

## MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE MADEIRA EM ESTUFAS - FASE DE AQUECIMENTO

### Laudelino Pontes Fernandes

Universidade Regional do Noroeste do Rio grande do Sul.  
Instituto de Ciência, Tecnologia e Saúde, Santa Rosa, RS.  
CEP – 98.900-000, [laudef@brturbo.com.br](mailto:laudef@brturbo.com.br)

### Valdeci José Costa

Universidade do Planalto Catarinense.  
Departamento de Ciências exatas e Tecnológicas. Av. Castelo Branco, 170.  
CEP – 88509-900, [valdeci@uniplac.net](mailto:valdeci@uniplac.net)

### Gilberto Carlos Thomas

Universidade Regional do Noroeste do Rio grande do Sul.  
Instituto de Ciência, Tecnologia e Saúde, Santa Rosa, RS.  
CEP – 98.900-000, [gcthomas@uol.com.br](mailto:gcthomas@uol.com.br)

**Resumo.** Foi efetuado um estudo numérico experimental com o objetivo de simular a fase de aquecimento de uma tábua de madeira exposta a diferentes temperaturas ambientais, estando ela seca ou verde. Experimentalmente foram efetuados testes a temperatura de 80, 90 e 100 °C em uma estufa com capacidade para 0,25 m<sup>3</sup>. O aquecimento é elétrico e a circulação de ar ocorre apenas por convecção natural. Por intermédio de termopares foi monitorada a temperatura em um ponto central da tábua. Para a tábua seca, em 35 minutos o ponto central atingiu a temperatura de 56 °C, enquanto que para a tábua verde este tempo subiu para mais de 5 horas. Numericamente foi resolvido o problema térmico e fluidodinâmico usando o software comercial CFX. Foi utilizada uma geometria hipotética que em seu design se aproxima significativamente de uma estufa real. Os principais fenômenos envolvidos no processo de transferência de calor e massa foram considerados. 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. Mesmo utilizando este swirl, os resultados numéricos apresentam boa concordância com os resultados experimentais apenas nos primeiros 70 minutos. Este fato ocorre devido a variação das propriedades físicas, principalmente a difusividade térmica.

*Palavras chave:* Secagem de madeira, medida fitossanitária, simulação numérica, validação experimental.

### 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 dela 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 (Keine, 1997). Neste cenário sua 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. 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, são efetuados 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. 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.

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.

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 e 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. Seus resultados mostram que a secagem via ar quente apresenta uma significativa vantagem sobre a secagem via vapor superaquecido. Este trabalho não faz nenhuma referência à aplicação da metodologia apresentada ao caso da secagem de tábuas de madeira.

Já Turner e Ferguson (I) (1995) desenvolveram um modelo matemático aplicável à secagem de tábuas de madeira. Na sua primeira parte, 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 os modelos com dois nós e quatro nós, e foi estabelecida uma comparação entre os dois casos, com relatos sobre vantagens e desvantagens de um sobre o outro. O modelo matemático utiliza equações diferenciais parciais de 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, pois a física do problema, é um processo de difícil compreensão, contudo necessárias ao intuito de elucidar os fenômenos de transporte que ocorrem durante a secagem.

O principal objetivo de Turner e Ferguson (I) (1995) foi estender a técnica SM-CV a malhas não estruturadas, com elementos ou volumes de controle da malha 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, a conservação dos fluxos é mais precisa. O principal benefício do uso de volumes de controle é que o método numérico é conservativo, não somente no domínio de cálculo, mas em cada volume de controle do domínio computacional. Isto facilita, após a convergência, a conservação no balanço de massa e energia.

De acordo com Turner e Ferguson (I) (1995), 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.

Turner e Ferguson (II) (1995) fazem uma complementação do estudo iniciado com método quatro nós em um meio anisotrópico, aplicando o referido método para um meio anisotrópico, especificamente a 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 transversal 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 causa de 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 do stress interno, requisitos necessários para 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, aplicando-a na secagem de madeira. 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, gera um elevado esforço computacional na geração dos coeficientes das matrizes do sistema. A orientação dos elementos dentro da malha pode ter impacto na convergência da solução. Pois os elementos das faces dos eixos paralelo e longitudinal oferecem melhores propriedades de solução.

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. Contudo, 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 equação para migração líquida. Outras hipóteses simplificadoras são adotadas de modo a facilitar ainda mais a solução do problema.

Segundo Perré et al. (1999), a condução de calor e transferência de massa ocorre durante a secagem com vaporização interna, o qual envolvem mecanismos físicos complexos, juntamente com sistemas de equações não lineares resolvidos por método numérico computacional, cujos modelos existem na literatura. 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 é de dados obtidos de forma empírica.

Portanto não existem reais evidências de uso compreensivo de modelos experimentais adequados a uma formulação geral expressa para a escala completa do processo de secagem.

Awadalla et al. (2004) desenvolveram um modelo matemático para otimização da secagem de madeira à base de energia solar. É efetuada análise numérica e experimental. No desenvolvimento do modelo são empregadas algumas hipóteses. As estantes no interior da câmara de secagem de madeira são divididas em (m) colunas, em direção ao fluxo de ar. Para cada coluna, cada tabua é dividida em (n) 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 tabua. A mudança de temperatura do ar seco entre as tabuas 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 tabuas é o mesmo. A densidade do ar usado na secagem 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 nas laterais pode ser negligenciada.

