

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL
CAMPUS CURITIBANOS

LEONARDO JONATHAN GUISOLPHI GOMES DE OLIVEIRA

**SECAGEM CONVENCIONAL DE MADEIRA SERRADA DE *Pinus taeda* L.
BUSCANDO ATENDER A INDÚSTRIA MOVELEIRA DO SUL DO BRASIL.**

CURITIBANOS

2014

LEONARDO JONATHAN GUI SOLPHI GOMES DE OLIVEIRA

**SECAGEM CONVENCIONAL DE MADEIRA SERRADA DE *Pinus taeda* L.
BUSCANDO ATENDER A INDÚSTRIA MOVELEIRA DO SUL DO BRASIL.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Florestal. Orientador: Prof. Dr. Ugo Leandro Belini.

CURITIBANOS

2014

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Florestal
Rodovia Ulysses Gaboardi km3
CP: 101 CEP: 89520-000 - Curitibanos - SC
TELEFONE (048) 3721-4170 - E-mail: alexandre.siminski@ufsc.br

LEORNARDO JONATHAN GUI SOLPHI GOMES DE OLIVEIRA

SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE PINUS TAEDA L. BUSCANDO ATENDER A INDÚSTRIA MOVELEIRA DO SUL DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Colegiado do Curso de ENGENHARIA FLORESTAL, do Campus Curitibanos da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Ugo Leandro Belini

Data da defesa: 24 de novembro de 2014.

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:



Presidente e Orientador: Dr. Ugo Leandro Belini
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Curitibanos



Membro Titular: Thiago Focht Barbosa
Berneck S.A. Painéis e Serrados
Curitibanos

Local: Universidade Federal de Santa Catarina
Campus de Curitibanos
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Florestal

AGRADECIMENTOS

Para que a concretização deste estudo se efetivasse: agradeço às inúmeras pessoas que foram incentivadoras neste processo e seus ensinamentos serão a partir de agora essenciais em minha caminhada pessoal e profissional.

A Deus, que através da força do teu espírito, me fez superar as dificuldades encontradas no caminho.

À UFSC pela oportunidade de graduação com ensino de qualidade.

Ao meu professor orientador, Ugo Leandro Belini, contribuindo com todo o conhecimento repassado, atenção e dedicação ao me orientar.

À BERNECK S.A. Painéis e Serrados – unidade Curitiba, SC pela oportunidade de estágio em um setor importantíssimo à Engenharia Florestal.

Ao senhor Luis Trajano Munhoz e a todos os colaboradores do setor de secagem na empresa Berneck que me auxiliaram e deram suporte para a realização desse trabalho.

Ao Thiago Focht Barbosa, pela tradução do resumo e por ter sido um excelente supervisor durante o estágio e um facilitador para que o trabalho fosse realizado.

A todos os professores que de alguma forma contribuíram na graduação. Em especial aos professores, Nei e Magnos Vivian pelo apoio e incentivo e pelos conhecimentos repassados.

Aos professores. Dr. Reginaldo Geremias e Dr. Joni Stolberg, que com paciência me auxiliaram nas pesquisas, valorizando os pontos fortes e sendo rígidos quando preciso.

Aos meus avós, Santana e João (in memoriam), pela criação incentivo e exemplo de pessoa.

À minha esposa Priscila e meu filho João pela paciência e companheirismo oferecidos nos dois últimos anos da minha graduação. Com seu amor, tudo ficou mais fácil.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

(Henry Ford)

RESUMO

A secagem da madeira serrada é considerada a fase que mais agrega valor ao produto. Nesta temática, madeira obtida a partir do beneficiamento de *Pinus spp.* pode apresentar um defeito na secagem que é a mancha química, ou mancha marrom, que desqualifica a madeira para aceitação pela indústria moveleira. O presente trabalho objetivou avaliar programas de secagem com diferentes temperaturas descritas pela literatura, para que se chegasse à viabilidade ótima, considerando a qualidade e o tempo de secagem. Para tanto, foram preparadas cargas de madeira serrada com 27 mm de espessura, somando um total de 200 m³ para cada carga e ao final da secagem foram amostrados três fardos aleatórios, atentando apenas para a largura das peças que eram, uma com 79 mm, outra com 104 mm e a terceira com 154 mm, sendo que todas possuíam 3990 mm de comprimento. A secagem foi feita em estufa convencional com temperaturas entre 60 e 100°C, sendo que foram avaliados três programas, o programa “A” com temperatura máxima de 86°C, o programa “B” com temperatura máxima de 76°C chegando a 96°C na fase de condicionamento e o programa “C” com temperatura máxima de 100°C durante a secagem. Foram amostradas 50 peças de cada fardo separado, e através de análise visual verificou-se (i) o somatório do comprimento das trincas superficiais, (ii) o somatório do comprimento das trincas de topo, (iii) o nível de mancha marrom mais intenso presente na peça e (iv) se apresentavam algum tipo de empenamento. Com os dados da amostragem foi calculado o índice linear de trinca, o percentual de mancha em nível de intensidade 1, 2 e 3 na superfície e o percentual de tortuosidade. Os resultados indicam que o programa “C” não atendeu os critérios de qualidade esperados pela indústria moveleira, pois apresentou um elevado percentual de peças com mancha nível 3; já os programas “A” e “B” foram satisfatórios e similares, porém o programa “A” se mostrou mais viável em relação ao “B”, quando levado em consideração o tempo de secagem e o índice linear de trinca. Pode-se concluir que programas para secagem convencional de *Pinus taeda* L. no planalto catarinense, buscando madeira com qualidade para aplicação na indústria moveleira, devem operar com temperaturas iniciais abaixo de 80°C, e apenas nas fases finais, onde a umidade está próxima ao PSF, devem exceder os 80°C.

Palavra-chave: secagem convencional, *Pinus taeda* L., mancha marrom, qualidade para móveis.

ABSTRAT

Drying lumber is considered the process that most adds value to the saw mill product. In this theme, wood obtained from the *Pinus* spp. Processing may have a defect in drying that is chemical stain, or brown stain, which disqualify for acceptance by the wood furniture industry. In this context, the present study aimed to evaluate programs with different drying temperatures described in the literature, to reaching the optimal feasibility, considering the quality and drying time. To do so, loads of lumber with 27 mm of thickness were prepared, for a total of 200 m³ for each load and the end of drying were sampled three random samples with width of 79 mm, 104 mm and 154, all of them had 3990 mm in length. Drying was carried out in drying kilns reaching temperatures between 60 and 100 °C, and were evaluated three programs, the "A" with a maximum temperature of 86 °C, program "B" with a maximum temperature between 76 and 96 °C in the conditioning phase and "C" program with a maximum temperature of 100 °C for drying. 50 parts of each package were sampled to make a visual analysis. After it was analyzed (i) the length sum of the surface cracks, (ii) the length sum of the top crack, (iii) the level of brown stain and (iv) some sort' of warping. With all data were calculated the linear index nof cracks, the percentage of stain intensity level 1, 2 and 3 on the surface and the percentage of tortuosity. The results indicate that the "C" program did not reach the quality expected by the furniture industry, because it presented a high percentage of pieces with stain level 3; The "A" and "B" programs had satisfactory results, but the program "A" has more feasible in relation to the "B", when is pompsoned both drying times and linear index. It can be concluded that programs for conventional drying of *Pinus taeda* L. in Santa Catarina plateau, looking for quality for the furniture industry, must operate with initial temperatures below 80 °C, and only in the final stages, where the humidity is near the PSF, must not exceed 80 °C.

