima de 56°C por 30 minutos. Essa sistemática visa à eliminação de insetos das famílias Anobiidae, Bostrichidae, Buprestidae, Cerambycidae, Curculionidae, Isoptera, Lyctidae (com algumas exceções), Oedemeridae, Scolytidae e Siricidae, além do nematóide *Bursaphelenchus xylophilus* de madeiras utilizadas como embalagens, pallets, skids ou escoras utilizadas no transporte.

Na natureza, os insetos habitam diversos locais. Esses locais podem estar sob a influência severa das intempéries ou ter um micro-clima ameno em relação às variações diárias e sazonais. Para cada situação específica houve a adaptação de algumas espécies de insetos.

Os insetos típicos de regiões temperadas apresentam uma dinâmica de desenvolvimento, assim como os de regiões tropicais também a apresentam.

Klok e Chown (1997), em seu estudo com larvas de *Pringleophaga marioni* Viotte (Lepidoptera:Tineidae), constatou que a temperatura máxima suportada pelas larvas foi de 38,7°C. Isso denota que, se a temperatura no centro da peça de madeira atacada ultrapassar os 40°C, as larvas dessa família zoológica não conseguem sobreviver.

Da mesma maneira, alguns coleópteros típicos de clima temperado também foram analisados, mostrando uma temperatura limite suportada por insetos da espécie *Alphitobius diaperinus* de 48,5°C. O acréscimo de poucos graus na temperatura leva a morte desses insetos (Salin et al, 1999).

No caso dos dípteros, a temperatura máxima suportável bem abaixo do limiar suportado pelos coleópteros. A temperatura referida situa-se na casa dos 35,5°C para as larvas (Klok e Chown, 2001).

Em seu estudo, Clarke (1960) acentua a dinâmica do efeito da temperatura sobre as reações fisiológicas do organismo dos insetos. Demonstra que a temperatura interna do inseto tende a acompanhar as variações da temperatura externa durante os primeiros quinze minutos. Após esse prazo de tempo, a temperatura interna tende a se manter 5°C acima da temperatura circundante. Isso ocorre dentro de um limite, não ultrapassando a temperatura suportável pelos seres humanos.

Assim, percebe-se que a elevação da temperatura interna da madeira pode incorrer na morte dos organismos que habitam essas peças, desde que ultrapassem os limites letais característicos de cada grupo específico.

Acredita-se, pelo observado em pesquisas e nas dinâmicas terrestres, que a temperatura de 56°C promove o extermínio da maior parte dos insetos que habitam madeiras, seja utilizando-as como alimento ou apenas como abrigo.

Dessa maneira, a normalização (NIMF 15) editada pela FAO objetiva o extermínio da maior parte dos insetos que tem ao menos parte do desenvolvimento no interior de madeiras, uma vez que o material utilizado para embalagens e escoras de madeira de transporte, em geral, não recebe muitos cuidados. Como prevê a própria norma, alguns organismos podem permanecer vivos após o tratamento térmico. Porém, como prega a própria norma, são exceções.

Assim, o tratamento térmico das embalagens e escoras de madeira mostra-se uma boa maneira de controlar a disseminação de pragas através do comércio internacional, mantendo o equilíbrio ambiental pela isenção de uso de produtos químicos nocivos ao ambiente. Além disso, é uma forma de tratamento aceita por todos os países – o oposto do que ocorre com o tratamento por fumigação, onde se utiliza o brometo de metila como agente letal.

Depois desta revisão bibliográfica pode-se constatar que realmente a secagem da madeira está intimamente ligada à variação das propriedades físicas da matéria prima e que ainda existem muitas lacunas no conhecimento do processo como um todo, especialmente nas simulações numéricas que tratam o problema via formulação tridimensional, transiente e turbulenta.

### 3. MODELO MATEMÁTICO

#### 3.1. Equações de Transporte e Conservação

O modelo matemático foi estabelecido em função das equações já disponíveis no software comercial CFX e necessárias a simulação do processo de secagem, uma vez que este software foi utilizado em todas as simulações numéricas. Algumas expressões foram estabelecidas via aproximação polinomial a partir dos dados experimentais obtidos nas estufas do CCET.

Para o fluido foram resolvidas equações de conservação da massa, momento e energia; numa formulação tridimensional, transiente e turbulenta. Para a fase sólida somente a equação da energia é resolvida. Formulação baseada no método de volumes finitos é empregada na solução do problema. O método é robusto, totalmente implícito, conservativo e usa a aceleração multigrid com técnica de decomposição LU para resolver o sistema de equações linearizadas. Um método iterativo resolve o sistema de equações até que o critério de convergência seja atingido.

As equações de conservação da massa, momento e energia podem ser escritas na forma,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot \left( -\rho \delta + \mu (\nabla U + (\nabla U)^T) \right) + S_M \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (3.3)$$

onde  $h_{tot}$  é a entalpia total específica, a qual, para o caso geral de fluxo compressível e propriedades variáveis é dada em termos da entalpia termodinâmica específica,  $h$ , como:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (3.4)$$

onde

$$h = h(p, T) \quad (3.5)$$

Se as forças viscosas são relevantes, então um termo adicional é acrescentado ao segundo membro da equação da energia, a fim de quantificar os efeitos da tensão viscosa, tornando-se:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot \left( \mu \nabla U + \nabla U^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot U \delta U \right) + S_E \quad (3.6)$$

Nas equações: (3.1 a 3.5) existem sete variáveis desconhecidas ( $u, v, w, p, T, \rho, h$ ), por isto devem-se acrescentar duas equações termodinâmicas algébricas: a equação de estado, que relaciona massa específica à pressão e temperatura; e a equação constitutiva, que relaciona a entalpia a temperatura e pressão. Se a contribuição da energia cinética a energia total pode ser desprezada, então a equação 3.6 simplifica-se para a seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (3.7)$$

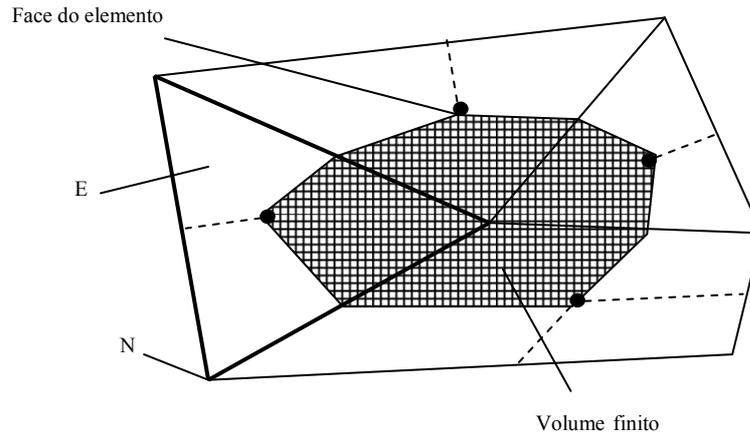
Como neste trabalho, existem regiões com fase sólida, a equação de transferência de calor deve ser resolvida também nesta região, desmembrada da fase gasosa. Isto é conhecido como transferência de calor conjugada, e a região sólida é conhecida como domínio sólido. Dentro do domínio sólido, a equação de conservação da energia é simplificada, uma vez que não existe escoamento dentro dele, mas somente condução de calor. Esta condução fica bem representada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (3.8)$$

### 3.2 Discretização das Equações Governantes

O domínio de cálculo deve ser discretizado em um número finito de volumes de controle usando uma malha. As equações governantes são integradas em cada volume de controle de forma a conservar cada grandeza (massa, momento, energia, etc.). A figura a seguir mostra um típico elemento de malha bidimensional, no qual uma superfície do volume de controle é representada pela área hachurada.

Está claro que cada nó é cercado por um conjunto de superfícies que formam o volume de controle. Todas as variáveis e propriedades são armazenadas nos nós dos elementos. Considere as equações de conservação da massa, momento e um certo escalar, expressas em coordenadas cartesianas:



**Figura 3.1:** Volume finito superficial

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) + S \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( T_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\phi \quad (3.11)$$

Estas equações são integradas sob o volume de controle, e o Teorema da Divergência de Gauss é aplicado para converter integrais de volume em integrais de superfície. Para volumes de controle que não deformam no tempo, as derivadas temporais podem ser evidenciadas da integral, tornando as equações na forma integral:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0 \quad (3.12)$$

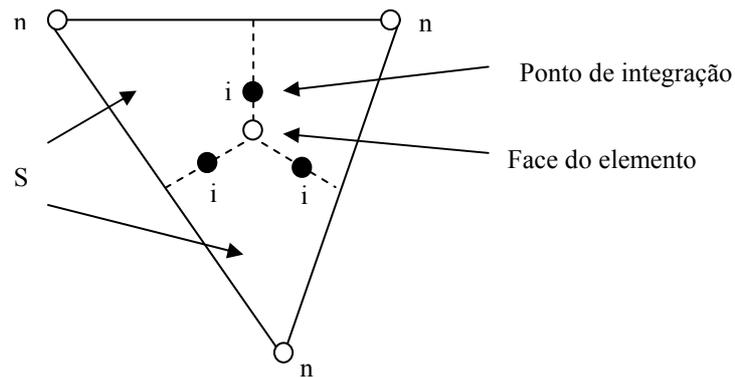
$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = - \int_S p dn_j + \int_S \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S dv \quad (3.13)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho U_j \phi dn_j = \int_S T_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\phi dV \quad (3.14)$$

onde  $V$  e  $s$  denotam o volume e a superfície de integração, e  $dn_j$  são as componentes cartesianas diferenciais do vetor área, externo à superfície. As integrais de superfície são as

integrações dos fluxos, enquanto que as integrais de volume representam os termos fonte ou de acumulação.

O primeiro passo para resolver estas equações contínuas numericamente, é aproximá-las por funções discretas. Considere um elemento de malha tal como mostrado na figura a seguir.



**Figura 3.2:** Elemento da malha

Os fluxos de superfície devem ser calculados nos pontos de integração para completar a conversão da equação contínua na sua forma discreta. Os pontos de integração,  $ip$ , são situados no centro de cada segmento de superfície em um elemento e que é construído unindo o centróide de uma face ao baricentro do elemento, de acordo com o tutorial do CFX.

A forma discreta destas equações é descrita como:

$$V \left( \frac{\rho - \rho^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (3.15)$$

$$V \left( \frac{\rho U_i - \rho^o U_i^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (p \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + S^M \quad (3.16)$$

$$V \left( \frac{\rho \phi - \rho^o \phi^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} \left( T_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right)_{ip} + \bar{S}_\phi V \quad (3.17)$$

onde  $V$  é o volume de controle, e o subscrito  $ip$  denota o ponto de integração, o somatório cobre todos os pontos de integração do volume de controle,  $\Delta n_j$  é o vetor normal à superfície

e  $\Delta t$  é o passo de tempo. Note que o esquema de Euler de primeira ordem, atrasado, foi assumido nesta integração, embora o esquema de segunda ordem também tenha sido usado durante as simulações. O sobrescrito  $o$  refere-se ao passo de tempo anterior. O fluxo discreto de massa pela superfície do volume de controle é denotado por  $\dot{m}_{ip}$  e dado por

$$\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} \quad (3.18)$$

Um arranjo em única célula, co-localizado na malha para vencer o desacoplamento pressão velocidade foi utilizado. Assim, a representação unidimensional para a conservação da massa pode ser escrita como:

$$\left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_i + \frac{\Delta x^3 A}{4\dot{m}} \left( \frac{\partial^4 p}{\partial x^4} \right)_i = 0 \quad (3.19)$$

onde

$$\dot{m} = \rho U_j \Delta n_j$$

A aproximação da equação de continuidade empregada é do tipo diferenças centrais de segunda ordem para a derivada da velocidade, modificada para a quarta derivada da pressão a qual atua na redistribuição da influência da pressão. Isto resolve o problema das flutuações nas bordas dos corpos sólidos que aparecem nos arranjos co-localizados.

O termo transiente, depois de integrado no volume de controle é dividido em dois termos como segue.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV = V \left( \rho^o \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (3.20)$$

Com esquema de Euler de primeira ordem atrasado as derivadas temporais são aproximadas como

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi - \phi^o}{\Delta t} \quad (3.21)$$

De forma que a equação 3.20 torna-se

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV = V \left( \frac{\rho \phi - \rho^o \phi^o}{\Delta t} \right) \quad (3.22)$$

A qual é robusta, totalmente implícita, limitada, conservativa no tempo, e não possui limitação no passo de tempo.

Usando o esquema de Euler de segunda ordem, as derivadas temporais são aproximadas como

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{3}{2} \phi - 2\phi^o + \frac{1}{2} \phi^{oo} \right) \quad (3.23)$$

onde  $\phi^{oo}$  representa a solução no penúltimo passo no tempo. Tendo as mesmas vantagens da formulação 3.21, a derivada fica melhor aproximada.

Os campos de solução são armazenados nos nós da malha. No entanto, vários termos nas equações requerem avaliações da solução ou gradientes das mesmas nos pontos de integração. Por esta razão deve-se ter uma maneira de calcular a variação da solução dentro do elemento onde se encontram os pontos de integração. Isto é possível com as funções de forma para elementos finitos. Uma variável  $\phi$  varia dentro de um elemento como segue:

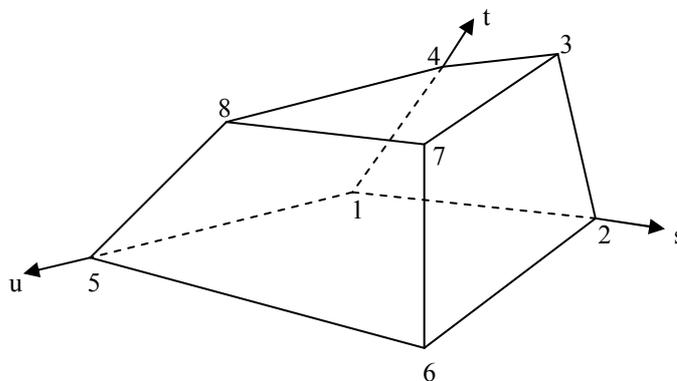
$$\phi = \sum_{i=1}^{N_{node}} N_i \phi_i \quad (3.24)$$

onde  $N_i$  são as funções de forma para o nó  $i$  e o número de nós do elemento  $\phi_i$  é o valor de  $\phi$  para o nó  $i$ . O somatório cobre todos os nós de um elemento. Propriedades importantes da função de forma incluem:

$$\sum_{i=1}^{N_{node}} N_i = 1 \quad (3.25)$$

$$\text{Para o nó } j, \quad N_i = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

As funções de forma são lineares em coordenadas paramétricas. Por exemplo, considere o seguinte elemento hexaédrico.



**Figura 3.3** – Elemento hexaédrico de uma malha qualquer.

As funções de forma tri-lineares aplicados para este caso são:

$$\begin{aligned}
N_1(s,t,u) &= (1-s)(1-t)(1-u) \\
N_2(s,t,u) &= s(1-t)(1-u) \\
N_3(s,t,u) &= st(1-u) \\
N_4(s,t,u) &= (1-s)t(1-u) \\
N_5(s,t,u) &= (1-s)(1-t)u \\
N_6(s,t,u) &= s(1-t)u \\
N_7(s,t,u) &= stu \\
N_8(s,t,u) &= (1-s)tu
\end{aligned} \tag{3.26}$$

As funções de forma também são usadas para calcular várias quantidades geométricas, tais como as coordenadas  $ip$ , vetores de área, etc.. Isto é possível porque a equação 3.24 vale também para as coordenadas:

$$y = \sum_{i=1}^{N_{node}} N_i y_i \tag{3.27}$$

Seguindo a aproximação padrão para os elementos finitos, funções de forma são utilizadas para avaliar as derivadas dos termos de difusão. Por exemplo, para a derivada na direção  $x$  no ponto de integração  $ip$ , vale:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{ip} = \sum_{n=1}^{N_{node}} \left. \frac{\partial N_n}{\partial x} \right|_{ip} \phi_n \tag{3.28}$$

O somatório cobre todas as funções de forma para o elemento. As derivadas cartesianas das funções de forma podem ser expressas em termos de suas derivadas locais via matriz jacobiana:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial s} \\ \frac{\partial N}{\partial t} \\ \frac{\partial N}{\partial u} \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

Os gradientes da função de forma podem ser avaliados em cada ponto local de integração (interpolação tri-linear), ou no local onde cada superfície  $ip$  intercepta a fronteira do elemento (interpolação linear-linear).

A integração superficial do gradiente de pressão na equação do movimento envolve a avaliação da expressão:

$$(P \Delta n_{ip})_{ip} \tag{3.30}$$

O valor de  $P_{ip}$  é avaliado usando a função de forma:

$$P_{ip} = \sum_n N_n(s_{ip}, t_{ip}, u_{ip}) P_n \quad (3.31)$$

que, como o termo de difusão, a função de forma usada para interpolar  $P$  pode ser avaliada em cada ponto de integração ou em cada ponto onde  $ip$  intercepta a fronteira do elemento.

Para completar a discretização dos termos advectivos, a variável  $\phi_{ip}$  deve ser ligada ao valor nodal de  $\phi$ . O esquema de advecção empregado no CFX é escrito como:

$$\phi_{ip} = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta r \quad (3.32)$$

onde  $\phi_{up}$  é o valor no nó contra fluxo, e  $r$  é o vetor no nó contra fluxo para  $ip$ . Quando se usa uma combinação específica,  $\nabla \phi$  é o gradiente adjacente médio nodal e quando se usa um esquema de alta resolução  $\nabla \phi$  é o gradiente nodal do nó contra fluxo. Particular escolha para  $\beta$  proporcionam diferentes esquemas de implementação.