Com estas hipóteses, Awadalla et al. (2004) desenvolveram vários experimentos, mostrando a viabilidade do modelo, contudo, o tempo necessário obtido, para que o processo de secagem ocorra, é demasiado longo: em torno de 15 dias.

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. O fenômeno do transporte de umidade inclui convecção e difusão de vapor d'água, convecção de água por capilaridade nos poros da partícula e difusão da água retida no interior da madeira sólida. Outras considerações de natureza física ainda são efetuadas. O sistema de equações obtido é resolvido por um método semi-implícito.

O estudo realizado por Di Blasi (1998) é efetuado com o objetivo de avaliar as aplicações da conversão de biomassa no campo termoquímico. Segundo ele, a dinâmica de evaporação e transporte da umidade na matriz sólida da madeira ainda não está bem esclarecida, mesmo do ponto de vista qualitativo.

Todas as equações e condições de contorno que compõem o modelo são descritas como constituindo um problema bem-posto. A discretização das mesmas é efetuada por um método semi-implícito de diferenças finitas. Outros detalhes de natureza numérica também são descritos. Um estudo paramétrico é realizado e seus resultados são avaliados qualitativamente para altas temperaturas, em torno de 600 K. Uma validação é realizada a partir de dados experimentais de outro autor e segundo ele, a concordância é boa.

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 stress aplicado 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.

Como pode ser observado, além de escassos, os trabalhos ligados a simulação do processo de secagem da madeira, apresentam limitações ligadas tanto a física do problema quanto a especificidades da própria pesquisa realizada, e também das dificuldades de natureza computacional. Por isto estabelecer modelos matemáticos mais realísticos e confiáveis, e que estejam suportados pela experimentação, é de grande interesse para a comunidade científica e para a indústria que ainda não possui grandes ferramentas computacionais que possibilitem simular virtualmente a secagem da madeira.

Com relação à experimentação, certo fato tem preocupado estes autores: a publicação de uma resolução da FAO (Food and Agricultural Organization) estabelecendo a temperatura de secagem suficiente para eliminar organismos vivos no interior de uma peça de madeira (ISPMS nº 15, 2002). Ocorre que no Brasil, não existe ou não é do conhecimento destes pesquisadores, literatura que justifique ou disserte acerca deste fato. Contudo, esta resolução foi simplesmente endossada pelo Ministério da Agricultura, o qual editou norma (IN04/2004), não só confirmando como também determinando que a temperatura no ponto central de qualquer peça de madeira deve ser de no mínimo 56 °C durante pelo menos 30 minutos. Esta necessária medida fitossanitária deve eliminar vários insetos presentes na madeira, também listados pela referida norma, e certo tipo de nematóide. Porém, não existe certeza de que para madeiras produzidas e industrializadas no Brasil, tal medida realmente venha a atingir o objetivo proposto. Diante do exposto, tornou-se objetivo deste grupo, investigar, paralelamente a outras metas, se este procedimento é eficaz para as espécies *Pinus sp.*, ao mesmo tempo em que se estabelecem testes experimentais de comportamento térmico das peças com o objetivo de validar o código numérico.

## 2. Procedimento experimental

Foram realizados vários testes experimentais de secagem de madeira em 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. Foram realizados 4 ensaios com tabuas secas e três com tabuas úmidas; todas com dimensões de 2,5 cm X 15 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 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.

Em cada uma das peças foi feita uma perfuração central onde foi acoplado um termopar. Através de equipamento fabricado pela MARRARI foi monitorada a temperatura no centro de cada peça. Este equipamento foi fabricado com o objetivo de monitorar a temperatura no centro das peças 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.

Outros dados também foram obtidos de uma estufa experimental fabricada pela CONTRACO. Seu aquecimento é efetuado pela queima de gás GLP e tem capacidade para 2 m<sup>3</sup>. 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 estufa.

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.

## 2. Formulação numérica

O modelo matemático foi estabelecido em função das equações já disponíveis no software comercial CFX, o qual foi utilizado em todas as simulações. Algumas expressões foram estabelecidas via aproximação polinomial a partir dos dados experimentais obtidos nas estufas do CCET (Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas).

Para o fluido foram resolvidas equações de conservação da massa, momento e energia; 3D, transiente e turbulento. 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 no tempo 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.

## 3. Resultados e discussões

Inicialmente vamos fazer uma análise dos resultados experimentais. As Figs. 1 a 3 mostram os valores obtidos para a temperatura de madeira seca e madeira verde.