Keyword: Wood drying, *Pinus taeda* L., brown stain, quality for wood furniture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Dados de produção de móveis, em milhões de unidades produzidas. Fonte: ABRAF, 2013.....	16
Figura 2-	Dados da exportação do faturamento por exportação de móveis. Fonte: ABRAF, 2013.....	17
Figura 3-	Modelo esquemático de uma estufa de secagem convencional.....	19
Figura 4-	Trinca de superfície ocasionada pela secagem.....	22
Figura 5-	Trinca de topo ocorrido por conta da secagem.....	23
Figura 6-	Ilustração da mancha café em três níveis de intensidade(1, 2 e 3), e uma amostra sem mancha (0).	23
Figura 7-	Ilustração da grade de madeira serrada com tabiques bem alinhados	27
Figura 8-	Ilustração dos calços alinhados aos tabiques.....	27
Figura 9-	(A) Vista externa da câmara de secagem, (B) serpentina (tina) para banho inicial e condicionamento da madeira e (C) sensores de temperatura de bulbo seco (TBS) e bulbo úmido (TBU).	28
Figura 10-	Gabarito de níveis de mancha, sendo nível 0 sem ocorrência da mancha café, nível 1, mancha de superfície, nível 2, mancha com profundidade até cerca de 1,5 mm e nível 3 mancha com profundidade maior que 1,5 mm	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Dados de trinca, tortuosidade e mancha.	32
------------------	--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SILAS

EUA	Estados Unidos da América
ILT	Índice linear de trinca
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
mm	Milímetro
PIB	Produto interno bruto
PMVA	Produtos de maior valor agregado
PSF	Ponto de saturação das fibra
SC	Santa Catarina
TBS	Termômetro de Bulbo Seco
TBU	Termômetro de Bulbo Úmido
US\$	Dólar
VTI	Valor de transformação industrial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. PROBLEMÁTICA	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1. HISTÓRICO DA MADEIRA SERRADA.....	15
3.2. ECONOMIA	16
3.3. SECAGEM DE MADEIRA.....	18
3.4. FORMAS DE SECAGEM.....	18
3.5. SECAGEM CONVENCIONAL.....	18
3.6. RELAÇÃO ÁGUA-MADEIRA	20
3.7. OCORRÊNCIA DE DEFEITOS.....	22
3.7.1. Trincas e rachaduras	22
3.7.2. Mancha química	23
3.7.3. Percentual de tortuosidade	24
4. OBJETIVOS	25
1.1. OBJETIVO GERAL	25
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	25
5. METODOLOGIA	26
5.1. ESCOLHA DA MADEIRA	26
5.2. PREPARO DA MADEIRA	26
5.3. CÂMARA DE SECAGEM.....	28
5.4. ESCOLHA DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	29
5.5. AMOSTRAGEM	29
5.6. ANÁLISE DOS NÍVEIS DE MANCHA.....	29
5.7. ANÁLISE DO ÍNDICE LINEAR DE TRINCA (ILT).....	30
5.8. ANÁLISE DO PERCENTUAL DE TORTUOSIDADE.....	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
7. CONCLUSÃO	34
8. RECOMENDAÇÕES	35
9. REFERÊNCIA	36

1. INTRODUÇÃO

Em resposta a automação e desenvolvimento de tecnologias que permitem um aumento da qualidade do desdobro e do beneficiamento, a madeira serrada antes seca ao ar livre passou a ser seca em estufas que inicialmente eram de pequenas e médias empresas que absorviam madeira de alta qualidade para a produção de móveis, porém a produção em grande escala não permite a secagem quase artesanal feita por pequenas empresas (PEREIRA, 1993).

A secagem convencional apresenta vantagens como a rapidez, o menor consumo de energia e a estabilidade da madeira através de estufas que operam com temperaturas que vão de 40 até 90°C. Porém, com a adoção dessa prática, cresceu nos últimos anos a ocorrência da mancha marrom, antes pouco frequente em programas de secagem convencionais (PEREIRA, 1993).

Mesmo com as vantagens, esse método de secagem tem sido limitado em algumas espécies, como *Pinus*, pela ocorrência da mancha marrom. De natureza química, sua formação é atribuída aos extrativos solúveis em água que migram para a superfície, através do fluxo capilar, sendo depositados na medida em que a água se evapora. Ao final da secagem as peças apresentam aspecto normal ou às vezes um nível de mancha de superfície. Porém no caso de madeiras com qualidade para móveis, ao sofrerem o processo de acabamento, no qual as camadas superficiais são removidas ao serem lixadas ou aplainadas, passam a exibir a mancha marrom mais intensa que geralmente localiza-se entre 0,5 e 2,5 mm de profundidade (JANKOWSKY, 1985).

O mercado consumidor tem se tornado cada vez mais exigente, sendo assim é de fundamental importância que o processo seja dirigido da forma mais eficiente possível. Como a secagem convencional de madeira é um processo com custo elevado, gastos desnecessários devem ser evitados, sem que se perca a qualidade do produto (JANKOWSKY, 1993).

A mancha marrom deprecia a madeira implicando em sérios prejuízos, pois para elimina-la é necessário que se retire uma camada espessa com perdas de até 40% do volume de material. A ocorrência da mancha é favorecida por diversos fatores como: (a) intervalos de tempo compreendidos entre o abate da árvore e o desdobro e entre o desdobro e a secagem; (b) condições de secagem (temperatura e ventilação) e (c) extrativos (MILLETT, 1952).

Programas de secagem com temperaturas moderadas contribuíram para a redução da mancha em trabalho desenvolvido por Garbe (2006), porém também é relatado que a secagem

em temperaturas moderadas aumenta o índice de trinca. Então é necessário que se trabalhe com temperaturas brandas inferiores a 60°C e umidade relativa alta, especialmente durante os estágios iniciais, porém essa ação implica na queda da produção e podem influenciar na ocorrência de trincas indesejáveis (TOMASELLI, 1988).

Tratamentos químicos mostraram-se eficientes no controle da mancha marrom em madeira de *Pinus lambertiana* e *Pinus strobus*. Porém em reprodução dos testes por Tomaselli (2000), com *Pinus elliotii* var. *elliottii* os resultados não foram satisfatórios. Sendo assim a única forma disponível e possível para a indústria e o controle da temperatura, com temperaturas baixas até o ponto de saturação das fibra (PSF), cerca de 30% de umidade. A partir desse estágio, até a umidade final desejada, as altas temperaturas podem ser empregadas (PEREIRA, 1992).

Como relatado por Tomaselli (1988), Garbe (2006), é possível reduzir ou até eliminar os níveis de mancha café em *Pinus taeda* L. Há então um respaldo para que seja melhor avaliada essa relação de temperatura e mancha, permitindo desenvolver processos que sejam viáveis e não danifiquem a qualidade da madeira produzida.

2. PROBLEMÁTICA

O estado de Santa Catarina é um dos principais produtores de madeira serrada e o maior produtor e exportador de móveis de madeira do país, notadamente oriundas da madeira de *Pinus spp.* Sendo assim, a produção de madeira seca artificialmente e com alta qualidade é imprescindível para a manutenção destas indústrias moveleiras e de produtos de maior valor agregado (PMVA). Deste modo, faz-se necessária a busca por procedimentos que possam nortear a secagem da madeira permitindo que a qualidade aumente e o mercado possa ser mantido e/ou ampliado.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. HISTÓRICO DA MADEIRA SERRADA

O sul do país, devido a incentivos fiscais e ao desenvolvimento de indústrias madeireiras, é composto por extensas áreas plantadas com espécies do gênero *Pinus*, especialmente *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

Tanto em Santa Catarina (SC), quanto no resto do país, a madeira teve e tem um papel imprescindível na formação e na economia atual. O extrativismo começou por volta de 1900, sendo que ainda não comandava a economia estadual, pois no estado a indústria têxtil e o setor alimentar também tinham um papel importante (HOFF, 2004).