### 3.3 Solução do Sistema de Equações

O conjunto de equações obtido pela aplicação do método dos volumes finitos em todos os elementos do domínio são equações de conservação discretas. O sistema de equações pode ser escrito na forma:

$$\sum_{nb_i} a_i^{nb} \phi_i^{nb} = b_i \quad (3.33)$$

onde  $\phi$  é a solução,  $b$  os termos independentes,  $a$  os coeficientes da equação,  $i$  é o identificador do volume de controle ou nó em questão, e  $nb$  significa vizinho, mas também inclui os coeficientes centrais que estão multiplicando a solução para o  $i$ th local. Este conjunto, para todos os volumes finitos, constitui o sistema linear de equações a ser resolvido. Na equação de uma grandeza escalar (entalpia, por exemplo),  $a_i^{nb}$ ,  $\phi_i^{nb}$  e  $b_i$  produzem valores constantes, mas para o acoplamento tridimensional massa-momento, eles produzem uma matriz 4x4 ou um vetor 4x1, que são expressos como:

$$a_j^{nb} = \begin{bmatrix} a_{uu} a_{uv} a_{uw} a_{up} \\ a_{vu} a_{vv} a_{vw} a_{vp} \\ a_{wu} a_{wv} a_{ww} a_{wp} \\ a_{pu} a_{pv} a_{pw} a_{pp} \end{bmatrix}_i^{nb} \quad (3.34)$$

e],

$$\phi_i^{nb} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix}_i^{nb} \quad (3.35)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \end{bmatrix}_i \quad (3.36)$$

Um sistema de aceleração multigrid com técnica de decomposição LU é utilizado pelo CFX para resolver o sistema de equações linearizadas. Um método iterativo resolve o sistema de equações até que o critério de convergência seja atingido. O sistema de equações descrito anteriormente pode ser escrito na forma matricial.

$$[A][\phi] = [b] \quad (3.37)$$

onde  $[A]$  é a matriz dos coeficientes,  $[\phi]$  é o vetor solução e  $[b]$  são os termos independentes.

A equação acima é então resolvida iterativamente a partir de uma solução inicial dada,  $\phi^n$ , que é corrigida por uma parcela,  $\phi'$ , para obter uma solução melhorada  $\phi^{n+1}$ , isto é,

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' \quad (3.38)$$

onde  $\phi'$  é a solução de

$$A\phi' = r^n \quad (3.39)$$

Com  $r^n$  sendo o resíduo obtido de

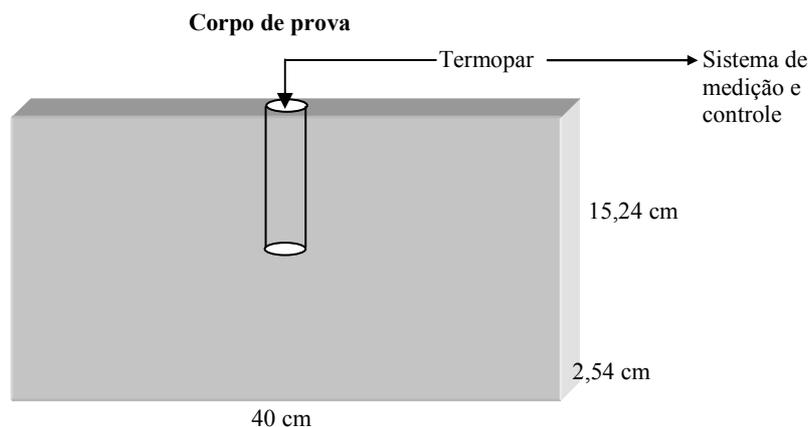
$$r^n = b - A\phi^n \quad (3.40)$$

Repetindo-se a aplicação deste algoritmo será encontrada a solução com a precisão desejada. A técnica multigrid é empregada com o intuito de, a partir de uma solução em uma malha grosseira, esta é transferida para uma malha mais refinada, convergida e transferida para uma malha ainda mais refinada, até que uma solução precisa seja obtida.

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados vários experimentos com o intuito de estudar as taxas de aquecimento de tábuas de madeira expostas a um ambiente com temperaturas próximas a 100 °C. Foram utilizadas duas estufas distintas. A primeira é uma estufa com aquecimento elétrico, de fabricação da DELEO Cia Ltda, com dimensões: 1 m de largura, 70 cm de comprimento e 90 cm de altura. Sua capacidade é de aproximadamente 0,25 m<sup>3</sup> de madeira gradeada. Sua temperatura pode variar de 70 °C até 300 °C. A movimentação de ar no interior da estufa ocorre apenas por convecção natural. Foram realizados três ensaios com tábuas secas e três com tábuas úmidas; todas com dimensões de 2,54 cm X 15,24 cm X 40 cm. Em um dos ensaios foram colocadas simultaneamente duas tábuas na estufa: uma seca com teor de umidade de 16,8 % e uma verde com teor de umidade acima de 60 %. Neste último caso a temperatura da estufa foi regulada para 100 °C. Os demais dados experimentais foram obtidos sempre para uma peça. Para a madeira seca o teor médio de umidade variou entre 14,2 % e 16,8 % e para a madeira verde a umidade permaneceu em torno de 60 %. Os experimentos foram conduzidos para temperaturas da estufa iguais a 80 °C, 90 °C e 100 °C.

As peças de madeira seca foram obtidas em ponto de venda da região após longo período de exposição ao sol e guardadas posteriormente em barracão coberto. As peças de madeira verde foram obtidas logo após a serragem, foram embaladas e armazenadas em ambiente devidamente climatizado.



**Figura 4.1:** Corpo de prova mostrando a localização da perfuração e conseqüente inserção do termopar.

Em cada uma das peças foi feita uma perfuração radial, central à face, onde foi acoplado um termopar, vide Fig. 4.1. Através do termo-medidor, equipamento fabricado pela MARRARI foi monitorada a temperatura no centro de cada peça. Este equipamento foi fabricado com o objetivo de monitorar a temperatura interna das peças de madeira durante a secagem, como forma de controle fitossanitário estabelecido pela NINF-15. A temperatura no interior da estufa foi monitorada por três termopares estrategicamente dispostos. Os registros foram feitos a cada cinco minutos. As Tabs. 5.1 a 5.5 apontam os resultados obtidos para a estufa DELEO com intervalos de 30 minutos.

Outros dados também foram obtidos a partir de uma estufa experimental fabricada pela CONTRACO. Seu aquecimento é efetuado pela queima de gás GLP e tem capacidade para 2  $m^3$ . Foram aquecidas simultaneamente duas tábuas: uma seca com teor de umidade de 16,2 % e outra verde, com teor de umidade em torno de 60 %; ambas com dimensões de 2,5 *cm* X 15 *cm* X 2,5 *m*. A temperatura ambiente foi fixada em 90 °C por um período de 9 horas. A temperatura interna das peças foi monitorada pelo termo-medidor da MARRARI, enquanto que umidade, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido foram registradas e controladas pelo CLP da própria estufa. Os resultados experimentais encontrados estão dispostos na Tab. 5.6.

Esta estufa possui um sistema de 3 ventiladores dispostos na sua parte superior, sendo estes os responsáveis pela circulação interna de ar. Eles são reversíveis e o intervalo de tempo para reversão é determinado pelo operador.

Neste ensaio, o teor de umidade da madeira é obtido na própria estufa por dois transdutores que determinam seu valor via resistência elétrica. Para a calibração do modelo durante a fase de aquecimento da madeira foram usados apenas os valores da temperatura de bulbo seco, uma vez que os valores apresentados para a umidade são excessivamente altos e não apresentam a precisão necessária para efeitos de calibração.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Pesquisas Experimentais

A secagem de madeira está ligeiramente dividida em três estágios. O primeiro está ligado à fase de aquecimento, onde as taxas de evaporação são desprezíveis. No segundo estágio ocorre a evaporação da umidade contida na madeira e finalmente, o terceiro estágio ocorre quando a madeira já está seca e sua temperatura é incrementada até valores próximos a temperatura ambiente. Este trabalho dedica-se a analisar a fase de aquecimento, em função dos objetivos propostos inicialmente e das necessidades pré-eminentes já destacadas.

Inicialmente apresentam-se alguns dos resultados experimentais obtidos nas estufas do CCET. As Tabs 5.1 a 5.5 apresentam os resultados obtidos para a estufa DELEO. A Tab. 5.1 apresenta os resultados obtidos para a temperatura de uma tábua seca submetida a uma temperatura ambiente de 80 °C, com exposição de 420 minutos. A temperatura de 56 °C no centro da peça é alcançada aproximadamente em 35 minutos. O aquecimento é bastante rápido, atingindo a temperatura de 76 °C em 80 minutos de exposição.

**Tabela 5.1:** Resultados experimentais obtidos para uma tábua seca a uma temperatura ambiente de 80 °C durante 420 minutos. Valores de temperaturas em °C dispostos a cada 30 minutos.

Tempo (min)	T <sub>mad-seca</sub>	TA	TA	TA
0	26	25	24	26
30	54	82	80	82
60	70	84	83	84
90	76	83	82	83
120	77	84	83	85
150	77	82	81	83
180	77	82	82	83
210	77	85	84	85
240	77	81	80	81
270	79	86	85	88
300	81	84	82	84
330	79	82	83	84
360	78	80	79	81
390	77	80	79	80
420	77	77	78	78

**Tabela 5.2:** Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde a uma temperatura ambiente de 80 °C durante 840 minutos. Valores de temperaturas em °C dispostos a cada 30 minutos.

Tempo (min)	T <sub>mad-verde</sub>	TA	TA	TA
0	28	27	25	28
30	36	78	75	78
60	44	75	72	75
90	47	80	78	81
120	49	83	80	83
150	49	81	80	83
180	51	83	81	83
210	51	80	77	80
240	52	80	77	80
270	52	82	81	83
300	53	82	81	82
330	56	80	78	80
360	57	82	79	82
390	57	84	81	84
420	57	82	79	82
450	59	83	81	83
480	61	84	82	83
510	62	80	78	81
540	63	84	81	84
570	63	83	80	83
600	64	85	83	85
630	64	83	81	85
660	65	85	82	85
690	65	82	80	83
720	66	83	82	84
750	66	84	82	85
780	66	80	77	80
810	67	80	78	81
840	68	84	83	85
570	63	83	80	83
600	64	85	83	85
630	64	83	81	85
660	65	85	82	85
690	65	82	80	83
720	66	83	82	84
750	66	84	82	85
780	66	80	77	80
810	67	80	78	81
840	68	84	83	85

A partir deste ponto a temperatura permanece num certo patamar, e apenas pequenas oscilações ocorrem em virtude das oscilações da própria estufa.

A Tab. 5.2 apresenta os resultados obtidos para a temperatura de uma tabua verde com teor de umidade em torno de 60% submetida a uma temperatura de 80 °C, com exposição de 840 minutos. A temperatura de 56 °C no interior da peça é alcançada em 5 horas e 30 minutos. Para este caso o aquecimento é bastante lento, tanto que, somente depois de 14 horas, é que a temperatura no ponto central alcança 68 °C. Este valor é 15 % menor que o valor estabelecido para a temperatura ambiente. Observe-se que esta diferença permanece até que toda a água contida na madeira tenha evaporado. Estes resultados são condizentes com aqueles obtidos por Di Blasi et al (2003).

A Tab. 5.3 apresenta os resultados obtidos para a temperatura de uma tábua seca submetida a uma temperatura ambiente de 90 °C, com exposição de 300 minutos. A temperatura de 56 °C no centro da peça é atingida aproximadamente em 35 minutos. O aquecimento é bastante rápido, elevando-se a uma temperatura de 77 °C em 90 minutos de exposição. Em comparação aos resultados mostrados na Tab. 5.1, o gradiente de temperatura entre o centro da peça e o ambiente, é neste caso, superior ao anterior. Após ter-se atingido o patamar de 83 °C, a diferença mantém-se em aproximadamente 8 °C.

A Tab. 5.4 apresenta os resultados obtidos para temperatura de uma tabua úmida com teor de umidade em torno de 60% submetida a uma temperatura de 90 °C, com exposição de 780 minutos. A temperatura de 56 °C no interior da peça é alcançada em 6 horas e 50 minutos. Para este caso o aquecimento é bastante lento, tanto que, são necessárias aproximadamente 13 horas para que a temperatura alcance 77 °C. Este valor é 14,4% inferior ao valor estabelecido para a temperatura ambiente, caso análogo ao da Tab. 5.2.

**Tabela 5.3:** Resultados experimentais obtidos para uma tábua seca a uma temperatura ambiente de 90 °C durante 300 minutos. Valores de temperaturas em °C dispostos a cada 30 minutos.

Tempo (min)	T <sub>mad-seca</sub>	TA	TA	TA
0	26	27	25	27
30	52	80	79	83
60	68	89	88	92
90	77	92	91	95
120	80	94	83	98
150	83	91	90	94
180	84	92	91	96
210	86	95	93	97
240	87	95	94	97
270	87	95	93	97
300	87	96	95	95

**Tabela 5.4:** Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde a uma temperatura ambiente de 90 °C durante 780 minutos. Valores de temperaturas em °C dispostos a cada 30 minutos.

Tempo (min)	T <sub>mad-verde</sub>	TA	TA	TA
0	25	27	28	27
30	36	82	77	82
60	44	89	73	89
90	84	91	76	91
120	50	87	71	87
150	51	88	72	89
180	52	95	79	96
210	52	87	83	88
240	53	92	89	92
270	53	90	88	91
300	53	92	90	93
330	53	90	87	90
360	54	90	89	90
390	55	91	89	92
420	56	93	91	94
450	56	94	91	94
480	57	90	88	90
510	59	90	88	91
540	99	90	88	51
570	65	91	88	91
600	68	93	91	94
630	70	95	92	95
660	71	89	87	90
690	76	107	102	106
720	77	98	96	98
750	77	89	88	91
780	77	93	91	91

A Tab. 5.5 apresenta os resultados obtidos para a temperatura de uma tábua seca e uma tabua úmida, submetidas a uma temperatura ambiente de 100 °C, com exposição de 720 minutos. A temperatura de 56 °C no centro da tábua seca é alcançada em aproximadamente 35 minutos. O aquecimento é bastante rápido, atingindo a temperatura de 80 °C em 90 minutos de exposição. Depois deste período a temperatura eleva-se gradativamente com a secagem, atingindo 98 °C depois de 12 horas de aquecimento. Este valor é apenas 2% menor que o valor estabelecido para a temperatura ambiente da estufa.

Para a tábua verde, a temperatura de 56°C no interior da peça é atingida em aproximadamente 3 horas. O aquecimento como nos casos anteriores, é bastante lento, tanto que a temperatura de 70 °C é alcançada depois de 7 horas e 30 minutos. São necessárias

aproximadamente 12 horas para que a temperatura alcance  $80^{\circ}\text{C}$ . Este valor é 20% inferior a temperatura ambiente estabelecida. Deve-se destacar aqui a idêntica tendência de resultados obtidos tanto para a madeira seca quanto para a madeira verde, isto é, a madeira seca sofre um processo de aquecimento bastante rápido, enquanto que a madeira verde aquece lentamente, de acordo com seu teor de umidade. Estes resultados são análogos com os resultados apresentados por Di Blasi et al (2003) para níveis bastante superiores de temperatura ambiente, da ordem de 600 K.

A Tab. 5.6 apresenta os resultados obtidos para a estufa CONTRACO. Nesta estufa foram colocadas duas tábuas, uma seca e uma úmida, submetidas a uma temperatura de  $90^{\circ}\text{C}$ , com exposição de 540 minutos.

**Tabela 5.5:** Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde e uma tábua seca a uma temperatura ambiente de  $100^{\circ}\text{C}$  durante 720 minutos. Valores de temperaturas em  $^{\circ}\text{C}$  dispostos a cada 30 minutos

Tempo (min)	T <sub>mad-verde</sub>	T <sub>mad-seca</sub>	TA	TA
0	29	28	27	28
30	34	52	82	85
60	45	71	90	94
90	51	79	94	97
120	53	82	95	98
150	55	84	95	97
180	56	85	96	95
210	57	86	96	96
240	58	87	95	98
270	60	89	99	102
300	61	90	97	101
330	63	91	100	101
360	65	92	100	103
390	66	93	99	99
420	68	94	99	104
450	69	94	97	100
480	71	95	98	101
510	73	95	98	101
540	74	95	99	102
570	75	96	100	104
600	76	96	100	102
630	77	96	101	104
660	79	97	99	102
690	80	98	104	107
720	80	98	101	104

**Tabela 5.6:** Resultados experimentais obtidos para uma tábua verde e uma tábua seca, na estufa CONTRACO, a uma temperatura ambiente de 90 °C durante 540 minutos. Valores de temperaturas em °C dispostos a cada 30 minutos.

Tempo (min)	T <sub>mad-verde</sub>	T <sub>mad-seca</sub>	TA	TA
0	24	29	32	33
30	42	64	93	91
60	53	74	90	89
90	57	78	90	90
120	59	79	90	91
150	60	81	92	91
180	61	81	94	95
210	62	82	93	92
240	63	83	93	92
270	64	84	101	96
300	64	85	92	95
330	65	86	92	91
360	65	86	103	97
390	66	87	94	92
420	66	87	97	95
450	67	88	91	91
480	68	88	98	91
510	68	88	94	94
540	69	88	96	95

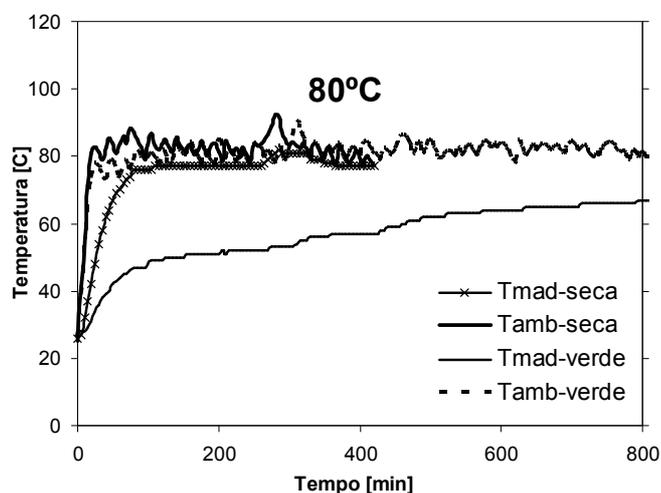
A tábua verde tem um teor inicial de umidade igual a 42 %. Os ventiladores internos da estufa foram mantidos ligados durante todo o experimento a uma velocidade de 1800 *rpm*, tendo havido apenas uma inversão no seu sentido de rotação. Com isto a velocidade do ar na frente dos ventiladores foi aferida em 7 *m/s*, aproximadamente, e 2 *m/s* no centro da câmara. Com este procedimento, pode-se avaliar o impacto dos efeitos convectivos sobre as taxas de aquecimento.