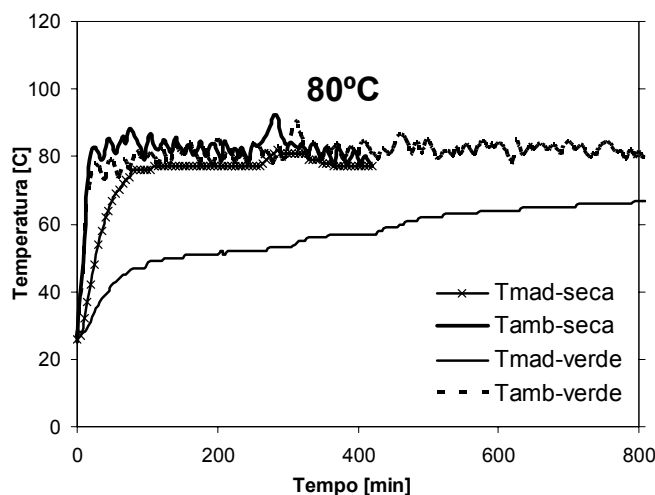


Figura 1: Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 80 °C, para madeira seca e para madeira verde.

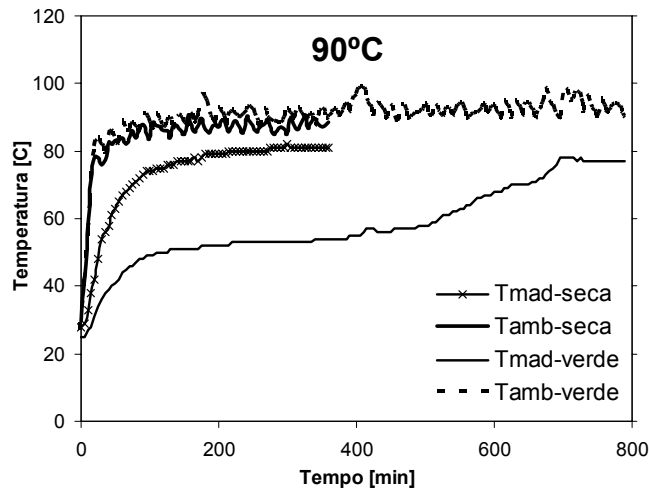


Figura 2: Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 90 °C, para madeira seca e para madeira verde.

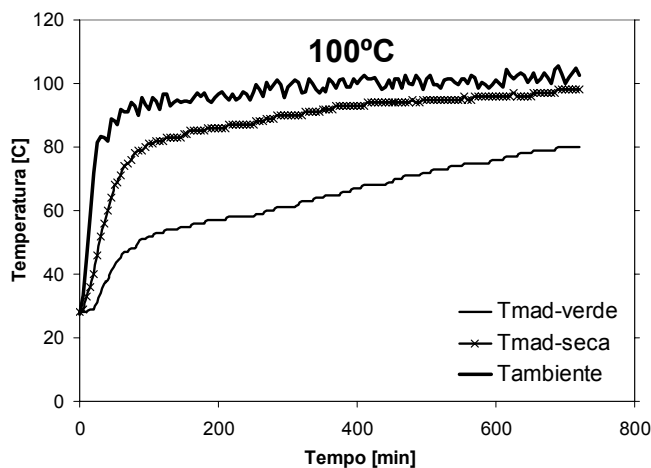


Figura 3: Comportamento da temperatura da madeira em um ponto localizado exatamente no centro da mesma, para uma temperatura ambiente de 100 °C, para madeira seca e para madeira verde.

A Fig. 1 mostra o comportamento da temperatura em um ponto central das peças para madeira verde e seca quando submetidas a uma temperatura de 80 °C. Como se pode observar, a temperatura no interior da madeira seca atinge a temperatura de 56 °C em aproximadamente 35 minutos, e temperatura igual a ambiente em 4,5 horas. Já a madeira verde leva 5,5 horas para atingir 56 °C em seu ponto central e somente depois de 25 horas é que se aproxima da temperatura ambiente.

A Fig. 2 mostra o comportamento da temperatura em um ponto central das peças para madeira verde e seca quando submetidas a uma temperatura de 90 °C. Como se pode observar, a temperatura no interior da madeira seca atinge a temperatura de 56 °C também em aproximadamente 35 minutos, e temperatura próxima a ambiente em 4 horas. Já a madeira verde leva 5,5 horas para atingir 56 °C em seu ponto central levando mais de 20 horas para se aproximar da temperatura ambiente.

A Fig. 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.

Com relação aos resultados obtidos, inicialmente pensou-se que a madeira verde deveria apresentar taxas mais rápidas de aquecimento. Uma intensa revisão bibliográfica foi realizada para elucidar esta situação, onde se constatou que 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; e que se explica o resultado obtido nos testes. Com o incremento da umidade existe uma significativa redução no valor da difusividade térmica. 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.

O estudo numérico foi realizado para várias configurações de estufas e diferentes condições iniciais. Os resultados mais significativos serão expostos aqui. A Figura 4(a) ilustra uma estufa em miniatura proporcional a uma estufa real, na qual vários testes foram realizados. A Figura 4(b) mostra as linhas de corrente obtidas para uma velocidade de 30 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. Melhoria 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 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 min e o problema de transferência de calor também foi resolvido.