Nos anos 60 o extrativismo e o processamento da madeira já dominavam a economia, pois de 1915 a 1929 a produção de madeira aumentou em 22 vezes, e o valor de transformação industrial (VTI) passou de 17,32% em 1920, para 18,06% em 1939, e continuou crescendo no mesmo ritmo até os anos 60 (FILHO, 2007) e (ABRAF, 2013).

Esse aumento imponente da produção madeireira deu-se pelo início da colonização do oeste e do vale do Rio do Peixe, pois para poder produzir alimento os camponeses extraíam a madeira, que na época pela alta oferta possuía demanda insuficiente e com isso o preço era baixo. A madeira extraída em SC era exportada para outros estados como Rio de Janeiro, São Paulo, e outros países como a Argentina. Grande parte da madeira também foi utilizada na construção de ferrovias que uniram o sul do país ao sudeste e o oeste do estado aos portos (FILHO, 2007).

Nos dias de hoje a madeira é cada vez mais superfaturada, sendo que o extrativismo de madeira representa apenas 0,8% da economia catarinense, pois necessita projetos específicos para se extrair a mata nativa. Porém a indústria madeireira representa mais de 10% da economia, pois ao longo dos anos conforme a madeira era extraída e a mata nativa era extinta, grandes empresas investiam em melhoramento, tanto para a produção quanto para o processamento da madeira, isso fez com que o estado de Santa Catarina se tornasse um dos estados mais reflorestados do país, sendo o maior produtor de madeira processada (FILHO, 2007).

Hoje o estado de Santa Catarina exporta para outros estados e países produtos brutos como madeira serrada, laminados, torras de pinus, torras de eucalipto, varas de eucalipto para

a construção civil, etc. Adicionalmente também produtos altamente industrializados como móveis, portas, compensado, MDF, MDP, outros processados conforme a demanda das indústrias (MENDES et al., 2011)

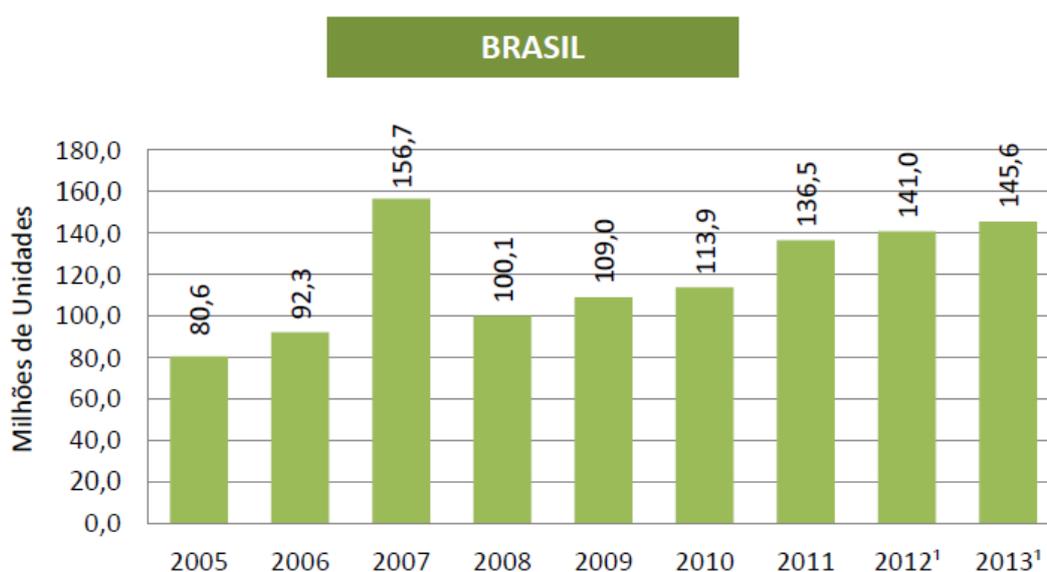
3.2. ECONOMIA

Analisando o Produto Interno Bruto (PIB) nacional, é verificado que o setor madeireiro é responsável por aproximadamente 5% de participação. Dentro deste percentual está a produção de madeira serrada, painéis, celulose e papel, energia.

O mercado de madeira serrada em 2012 fará o país ocupar a 9^a posição, sendo responsável por 3,2 % do total mundial. Somente a produção de *Pinus* no mesmo ano chegará a 9,17 milhões m³ (ABRAF, 2013).

A produção de móveis no Brasil irá atingir uma produção de 141 milhões de unidades em 2012 somando um montante de US\$ 347,0 bilhões, com comercialização em 70 países sendo que a China tem participação em 31% e os EUA 14%. Seguindo a evolução da produção de móveis de madeira se vê que no ano de 2012 a produção chegará próxima ao pico alcançado em 2007, antes da crise mundial, e em 2013, a produção de unidades chegará a 145 milhões de unidades (Figura 1) (ABRAF, 2013).

Figura 1. Dados de produção de móveis, em milhões de unidades produzidas (¹ dados estimados).
Fonte: ABRAF, 2013.



Em Santa Catarina existe o mais importante polo moveleiro exportador de móveis de madeira, localizado na região de São Bento do Sul, tratando-se de um polo formado por

pequenas e média empresas que absorvem madeira de alta qualidade para a produção de móveis (ABRAF, 2013).

De acordo com a ABRAF (2013), no ano de 2013 os três estados do sul do Brasil produziram e exportaram 90% dos móveis de madeira produzidos no país, sendo que o valor total de exportações de móveis do país chegou a de US\$ 468,9 milhões (Figura 2).

Figura 2. Dados da exportação do faturamento por exportação de móveis. Fonte: ABRAF, 2013.



Santa Catarina hoje é o maior exportador e terceiro maior produtor de móveis de madeira do país, com mais de 1800 fábricas, a maioria no polo de São Bento do Sul que concentra 15,3% do total das exportações nacionais de madeira e 37% das exportações de móveis de madeira (ABRAF, 2013).

3.3. SECAGEM DE MADEIRA

Segundo Rozas (1993) e Jankowsky (1983), a madeira é um material poroso e higroscópico, com água no estado líquido dentro de suas fibras e água adsorvida em componentes da parede celular. Por convecção, na secagem de um material poroso, ocorrem três estágios distintos, os quais determinam a curva característica de secagem do material.

A secagem da madeira é de fundamental importância para o seu processo de beneficiamento. A retirada da água da madeira pode ser realizada naturalmente (ao ar livre), ou artificialmente (em câmaras). E esse processo é imprescindível para que a umidade da madeira seja adequada ao seu uso final, por exemplo, materiais destinados a construção civil ($U=18\%$) ou confecção de moveis ($U=10$ a 14%) (SANTOS, 2002).

Em qualquer processo de transformação da madeira em manufaturados, a secagem é a fase intermediária que mais agrega valor ao produto final; pois torna o material mais estável dimensionalmente e facilita o acabamento mecânico da superfície, a aplicação de adesivos, tintas e vernizes (NENNEWITZ, 2012).

A da disponibilidade de florestas nativas, assim como o aumento da disponibilidade de florestas plantadas muito mais caras, vem realçando a necessidade de melhorar o processamento da madeira e redução dos defeitos de secagem (KLITZKE, 2002).