Os resultados obtidos confirmam as expectativas de que o aquecimento seria mais rápido se comparado aos resultados anteriores para uma atmosfera inerte. Simpson (1999), constatou que com apenas a ventilação forçada há uma redução do teor de umidade da madeira. Em nossos experimentos observamos que o aquecimento em estufa com ventilação, forçada, o aquecimento é mais rápido, pois a temperatura de 56 °C no centro da tabua seca é atingida em menos de 25 minutos. O aquecimento é bastante rápido, e alcança 80 °C em aproximadamente duas horas de exposição, elevando-se até o final do período de 9 horas à temperatura alcança 88 °C, portanto 2,2% menor que o valor estabelecido para a temperatura ambiente.

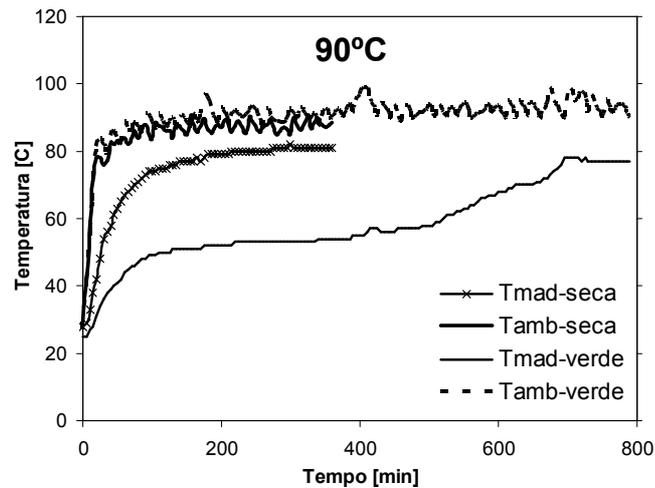
A temperatura de 56 °C no centro da tábua úmida é alcançada em 80 minutos. Este valor é muito inferior se comparado aos demais resultados. Neste caso os efeitos convectivos são expressivos para a taxa de secagem e conseqüente incremento na temperatura. Depois de 9 horas de exposição, o ponto central alcança a temperatura de 69 °C, valor este 23,3 % menor que a temperatura ambiente estabelecida.

A Figuras 5.1 a 5.3 evidenciam com maior clareza os resultados discutidos até aqui. A Fig. 5.1 mostra o comportamento da temperatura no ponto central das peças para madeira verde e seca quando submetidas a uma temperatura de 80 °C. Mediante inspeção da mesma, fica claro a diferença de comportamento entre madeira seca e madeira verde em relação as taxas de aquecimento e também o comportamento de cada uma em relação a temperatura ambiente.

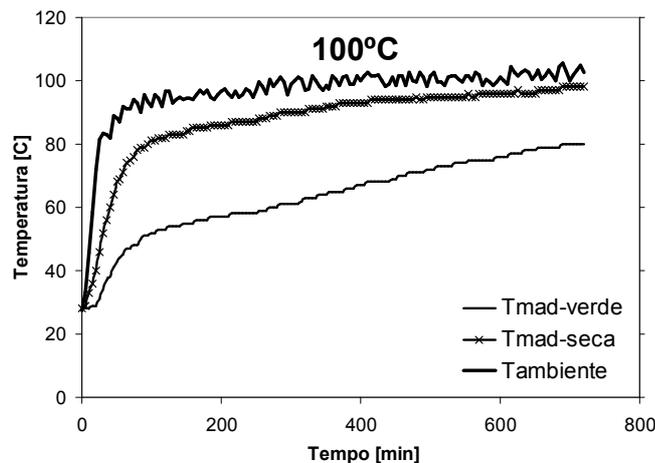
A Fig. 5.2 mostra o desempenho da temperatura em um ponto central das peças para madeira verde e seca quando submetidas a uma temperatura de 90 °C. Como no primeiro caso, a temperatura de 56 °C no ponto central da madeira seca é atingida em aproximadamente 35 minutos, e se aproxima da temperatura ambiente em 4 horas. Para a madeira verde, a medida em que a vaporização da umidade vai ocorrendo, sua temperatura vai se incrementando lentamente.



**Figura 5.1:** Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da tábua, para uma temperatura ambiente de 80 °C, para madeira seca e para madeira verde.



**Figura 5.2:** Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 90 °C, para madeira seca e para madeira verde.



**Figura 5.3:** Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 100 °C, para madeira seca e para madeira verde.

A Fig. 5.3 mostra os resultados obtidos para uma temperatura ambiente igual a 100 °C. A tendência é a mesma dos testes anteriores. Observe-se que a temperatura ambiente plotada é a mesma para ambos os casos. Isto foi empregado, pois para 100 °C os testes foram realizados

com duas peças, uma seca e uma verde. Em todos os gráficos foram apresentados os valores médios das temperaturas obtidas para o ambiente.

De acordo com os resultados obtidos, a menor taxa de aquecimento da madeira verde deve-se a bruscas mudanças em suas propriedades físicas ocasionadas pela presença de um maior teor de umidade. Isto é, as propriedades físicas são determinísticas nos efeitos de transferência de calor. Existe uma intrínseca relação de dependência entre a condutibilidade térmica, massa específica e calor específico. Esta relação é representada por uma grandeza física chamada difusividade térmica. Com o incremento da umidade, esta grandeza pode ser muitas vezes ampliada fazendo com que a difusão do calor no interior da tábua seja reduzido. Além disso, grande parte do calor transferido é utilizado na evaporação da umidade.

Do ponto de vista da NINF-15, comprovou-se com os experimentos realizados que são necessários aproximadamente 35 min para que o ponto central da tábua seca atinja a temperatura de 56 °C estabelecida como temperatura fitossanitária pela referida medida. Note que o tempo estabelecido não mostrou grande dependência com a temperatura. Já para a tábua verde, os melhores resultados foram obtidos na presença de ventilação forçada, onde a temperatura de 56 °C foi obtida depois de 80 minutos.

## **5.2 Pesquisas numéricas**

Neste trabalho, o estudo numérico da secagem de madeira, ligada a fase de aquecimento, teve início com a geração de uma geometria mais adequada tanto ao procedimento numérico quanto a caracterização física do problema. Muitos casos testes foram realizados até que resultados plausíveis pudessem ser aqui apresentados. Todas as pesquisas foram realizadas mediante o uso do software comercial CFX. Esta possibilidade auxiliou no desenvolvimento da pesquisa de muitas maneiras, contudo não foi tão simples aprender a usar esta ferramenta.

### **5.2.1 Simulação da estufa em forma de canal**

A Fig. 5.4 esboça a estufa empregada no estudo de alguns casos testes. Ela foi constituída de um canal em forma de paralelepípedo com dimensões: 3 m x 54 cm x 20 cm. Primeiramente foram dispostas oito tábuas em duas pilhas de quatro tábuas cada uma. Cada tábua possuía as seguintes dimensões: 2.5cm x 15 cm x 50 cm.

As setas indicam claramente as regiões de entrada e saída. A velocidade de entrada foi fixada em  $0,5 \text{ m/s}$ . Três temperaturas de entrada foram estudadas:  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  e uma obtida via aproximação polinomial aos dados extraídos de um ensaio real.

**Tabela 5.7:** Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações numéricas.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Velocidade	$0,5 \text{ m/s}$
Temperatura ambiente	$90 \text{ }^\circ\text{C}$
Massa específica	$510 \text{ kg/m}^3$
Calor específico	$1380 \text{ J/kg K}$
Condutividade térmica	$0,12 \text{ W/m K}$
Massa molar	$1 \text{ kg/kmol}$

As características físicas da madeira usada estão dispostas na Tab. 5.7. O teor de umidade está implícito na condutividade térmica, massa específica e no calor específico.

A malha obtida para referida estufa é apresentada na Fig. 5.5. Com a intenção de obter resultados mais consistentes fisicamente mais de 1.300.000 volumes foram gerados nas oito peças de madeira e no escoamento dentro do duto. Saliente-se que os resultados seriam ainda melhores se fosse empregada uma quantidade ainda maior de volumes, fato este que devido à nossa limitação da capacidade computacional não possível. O computador utilizado nas simulações foi um Atlon 2.8, com 1,00 GB de memória RAM. Que consome bastante tempo de trabalho, pois quando nos casos mais complexos foram necessárias mais de 14 horas de simulação para que um único caso fosse resolvido.

Para fins de organização de estudo e interpretação, os testes numéricos foram divididos em 3 casos.

No caso 1, os campos de velocidade e temperatura em toda a estufa tiveram seus valores fixados iguais à velocidade e temperatura na entrada, o que corresponde na prática, à exposição das peças de madeira a um ambiente com temperatura superior a elas, já no início do processo. Este procedimento evita problemas iniciais de convergência e permite que o passo de tempo seja aumentado muitas vezes.

Na Fig. 5.6 pode-se ver claramente a aceleração do escoamento ao passar por entre as peças. O escoamento sofre uma aceleração pelas laterais da segunda pilha. Isto é justificado quando se analisa a quebra de camada limite que ocorre no vão da primeira para a segunda pilha por entre as tábuas. Este aumento de velocidade nas laterais favorece o aquecimento da tábua superior e da tábua inferior da segunda pilha. Este fato pode ser observado mediante inspeção das Figs. 5.7 à 5.11; nas quais são mostradas a distribuição de temperaturas (local) num plano central e longitudinal a estufa. Pode-se claramente observar que, nos primeiros quinze minutos, as peças sofrem um grande incremento nas suas temperaturas. As regiões frontais ao escoamento, os cantos e as peças da segunda pilha apresentam evolução mais rápida que outras regiões. O efeito convectivo provoca este fato. Depois de 75 minutos a madeira está praticamente à temperatura do meio.

Nas figs. 5.12 a 5.14 são apresentadas as curvas de distribuição de temperaturas (global) na superfície das peças para vários tempos de exposição. Novamente fica claro que as peças da segunda pilha se aquecem mais rapidamente que as da primeira fila. Características inerentes a camada limite dificultam a transferência de calor na fileira frontal. Da fig. 5.13, por exemplo, pode-se inferir que existe uma diferença de temperatura de aproximadamente 30°C entre o canto e o ponto de menor temperatura aos 30 minutos de exposição. Com o passar do tempo esta diferença diminui, mas as bordas sempre estão à temperatura mais elevadas. Estes gradientes são responsáveis pelas forças de tensão internas responsáveis pelas rachaduras que ocorrem nas tábuas.

Observando-se a Fig. 5.13, pode-se inferir que as tábuas da primeira coluna sofrem um aquecimento superficial altamente homogêneo. A visualização tridimensional facilita esta conclusão.

No caso 2, com o objetivo de observar o aquecimento transiente de toda a estufa, as condições iniciais de temperatura e velocidade foram fixadas em: 20°C e 0 m/s, respectivamente. Um escoamento com velocidade de 0,5 m/s e temperatura de 80 °C foi prescrito na entrada do canal. Estas condições colocam o problema mais próximo a situações reais.

Com o objetivo de validar os resultados numéricos obtidos para este caso, foi plotada na Fig. 5.15, o comportamento da temperatura em um ponto central de uma tábua localizada na segunda pilha, terceira posição. É efetuada a comparação com os resultados experimentais obtidos na estufa DELEO para uma tábua seca, com temperatura ambiente de 80 °C. Como se

observa, existe uma excelente concordância entre os resultados obtidos, o que comprova que o problema vem sendo resolvido adequadamente.

As figs. 5.16 a 5.19 mostram a distribuição local de temperatura nas peças em num plano central e longitudinal à estufa, para vários tempos de exposição. Pelas figs. pode-se observar que o processo de aquecimento transiente é adequadamente capturado. Como no caso 1, o aquecimento é bastante rápido, tanto que em apenas quinze minutos de exposição e o menor valor encontrado gira em torno de 320 K (47°C). Contudo existe uma diferença de temperatura entre os dois casos de aproximadamente 15°C. Pela Fig. 5.16, percebe-se a redução de temperatura que ocorre com o ar depois que ela passa por entre as tábuas. Algumas zonas de flutuação podem ser identificadas nesta região. O método é então suficientemente preciso, pois é capaz de capturar, inclusive, este tipo de comportamento. Isto se deve a formulação turbulenta disponível no CFX, e empregada nestas simulações.

Mediante inspeção destas figuras conclui-se que também neste caso, a segunda pilha sofre um aquecimento mais rápido que a primeira. Os motivos são os mesmos do caso 1.

As Figs. 5.20 à 5.22 mostram as curvas de distribuição de temperatura local nas peças para vários períodos de exposição do caso 2. É possível distinguir as regiões onde o aquecimento ocorre com maior ou menor rapidez. Após uma hora de exposição, as tábuas já estão à temperatura muito próxima à do escoamento. Os cantos da segunda pilha aquecem muito rapidamente, em relação à primeira pilha. Mais uma vez se pode visualizar em 3D como ocorre a distribuição superficial de temperatura nas tábuas e que a segunda pilha tem taxas superiores de aquecimento.

Numa modelagem mais rigorosa de uma estufa, deveria prever que no início do processo, o ar que adentra a ela vai se aquecendo lentamente. Por isto, no caso 3, foi imposta na entrada do canal uma temperatura variável controlada pela função,

$$T(t) = -1E-09t^5 + 9E-07t^4 - 0,0003t^3 + 0,0267t^2 - 0,6031t + 20,204 \quad (5.1)$$

Sua forma foi estabelecida via aproximação polinomial, usando o método dos mínimos quadrados, a partir de dados reais obtidos de experimentos realizados na estufa CONTRACO do CCET. Estes dados foram obtidos de uma curva de secagem com carga completa. O resultado da aproximação proporcionou resultados numéricos bastante satisfatórios. A Fig. 5.23 compara o comportamento do polinômio dado pela equação 5.1 com os dados experimentais.

As linhas de corrente no interior da estufa para este caso são mostradas na Fig. 5.24. Pode-se observar que os resultados obtidos são extremamente similares aos obtidos para o caso 1. Existe um incremento na velocidade sobre as laterais da segunda pilha. Pode-se inferir, portanto, que o nível de temperatura não influencia consideravelmente nos perfis de velocidade, mas sim a geometria.

Os resultados numéricos obtidos para o desenvolvimento da temperatura no escoamento e nas peças de madeira para o caso 3 são apresentados nas Figs. 5.25 à 5.33. No início, vide Figs. 5.25 e 5.26, o escoamento aumenta lentamente sua temperatura devido ao comportamento do polinômio que a está regendo na entrada. Passados noventa minutos, de acordo com a Fig. 5.27, as taxas de transferência já se elevaram várias vezes e os extremos das peças já estão bastante aquecidos.

Nas Figs. 5.28 a 5.30 vê-se claramente os diferentes níveis de temperatura nas tábuas, à medida que o tempo avança.

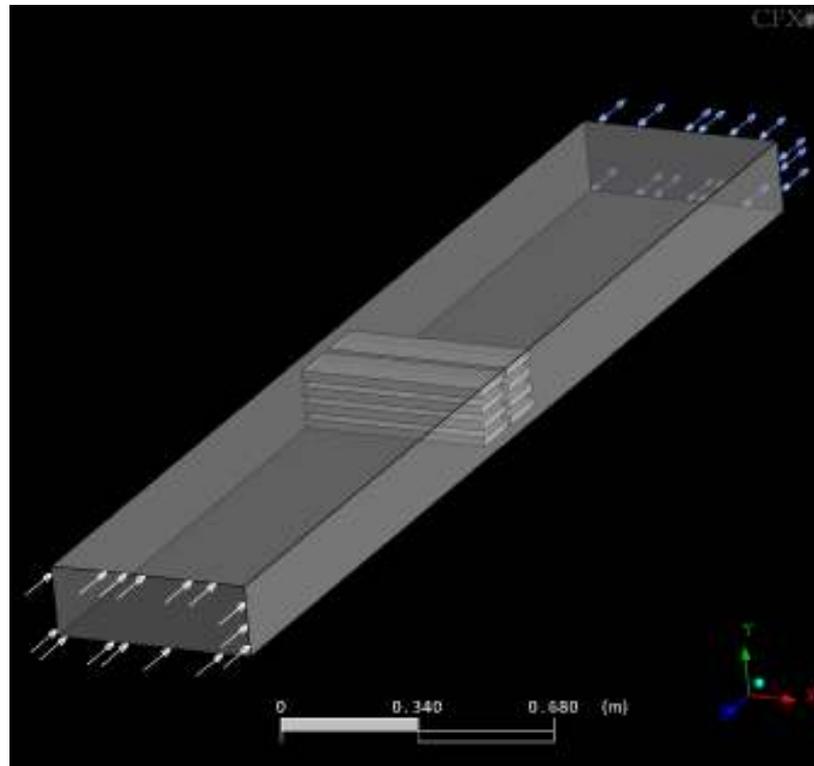
Uma visão tridimensional do que foi citado acima é mostrado nas Figs. 5.31 à 5.33. Delineia-se mais uma vez que também para o caso 3, a temperatura na segunda pilha cresce mais rapidamente.