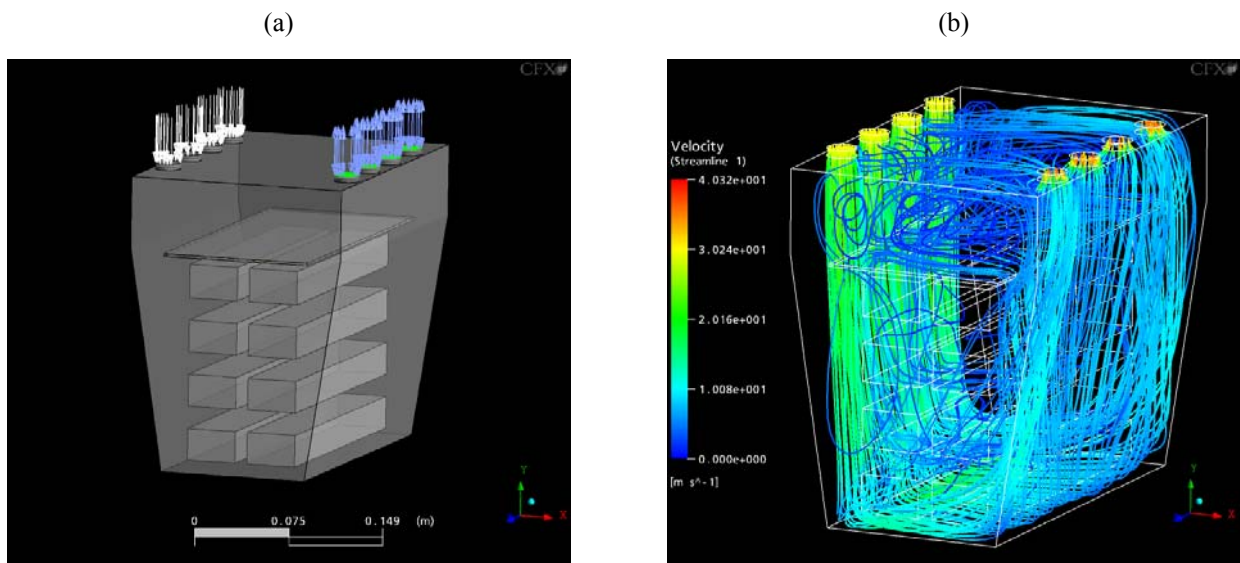


Figura 4: (a) Estufa em miniatura com oito tábuas em seu interior. Os dutos de entrada estão indicados com as setas brancas e os dutos de saída com as setas azuis. (b) Linhas de corrente para uma velocidade de 30 m/s na entrada da estufa com temperatura do ar igual a 80 °C.

Mediante inspeção da Fig. 4(a) 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.

As Figuras 5 e 6 mostram a temperatura no interior das tábuas e do escoamento em uma seção transversal, para 0,1 s; 0,2 s; 0,4 s; 1 s; 5 s; 10 s; 10 min e 10 s; 20 min e 10 s e 30 min e 10 s. 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 Figuras 5(a) e 5(b) os níveis de flutuação podem ser facilmente visualizados. Analisando mais detalhadamente a Fig. 6(a) observa-se que o gradiente de temperatura entre as tábuas superiores e inferiores ultrapassa 25 °C. Neste caso a velocidade do escoamento e a geometria da estufa estão influenciando diretamente nos resultados obtidos.

Com o intuito de validar o modelo e simular o uso de ventiladores no interior da estufa foi implementado um “swirl” em cada entrada da mesma. Assim foi constituída a geometria mostrada na Fig. 7(a). Vários testes foram efetuados para madeira seca e madeira verde. As constantes físicas e algumas condições iniciais consideradas importantes são mostradas nas Tabelas 1 e 2. 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.