3.4. FORMAS DE SECAGEM

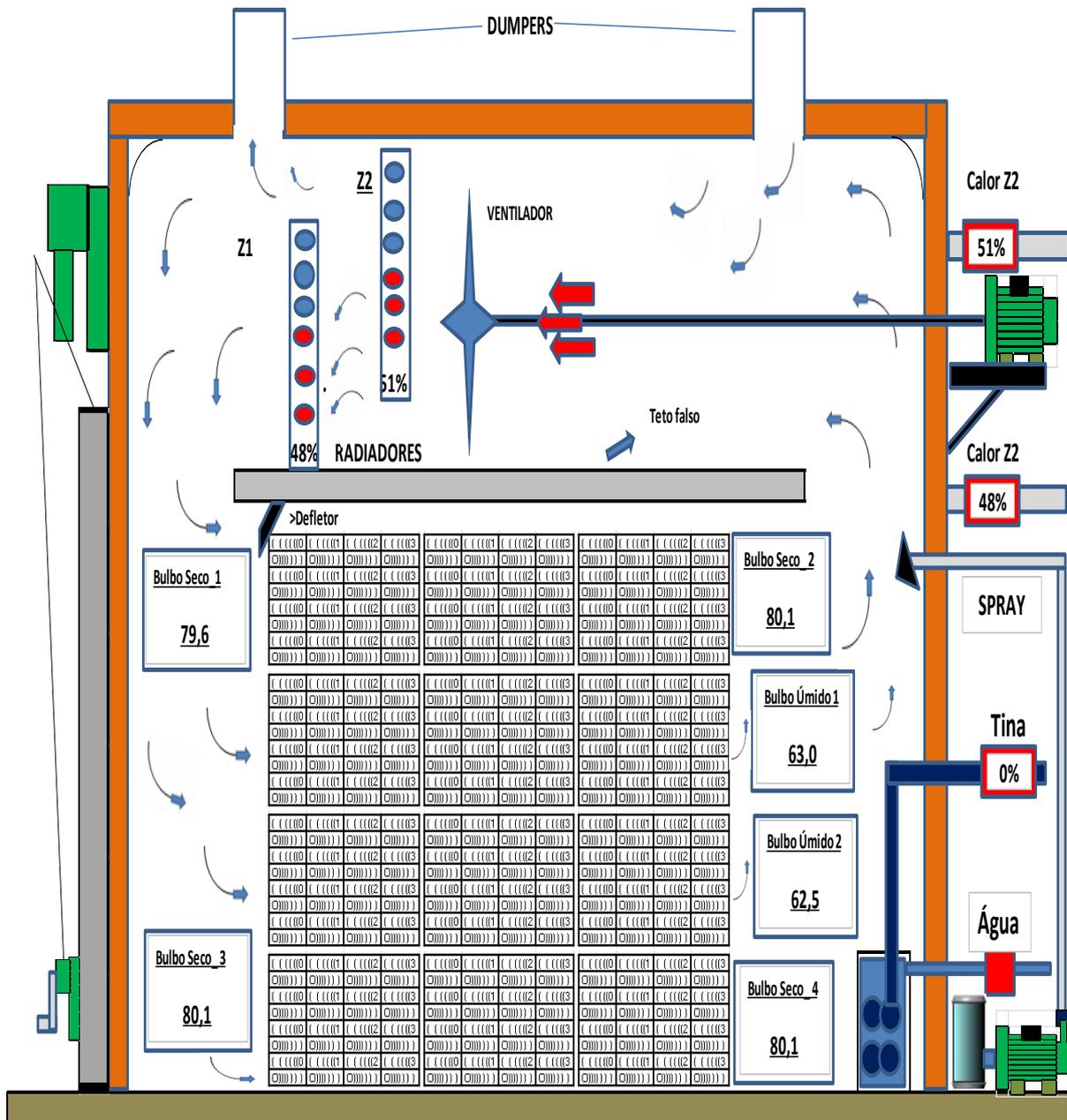
A secagem de madeira pode ser feita através de secagem solar que consiste na secagem à baixa temperatura ($< 50^{\circ}\text{C}$). Através também de secador de alta frequência de vácuo madeira. Para secar grandes volumes de taboas serradas verdes para 20 – 30% umidade, com custos mínimos é interessante o uso de pré-secadores. Secador Rápido ACT secadores rápidos permitem, hoje, tempos de secagem muito curtos. Outra forma de secagem é a secagem convencional, em estufas ou secadores onde é possível operar com temperaturas entre 40°C e 90°C , ter circulação forçada de ar e sistema para umidificação e troca de ar (SEVERO, 2000).

3.5. SECAGEM CONVENCIONAL

Na secagem convencional, em estufas ou secadores (Figura 3), tem-se controle da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar (se houver a presença de um inversor de

frequência). Esse método é caracterizado por operar com temperaturas entre 40°C e 90°C, ter circulação forçada de ar e sistema para umidificação e troca de ar (SEVERO, 2000).

Figura 3. Modelo esquemático de uma estufa de secagem convencional.



Fonte: O autor (2014).

O princípio da secagem artificial é promover o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor como de umidade). Dessa forma a madeira não apresenta defeitos oriundos da diferença de potencial, que são o colapso, as trincas de superfície e de topo, tendo assim a secagem completa da madeira o mais rápido possível com um nível de perdas que não comprometa a

produção e um padrão de qualidade aceitável para o produto que se pretende (MELO et al., 2008).

Para se atingir esse objetivo é necessário o conhecimento sobre a termodinâmica da secagem como também sobre as características da madeira e sobre o funcionamento do secador (JANKOWSKY, 1995).

O potencial é um aspecto importante a ser considerado na secagem convencional. Mudanças bruscas de temperatura e umidade relativa podem favorecer os aparecimentos de defeitos e uma forma de minimizar essa ocorrência é utilizar programas de secagem com mudanças suaves (potencial de secagem constante), essa é considerada uma boa alternativa para reduzir o tempo total do processo e ganhar qualidade na madeira seca (ANDRADE, 2000).

Os sistemas automatizados com tecnologias recentes permitem operar com um potencial de secagem constante e evitar alterações bruscas de temperatura e umidade relativa.

A secagem é composta por três fases distintas nos programas de secagem: aquecimento inicial, secagem propriamente dita e uniformização e condicionamento (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Sendo que a secagem propriamente dita é composta por duas etapas importantes sendo delimitadas pelo PSF.

3.6. RELAÇÃO ÁGUA-MADEIRA

A madeira recém cortada apresenta seus vasos, canais, lúmens, bem como as regiões amorfas da celulose da parede celular, saturados por água. Segundo Sanches (1995), no momento em que a árvore é derrubada a água está presente em quatro diferentes formas ou tipos.

- Água capilar ou livre;
- Água higroscópica ou de adesão;
- Água de constituição, fazendo parte das moléculas de celulose, hemicelulose e lignina;
- Vapor de água, localizado nas aberturas naturais da madeira e movimentando-se por difusão.

A movimentação capilar é realizada através das aberturas naturais existentes na madeira, sendo o fator limitante a permeabilidade.

Sanches (1995) define água livre como sendo a existente na madeira quando o teor de umidade esta acima do PSF, movimentando a água principalmente por capilaridade. A água higroscópica é a presente nas paredes celulares e que movimenta-se por difusão, sendo que ocorre com o teor de umidade abaixo do PSF.

Na primeira etapa de secagem (taxa de secagem constante) ocorre a evaporação da água superficial e a movimentação da água líquida, do interior até a superfície de evaporação, sendo que isso ocorre por forças de capilaridade. Na superfície ocorre o deslocamento de uma corrente de ar, caracterizando a secagem por convecção. A energia (calor sensível) da corrente de ar é transferida para a superfície da madeira, fazendo com que ocorra a vaporização da água ali existente que em forma de vapor é transferida para a corrente de ar. Nessa etapa da secagem as condições externas exercem grande efeito sobre o processo, interferindo na taxa de secagem (SEVERO, 2000).

