UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATEUS HENRIQUE BINI

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM EM MADEIRA DE PINUS



MATEUS HENRIQUE BINI

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM EM MADEIRA DE PINUS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

CURITIBA 2019

TERMO DE APROVAÇÃO

MATEUS HENRIQUE BINI

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM EM MADEIRA DE PINUS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke Orientador – Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR

Prof. Dr. Thiago Campos Monteiro Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR

Doutoranda Linéia Roberta Zen Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR

Curitiba, 05 de Dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria, de todo conhecimento e de toda inspiração;

A minha família, pelo apoio incondicional em todos os momentos;

A Universidade Federal do Paraná, que tem sido meu segundo lar nos últimos nove anos, desde o curso Técnico em Petróleo e Gás;

Ao curso de Engenharia Florestal, aonde me encontrei profissionalmente e fiz grandes amizades para a vida toda;

Ao professor Dr. Ricardo Jorge Klitzke, pela orientação, apoio e amizade;

Ao professor Dr. Thiago Monteiro e doutoranda Linéia Zen, por terem aceitado participar da banca de avaliação deste trabalho;

A toda equipe do Laboratório de Secagem da Madeira;

E ao técnico da marcenaria, Mauro Távora, pela grande ajuda com os corpos de prova utilizados neste estudo.

Muito Obrigado!

RESUMO

Pinus taeda é a espécie de rápido crescimento mais plantada no sul do Brasil, sendo utilizada principalmente na geração de produtos sólidos, para isto sendo necessário executar sua secagem. A secagem da madeira ocorre da superfície da peça para o seu interior, o que favorece a ocorrência de tensões de secagem associadas a gradientes de umidade. O método de avaliação da qualidade da secagem de Simpson (1991) é o mais utilizado para verificar as tensões de secagem, mediante a realização de um teste de teor de umidade final, de gradiente de umidade e teste de garfo. McMillen (1958) sugere um teste de fatias ou divisões para avaliar as tensões de secagem e o gradiente de umidade, indicando-o como mais preciso do que o teste de garfo clássico. Neste trabalho comparou-se estas metodologias de avaliação de tensões de secagem, verificando a influência do plano de corte da madeira e da temperatura máxima utilizada no programa de secagem. Utilizou-se da equação de Füller (1995) para calcular a resposta do garfo, visando comparar com o resultado do teste de divisões. Os resultados obtidos com as metodologias de McMillen (1958) e Simpson (1991) foram similares. Foram observadas deformações mais acentuadas nas amostras do plano tangencial e no ciclo de secagem com temperatura máxima de 90°C. A resposta do garfo foi menor no ciclo de secagem mais severo em razão da liberação das tensões de secagem na formação de defeitos na madeira. O gradiente de umidade foi mais elevado nas amostras radiais, bem como no ciclo de até 90°C.

Palavras-chave: Tensões de secagem. Gradiente de umidade. Teste de fatias. Secagem convencional. *Pinus taeda*.

ABSTRACT

Pinus taeda is the fastest growing species most commonly planted in southern Brazil, being mainly used in the generation of solid products. Wood drying occurs from the interior surface of the piece, which favors the occurrence of drying stresses associated with moisture gradients. Simpson's (1991) drying quality assessment method is the most widely used method for checking drying stresses by performing a final moisture content test, moisture gradient test, and prong test. McMillen (1958) suggests a slice or division test to evaluate drying stresses and moisture gradient, indicating it as more accurate than the classic prong test. In this work was compared these drying stress evaluation methodologies, verifying the influence of the wood cutting plane and the maximum temperature used in the drying program. The Füller equation (1995) was used to calculate the prong response in order to compare with the result of the division test. The results obtained with the methodologies of McMillen (1958) and Simpson (1991) were similar. More severe deformations were observed in the tangential plane samples and in the drying cycle with a maximum temperature of 90 °C. The prong response was lower in the more severe drying cycle due to the release of drying stresses in the formation of wood defects. The moisture gradient was higher in radial samples as well as in the cycle up to 90 °C.