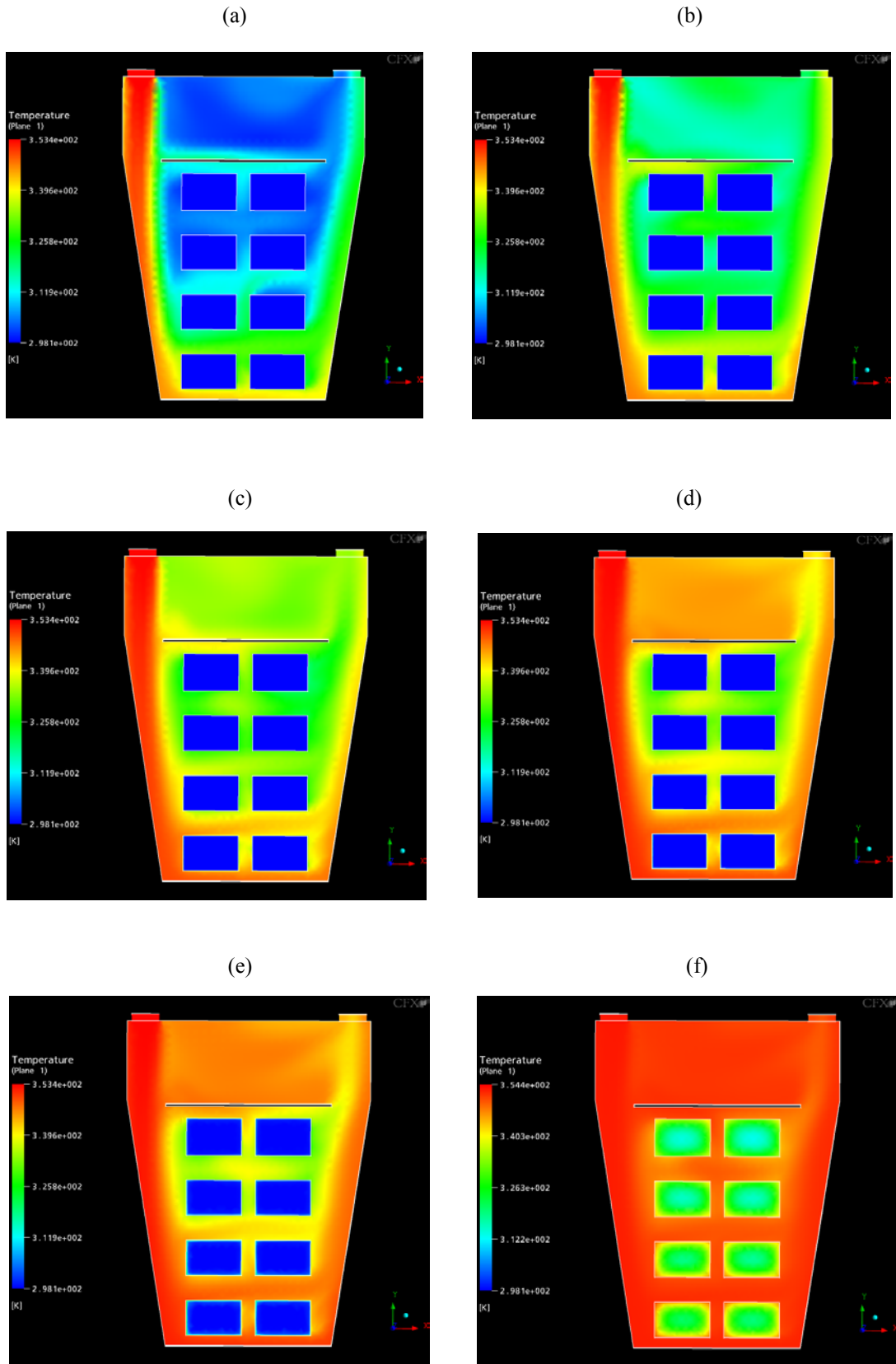


Figura 5: Distribuição de temperatura global num plano transversal à pilha de madeira: (a) 0,1 s. (b) 0,2 s. (c) 0,4 s. (d) 1 s. (e) 5 s. (f) 10min e 10 s.

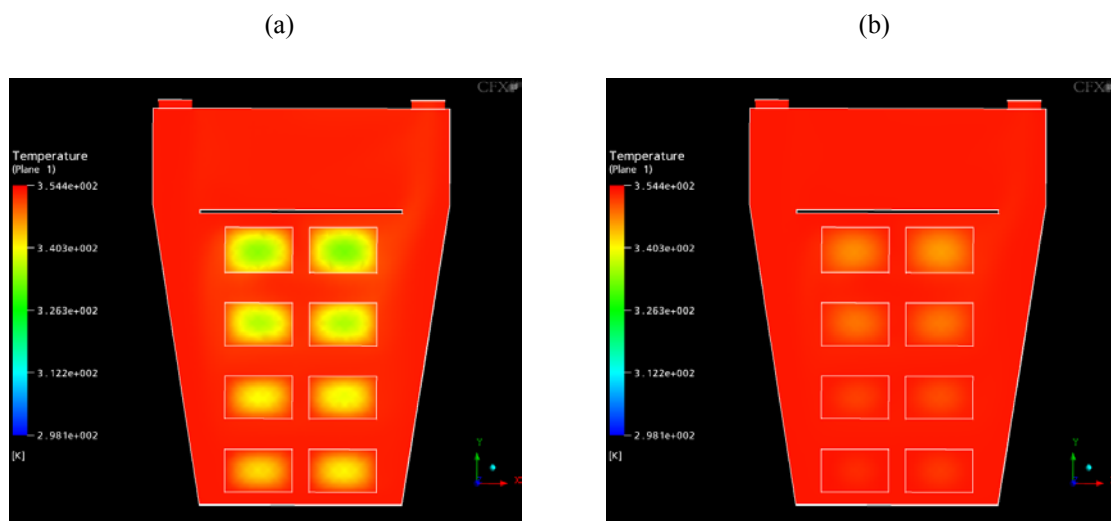


Figura 6: Distribuição de temperatura num plano transversal à pilha de madeira: (a) 20 min e 10 s. (b) 30min e 10 s.

Tabela 1: Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações de madeira verde.

Propriedade	Valor
Velocidade na entrada	1 m/s
Velocidade no swirl	4 m/s
Massa específica	1.143 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	1.976,17 J/kg K
Condutividade térmica	0,12 W/mK
Massa molar	1 kg/kmol
Dimensões das peças	15 x 40 x 2,54 cm

Tabela 2: Características físicas da madeira tipo Building Board Softwood utilizada nas simulações de madeira seca.