Enquanto o material perde umidade, a vaporização da água na superfície provoca uma gradiente de umidade mais representativo no sentido da espessura, e simultaneamente o gradiente é gerado partindo da energia que irá aquecer o material. A partir desse ponto a quantidade de água líquida que chega até a superfície é menor que a quantidade de água evaporada, então se inicia a primeira fase de taxa de secagem decrescente, durante o qual a linha de vaporização penetra no material em direção ao centro.

A movimentação interna da água ocorre nas fases de líquido, vapor e como água higroscópica. Assim como a movimentação na fase líquida é fundamentalmente um fenômeno de capilaridade, sendo afetada pela estrutura anatômica da madeira, a movimentação nas outras fases é basicamente um fenômeno difusivo, afetado não só pelas condições termodinâmicas da corrente de ar como também por características da própria madeira, principalmente a massa específica. A influência do material na taxa de secagem passa a ser significativa (STANGERLIN, 2009).

No estagio final de secagem (segunda fase de taxa decrescente), iniciando quando a linha de evaporação de água fica restrita ao centro da madeira, não há mais água livre no material. A continuação da secagem fica sendo controlada pela resistência interna da madeira até o teor de umidade de equilíbrio ser alcançada. A saída da água de impregnação promove modificações estruturais na madeira, aproximando as células lenhosas e conferindo maior

rigidez às mesmas. Isto explica a contração da madeira, manifestando-se entre 6% e 28% do teor de umidade (STANGERLIN, 2009).

3.7. OCORRÊNCIA DE DEFEITOS

3.7.1. Trincas e rachaduras

As trincas (Figura 4) na superfície são indesejadas em madeiras com qualidade de móveis, e elas aparecem quando tensões que excedem a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras desenvolvem-se na superfície, devido a um início de secagem muito forçado, que produz diferença acentuada entre os teores de umidade da superfície e do centro da madeira (GARBE, 2006). Quanto mais espessa for a madeira, maior a possibilidade do aparecimento de rachaduras superficiais. Este defeito ocorre principalmente na fase inicial da secagem e, quando detectado a tempo, pode ser reduzido, aumentando-se a umidade relativa do ar dentro da estufa.

Figura 4. Trinca de superfície ocasionada pela secagem.



Fonte: O autor (2014).

Segundo Klitzke (2002), uma forma de se evitar a rachadura de topo (Figura 5) é evitar o uso de correntes de ar muito forte e seco sobre a superfície da madeira úmida.

Figura 5. Trinca de topo ocorrido por conta da secagem.



Fonte: O autor (2014).

3.7.2. Mancha química

Quanto a manchas químicas (mancha marrom ou mancha café), (Figura 6) Klitzke (2002) relata que são produzidas por ação de fungos ou por alterações químicas que ocorrem com os extrativos solúveis em água, geralmente os açúcares e os taninos, ambos sujeitos a oxidação, resultando em escurecimento quando expostos ao calor e a presença de oxigênio.

Quando a madeira é exposta a temperaturas maiores que 50°C os extrativos solúveis em água são solubilizados e transportados para a superfície e depositados na camada superficial de 0,5 a 2mm de profundidade, sendo que a partir dos 60°C são formadas manchas amareladas, que são consideradas precursoras da mancha marrom, que começa a ser formada quando a temperatura de trabalho está próxima aos 90°C (PEREIRA, 1992). Klitzke (2002) observou que a mancha se marrom forma ao utilizar-se altas temperaturas quando o teor de umidade da madeira encontra-se acima do PSF.

Figura 6. Ilustração da mancha café em três níveis de intensidade (1, 2 e 3), e uma amostra sem mancha (0).



Fonte: O autor (2014).

Para Tomaselli (2000) e Pereira (1992), podem ser consideradas alternativas para a redução da mancha:

- a redução dos intervalos de tempo compreendido entre a derrubada e o desdobro e entre o desdobro e a secagem;
- uso de altas temperaturas para o bloqueio do processo de formação das manchas, através da inativação das enzimas envolvidas;
- utilização de programas de secagem com dois estágios, com temperaturas moderadas enquanto a madeira encontra-se com teor de umidade acima de 30% e altas temperaturas a partir desse instante até a umidade final;
- utilização de tratamentos químicos após o desdobro, porém além de tóxicos os produtos apresentaram problemas no manuseio;

3.7.3. Percentual de tortuosidade

Para que se comprove a viabilidade de um programa ou de uma determinada prática de secagem, é imprescindível que se avalie junto com os outros dados o percentual de tortuosidade, pois pode ser o fator limitante quando se trabalha com temperaturas elevadas.

Santos (2002) relata que os empenamentos são qualquer distorção na peça de madeira em relação a sua superfície original.

Martins (1988) define que existem cinco formas de empenamento, sendo o torcimento, o encurvamento, o empenamento longitudinal, o arqueamento e o arqueamento em forma de diamante.

4. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GERAL

- Aplicar e identificar curvas de secagem ótimas para melhorar a qualidade de secagem convencional de *Pinus taeda* L. no planalto serrano, evitando mancha marrom, com qualidade para suprir as indústrias moveleiras.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Obter madeira seca com Índice linear de trinca (ILT) menor que 2,5%;
- Obter madeira seca com níveis aceitáveis de mancha café e com profundidade de até 1,5 mm;
- Pontuar as temperaturas mais eficientes para cada fase de secagem, obtendo um meio termo entre os índices de mancha, de empenamento e de trinca sem inviabilizar a secagem prolongando muito o tempo de secagem.

5. METODOLOGIA

5.1. ESCOLHA DA MADEIRA

A madeira escolhida para o trabalho foi *Pinus taeda* L., sendo que as toras eram provenientes da região de Curitiba. As mesmas possuíam diâmetro entre 180 a 250 mm e comprimento 4200 mm, sendo classificada como tora fina.

Após o corte foram carregadas e transportadas até o pátio da empresa incubadora onde ficaram por cerca de 2 dias no formato de tora e então passaram para a linha de processamento para serem serradas.

5.2. PREPARO DA MADEIRA

As toras foram serradas em serra fita e posteriormente em refiladoras e múltipla circular, sendo que as madeiras com classificação para a produção de móveis foram retiradas de regiões do alburno da tora, permitindo um máximo de 15% de medula sadia na peça.

Os cortes radiais e tangenciais não foram separados, pois a qualidade da madeira é *Cut-of-log* (COL), o que consiste no fatiamento total da tora ignorando sentido de fibras, separando apenas a medula do alburno.

O gradeamento foi feito através da sobreposição de camadas de madeira e de tabiques, sendo que o entabicação foi feito com nove linhas de tabiques que possuíam uma espessura média de 20 mm.

O gradeamento automatizado permite um alinhamento quase perfeito, que deve ser com a linha de tabique bem controlada, alinhada e sem falta de tabiques, para que não interfira na qualidade da madeira distribuindo bem o peso da carga durante a secagem somente em cima dos tabiques (Figura 7).