### **5.2.2 Simulação da Estufa Contraco**

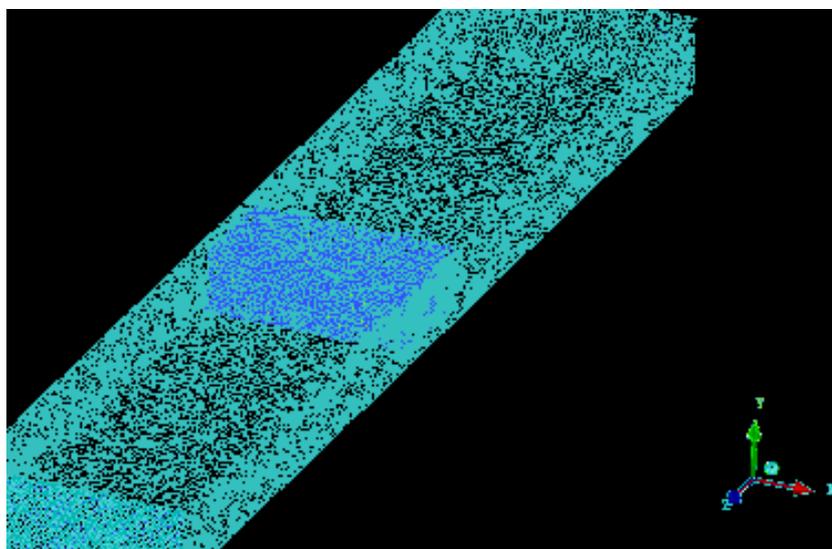
Numa tentativa de se obter resultados que reproduzissem melhor a física das estufas em geometrias reais para fins de pesquisas numéricas, a estufa hipotética mostrada na Fig. 5.34 (a), é uma representação da estufa CONTRACO do CCET. Vários testes foram realizados. Os resultados considerados mais importantes serão mostrados e comentados a seguir.

A Figura 5.34(b) mostra as linhas de corrente obtidas para uma velocidade de  $30 \text{ m/s}$  na região de entrada. Com isto um número de Reynolds da ordem de  $10^5$  foi obtido. Este valor é extremamente alto se comparado a valores reais. Contudo um dos objetivos deste trabalho é conseguir resolver o problema para condições bastante severas. Melhorias das condições de contorno da pressão, temperatura e controle do passo no tempo, propiciaram a convergência. Um procedimento já conhecido foi utilizado: primeiro foi resolvido o campo fluido-dinâmico nos primeiros  $10 \text{ s}$  de simulação. Uma vez estabelecidos os perfis de velocidade, os resultados obtidos foram utilizados como dados de entrada para uma nova simulação com tamanho de passo no tempo igual a  $10 \text{ min}$  e o problema de transferência de calor também foi resolvido.

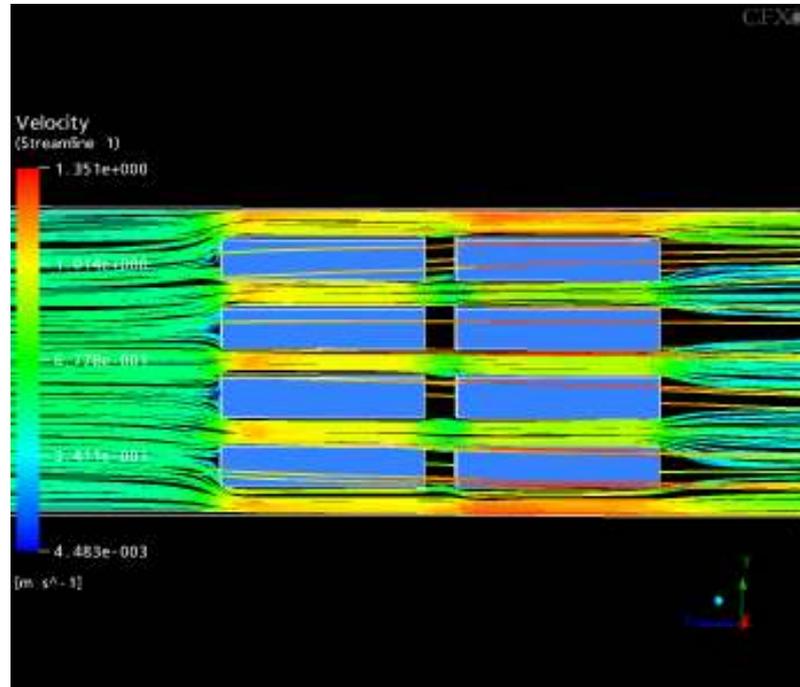
Em virtude da limitação da capacidade computacional, e excessivo número de elementos na malha, foi necessária a redução na largura das peças de madeira. As dimensões de cada tábua são  $2.5\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ .



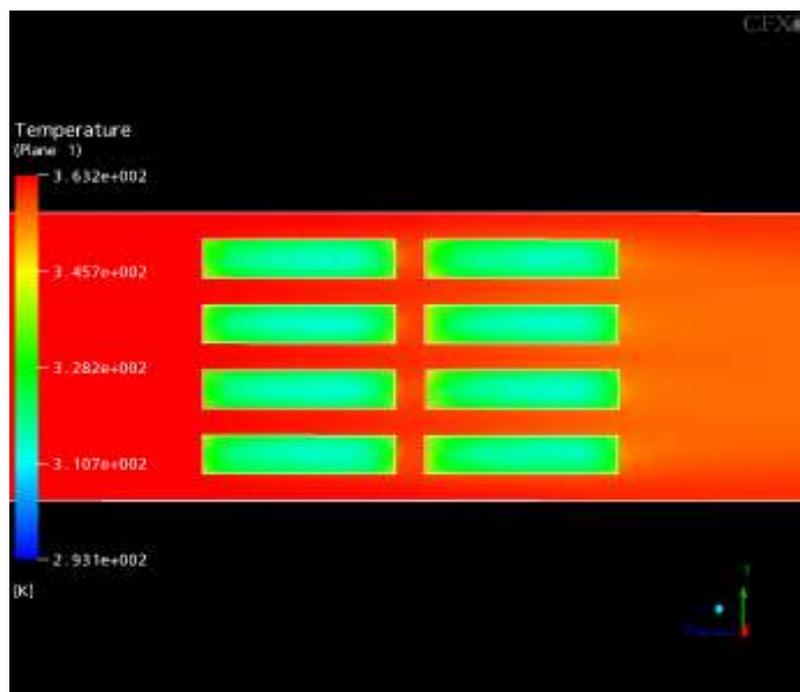
**Figura 5.4:** Design da estufa utilizada nos primeiros casos testes. Oito tábuas foram dispostas em duas pilhas paralelas de maneira transversal a um escoamento de velocidade  $0,5\text{ m/s}$ .



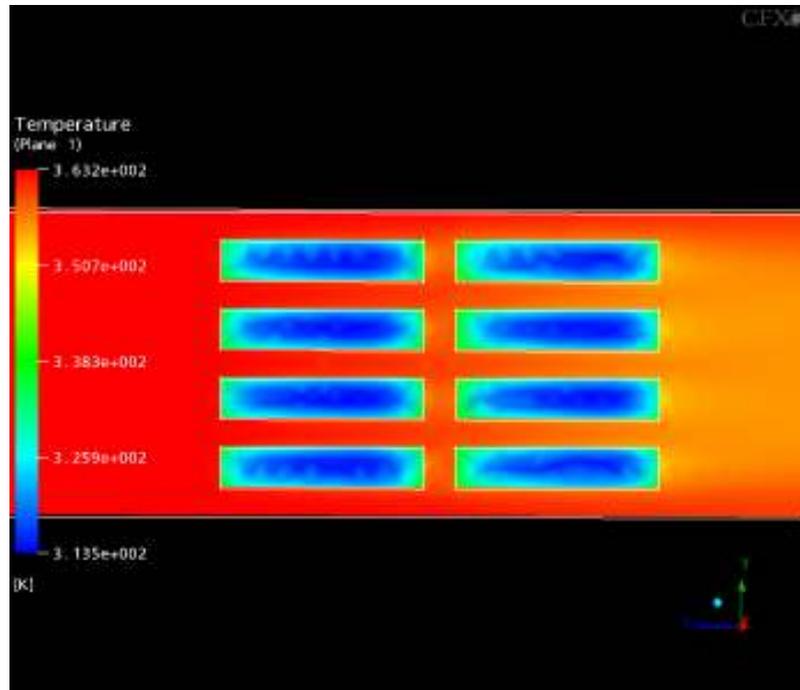
**Figura 5.5:** Malha gerada para uso nos casos 1, 2 e 3.



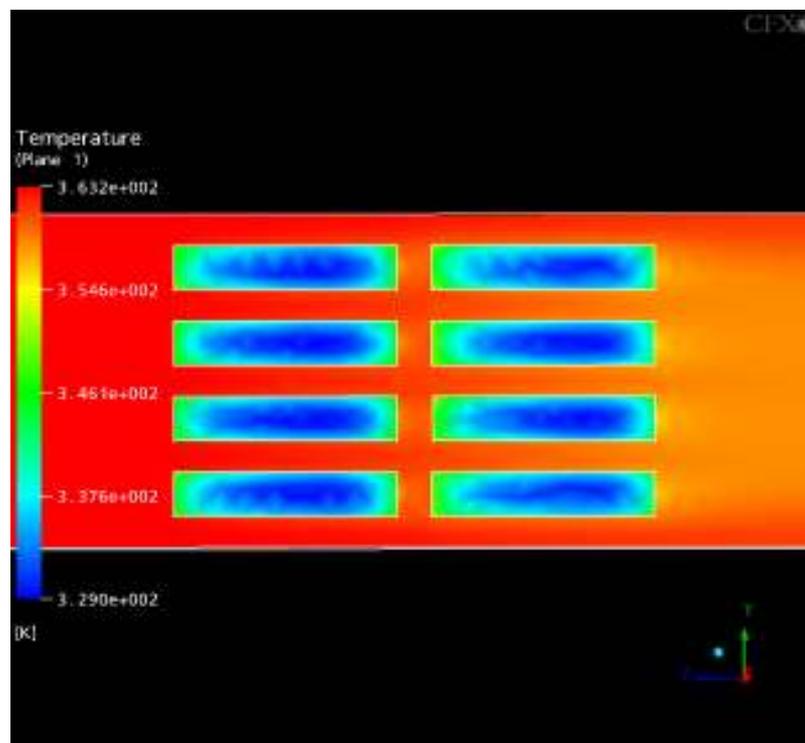
**Figura 5.6:** Linhas de corrente obtidas para o caso 1 em um tempo de 15 minutos de iniciado o processo para uma velocidade de escoamento de  $0,5 \text{ m/s}$ .



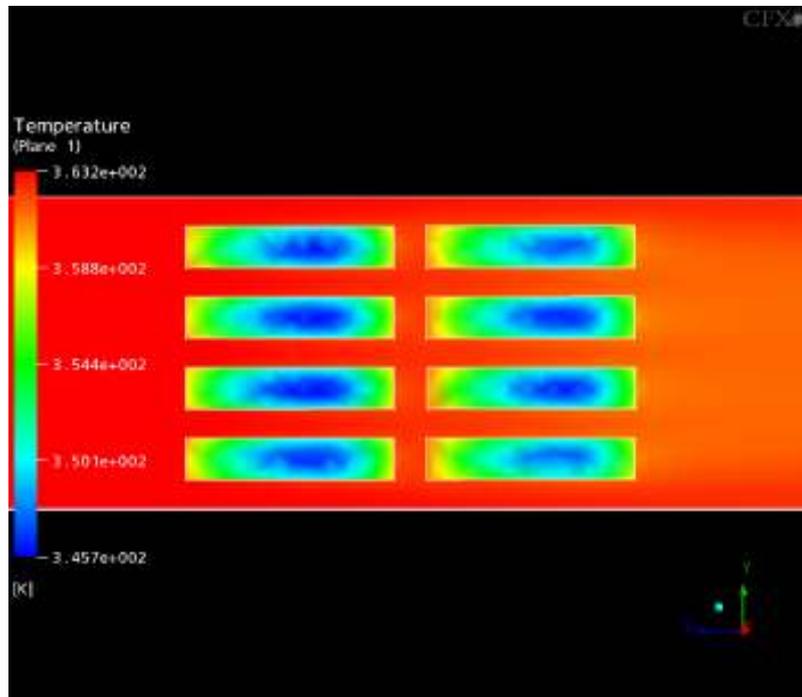
**Figura 5.7:** Distribuição de temperaturas (global) no canal e nas peças com 15 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1.



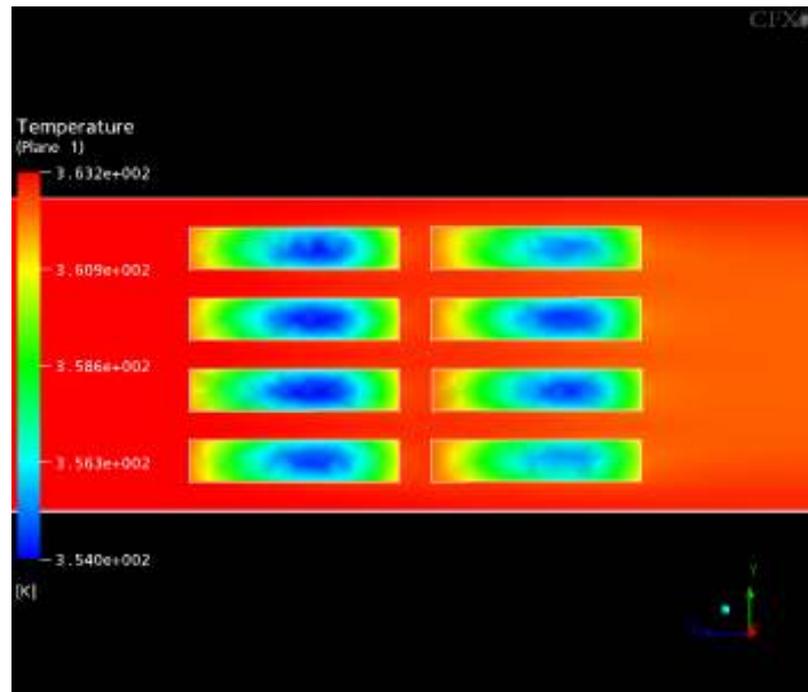
**Figura 5.8:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 15 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1.



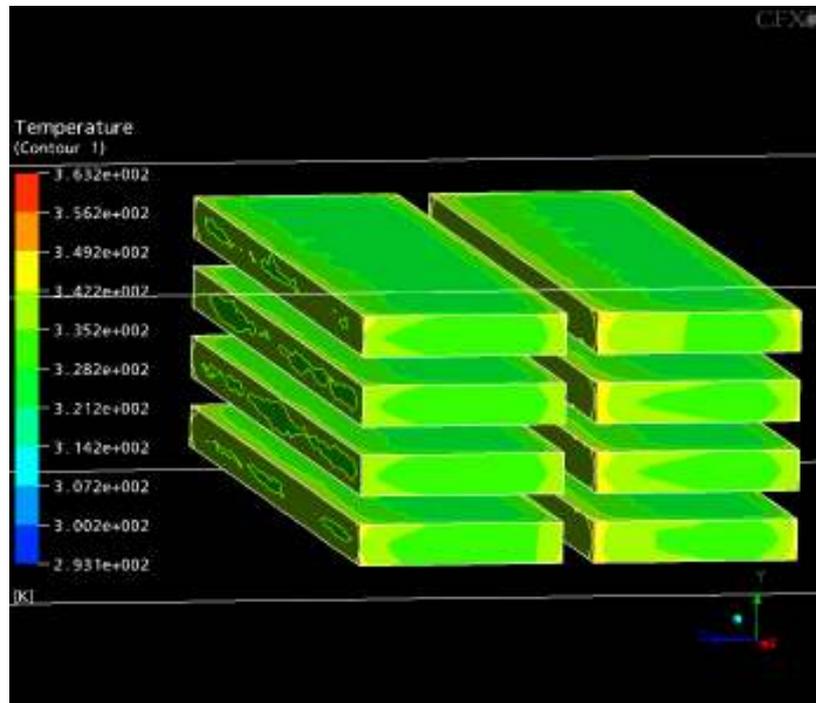
**Figura 5.9:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 30 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1.



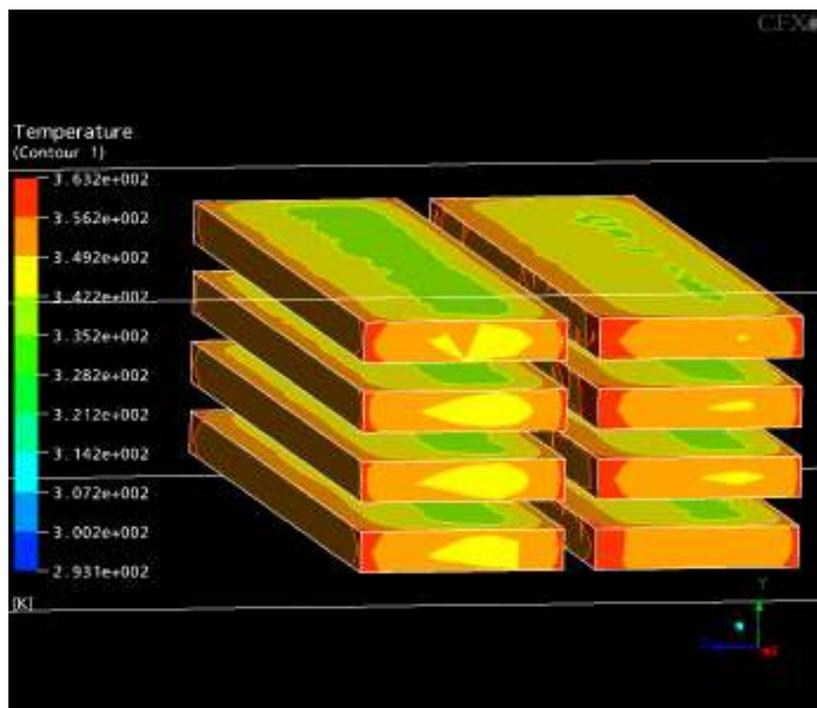
**Figura 5.10:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 45 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1.