Keywords: Drying tensions. Moisture gradient. Slice test. Conventional drying. Pinus

taeda.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2 - COMPONENTES DA CÂMARA DE SECAGEM CONVENCIONAL.....21 FIGURA 3 - PROGRAMA UTILIZADO PARA A SUPERVISÃO DA SECAGEM......22 FIGURA 4 - DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS DE PINUS NA PILHA DO CICLO DE FIGURA 5 - DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS DE PINUS NA PILHA DO CICLO DE FIGURA 7 - ESQUEMA DE CORTE E MEDIÇÃO DO MÉTODO DE DIVISÕES25 FIGURA 8 - EXEMPLO DE SEÇÕES RADIAL E TANGENCIAL OBTIDAS DE FIGURA 9 - DIVISÕES OBTIDAS NAS SEÇÕES RADIAL E TANGENCIAL DE FIGURA 10 - SEQUÊNCIA DE AVALIAÇÃO DAS DIVISÕES PARA FIGURA 11 - AMOSTRAS DE COMPARAÇÃO DO MÉTODO DE SIMPSON29 FIGURA 13 - ESQUEMA DE CORTE DE AMOSTRAS DO GRADIENTE DE FIGURA 14 - SECÃO TANGENCIAL DO CICLO DE 90°C COM RACHADURAS....52 FIGURA 15 - VISTA LATERAL DE SEÇÕES RECÉM CORTADAS DO CICLO DE 90°C, COM PRESENCÃO DE RACHADURAS INTERNAS E REGIÕES ÚMIDAS .. 53

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - CICLO DE SECAGEM COM TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 70°C
GRÁFICO 2 - CICLO DE SECAGEM COM TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 90°C 33
GRÁFICO 3 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS NO PLANO TANGENCIAL A 40% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)
GRÁFICO 4 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL A 40% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)40
GRÁFICO 5 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO TANGENCIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)42
GRÁFICO 6 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO TANGENCIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 90°C)43
GRÁFICO 7 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)44
GRÁFICO 8 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 90°C)45
GRÁFICO 9 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO TANGENCIAL APÓS ACONDICIONAMENTO (CICLO DE 70°C)46
GRÁFICO 10 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO TANGENCIAL APÓS ACONDICIONAMENTO (CICLO DE 90°C)47
GRÁFICO 11 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL APÓS ACONDICIONAMENTO (CICLO DE 70°C)
GRÁFICO 12 - GRADIENTE E DEFORMÁÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL APÓS ACONDICIONAMENTO (CICLO DE 90°C)49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROGRAMA DE SECAGEM PARA TÁBUAS DE PINUS COM
TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 70°C19
TABELA 2 - PROGRAMA DE SECAGEM PARA TÁBUAS DE PINUS COM
TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 90°C20
TABELA 3 - TESTES REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE
PINUS E DOS DOIS CICLOS DE SECAGEM EXECUTADOS
TABELA 4 - PERDA DE MASSA E VOLUME NA SECAGEM DA MADEIRA
TABELA 5 - GRADIENTE DE UMIDADE NA INTERVENÇÃO A 40%, MÉTODO DAS
DIVISÕES41
TABELA 6 - GRADIENTE DE UMIDADE NA INTERVENÇÃO A 10%, MÉTODO DAS
DIVISÕES45
TABELA 7 - GRADIENTE DE UMIDADE APÓS ACONDICIONAMENTO, MÉTODO
DAS DIVISÕES
TABELA 8 - GRADIENTE DE UMIDADE APÓS ACONDICIONAMENTO, MÉTODO
DE SIMPSON (1991)51
TABELA 9 - RESPOSTA DO TESTE DE GARFO51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	.11
2 OBJETIVOS	.13
2.1 OBJETIVO GERAL	.13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	.13
3 REVISÃO DE LITERATURA	.14
3.1 SECAGEM DA MADEIRA EM ESTUFA CONVENCIONAL	.14
3.2 RELAÇÃO ÁGUA – MADEIRA	.14
3.3 TENSÕES DE SECAGEM	.15
3.4 AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES DE SECAGEM	.16
3.4.1 Teste de garfo	.16
3.4.2 Método das divisões	.17
3.4.3 Outros métodos de avaliação das tensões de secagem	.17
4 MATERIAL E MÉTODOS	.19
4.1 PREPARAÇÃO DE MATERIAL PARA COLETA DE DADOS	.19
4.2 SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL SEMI-INDUSTRIAL	.20
4.3 TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA	.23
4.4 CONTRAÇÃO DA MADEIRA	.24
4.5 MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MADEIRA	.25
4.6 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE	.25
4.6.1 Método de divisões de McMillen (1958)	.25
4.6.2. Método para avaliação da qualidade da secagem de Simpson (1991)	.29
4.6.2.1 Teste de garfo	.30
4.6.2.2 Teste de gradiente de umidade	.30
4.7 ANÁLISE DOS DADOS	.31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	.32
5.1 CURVAS DOS CICLOS DE SECAGEM	.32
5.2 RESULTADOS OBTIDOS	.33
5.2.1 Teor de umidade inicial e final da madeira	.34
5.2.2 Massa específica aparente da madeira	.36
5.2.3 Contração da madeira	.37
5.3 TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE A 40%	.39
5.4 TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE A 10%	.42
5.5 TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE AO FIM DO CICLO	.46
6 CONCLUSÃO	.54

REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE	

1 INTRODUÇÃO

Pinus taeda é uma espécie florestal nativa do sul e sudeste dos Estados Unidos, sendo uma das mais importantes espécies dentre as plantadas em nível comercial naquela região. Dentre as espécies do gênero é a mais plantada no Brasil, com aproximadamente um milhão de hectares, com os plantios concentrados nos planaltos da região sul e nas áreas mais chuvosas do sul dos estados de São Paulo e Minas Gerais (PRATA, 2010).

Segundo o relatório anual da Indústria Brasileira de Arvores (IBA, 2017), dos 7,84 milhões de hectares de plantios florestais no país em 2016, cerca de 1,6 milhão de hectares (20,4%) encontravam-se ocupados por espécies do gênero *Pinus*, com tal área concentrada principalmente nos estados do Paraná (42%) e Santa Catarina (34%). A produtividade volumétrica das florestas de *Pinus* brasileiras atingem, em média 30,5 m³ por hectare ao ano, com idade de rotação geralmente de até 20 anos, sendo as florestas brasileiras as mais produtivas do mundo (IBÁ, 2017).

A madeira de *Pinus* é utilizada principalmente na geração de produtos sólidos, por vezes com finalidade estrutural, ou ainda, visando o mercado externo, fazendose necessário secar a madeira a um teor de umidade final de acordo com o uso a que se destina.

A secagem é uma etapa fundamental dentro da cadeia de processamento da madeira sólida, dada a influência que a água exerce nas propriedades deste material e a natureza estratégica do processo – oneroso, demorado, sensível a quaisquer variações de seus parâmetros – a secagem necessita de adequada gestão, devendo-se buscar a redução dos custos e aumento da qualidade da madeira, atendendo as exigências do mercado.

A secagem da madeira ocorre da superfície da peça para o seu interior o que favorece a ocorrência de tensões de secagem associado a gradientes de umidade, sendo que a espessura da tábua exerce forte influência na geração destas tensões e gradientes no perfil da peça. Isto ocorre devido a maior quantidade de paredes celulares que a água terá que ultrapassar até chegar à superfície da tábua pelo processo físico de transferência de massa conhecida por difusão impedida.

As tensões de secagem quando superam a resistência à compressão perpendicular às fibras da parede celular causam a formação de rachaduras da

superfície para o interior na peça de madeira, além de favorecer o aparecimento de deformações longitudinais na tábua (empenamentos).

Estes são os desafios a serem superados pelo processo de secagem de madeira em estufa convencional. Os custos do processo de secagem serão reduzidos quando forem atingidas as condições adequadas de controle das variáveis ambientais, visando obter a velocidade ótima de secagem em cada fase.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os níveis de tensões de secagem e gradiente de umidade na madeira de *Pinus taeda* comparando os métodos de McMillen (1958) e Simpson (1991).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar se há relação entre a intensidade das tensões de secagem com o plano de corte da madeira (tangencial ou radial);
- Verificar a influência da temperatura máxima de operação da estufa no surgimento de tensões de secagem.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SECAGEM DA MADEIRA EM ESTUFA CONVENCIONAL

De acordo com Jankowski, Santos e Andrade (2000), a secagem convencional da madeira é caracterizada pelo controle que se tem sobre as variáveis ambientais atuantes sobre a madeira no interior da estufa ou secador, com temperaturas de operação entre 40°C e 90°C, utilizando-se de sistemas de ventilação forçada, umidificadores e de trocas gasosas.