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



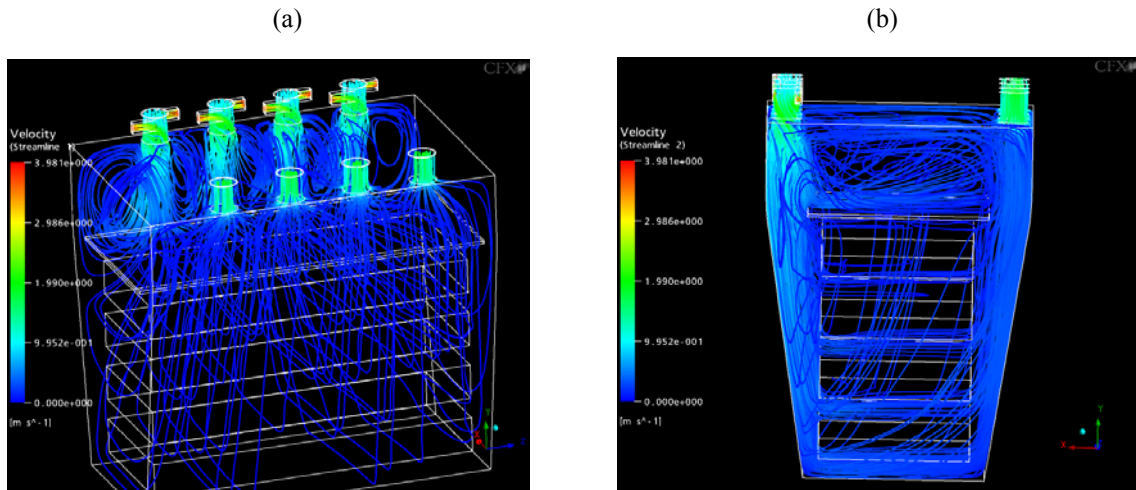


Figura 7: (a) Isolinhas de velocidade obtidas com “swirl” na entrada e temperatura do ar igual a 90 °C, depois de 0,2 s de iniciado o processo de entrada de ar quente dentro da estufa. (b) Isolinhas de velocidade depois de 6 horas de instalação do fluxo de ar a 90°C.

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. 7(a). É fácil observar que são formados grandes vórtices logo na entrada da estufa. Existe até uma pequena redução nos índices gerais de velocidade, se comparadas a outros resultados anteriores. Por outro lado, mediante inspeção da Fig. 7(b), pode-se inferir que a presença do “swirl” melhora a distribuição do fluxo de ar à medida que o escoamento evolui. A distribuição da energia ocorre de maneira bastante uniforme. Por observação da Fig. 9 (a)-(f), a qual mostra a evolução do campo de temperaturas local, num plano central da estufa, no período de 15 min a 6 h depois de iniciado o aquecimento, pode-se verificar como está acontecendo a transferência de calor entre o ar quente e as peças de madeira. Os resultados encontrados contrariam a hipótese de Awadalla *et al.* (2004) em que o mesmo afirma que a transferência de calor pelas laterais da madeira pode ser desprezada. Pode-se verificar ao longo da Fig. 9 que o aquecimento evolui justamente a partir da lateral da peça. Nisto reside a importância de uma solução 3D para este tipo de problema.

Os resultados numéricos obtidos para a madeira verde não concordam com os dados experimentais (Fig. 8). 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 tábua da estufa mostrada na Fig. 7, tende aos valores da madeira seca. Isto implica em que os valores estabelecidos para a difusividade térmica não estão variando de maneira a simular o caso da madeira verde.

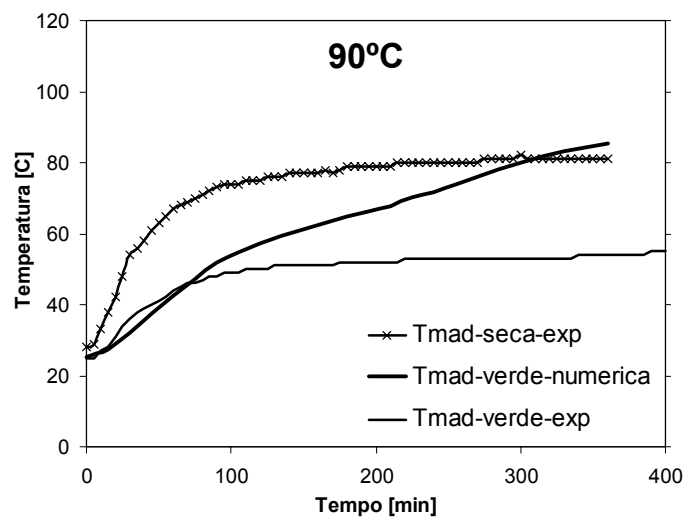


Figura 8: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para madeira verde e seca com os valores numéricos obtidos para a madeira verde