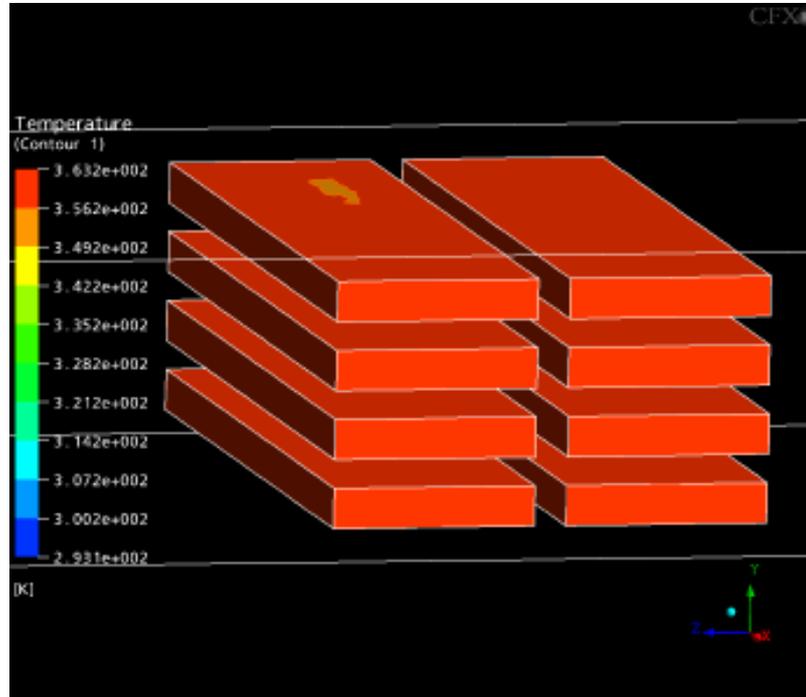
**Figura 5.11:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 60 min de exposição, num plano central e longitudinal à estufa; caso 1.



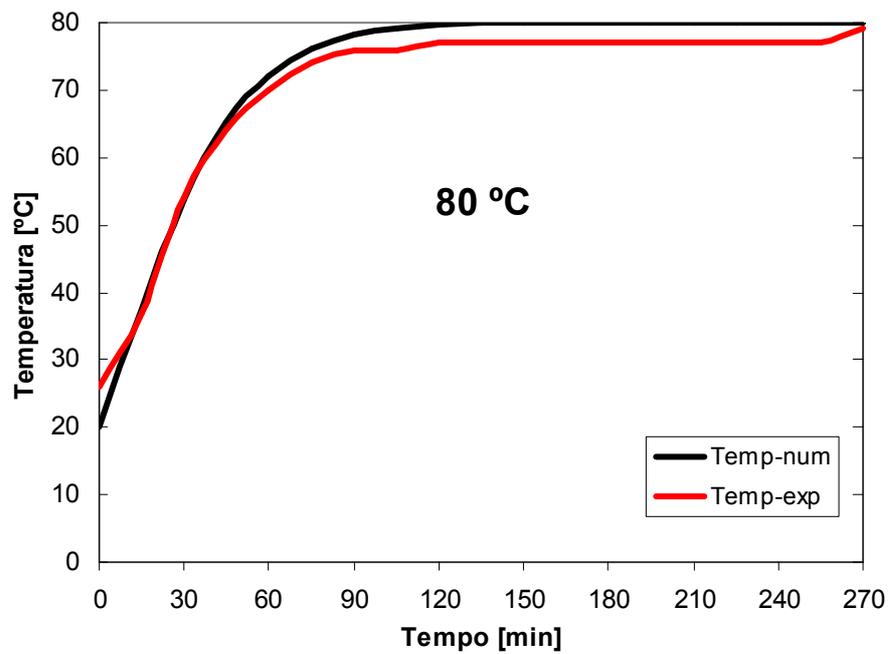
**Figura 5.12:** Curvas de distribuição de temperaturas (global) nas peças com 15 min de exposição; caso 1.



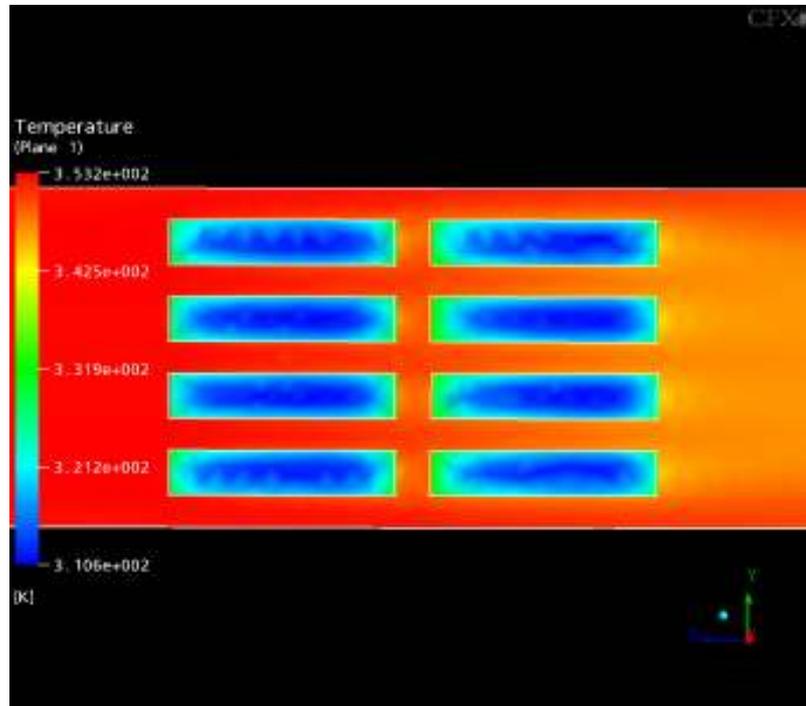
**Figura 5.13:** Curvas de distribuição de temperaturas (global) nas peças com 30 min de exposição; caso 1.



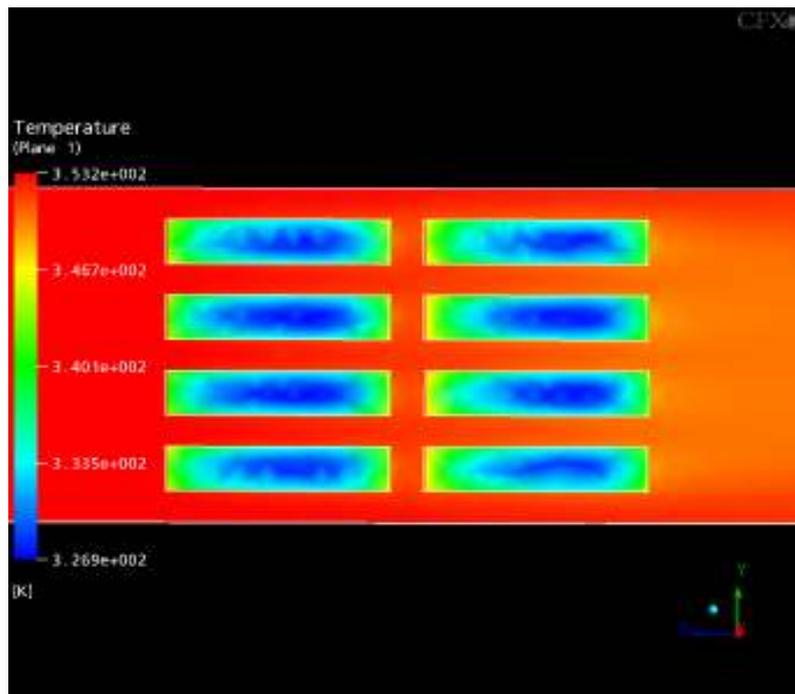
**Figura 5.14:** Curvas de distribuição de temperaturas (global) nas peças com 60 min de exposição; caso 1.



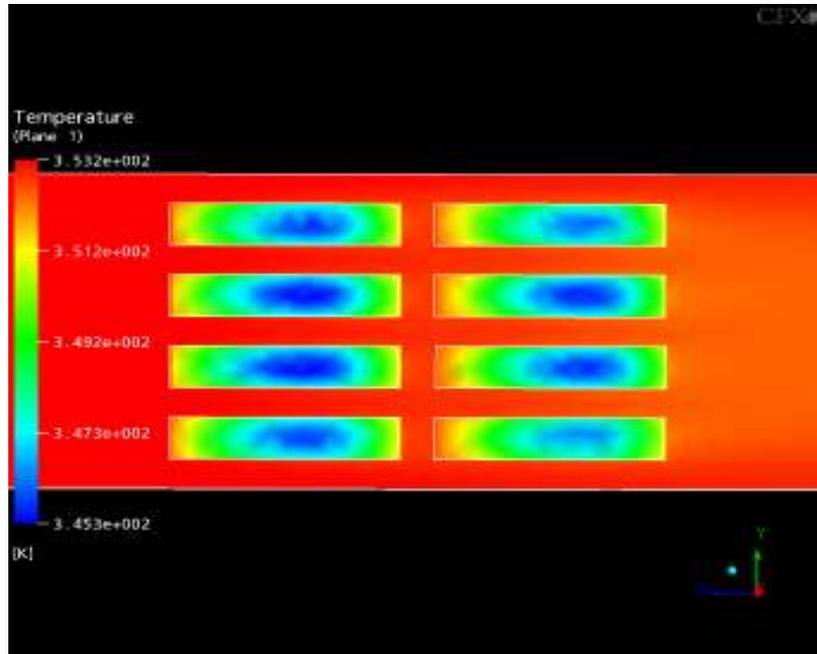
**Figura 5.15:** Comportamento da temperatura em um ponto central da tábua de madeira. Comparação entre resultados numéricos e experimentais para uma temperatura ambiente de 80 °C. Caso 2.



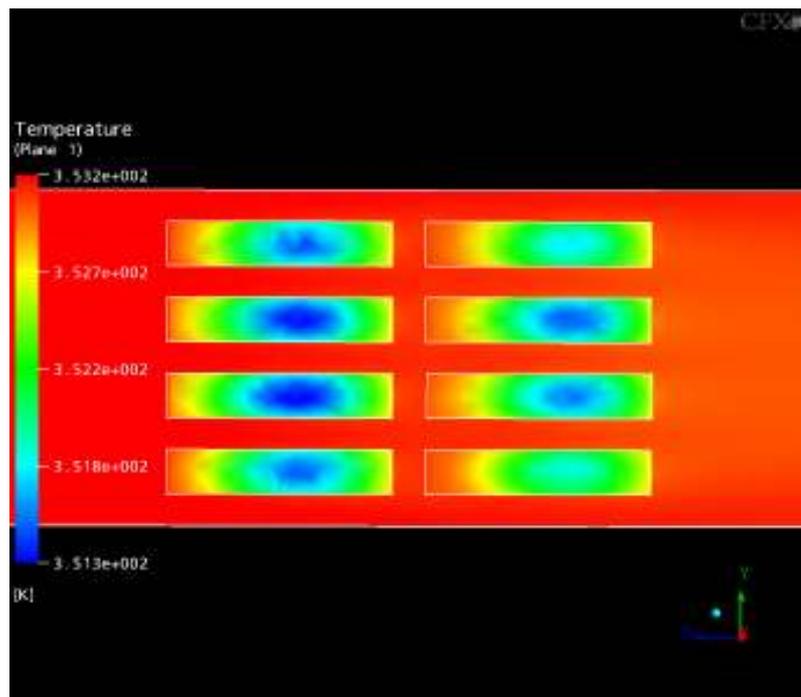
**Figura 5.16:** Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 15 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2.



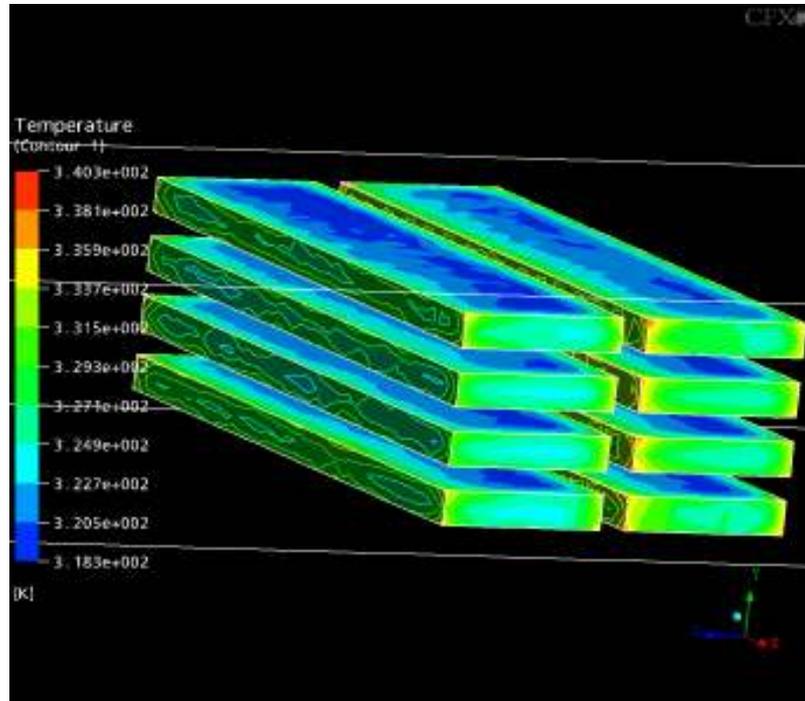
**Figura 5.17:** Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 30 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2.



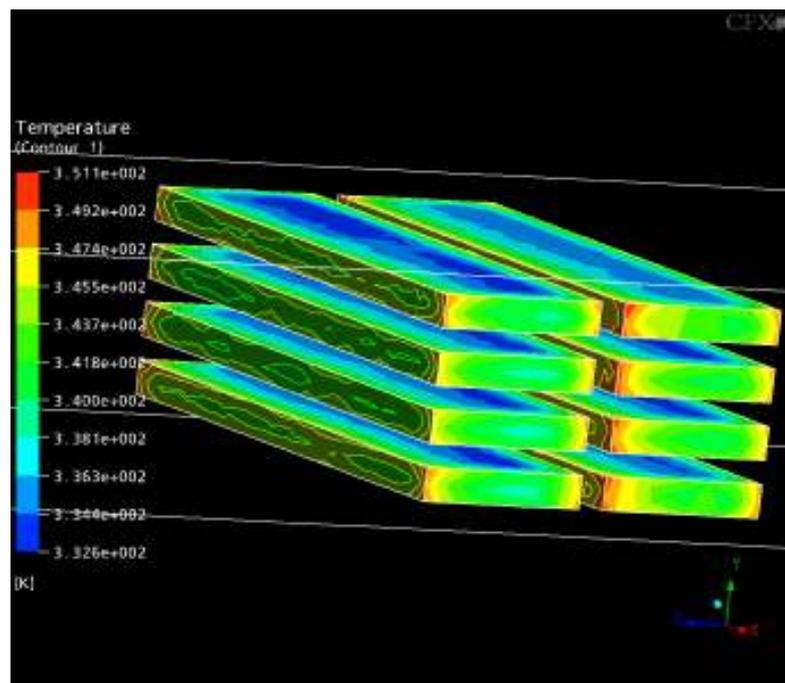
**Figura 5.18:** Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 60 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2.



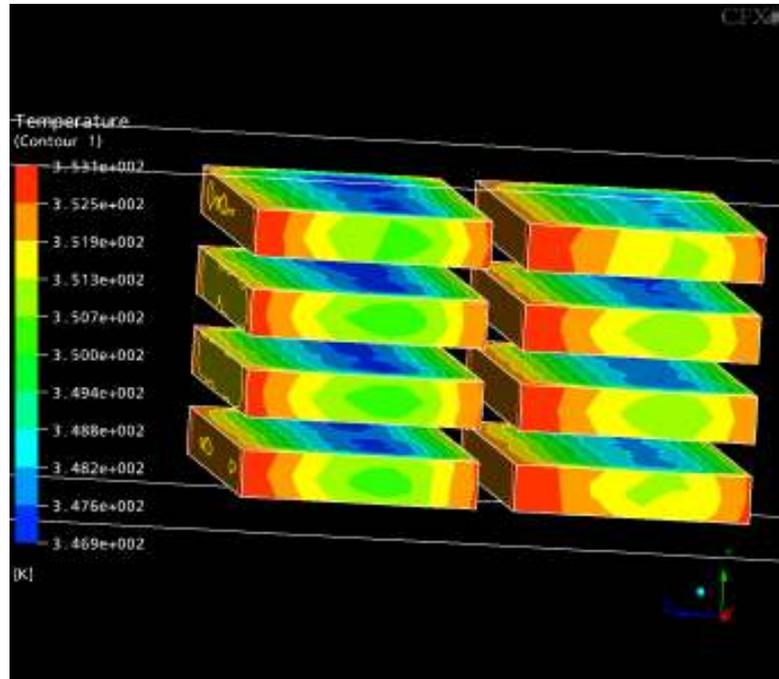
**Figura 5.19:** Distribuição de temperaturas (local) nas peças com 90 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 2.