A secagem convencional apresenta vantagens como a independência das condições climáticas externas, o maior controle sobre a umidade final, o menor tempo de secagem, a diminuição de ocorrência de defeitos, além da adequação a diversos tipos de madeira, apresentando, porém, custos superiores em relação à outros métodos de secagem, como ao ar livre e estufa solar (SANCHÉZ, 2017).

A otimização de um processo de secagem deve levar em consideração o tempo de secagem, a qualidade requerida do produto final, o teor de umidade desejado, o consumo energético e o custo global da secagem (RÉMOND; PERRÉ, 2008), sendo possível reduzir o tempo de secagem e a incidência de defeitos, quando o processo é conduzido adequadamente (SUSIN *et al*, 2014).

3.2 RELAÇÃO ÁGUA – MADEIRA

A água na madeira pode encontrar-se no interior da parede celular como água de impregnação ou preenchendo as cavidades celulares na forma de vapor ou líquido, então referida como água livre (SKAAR, 1972).

De acordo com Skaar (1988) o termo "Ponto de Saturação das Fibras" foi aplicado originalmente por Tiemann em 1906, que observou a existência de um certo nível ou ponto do teor de umidade em que, abaixo deste, as propriedades mecânicas da madeira sofriam um aumento significativo, enquanto acima deste ponto as propriedades mecânicas não sofriam decréscimo, mas mantinham-se constantes. Uma vez que apenas a parede celular exerce influência nas propriedades mecânicas da madeira, tal ponto do teor de umidade deveria significar que o conteúdo de água residual na madeira estaria então na parede celular, enquanto os lumes celulares estariam vazios. Seria esse ponto, então, o ponto de saturação das fibras (SKAAR, 1988).

O teor de umidade influencia significativamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira, dureza, usinagem, condutividade térmica e outras propriedades relacionadas ao processamento da madeira (KOLLMANN; CÔTÈ JÚNIOR, 1968).

A variação dimensional do material madeira em função da interação desta com a variação da umidade do meio é a propriedade mais desfavorável desse material, de tal modo que incrementar a estabilidade dimensional da madeira é uma busca permanente em muitos segmentos que trabalham com a madeira maciça (KOLLMANN; CÔTÈ JÚNIOR, 1968).

3.3 TENSÕES DE SECAGEM

Segundo Simpson (1991) a contração da madeira é a razão principal de muitos problemas que ocorrem durante a secagem e após esta. As tensões de secagem surgem porque a madeira seca de modo desuniforme em seus sentidos tangencial, radial e longitudinal, bem como mais rapidamente na superfície do que no interior. Dessa forma, a região mais externa da peça de madeira perde umidade abaixo do ponto de saturação das fibras e começa a contrair antes da região mais interna estar pronta para contrair também, o que gera as tensões (SIMPSON, 1991).

McMillen (1958) menciona que, quando surge uma tensão em uma região da madeira, outra região deverá balancear essa tensão, de modo a estabilizar a peça. Quando essa tensão ultrapassa um limite proporcional, ou for uma tensão que, mesmo abaixo do limite proporcional, ocorra por longo período do ciclo, causará uma deformação ou defeito irreversível na peça de madeira. Quando um material é submetido à ação de uma força ou, no caso da madeira, a um esforço de compressão, que é uma condição dinâmica da natureza deste material, este fica estressado ou tensionado (MCMILLEN, 1958).

De acordo com McMillen (1958), no caso de uma situação de estresse de curta duração e abaixo do limite proporcional, a tensão desaparece quando a carga é liberada, ou seja, é uma tensão elástica. Ao submeter o material a um esforço além do limite proporcional ou mesmo abaixo deste, porém aplicado por um longo período de tempo, produz uma tensão que não desaparece após a liberação da

carga, a qual seria uma tensão permanente. Dessa forma, tensões de secagem residuais são produzidas por estes esforços, em função de sua intensidade e duração.

De acordo com Salinas *et al.* (2015) as tensões de secagem são as principais causas de defeitos na madeira, como rachaduras e deformações. Em razão disto, é comum as empresas utilizarem de uma etapa de acondicionamento da madeira após a secagem, submetendo a madeira seca à vapor saturado e elevada temperatura, com finalidade de aliviar essas tensões (SALINAS *et al.*, 2015).