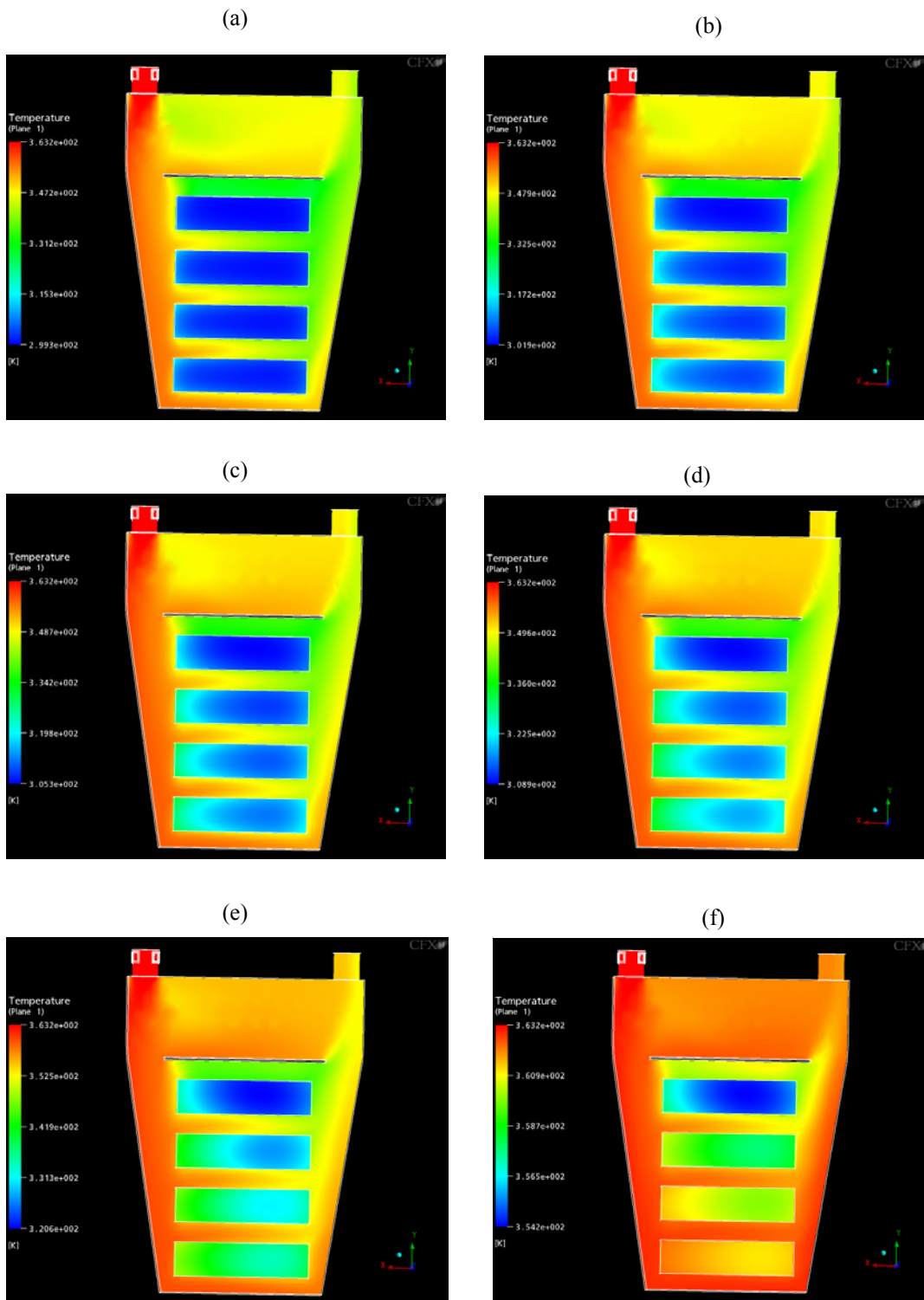


Figura 9: Distribuição local de temperatura com o tempo para: (a) 15 min (b) 30 min (c) 45 min (d) 1 hora (e) 2 horas (f) 6 horas.

Estudos mais detalhados são necessários em função de tornar a umidade variável no interior da madeira. Todos os resultados mostrados nas Figs. 7 a 9, foram estabelecidos para um valor médio da umidade igual a 28%; valor este já determinado por Kollmann e Côté (1968). Tornar os valores da condutibilidade térmica, densidade e calor específico variáveis no CFX não é difícil, o problema é tornar a madeira um material poroso e que aceite estas características físicas. Esta tem sido uma grande barreira à evolução de um projeto maior, que é simular na íntegra o processo de secagem da madeira. Esforços têm sido feitos no sentido de romper estas dificuldades e espera-se que logo tenhamos um modelo mais real e eficaz.