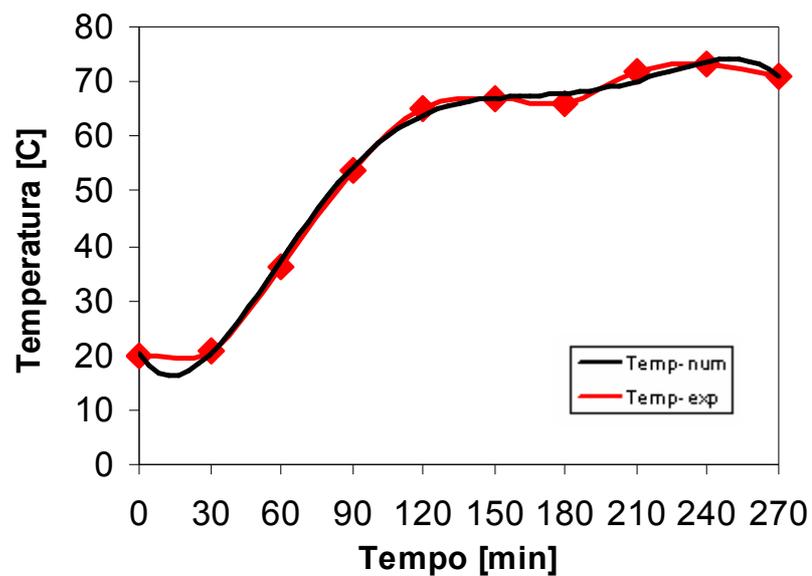
**Figura 5.20:** Curvas de distribuição de temperaturas (local) nas peças com 15 min de exposição; caso 2.



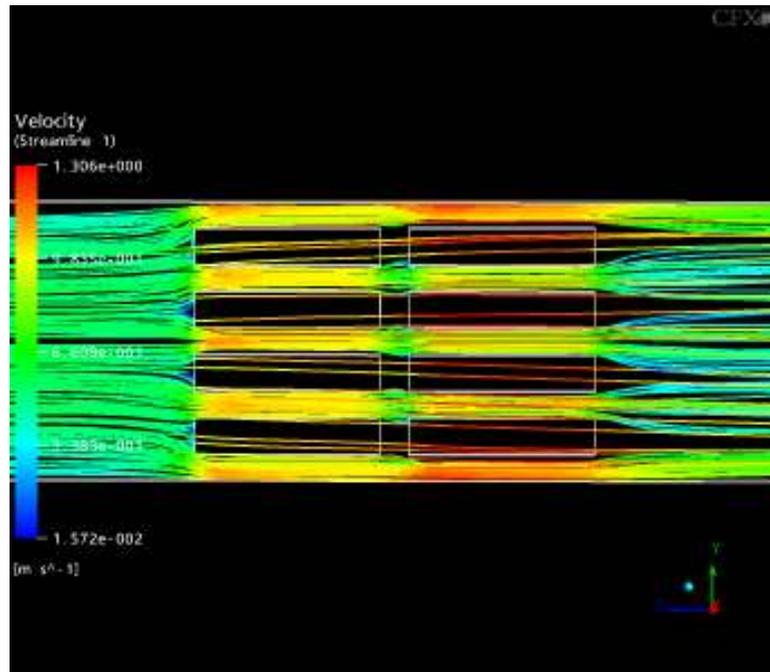
**Figura 5.21:** Curvas de distribuição de temperaturas (local) nas peças com 30 min de exposição; caso 2.



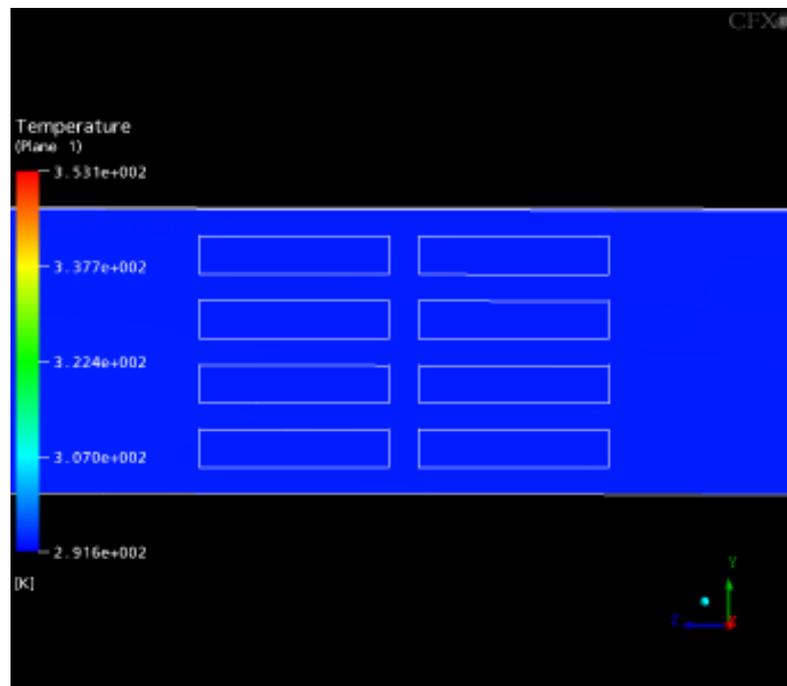
**Figura 5.22:** Curvas de distribuição de temperaturas (local) nas peças com 60 min de exposição; caso 2.



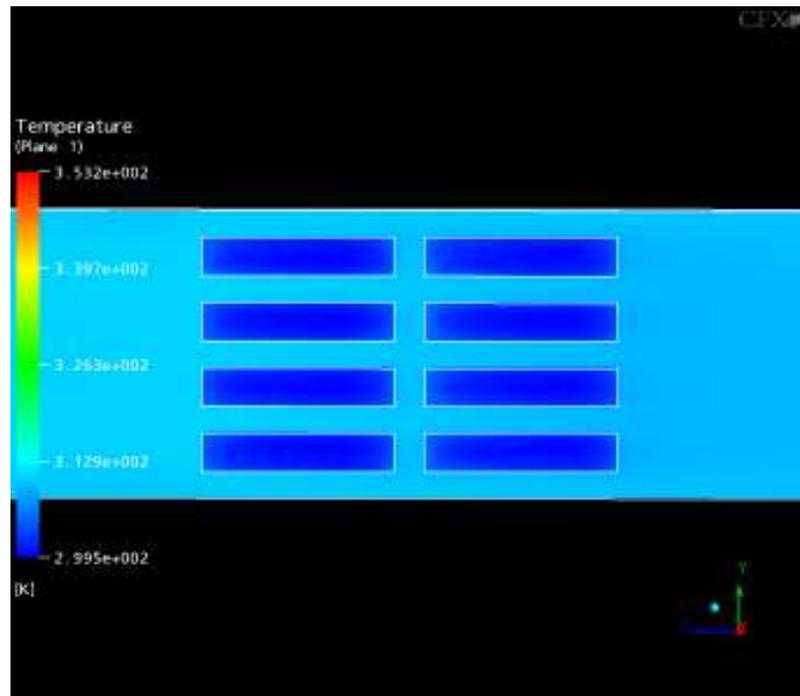
**Figura 5.23:** Aproximação polinomial para a temperatura na entrada da estufa (em preto), a partir de valores reais extraídos da estufa experimental do CCET (em vermelho).



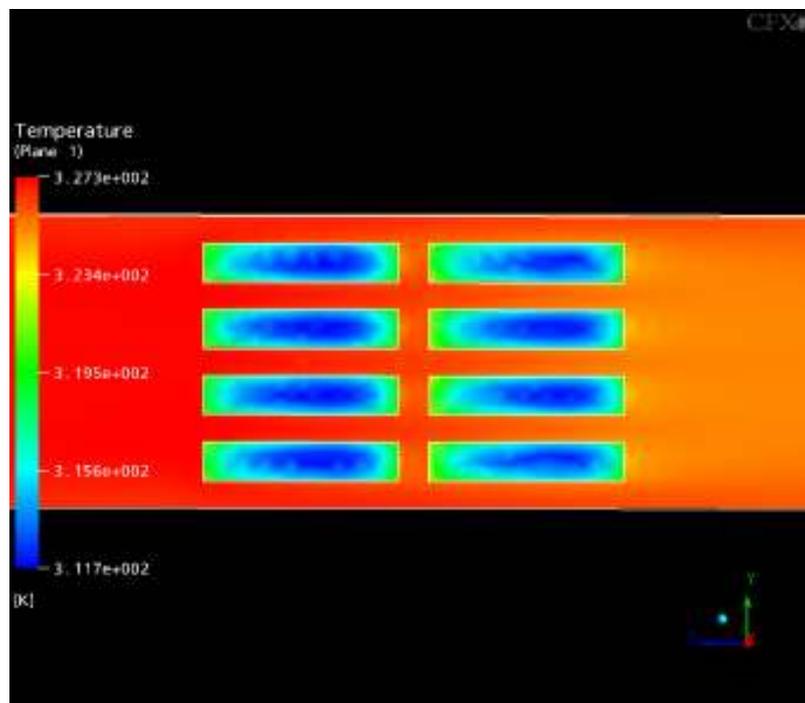
**Figura 5.24:** Linhas de corrente no interior da estufa para um escoamento totalmente desenvolvido. Caso 3.



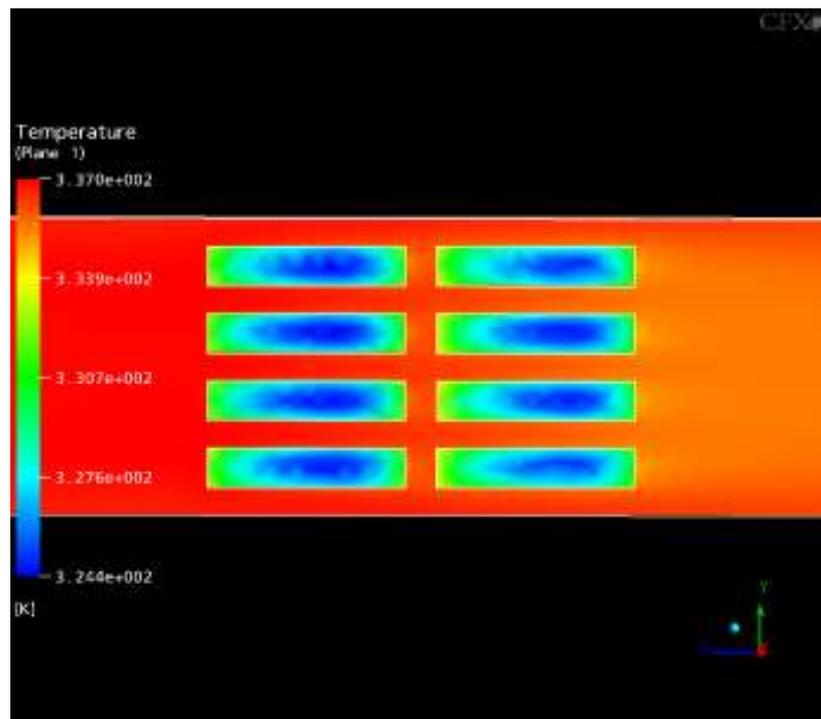
**Figura 5.25:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 30 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.



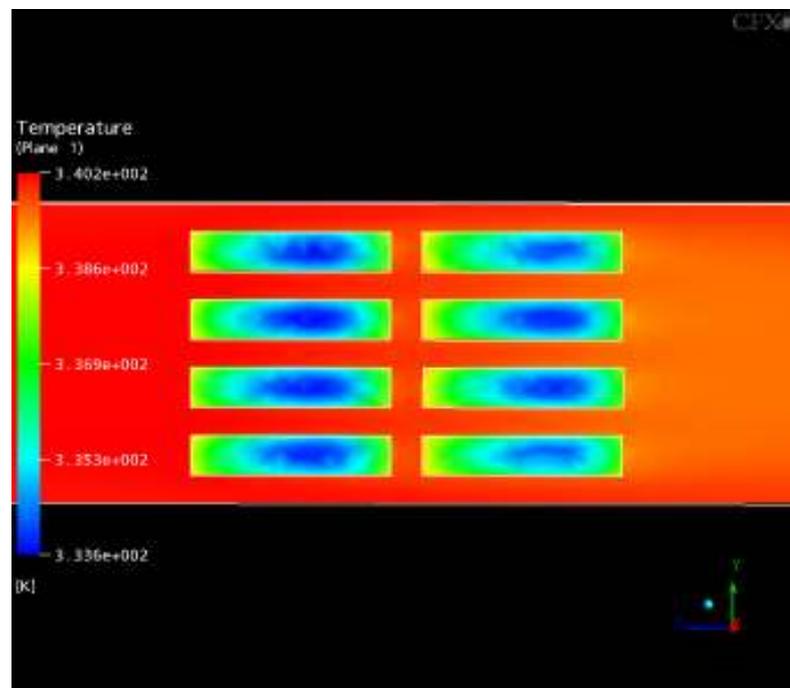
**Figura 5.26:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 60 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.



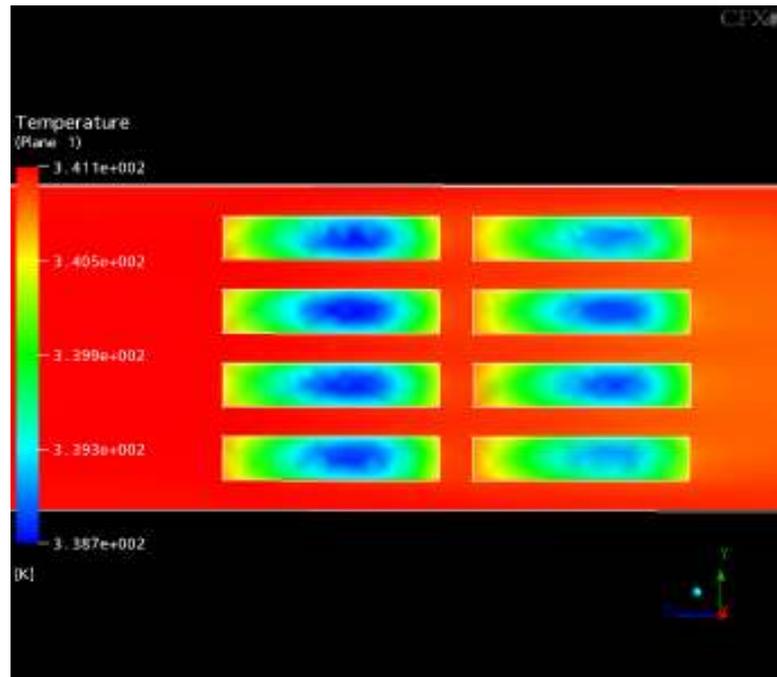
**Figura 5.27:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 90 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.



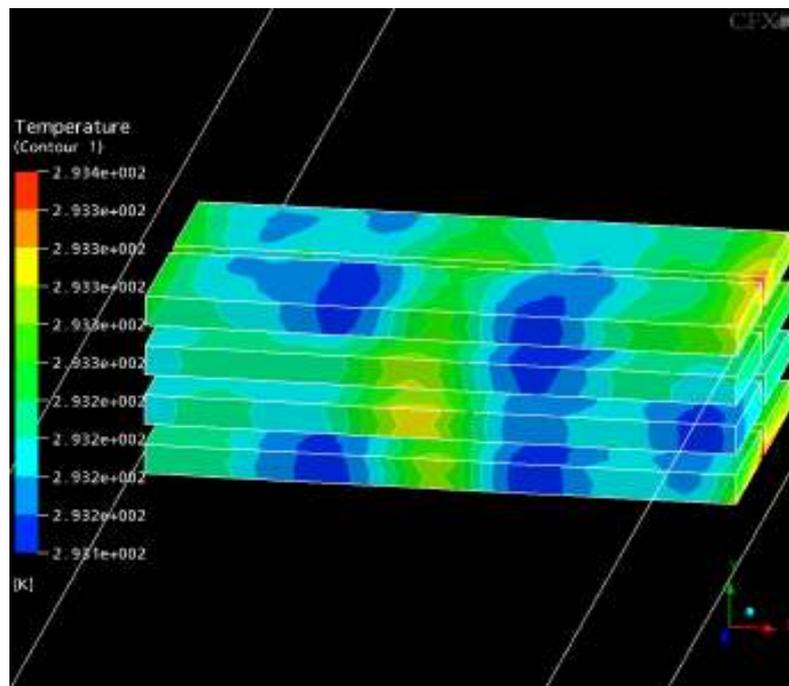
**Figura 5.28:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 120 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.



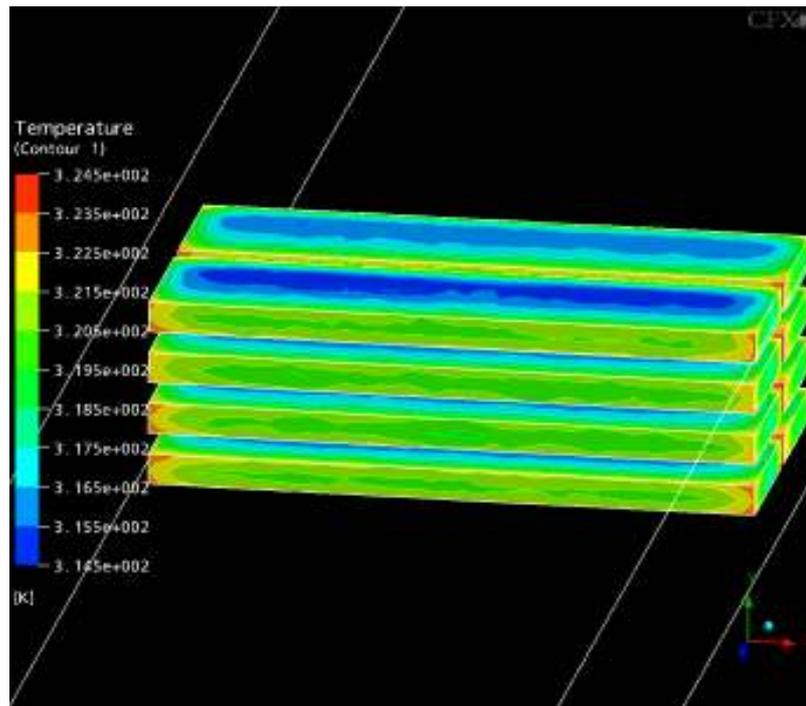
**Figura 5.29:** Distribuição de temperaturas (local) no canal e nas peças com 150 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.