3.4 AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES DE SECAGEM

3.4.1 Teste de garfo

O método mais utilizado é o chamado "teste de garfo" que, conforme Simpson (1991) é um método em que pode-se visualizar a liberação das tensões pelo corte incompleto da seção. O desbalanceamento das tensões entre a região externa e a região interna após o corte da serra fará com que os pinos se curvem, conforme a intensidade do estresse causado na madeira, podendo ser classificado em baixo ou elevado.

McMillen (1958) apresenta uma forma adaptada do teste de garfo clássico, em que a retira-se uma seção transversal da peça, com largura definida, mede-se o comprimento da seção antes de se iniciar os cortes e então corta-se a seção em dez divisões com iguais dimensões, sem separá-las. Mede-se então o comprimento de cada divisão do garfo e plota-se os dados obtidos em um gráfico, usando como referência no eixo das abscissas o valor obtido de comprimento da seção.

Simpson (1991), afirma que para se ter uma boa compreensão das tensões de secagem, faz-se necessário ter uma ideia do teor de umidade das amostras e do gradiente de umidade nestas. O mesmo autor ainda sugere cortar três seções: a primeira deve ser cortada, pesada e colocada para secar em estufa, sendo pesada novamente e o teor de umidade calculado. A segunda seção deve ser cortada na forma de duas "conchas" ou regiões externas, com um quarto da espessura total da madeira cada, e o núcleo deve ter metade da espessura total da madeira, os três são pesados, secos e repesados para calcular o teor de umidade. Por fim, a terceira

seção deve ser cortada como no teste de garfo, para visualizar-se a reação das tensões.

3.4.2 Método das divisões

McMillen (1958) apresenta como outra metodologia para avaliar tensões de secagem, proceder o corte completo da seção em "fatias" de espessuras iguais, ao invés de manter a forma de garfo. Mede-se com micrômetro o comprimento de cada divisão antes e após o corte, construindo-se um gráfico. Calcula-se também o teor de umidade em cada fatia, gerando um gráfico que demonstra a relação direta entre as tensões, representada pela deformação das peças, e o gradiente de umidade. A amostragem realizada ao longo do ciclo fornece a informação da evolução periódica das tensões e gradiente de umidade na peça.

Salienta-se que da mesma amostra retira-se mais de uma seção, em momentos diferentes do ciclo de secagem, ou seja, retira-se a peça da câmara, remove-se a seção para realizar o teste de garfo e coloca-se a tábua novamente na estufa para continuar o processo de secagem, para a posterior retirada de uma outra amostra.

Segundo McMillen (1958), ambos os métodos – garfo adaptado e fatias ou divisões – caracterizam muito bem os efeitos dos esforços de tração (na porção exterior da peça, que sofre um encurtamento) e de compressão (no interior da peça, pressionado pelo exterior e que, portanto, sofre um alongamento).

O teste de garfo clássico é essencialmente qualitativo, no entanto, uma das formas de torna-lo qualitativo é pelo cálculo da "resposta do garfo". Füller (1995) comenta que poucos estudos tem sido direcionados para a interpretação do teste de garfo, bem como não há um consenso da geometria de corte do garfo. O autor observou que a resposta do teste de garfo é fortemente influenciada pela espessura do dente, de modo que quanto menor a espessura, maior a resposta.

3.4.3 Outros métodos de avaliação das tensões de secagem

Tarmian, Sepeher e Rahimi (2009) avaliaram o comportamento das tensões de secagem em madeira normal de *Populus nigra* L. e madeira com tensões de crescimento, estimando as tensões de secagem nos eixos tangencial e radial da

madeira utilizando o teste de garfo e no eixo longitudinal utilizando um aparelho chamado "*stress gauge*". Quanto à resposta dos planos radial e tangencial à formação de tensões de secagem, os autores observaram elevado nível de tensão nas peças tangenciais, não diferindo estatisticamente entre amostras confeccionadas com madeira normal ou com tensões de crescimento.

Diawanich; Matan e Kyokong (2010) comentam que, em razão da interrupção periódica do ciclo de secagem, e devido ao teste de garfo e o teste de fatias serem métodos destrutivos de avaliação das tensões de secagem, é quase impossível realizar a adaptação de tais técnicas para a medição em tempo real da evolução do estresse nas peças de madeira, fazendo-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos.