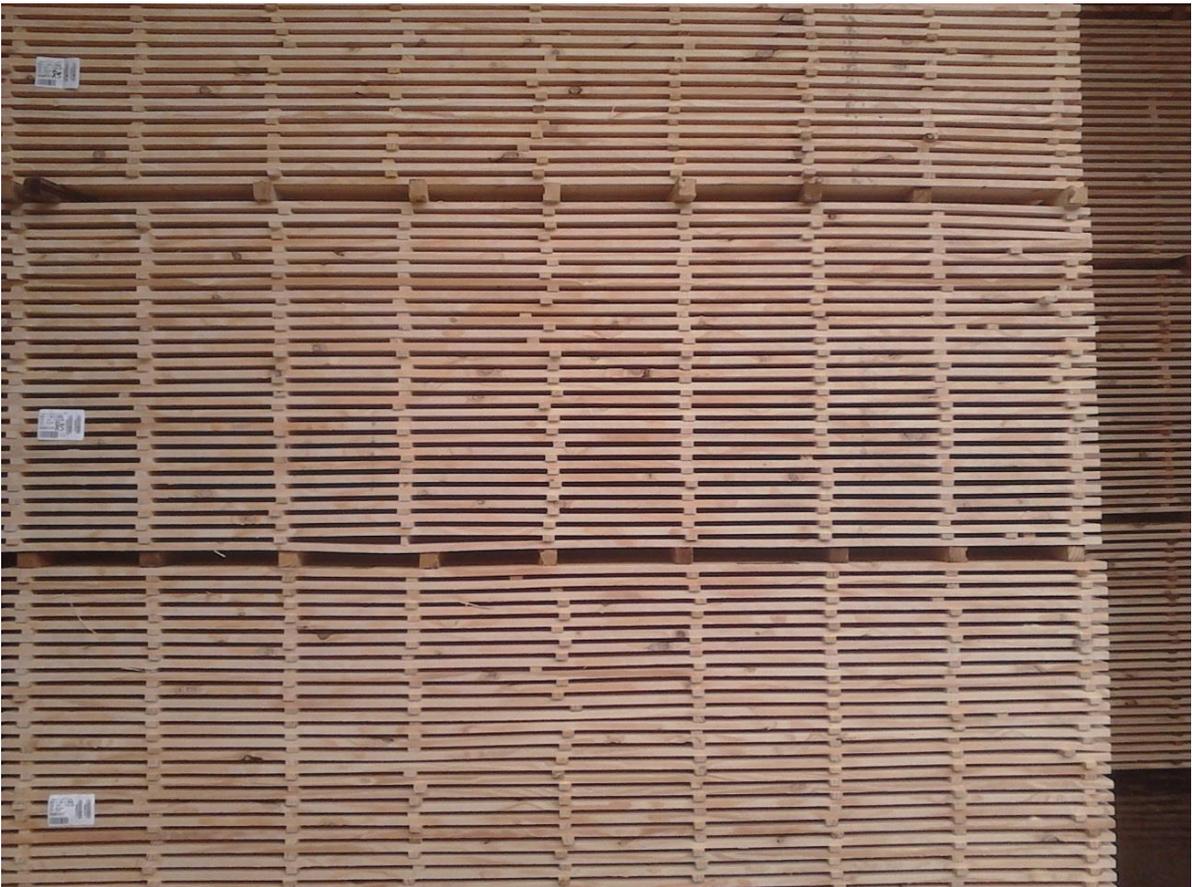
Figura 7. Ilustração da grade de madeira serrada com tabiques bem alinhados.



Fonte: O autor (2014).

Após o gradeamento, as grades com 1500 mm de largura por 1400 mm de altura foram levadas para a estufa, onde foram empilhadas com separação por calços de 58 mm, dispostos sobre a linha de tabique (Figura 8), homogeneizando a distribuição de peso na carga, sendo que a carga da estufa foi composta por 48 grades, dispostas em 4 filas, 3 linhas e 4 camadas de altura, somando cerca de 200 m³.

Figura 8. Ilustração dos calços alinhados aos tabiques.

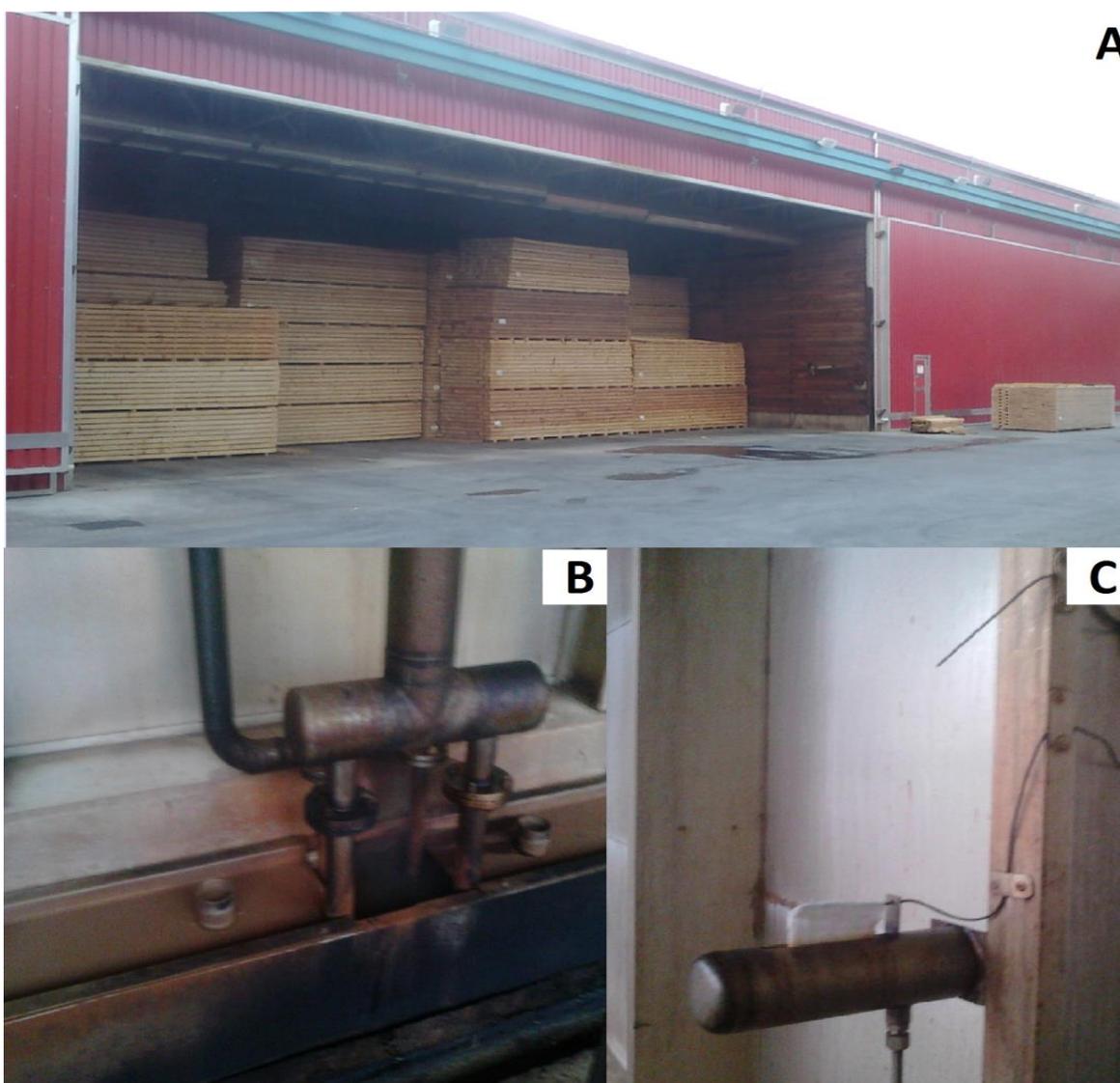


Fonte: O autor (2014).