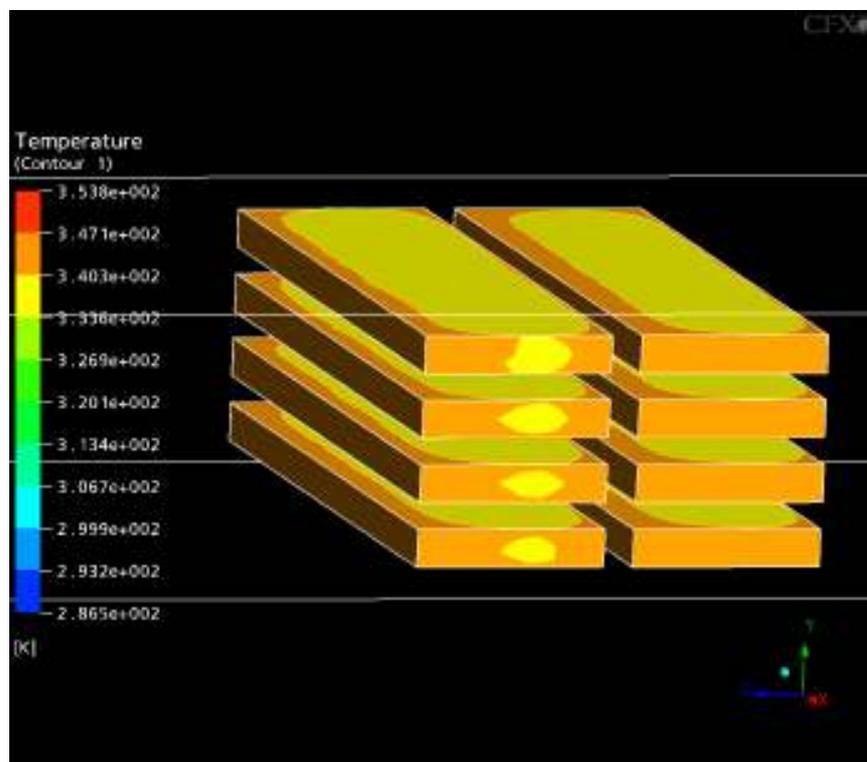
**Figura 5.30:** Distribuição de temperaturas (global) no canal e nas peças com 180 min de exposição num plano central e longitudinal à estufa; caso 3.



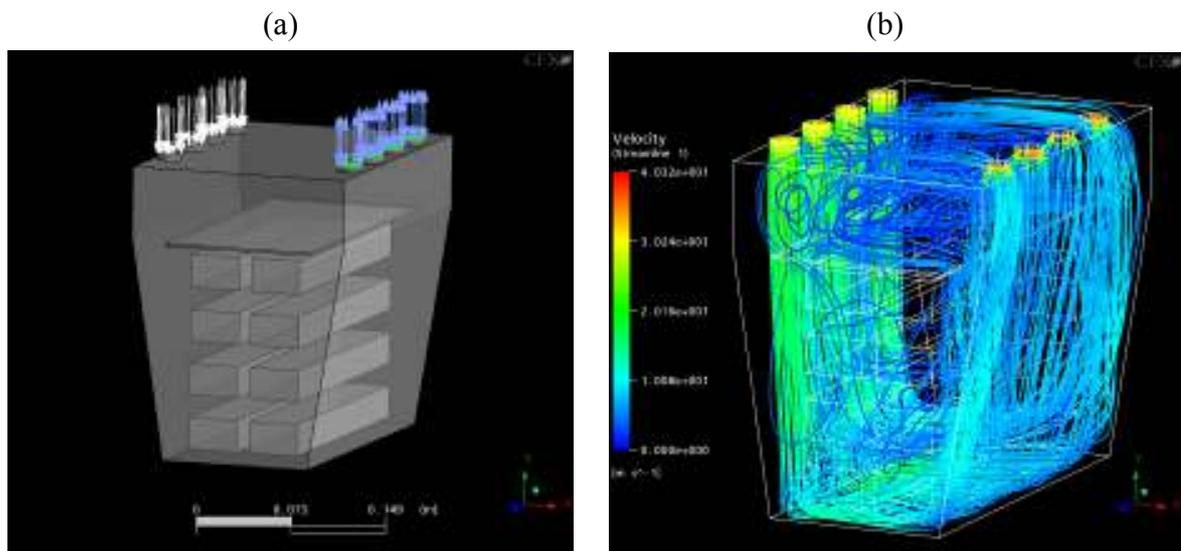
**Figura 5.31:** Curva de distribuição da temperatura local nas peças com 30 min de exposição, numa visão da entrada da estufa; caso 3.



**Figura 5.32:** Curva de distribuição da temperatura local nas peças com 90 min de exposição, numa visão da entrada da estufa; caso 3.



**Figura 5.33:** Curva de distribuição da temperatura global nas peças com 180 min de exposição; caso 3.

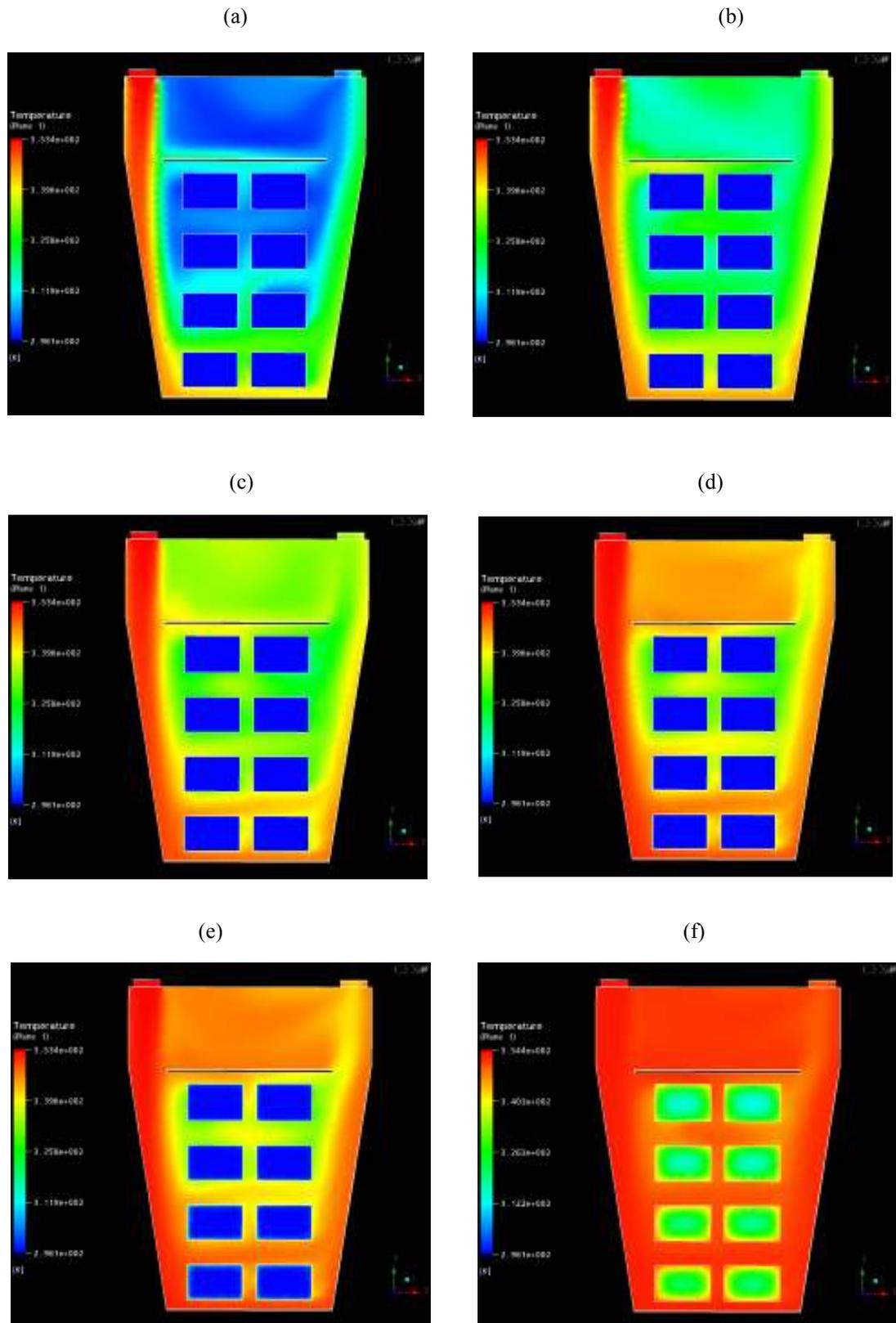


**Figura 5.34:** (a) Estufa em miniatura com oito tábuas em seu interior. Os dutos de entrada estão indicados com as setas brancas e os dutos de saída com as setas azuis. (b) Linhas de corrente para uma velocidade de  $30 \text{ m/s}$  na entrada da estufa com temperatura do ar igual a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

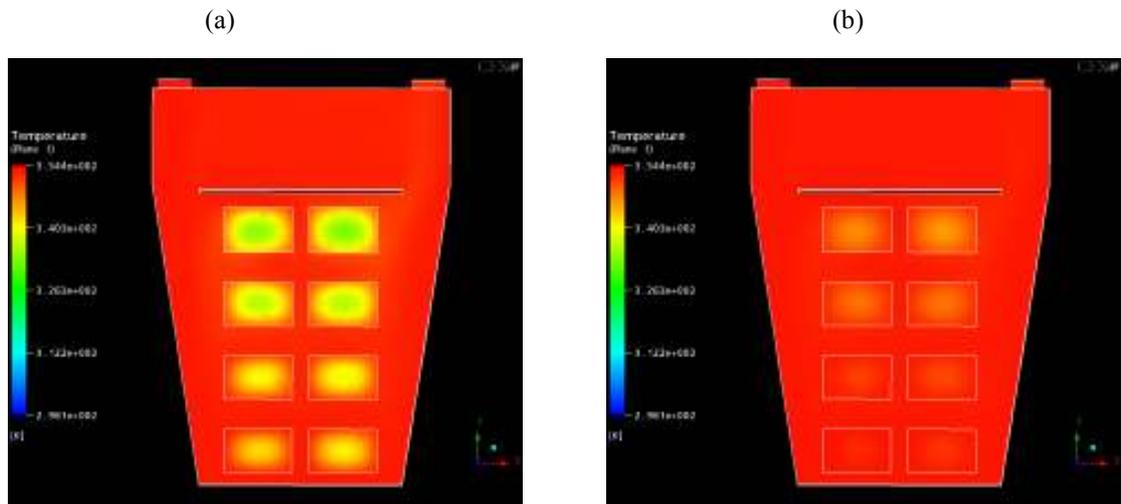
Mediante inspeção da Fig. 5.34(b) pode-se verificar o comportamento do escoamento entre as peças de madeira. Como a velocidade é bastante alta, as linhas de corrente se concentram na parte inferior da estufa, otimizando as trocas de calor nesta região.

Note-se que existe uma região de grande recirculação acima do sub-teto da estufa. Em estufas reais isto é evitado pela disposição dos ventiladores em uma das laterais da estufa, entre o sub-teto e o teto da mesma. Contudo, neste caso, grande parte da energia cinética do escoamento é dissipada nesta região. Não seria uma característica adequada para a construção de um novo modelo de estufa, como será comprovado mais adiante neste trabalho, em outro caso.

As Figs. 5.35 e 5.36 mostram a temperatura no interior das tábuas e do escoamento em uma seção transversal da estufa, para  $0,1 \text{ s}$ ;  $0,2 \text{ s}$ ;  $0,4 \text{ s}$ ;  $1 \text{ s}$ ;  $5 \text{ s}$ ;  $10 \text{ s}$ ;  $10 \text{ min}$  e  $10 \text{ s}$ ;  $20 \text{ min}$  e  $10 \text{ s}$  e  $30 \text{ min}$  e  $10 \text{ s}$ , respectivamente. Como se pode observar a taxa de aquecimento é bastante rápida. Pode-se visualizar claramente o campo fluido-dinâmico sendo estabelecido. O nível de turbulência produzido favorece as trocas de calor, e em aproximadamente 30 minutos toda a madeira está à temperatura do escoamento. Nas Figs. 5.35(a) e 5.35(b) os níveis de flutuação podem ser facilmente visualizados.



**Figura 5.35:** Distribuição de temperatura global num plano transversal à pilha de madeira: (a) 0,1 s. (b) 0,2 s. (c) 0,4 s. (d) 1 s. (e) 5 s. (f) 10min e 10 s.



**Figura 5.36:** Distribuição de temperatura global num plano transversal à pilha de madeira: (a) 20 min e 10 s. (b) 30min e 10 s.

Analisando mais detalhadamente a Fig. 5.36(a) observa-se que o gradiente de temperatura entre as tábuas superiores e inferiores ultrapassa  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Neste caso a velocidade do escoamento e a geometria da estufa estão influenciando diretamente nos resultados obtidos. Os cantos das peças inferiores são aquecidos muito rapidamente. Esta situação leva a empenamentos e rachaduras indesejáveis ao processo de secagem.

Com o intuito de tornar o modelo geométrico da estufa ainda mais próximo da realidade e aprofundar o estudo deste tema, optou-se por simular o uso de ventiladores no interior da mesma, via implantação de um “swirl” em cada entrada. Assim foi constituída a geometria mostrada na Fig. 5.37(a). Vários testes foram efetuados para madeira seca e madeira verde. As constantes físicas e algumas condições iniciais consideradas importantes são mostradas nas Tabs. 5.8 e 5.9. O “swirl” é produzido mediante a introdução de dois pequenos dutos laterais em cada tubo de entrada. A velocidade de entrada nos dutos laterais deve ser várias vezes maior que a velocidade axial do ar no duto cilíndrico. A interação destes dois escoamentos gera um novo escoamento com componente de velocidade tangencial. Os efeitos produzidos por esta interação são muito significativos do ponto de vista do estabelecimento do campo de velocidades dentro da estufa.

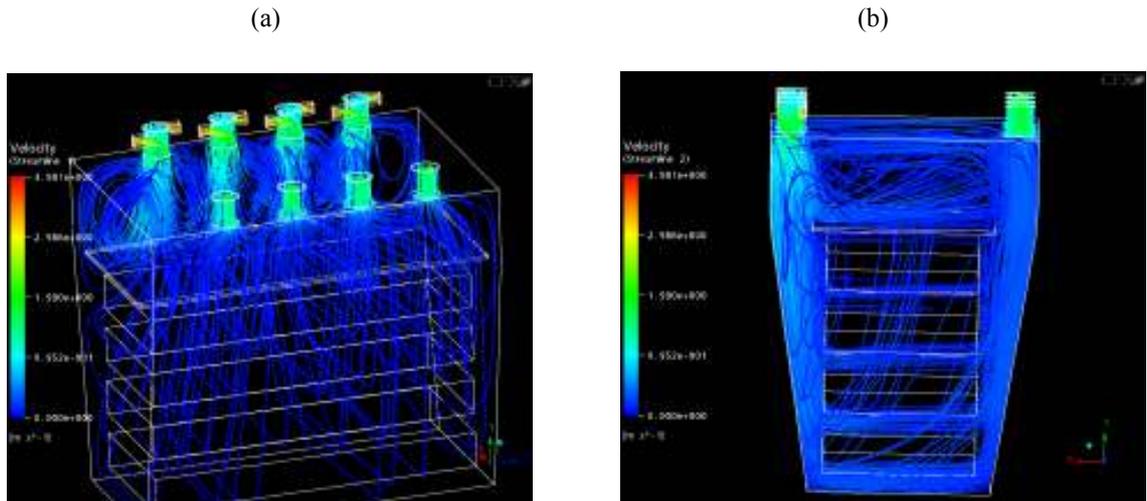
**Tabela 5.8:** Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações de madeira verde.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Velocidade na entrada	1 <i>m/s</i>
Velocidade no swirl	4 <i>m/s</i>
Massa específica	1.143 <i>kg/m<sup>3</sup></i>
Calor específico	0,472 <i>cal/g °C</i>
Condutividade térmica	0,0002868 <i>cal/cm °Cs</i>
Massa molar	1 <i>kg/kmol</i>
Dimensões das peças	15 x 40 x 2,54 <i>cm</i>

**Tabela 5.9:** Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações de madeira seca.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Velocidade na entrada	1 <i>m/s</i>
Velocidade no swirl	4 <i>m/s</i>
Massa específica	510 <i>kg/m<sup>3</sup></i>
Calor específico	1380 <i>J/kg K</i>
Condutividade térmica	0,12 <i>W/m K</i>
Massa molar	1 <i>kg/kmol</i>
Dimensões das peças	15 x 40 x 2,54 <i>cm</i>

Os resultados obtidos para o campo fluidodinâmico com uma temperatura do ar igual a 90 °C e depois de 0,2 s de vazão de ar quente, são mostrados na Fig. 5.37(a). É fácil observar que são formados grandes vórtices logo na entrada da estufa. Existe até uma pequena redução nos valores de velocidade, se comparadas a outros resultados anteriores. Por outro lado, mediante inspeção da Fig. 5.37(b), pode-se inferir que a presença do “swirl” melhora a distribuição do fluxo de ar à medida que o escoamento evolui. Com isso a distribuição da energia pode ocorrer de maneira mais uniforme. As Fig. 5.38(a)-(f), mostram a evolução do campo de temperaturas local, num plano central da estufa que agora tem uma única pilha de tábuas, no período de 15 *min* a 6 *h* depois de iniciado o aquecimento.