Allegretti e Ferrari (2008) desenvolveram um sensor para medição direta das tensões de secagem na madeira, o qual consiste em um manômetro de silicone micro usinado inserido em uma cápsula cilíndrica de teflon. Insere-se o sensor em um orifício feito na madeira, a uma determinada profundidade, portanto o sensor mensura diretamente a tensão de compressão produzido pelo encolhimento no diâmetro do orifício. De acordo com os autores, é possível observar a tendência de desenvolvimento da tensão durante o processo de secagem e pontos críticos podem ser identificados, como o tempo de reversão do estresse e o efeito da fase de acondicionamento no estresse interno.

Sánchez (2017) utilizou a extensometria para determinar as deformações resultantes das tensões de secagem em madeira de *Corymbia citriodora*. O equipamento extensômetro é utilizado na medição de deformações causadas por tensões de crescimento em árvores. Possui um relógio comparador acoplado que mede a deformação pelo afastamento entre dois pinos, longitudinalmente fixados nas superfícies das tábuas em orifícios de 20 mm de diâmetro. O autor observou que as tensões de secagem foram maiores na fase pós secagem, o acondicionamento a vapor foi satisfatório no alívio das tensões e a extensometria mostrou ser uma técnica viável para medição das tensões de secagem da madeira.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 PREPARAÇÃO DE MATERIAL PARA COLETA DE DADOS

Em procedimento realizado no Laboratório de Secagem da Madeira, pertencente ao Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná, foi conduzido o experimento de avaliação do nível das tensões de secagem geradas em madeira de *Pinus taeda* L.

Utilizou-se de peças de madeira verde que estavam mantidas em câmara fria no Laboratório de Secagem. As peças foram destopadas, padronizando-se as dimensões em 750 x 140 x 40 mm (comprimento, largura e espessura). Selecionouse três peças radiais e três tangenciais, a fim de verificar a influência do plano de corte no desenvolvimento e comportamento das tensões de secagem.

Foram testados dois programas de secagem, um com temperatura máxima de 70°C (Tabela 1) destinado para uso moveleiro e outro com temperatura máxima de 90°C (Tabela 2), destinado para embalagens. Os programas de secagem utilizados foram obtidos de Klitzke (2002).

TABELA 1 - PROGRAMA DE SECAGEM PARA TÁBUAS DE PINUS COM TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 70°C

ΕΤΑΡΑ	TU (%)	TBS (°C)	TBU (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
AQUECIMENTO	5 horas	70	70	100	22,0	-
SECAGEM FASE 1	Verde-50	70	64	74	11,0	-
SECAGEM FASE 2	50-40	70	62	67	9,4	4,8
SECAGEM FASE 3	40-35	70	59	59	8,0	4,7
SECAGEM FASE 4	35-30	70	57	53	7,1	4,6
SECAGEM FASE 5	30-25	70	54	45	6,1	4,5
SECAGEM FASE 6	25-20	70	52	40	5,5	4,1
SECAGEM FASE 7	20-15	70	51	37	5,2	3,4
SECAGEM FASE 8	15-10	70	50	35	5,0	2,5
ACONDICIONAMENTO	6 horas	70	63	73	10,5	1

FONTE: Klitzke (2002).

Onde: TU = Teor de umidade da madeira; TBS = Temperatura de bulbo seco; TBU = Temperatura de bulbo úmido; UR = Umidade relativa do ar; UE = Umidade de equilíbrio da madeira; PS = Potencial de secagem.

TABELA 2 - PROGRAMA DE SECAGEM PARA TÁBUAS DE PINUS COM TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 90°C

FASE	TU (%)	TBS (°C)	TBU (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
AQUECIMENTO	5 horas	90	90	100	22,0	-
SECAGEM FASE 1	Verde-50	90	82	72	9,0	-
SECAGEM FASE 2	50-40	90	80	67	7,9	5,7
SECAGEM FASE 3	40-35	90	77	59	6,7	5,6
SECAGEM FASE 4	35-30	90	75	54	6,0	5,4
SECAGEM FASE 5	30-25	90	73	49	5,5	5,0
SECAGEM FASE 6	25-20	90	71	45	5,0	4,5
SECAGEM FASE 7	20-15	90	69	41	4,5	3,9
SECAGEM FASE 8	15-10	90	68	39	4,4	2,8
ACONDICIONAMENTO	6 horas	90	84	74	10,5	1

FONTE: Klitzke (2002).