5.3. CÂMARA DE SECAGEM

A câmara de secagem observada na Figura 9A utilizada nos teste possui capacidade de carga média de 200 m³ e possui os seguintes itens: -inversor de frequência; -defletores superiores; -banho por tina conforme a Figura 9B; -termômetros de bulbo seco (TBS) e de bulbo úmido (TBU) dispostos conforme a Figura 9C; -linha de spray; -controle de vapor nos radiadores separados em dois lados em resposta ao monitoramento de temperatura TBS e TBS que também são dois sensores de cada temperatura; -radiadores com três camadas; -sete motores para a ventilação forçada; -sistema forçado de troca de ar com o ambiente; e -controle de secagem com computador supervisor.

Figura 9. (A) Vista externa da câmara de secagem, (B) serpentina “tina” para banho inicial e condicionamento da madeira e (C) sensores de temperatura de bulbo seco TBS e bulbo úmido TBU.



Fonte: O autor (2014).

5.4. ESCOLHA DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

Os programas de secagem avaliados foram desenvolvidos nos moldes tradicionais, com onze fases, sendo a primeira o aquecimento, sete fases de secagem e após uma de esfriamento, uma de condicionamento e a final de esfriamento.

Foram avaliados três programas de secagem, sendo que no programa “A”, a temperatura não ultrapassou os 86°C e teve uma variação de 22°C durante a secagem. No programa “B” a temperatura máxima alcançada foi de 76°C e teve uma variação de apenas 12°C durante a secagem, e no acondicionamento chegou a uma temperatura de 96°C por um tempo de três horas. Já o programa “C” chegou a 100°C durante a secagem e teve uma variação de 20°C.

Apenas o programa “B”, que trabalhou com temperaturas abaixo dos 80°C, teve temperatura maior na fase de condicionamento, para que se avaliasse o resultado obtido por Pereira e colaboradores (1993).

Todos os programas testados utilizaram uma ventilação interna da câmara de 2,5 a 3,5 m/s, que é considerada ideal para secagem de madeira com baixas temperatura (GALVAO, 1985).

5.5. AMOSTRAGEM

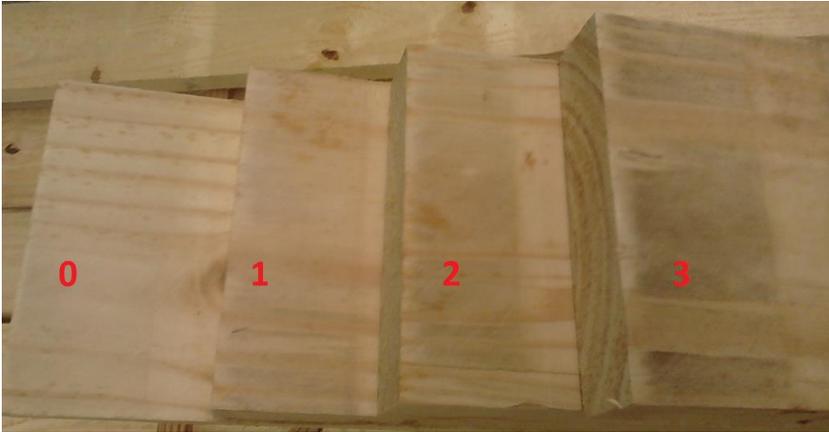
A amostragem foi feita em triplicata, sendo que em cada batelada foram selecionados três fardos aleatórios de madeira seca e que foram amostradas 50 peças por fardo, as peças possuíam 3990 mm de comprimento, 27 mm de espessura e cada fardo possuía madeira com largura diferente, sendo um com 79 mm, outro com 104 mm e o terceiro com 154 mm.

As amostras foram avaliadas em todo o seu comprimento, avaliando sempre o somatório de defeitos para a análise de trinca e o nível mais crítico de mancha presente na peça.

5.6. ANALISE DOS NÍVEIS DE MANCHA

A análise dos níveis de mancha foi feita visualmente, e com auxílio de um estilete para verificação da profundidade da mancha. A determinação visual do nível da mancha encontrado foi efetuado na mancha mais intensa encontrada na peça, e comparando-se este resultado com um gabarito de mancha (Figura 10) para que o critério fosse mantido.

Figura 10. Gabarito de níveis de mancha, sendo nível 0 sem ocorrência da mancha café, nível 1, mancha de superfície, nível 2, mancha com profundidade até cerca de 1,5 mm e nível 3 mancha com profundidade maior que 1,5 mm.



Fonte: O autor (2014).

Após a avaliação das amostras foi calculado o percentual de peças com mancha de cada nível de ocorrência, sendo que o nível 3 é o mais crítico e não é aceito pelo mercado moveleiro, pois exigem que o aplainamento retire uma camada muito espessa da peça, causando prejuízos ao cliente e perda de matéria prima.

5.7. ANÁLISE DO ÍNDICE LINEAR DE TRINCA (ILT)

A análise das trincas foi feita visualmente em todas as peças, sendo realizada através da medida das trincas de topo e superfície de cada peça. Para o cálculo do ILT (%) foi feito o somatório do comprimento das trincas de topo de cada peça e do somatório do comprimento das trincas de superfície de cada peça.

Foi calculado o ILT % com a seguinte fórmula:

$$ILT = \frac{LT1 + LT2}{L}$$

$$ILT = \frac{\sum_{i=1}^{40} LT_i}{\sum_{i=1}^{40} L}$$

5.8. ANÁLISE DO PERCENTUAL DE TORTUOSIDADE

A análise da tortuosidade foi feita visualmente, sendo verificado o número de peças que apresentaram alguma forma de empenamento. Sendo verificada a presença de empenamento longitudinal, encurvamento, encanoamento e torcimento, que de acordo com

Martins (1988) são formas de empenamento que limitam a qualidade da madeira notadamente para usos nobres.

6. RESULTADOS E DISCUSÃO

Após a análise das amostras, os dados foram compilados em Excel e obtidos os resultados dos testes (Tabela 1).

Tabela 1. Dados de trinca, tortuosidade e mancha.

Programa	Tempo real	Mancha %				Tortuosidade	Trincas
	Horas	1	2	3	total	%	ILT(%)
A	78	33	3	0	37,3	36	0,06
B	82	16	0	0	16	33	0,68
C	66	36	14,5	7	57,6	54	0,37

Fonte: O autor.

Como a qualidade de uma prática de secagem está atrelada a estas três formas de defeitos, os dados devem ser analisados em conjunto.

Em relação à viabilidade de tempo, o melhor programa foi o “C”, que teve tempo 12 e 16 horas menor que os programas “A” e “B”, respectivamente. Porém este programa apresentou defeitos de secagem que inviabilizam o seu uso para a produção de madeira para a indústria moveleira, sendo o único programa a apresentar mancha café de nível 3, além do percentual de tortuosidade que conforme os dados mais de 50% das peça apresentaram alguma forma de empenamento.

Os programas “A” e “B” foram satisfatórios em todos os quesitos, sendo que o programa “B” se mostrou ligeiramente melhor, quanto a qualidade nos níveis de mancha e tortuosidade, porém no quesito trinca foi inferior, apesar de nenhum dos programas apresentar ILT % superior a 2,5% que é considerado um nível crítico, o programa “A” apresentou o menor índice 0,06%, contra 0,68% do programa “B” e 0,37% do programa “C”.

O programa “A”, no qual 36% das peças analisadas apresentaram mancha café apenas 3% das peça possuíam mancha nível 2, pode ser considerado o aprovado entre os programas analisados, nas condições em que foram realizados.

Sendo o Programa “A” considerado o melhor o resultado, podemos comprovar o que foi relatado por Pereira (1993), que relatou que para *Pinus elliottii*, o uso de programas de secagem com duas etapas, sendo uma com temperatura moderada até cerca de 30% de

umidade e posteriormente temperaturas próximas a 100°C se mostrou o mais eficiente em seus estudos.