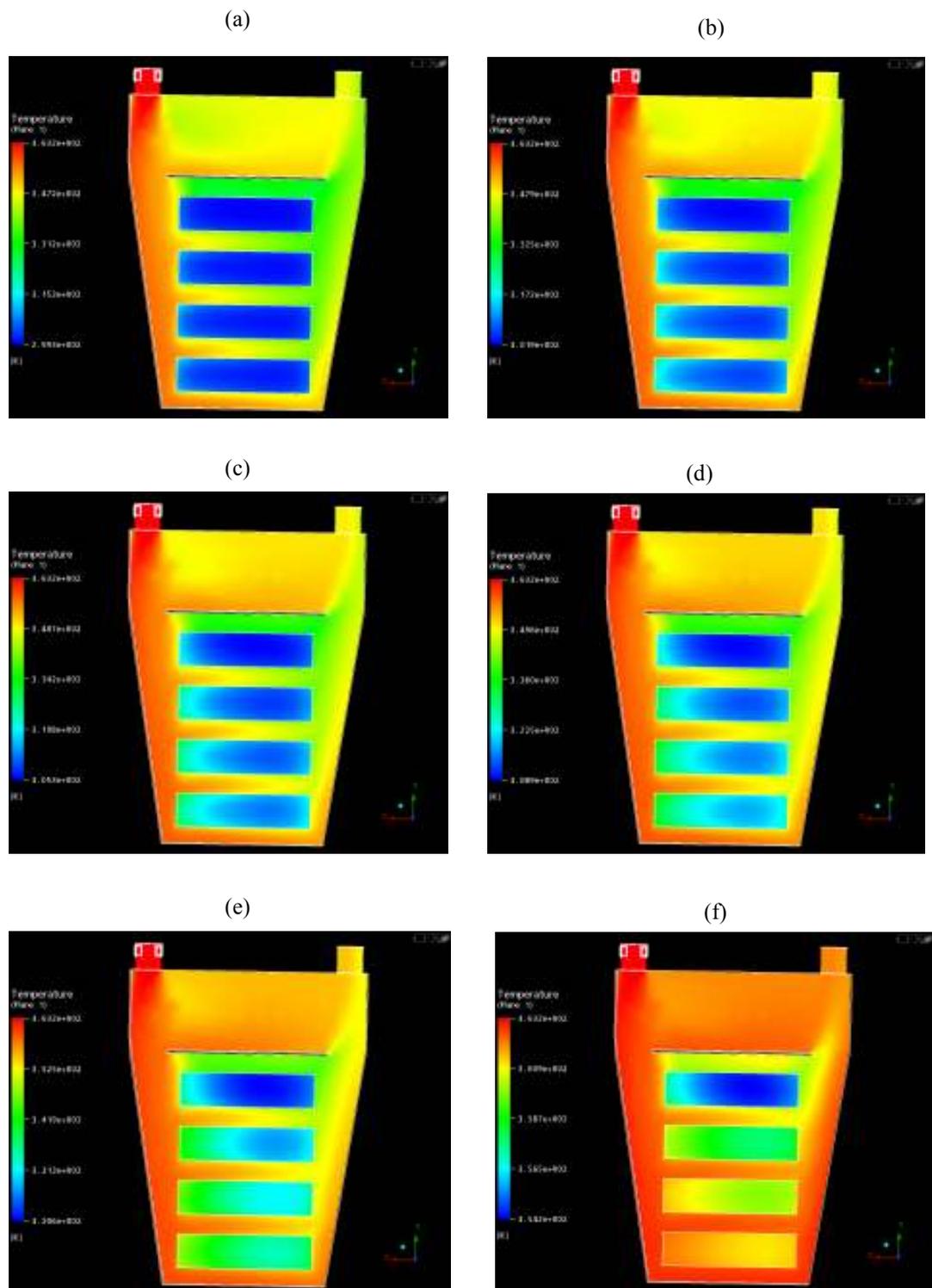


**Figura 5.37:** (a) Isolinhas de velocidade obtidas com “swirl” na entrada e temperatura do ar igual a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , após  $0,2\text{ s}$  do início do processo de entrada de ar quente dentro da estufa. (b) Isolinhas de velocidade depois de 6 horas de instalação do fluxo de ar a  $90^{\circ}\text{C}$ .

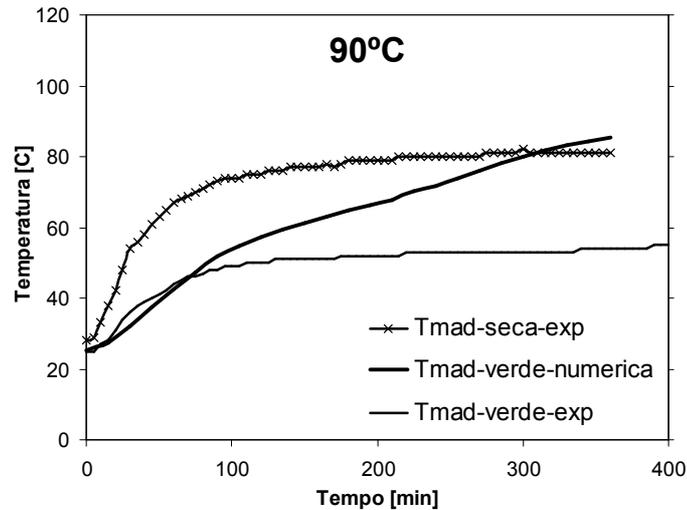
A evolução da transferência de calor entre o ar quente e as peças de madeira, nestes resultados contrariam a hipótese de Awadalla *et al.* (2004) de que a transferência de calor pelas laterais da madeira pode ser desprezada.

Pode-se verificar ao longo da Fig. 5.38 que o aquecimento evolui justamente a partir da lateral da peça. Nisto reside a importância de uma solução 3D para este tipo de problema. A difusão do calor ocorre principalmente na direção do escoamento. Nestes testes pode-se observar que o lado esquerdo da estufa aquece muito mais rapidamente que o lado direito. A tábuia colocada no extremo superior, mesmo depois de 6 horas apresenta-se com diferença de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  em relação ao escoamento. Logo, por causa das características geométricas, as tábuas aquecem da esquerda para a direita e de baixo para cima.

Os resultados numéricos obtidos para a madeira verde não concordam com os dados experimentais (Fig. 5.39). Durante os primeiros 70 minutos, os resultados são muito próximos, porém, com o passar do tempo, os valores monitorados da temperatura em um ponto localizado no centro da segunda tábuia da estufa mostrada na Fig. 5.37(a), tende aos valores da madeira seca. Provavelmente os valores empregados para a difusividade térmica não são apropriados para simular o caso da madeira verde.



**Figura 5.38:** Distribuição local de temperatura com o tempo para: (a) 15 min (b) 30 min (c) 45 min (d) 1 hora (e) 2 horas (f) 6 horas. Temperatura do ar na entrada é 90 °C.



**Figura 5.39:** Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para madeira verde e seca com os valores numéricos obtidos para a madeira verde.

Estudos mais detalhados são necessários, para verificar se a umidade variável no interior da madeira é a causadora das discrepâncias verificadas entre as soluções numéricas e experimentais. Todos os resultados mostrados nas Figs. 5.37 a 5.39, foram estabelecidos para um valor médio da umidade igual a 28%; valor este já utilizado por Kollmann e Côté (1968). É possível empregar valores variáveis da condutibilidade térmica, densidade e calor específico no CFX, no entanto a dificuldade encontrada na versão atual deste programa, é tornar a madeira um material poroso e que aceite estas propriedades físicas. Esta tem sido uma grande barreira à evolução de um projeto maior, que consiste na simulação completa do processo de secagem da madeira. Esforços têm sido feitos no sentido de romper estas dificuldades e obter um modelo numérico mais representativo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Várias considerações podem ser inferidas a partir dos testes numéricos e experimentais efetuados no decorrer deste trabalho, e são descritas a seguir:

- 1) Foi constituído um modelo matemático que descreve a fase de aquecimento de peças de madeira numa formulação tridimensional, transiente e turbulenta.
- 2) Foi realizada uma revisão bibliográfica do processo de secagem de madeira e seu estado da arte foi delineado.
- 3) Foram realizados vários testes experimentais com o intuito de estabelecer o comportamento da temperatura no centro de peças de madeira verde e madeira seca da espécie *pinus taeda*. Duas estufas experimentais foram usadas: uma com atmosfera inerte e outra com ventilação forçada.
- 4) Experimentalmente foi demonstrado que a madeira seca sofre aquecimento muito mais rápido que a madeira verde. Para as temperaturas ambientes iguais a 80, 90 e 100 °C, o ponto central da madeira seca atingiu a temperatura de 56 °C em aproximadamente 35 minutos em todos os casos testados em atmosfera inerte. Com isto mostrou-se que, para a madeira seca, e para os casos testados, as taxas de aquecimento não estão intimamente relacionadas à temperatura ambiente, pois sua variação foi de apenas 20°C.
- 5) Para a madeira verde, os tempos de aquecimento até 56 °C ficam bem dilatados em relação à madeira seca. Para 80 °C são necessárias 5 horas e 30 minutos e para 100 °C são 3 horas de aquecimento para que os 56 °C sejam atingidos. Neste caso a relação com a temperatura ambiente é muito mais explícita.
- 6) De acordo com a revisão bibliográfica, nenhum inseto considerado praga pela indústria do setor madeireiro, consegue sobreviver a temperaturas superiores a 50 °C. Por isto pode-se comprovar a validade da NIMF-15. Os resultados aqui obtidos determinam o tempo necessário para que tábuas verdes e secas atinjam a temperatura de 56 °C estabelecida pela norma.
- 7) Em ambiente convectivo as taxas de aquecimento são drasticamente incrementadas. As trocas de calor e massa ocorrem rapidamente. Nos casos testados, a tábua verde estava inicialmente com um teor de umidade de 42 % e 50

minutos depois já estava com apenas 15 %. Este resultado evidencia os efeitos das correntes de ar quente dentro da estufa.

- 8) As taxas de secagem da madeira estão fortemente ligadas às suas propriedades físicas. A difusividade térmica é drasticamente reduzida enquanto a condutividade térmica é ligeiramente incrementada com a umidade. Este fato vem ao encontro a resultados experimentais obtidos por Gu (2001), Fotsing e Takan (2004) e Tanaka (2001), obtidos para outras espécies de madeira.
- 9) Foram obtidos importantes resultados numéricos no sentido de simular o processo de aquecimento de tábuas de madeira em estufas. Várias geometrias foram testadas. Diferentes velocidades e temperaturas foram impostas na entrada. Inicialmente muitas dificuldades apareceram no momento de geração da malha e da convergência do método de solução.
- 10) Os testes numéricos mostraram que para o caso de duas pilhas de madeira dispostas transversalmente ao escoamento, em uma estufa tipo duto, a segunda pilha de madeira sofre um aquecimento mais rápido que a primeira.
- 11) Quando o controle da temperatura na entrada foi estabelecido por um polinômio obtido a partir de uma curva de secagem real, a concordância entre os resultados numéricos e experimentais foi excelente. Para 80 °C os resultados também foram muito bons.
- 12) Perfis de temperatura e velocidade foram obtidos para vários casos. E deve-se destacar a vantagem da visualização destes resultados, que graças ao CFX, permite fazê-lo de forma tridimensional.
- 13) Foi modelado um escoamento, com “swirl” nos dutos de entrada de ar quente, com o objetivo de simular a presença de ventiladores no interior da estufa. Este tipo de simulação ainda não foi encontrada na revisão de literatura efetuada.
- 14) Os resultados numéricos obtidos para tábua úmida não apresentam boa concordância com os resultados experimentais, mesmo utilizando um “swirl” na entrada. Provavelmente o problema está na variação das propriedades físicas, principalmente a difusividade térmica.
- 15) Os resultados numéricos confirmaram a presença de temperaturas elevadas nos cantos das peças.

- 16) Os resultados mostraram a importância da disposição dos dutos de entrada de ar, bem como da velocidade imposta.

Outras considerações ainda são passíveis de citação, contudo, as julgadas mais significativas já foram mencionadas.

Deve-se frisar que as metas a que se propunha este trabalho foram atingidas, contudo, existem muitas lacunas no conhecimento do processo de secagem da madeira que ainda merecem atenção e estudo e que ainda não puderam ser aqui contempladas em virtude da extensão e da complexidade do fenômeno.

Assim, como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Modelar a umidade no interior da madeira e considerar a sua evaporação com o aquecimento;
- Geração de geometrias maiores, condizentes com estufas reais e com maior número de tábuas;
- Considerar a madeira um material poroso anisotrópico;
- Validar os resultados obtidos para a estufa com carga completa;
- Efetuar um estudo sobre o momento da aplicação do banho de água ambiente para homogeneização da temperatura da madeira na estufa.
- Considerar as propriedades físicas variáveis;

Além de outros.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWADALLA, H. S. F., EL-DIB, A. F., MOHAMAD, M. A., REUSS, M., HUSSEIN, H. M. S. **Mathematical modeling and experimental verification of wood drying process.** Energy Conversion and Management. Vol. 45, pp. 197–207, 2004.
- BUZZI, Z. J. **Entomologia didática.** 2 ed. Curitiba: Ed. UFPR, 1993.
- CLARKE, K. U.. **Studies on the relationships between air temperature and the internal body temperature of *Locusta migratoria*** Journal of Insect Physiology. Volume 5, Issue 1, pp. 23-36, 1960.
- DI BLASI, C. **Multi-phase moisture transfer in the high temperature drying of wood particles.** Chemical engineering Science. Vol 53, No 2, pp. 353-366, 1998.
- DI BLASI, C.; BRANCA, C.; SPARANO, S.; LA MANTIA, B. **Drying characteristics of wood cylinders for conditions pertinent to fixed-bed countercurrent gasification.** Biomass & Energy, Vol. 25, N° I, pp. 45-58, 2003.
- DIETL, C.; WINTER, E. R. F.; VISKANTA, R. **An efficient simulation of the heat and mass transfer processes during drying of capillary porous, hygroscopic materials.** Int. J. Heat end Mass Transfer, Vol. 41, pp. 3611-3625, 1998.
- FOTSING, J. A. M., TAKAN, M. **A prediction of the thermal conductivity of sapelli.** Academic Open Internet Journal. Vol. 11, 2004.
- FYHR, C.; RASMUNSON, A. **Some aspects of the modeling of wood chips drying in superheated steam.** Int. J. Heat end Mass Transfer, Vol. 40, No 12, pp. 2825-2842, 1997.

- GU, H. **Structure Based, Two-dimensional Anisotropic, Transient Heat Conduction Model for Wood**. PhD. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- JOHANSSON, A.; FYHR, C.; RASMUNSON, A. **High convective drying of wood chips with air and superheated steam**. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 40, No 12, pp. 2843-2858, 1997.
- KEINE, S. **Avaliação do processo de secagem de Madeira em estufa com banho de vapor**. 215f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- KLOK, C. J., CHOWN, S. L.. **Critical thermal limits, temperature tolerance and water balance of a sub-Antarctic kelp fly, *Paractora dreuxi* (Diptera: Helcomyzidae)**. Journal of Insect Physiology. Vol 47, pp. 95–109, 2001.
- KLOK, C. K., CHOWN, S. L.. **Critical thermal limits, temperature tolerance and water balance of a Sub-Antartic caterpillar, *Pringleophaga marioni* (Lepidoptera: Tineidae)**. Journal of Insect Physiology. Vol. 43, N° 7, pp. 685 – 694, 1997.
- KOLLMANN, F. F. P. e CÔTÉ, W. A. Jr. **Principles of wood science and technology**. Vol. 1, New York, Springer-Verlag, 1968.
- KRABBENHOFT, K. e DAMKILDE, L., Double porosity models for the description of water infiltration in wood. Wood Science and Technology - Journal of the International Academy of Wood Science, Vol. 38, N° 8, pp 641-659, 2004.
- LEWIS, R. W., SCHREFLER, B.A. **The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media**. 2nd ed. Wiley, New York, 2000.
- MACLEAN, J. D. **Thermal conductivity of wood. Heating, piping and air conditioning**. 13: 380, 1941.

- NIJDAM, J. J.; LANGRISH, T. A. G.; KEEY, R. B. **A high temperature drying model for softwood timber**. Chemical Engineering Science, Vol. 55, pp. 3585-3598, 2000.
- NIMF 15, Directrices para reglamentar el embalaje de madera utilizado en el comercio internacional. FAO, Roma, 2002.
- PANG, S. **Investigation of effects of wood variability and rheological properties on lumber drying: application of mathematical models**. Chemical Engineering Journal, 86, pp. 103–110, 2002.
- PATANKAR S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Hemisphere Publishing Corporation McGraw Hill 1980.
- PEL, L.; LANDMAN, K. A.; KAASSCHIETER, E. F. **Analytic solution for the non-linear drying problem**. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3173-3180, 2002.
- PERRÉ, P.; TURNER, I. W.; PASSARD, J. **2-D Solution for drying with internal vaporization of anisotropic media**. AIChE Journal, Vol. 45, No 1, pp. 13-26, 1999.
- SALIN, C., VERNON, P., VANNIER, G.. **Effects of temperature and humidity on transpiration in adults of the lesser mealworm, *Alphitobius diaperinus* (Coleoptera: Tenebrionidae)**. Journal of Insect Physiology. Vol. 45, pp. 907–914, 1999.
- SIMPSON, W. T. **Drying and control of moisture content and dimensional**. Washington, DC:U.S. Department of Agriculture, 1999.
- STEINHAGEN, H. P. **Thermal conductive properties of wood, green or dry, from -40° to +100°C: A literature review**. Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Madison, WIS, 1977.

TANAKA, T. **Wood inspection of thermography**. 12th International Symposium on nondestructive testing of wood. Vol. 6, N° 3, 2001.

TURNER, I. W.; FERGUSON, W. J. **An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: Application to softwood drying, Part I: The isotropic model**. Appl. Math. Modelling, Vol. 19, pp. 654-667, 1995.

TURNER, I. W.; FERGUSON, W. J. **An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: Application to softwood drying, Part II: The anisotropic model**. Appl. Math. Modelling, Vol. 19, pp. 668-674, 1995.

WHITAKER, S. **Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying**. Adv Heat Transfer 13:119–203, 1977.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)