Onde: TU = Teor de umidade da madeira; TBS = Temperatura de bulbo seco; TBU = Temperatura de bulbo úmido; UR = Umidade relativa do ar; UE = Umidade de equilíbrio da madeira; PS = Potencial de secagem.

4.2 SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL SEMI-INDUSTRIAL

Na construção da pilha foram utilizadas 54 peças de madeira, distribuídas em seis camadas com nove peças em cada camada, sendo as camadas separadas por sarrafos separadores com 25 mm de espessura (Figura 1).



FIGURA 1 - CARGA DE MADEIRA DE PINUS PARA SECAGEM

FONTE: O autor (2019).

A câmara de secagem utilizada neste trabalho é um modelo semi-industrial metálico da marca "Kiefer" (Figura 2), com capacidade nominal de 1,0 m³ de madeira serrada e gradeada. Possui um comando elétrico central que rege os sistemas de aquecimento, vaporização, ventilação e circulação de ar. Apresenta sensores eletrônicos do tipo PT100 para medição das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, formando um psicrômetro para controle da umidade relativa na câmara (KLITZKE, 2002).

FIGURA 2 - COMPONENTES DA CÂMARA DE SECAGEM CONVENCIONAL



FONTE: O autor (2019).

Onde: (A) Câmara de secagem; (B) Caldeira elétrica; (C) Controlador lógico programável (CLP); (D) Damper frontal de entrada de ar; (E) Damper de saída de ar.

Para a supervisão da secagem, a câmara é dotada de um sistema de gerenciamento automatizado que permite monitorar, controlar e modificar as variáveis relevantes ao processo de secagem, como a velocidade de circulação do ar, as temperaturas de bulbo seco e úmido, a umidade relativa e a perda de umidade das madeiras (Figura 3).

Est.Met. 0,0°C 0,0% 0,0% 0% LIGADA 2 28,5% 3 76,1% 2 27,4% 78,7% 3 34,4% 7 83 55,4% d 30,5% 0 04,0% 50,5% ٥ 🗖 st.

FIGURA 3 - PROGRAMA UTILIZADO PARA A SUPERVISÃO DA SECAGEM

FONTE: O autor (2019).

A medição da umidade da madeira foi realizada por meio de quatro pares de pinos sensores (método elétrico resistivo). Os pinos sensores foram distribuídos em peças aleatoriamente na pilha. O programa de computador utilizado para controle das variáveis do processo de secagem foi o SV520 Power-View (v 2.3.6.7) desenvolvido pela empresa Marrari.

As Figuras 4 e 5 representam as duas cargas de madeira e a disposição das peças amostradas em cada pilha. As tábuas com os pares de pinos sensores foram colocadas de maneira dispersa, a fim de fornecer de maneira mais representativa as condições da pilha durante o ciclo de secagem.

Colocou-se as amostras utilizadas na avaliação das tensões de secagem na extremidade da pilha, próximas da porta, para facilitar a retirada destas para realizar os testes. Aplicou-se um adesivo selante nos topos destas peças, procedimento tomado a fim de evitar a perda acentuada de umidade pelos topos das amostras.



As amostras da avaliação de contração e densidade aparente foram colocadas em camadas e posições semelhantes, com intuito de obter-se condições similares de secagem destas peças.

FIGURA 4 - DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS DE PINUS NA PILHA DO CICLO DE ATÉ 70°C

Camada 1									Tangencial 1
Camada 2				1 e 6					Radial 1
Camada 3		Amostra 2	2 e 5				Amostra 1	Tangencial 2	
Camada 4		Amostra 4				3 e 7		Amostra 3	Radial 2
Camada 5		Amostra 6					4 e 8	Amostra 5	Tangencial 3
Camada 6									Radial 3
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Peça 6	Peça 7	Peça 8	Peça 9

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 5 - DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS DE PINUS NA PILHA DO CICLO DE ATÉ 90°C

Camada 1									Tangencial 1
Camada 2				1 e 6					Radial 1
Camada 3		Amostra 2				2 e 5	Amostra 1	Tangencial 2	
Camada 4		Amostra 4			3 e 7			Amostra 3	Radial 2
Camada 5		Amostra 6					4 e 8	Amostra 5	Tangencial 3
Camada 6									Radial 3
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Peça 6	Peça 7	Peça 8	Peça 9

Legenda								
Peças de madeira que compõem o lote								
Peças nas quais colocou-se os pares de pinos sensores								
Peças amostradas para medição da contração da madeira								
Peças amostradas para medição das tensões de secagem								

FONTE: O autor (2019).