No presente caso, a temperatura do programa “A” que se mostrou mais eficiente chegou apenas a 86°C, sendo que passou dos 80 °C quando a umidade estava próxima do PSF. Os resultados obtidos são compatíveis com os obtidos por Tomaselli (1988), que verificou a possibilidade de elevar-se a temperatura quando o teor de umidade estivesse abaixo do PSF.

A ocorrência da trinca não foi considerada relevante, porém vale ressaltar que a ocorrência de trinca em *Pinus* está ligada diretamente a temperatura que se trabalha e o gradiente de umidade da superfície da madeira e do ambiente da câmara. A mancha e a trinca ocorrem de forma inversamente proporcional, sendo que quanto maior a temperatura menor a ocorrência de trinca e maior os níveis de mancha.

Apesar de não terem sido objeto de estudo, as amostras apresentaram mancha amarela, considerada precursora da mancha marrom. Fato relatado por Millett (1952) e Pereira (1993), que atestaram que as manchas amarelas eram formadas durante a secagem com temperaturas brandas, abaixo de 80°C, porém quando submetidas a temperaturas acima de 90 °C e umidade relativa acima de 80% eram transformadas em mancha marrom. Porém, o presente resultado não foi de acordo com a literatura, sendo que o programa “B” chegou a 76°C durante a secagem e logo após foi submetido a temperatura de 96°C por três horas, e não apresentou mancha nível 2 e 3.

7. CONCLUSÃO

Conforme os objetivos do presente trabalho, conclui-se que:

- Com os resultados obtidos nas condições em que os ensaios foram realizados, julgando que foram feitos em escala industrial e que cada carga de madeira submetida à avaliação continha significativos 200 m³, é possível afirmar que os resultados são muito relevantes e de ampla aplicação para a secagem da madeira de *Pinus spp* no planalto catarinense;

- As temperaturas acima de 80°C propiciam o aparecimento da mancha marrom, além de aumentar o percentual de empenamento na madeira, o que é indesejável e inviável para a produção de produtos destinados à indústria moveleira, que confecciona produtos de alto valor agregado;

- Os objetivos do trabalho foram cumpridos, sendo que os níveis de mancha não chegaram a 10% de mancha nível 2 e 3, o índice de trinca não chegou ao máximo em nenhum dos programas testados.

- O programa de secagem que melhor atendeu os quesitos de qualidade possui temperatura de bulbo seco inicial de 64 °C e final de 86°C, sendo que a ventilação não passou dos 3,5 m/s e a temperatura crítica de 80 °C foi atingida quando a umidade estava em torno do PSF.

8. RECOMENDAÇÕES

A partir dos testes realizados e da revisão de literatura, faz-se as seguintes recomendações:

- Refazer os testes com uma análise mais criteriosa com auxílio de uma plaina, analisando os níveis de mancha na profundidade de aplainamento praticada em indústrias moveleiras, que é de 1,5 à 2 mm.

- Avaliar novos programas de secagem, buscando pontuar melhor quesitos como (i) tempos e (ii) temperatura para a secagem de diferentes espessuras e níveis de qualidades de produto.

9. REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. Anuário Estatístico ABRAF 2013 – Ano base 2012. Brasília, 2013.

ANDRADE A. Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras. Piracicaba, 2000. ESALQ, USP. (dissertação de mestrado).

FILHO A. G. Formação econômica de Santa Catarina, Ed da UFSC, 2ª ed. rev., p 83-236, Florianópolis, 2007.

GALVAO A. P. M.; JANKOWSKY . P. Secagem Racional da madeira. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

GARBE E. A.; Fatores Influentes na Secagem Convencional de *Pinus taeda* com Ênfase em Trincas Superficiais. Curitiba, 2006.

HOFF D. N.; SIMONI F. J. O setor de base florestal na serra catarinense. ed. Uniplac. p. 19 - 40, Lages, 2004.

JANKOWSKY, I.P.; HENRIQUEZ, E.Z. Gradiente de umidade e desenvolvimento de tensões da secagem artificial da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. IEEE, n.24, p.27-32, 1983.

JANKOWSKY, J.P.& HENRIQUEZ, E.Z. Gradiente de umidade e desenvolvimento de tensões da secagem artificial de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. IPEF, Piracicaba, 1993.

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In. seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, São Paulo, 1995. Anais. Piracicaba. IPEF/IPT, 1995. p. 109-118.

KLITZKE, R. J. Uso do inversor de frequência na secagem de madeira. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MARTINS, VARLONE ALVES. Secagem de madeira serrada. Brasília, IBDF/DPq - LPF, 1988.

MENDES B. G.; BUDZIAK D.; STOLBERG J.; PEIXER Z. I.; DALMARCO J. B.; SIMIONATTO E. L.; PEDROSA R. C.; FELIPE K. B.; OGAWA J.; PEGORARO C.; SCHEFFER L.; BESEN M. R.; OLIVEIRA L. J. G. G.; GEREMIAS R.; Estudo da qualidade das águas do rio marombas (SC/Brasil), utilizando parâmetros físico-químicos e Bioensaios. Revista de Ciências Ambientais, Canoas-RS, v.5, n.2, p. 43 a 58, 2011.

MELO R. R.; STANGERLINA D. M.; MÜLLERA E. M. T.; SANTINI B. J.; HASELEINB C. R. Programas de secagem para madeiras. 10º congresso florestal estadual, Nova Prata, 2008.

MILLETT, M.A. Chemical brown stain in sugar pine. Journal of Forest Products Research Society, v.2, n.5, p.232-236, 1952.

NENNEWITZ I.; NUTZSCH W.; PESCHEL P.; SEIFER G.; Manual de tecnologia da madeira. Editora Edgard Blucher Ltda. Tradução da 4ª edição alemã – 2008. 2ª edição brasileira – 2012.

PEREIRA J. C. D. Formação e Controle da Mancha Marrom em Madeira Serrada de *Pinus elliottii* Engelm Var. *elliottii*. Curtba. 1992.

PEREIRA J. C. D.; TOMAZELLI I.; CORRÊA J. B. C. Ocorrência da mancha marrom em madeira serrada de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*. Parte do Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n.26/27, p.41-47, Jan./Dez.1993.

ROZAS, M. E.C.E. E TOMASELLI, I. Secagem de madeira serrada de *Eucalyptus viminalis*. Santa Maria. Ciência Florestal/Centro de Pesquisas Florestais. Fundação de Amparo à Tecnologia e Ciência. Universidade Federal de Santa Maria. 1993.

SANTOS, G.R.V. Otimização da secagem convencional de madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. Piraciaba, 2002. USP/ESALQ, Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Madeiras.

SEVERO, E.T.D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. Ciência Florestal, Santa Maria, 2000.

SANCHES A; COSTA, M. Experiência argentina en el uso de la madera de eucalipto. In. Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, São Paulo, 1995. Anais. Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. p. 74-91.

STANGERLIN D. M. Avaliação do uso de estufa solar para secagem de madeira serrada de eucalipto. Santa Maria, 2009.

TOMASELLI, I. Aspectos físicos da secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm acima de 100°C. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1981. 128p.

TOMASELLI, I. Brown stain in *Pinus elliottii* sawn wood. In: IUFRO DIVISION 5 MEETING, 1988, São Paulo. Proceedings of wood drying working party sessions. p.94-100.

TOMASELLI, I. KLITZKE, R. J. Secagem da Madeira. Curitiba, UFPR, 2000. 89p.