#### 4. Considerações finais

Como conclusões deste trabalho pode-se destacar:

- a) Foi efetuada intensa revisão bibliográfica acerca das propriedades físicas: condutibilidade térmica, massa específica, calor específico e difusividade térmica da madeira;
- b) Foram efetuados testes experimentais com o objetivo de estabelecer o comportamento da temperatura no centro de uma peça de madeira da espécie *pinus taeda* fixando-se temperaturas ambientes iguais a 80, 90 e 100 °C. Os testes foram realizados para madeira seca e para madeira verde.
- c) Os testes indicaram que para madeira seca são necessários 35 minutos para que o ponto central alcance 56°C (normatização fitossanitária), não importando significativamente a temperatura externa.
- d) Para madeira úmida são necessárias em torno de 5,5 horas para que o ponto central atinja a temperatura de 56 °C. A difusividade térmica é drasticamente reduzida enquanto a condutividade térmica é ligeiramente incrementada com a umidade. Este fato vem de encontro aos resultados experimentais encontrados por Gu (2001), Fotsing e Takan (2004) e Tanaka (2001), obtidos para outras espécies de madeira.
- e) Foram obtidos importantes resultados numéricos no sentido de simular o processo de aquecimento de tábuas de madeira em estufas. Foram impostas altas velocidades na entrada da estufa (30 m/s) e através de uma técnica especializada foi obtida a convergência.
- f) 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 pela equipe na literatura pesquisada.
- g) Os resultados numéricos obtidos para tábua úmida não apresentam boa concordância com os resultados experimentais, mesmo utilizando um “swirl” na entrada. O problema está na variação das propriedades físicas, principalmente a difusividade térmica.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da UNIPLAC e da FUNCITEC, sem o qual não teria sido possível a realização desta pesquisa.

#### 6. Referências bibliográficas

- Awadalla, H. S. F., El-dib, A. F., Mohamad, M. A., Reuss, M., Hussein, H. M. S., 2004, “Mathematical Modelling and Experimental Verification of Wood Drying Process”, *Energy Conversion and Management*. Vol. 45, pp. 197–207.
- Di Blasi, C., 1998, “Multi-phase moisture transfer in the high temperature drying of wood particles”, *Chemical Engineering Science*. Vol 53, No 2, pp. 353-366.
- Fotsing, J. A. M., Takan, M., 2004, “A Prediction of the Thermal Conductivity of Sapelli”, *Academic Open Internet Journal*. Vol. 11.
- Gu, H., 2001, “Structure Based, Two-dimensional Anisotropic, Transient Heat Conduction Model for Wood”, PhD. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Johansson, A.; Fyhr, C.; Rasmunson, A., 1997, “High Convective Drying of Wood Chips With Air and Superheated Steam”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No 12, pp. 2843-2858.
- Keine, S., 1997, “Avaliação do Processo de Secagem de Madeira em Estufa com Banho de Vapor”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 215p.
- Kollmann, F. F. P. e Côté, W. A. Jr., 1968, “Principles of Wood Science and Technology”, Vol. 1, New York, Springer-Verlag.
- NIMF 15, 2002, “Directrices para Reglamentar el Embalaje de Madera Utilizado en el Comercio Internacional”, FAO, Roma.
- Pang, S., 2002, “Investigation of Effects of Wood Variability and Rheological Properties on Lumber Drying: Application of Mathematical Models”. *Chemical Engineering Journal*, 86, pp. 103–110.
- Perré, P.; Turner, I. W.; Passard, J., 1999, “2-D Solution for Drying with Internal Vaporization of Anisotropic Media”. *AIChE Journal*, Vol. 45, No 1, pp. 13-26.

- Tanaka, T., 2001, "Wood Inspection of Thermography", 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Vol. 6, N° 3.
- Turner, I. W.; Ferguson, W. J., 1995, "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.
- Turner, I. W.; Ferguson, W. J., 1995, "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.

## **MATHEMATICAL MODELING OF WOOD DRYING IN KILNS – HEATING PHASE**

Laudelino Pontes Fernandes

Regional University of the Norwest of the State of the Rio Grande do Sul  
Institute of Science, Technology and Health, Santa Rosa, RS, 98900-000, Brazil.  
laudef@brturbo.com.br

Valdeci José Costa

University of the Planalto Catarinense.  
Department of the Science and Technology, Av. Castelo Branco, 170, Lages, SC, 88509-900, Brazil.  
valdeci@uniplac.net

Gilberto Carlos Thomas

Regional University of the Norwest of the State of the Rio Grande do Sul  
Institute of Science, Technology and Health, Santa Rosa, RS, 98900-000, Brazil.  
gcthomas@uol.com.br

### **Abstract**

Wood drying is the most important industrial processes in the wood engineered products. The numerical and experimental study was developed with the objective to simulate the heating phases of wooden boards in a kiln. The different kiln temperatures were established for dry or green pieces. Temperatures around of 80, 90 and 100 °C were used in a kiln with capacity for 0.25 m<sup>3</sup>. The heating is electric and the air circulation occurs by only natural convection. By means of thermocouples, the temperature in a central point of the board was monitored. For dry board, in 35 minutes the central point reach the temperature of 56 °C, while that for the green board this time went up more than 5 hours. Numerically, the thermal and fluid flow problem was solved using the commercial software CFX. The main coupled phenomena in the process of heat and mass transfer were considered. A hypothetical geometry was used whose design approaches significantly to a real kiln. With the objective to simulate the occurrence of fans inside the kiln, swirl in the hot air inlets was generated. The numerical result presents good agreement with the experimental results only in first 70 minutes. This occurs due changes in physical properties, such as the thermal diffusivity.

Keywords: Wood drying, phytosanitary measure, numerical simulation, validation.