4.3 TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA

No momento do destopo das tábuas para a formação da carga a ser testada foram selecionadas aleatoriamente 10 amostras para medição da umidade inicial da carga. O teor de umidade foi obtido na base seca, utilizando o método gravimétrico e a equação (1), conforme norma COPANT 460 (1972).

Na determinação das tensões de secagem dos dois métodos estudados obteve-se também os teores de umidade final das amostras analisadas.

$$TU = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100 \qquad (1)$$

Onde:

TU = Teor de umidade (%);

Mu = Massa úmida (g);

Ms = Massa seca (g).

4.4 CONTRAÇÃO DA MADEIRA

Para a medição da contração da madeira em largura e espessura selecionouse três (03) amostras radiais e três (03) amostras tangenciais. As amostras selecionadas foram marcadas para serem realizadas as medidas sempre no mesmo ponto, antes e após a secagem (Figura 6). Seguiu-se as recomendações da norma COPANT 461 (1972).

FIGURA 6 - MARCAÇÃO DE TOPO PARA O TESTE DE CONTRAÇÃO



FONTE: O autor (2019).

Posteriormente, determinou-se contração parcial tangencial e contração parcial radial da madeira causada pela secagem, de acordo com a equação (2).

$$Contração = \frac{Dimensão verde - Dimensão seca}{Dimensão verde} \times 100$$
(2)

4.5 MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MADEIRA

Massa específica aparente foi determinada conforme as recomendações da norma COPANT – 462 (1972), utilizando-se a equação (3).

$$MEap = \frac{Mi}{Vi} \qquad (3)$$

Onde:

MEap = Massa específica aparente (g/cm³);

Mi = Massa em um teor de umidade i (g);

Vi = Volume em um teor de umidade i (cm³).

4.6 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE

4.6.1 Método de divisões de McMillen (1958)

Para avaliar as tensões em cada ciclo de secagem realizou-se o teste de fatias, adaptado de McMillen (1958) (Figura 7).

FIGURA 7 - ESQUEMA DE CORTE E MEDIÇÃO DO MÉTODO DE DIVISÕES



FONTE: Adaptado de McMillen (1958).

Selecionou-se três peças de madeira com plano corte radial e três peças com corte tangencial, das quais amostrou-se uma seção de dimensões 140 x 40 x 25 mm, sendo retiradas três seções por peça no ciclo de 70°C e duas seções por peça no ciclo de 90°C. Cada peça forneceu as seções em diferentes momentos do ciclo, sendo estes:

- Teor de umidade médio da pilha próximo à 40% (Apenas no ciclo de 70°C);
- Teor de umidade médio da pilha próximo à 10% (Ciclos de 70°C e 90°C);
- Fim do ciclo de secagem (Ciclos de 70°C e 90°C).

Em cada intervenção pausou-se o ciclo de secagem no software conectado ao controlador lógico programável da estufa, abriu-se esta e retirou-se as seis peças selecionadas. Cortou-se uma seção de cada amostra (Figura 8), destopou-se a seção para evitar problemas decorrentes de não paralelismo, mediu-se o comprimento destas com paquímetro digital e então serrou-se estas seções no sentido longitudinal do corte transversal, obtendo-se cinco divisões de cada seção (Figura 9).

FIGURA 8 - EXEMPLO DE SEÇÕES RADIAL E TANGENCIAL OBTIDAS DE TÁBUAS DE PINUS



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 9 - DIVISÕES OBTIDAS NAS SEÇÕES RADIAL E TANGENCIAL DE TÁBUAS DE PINUS



FONTE: O autor (2019).

Após a separação das divisões, as tensões de secagem são liberadas, sendo mensurada então as deformações por elas provocadas, sob a forma de encurtamento ou alongamento das divisões. Mediu-se esta variação dimensional com paquímetro digital e calculou-se a diferença entre antes e depois do corte das divisões.

Determinou-se o teor de umidade das fatias através da pesagem das amostras úmidas e posteriormente secas em estufa a 103°C ± 2°C durante 24 horas, obtendo-se o teor de umidade individual de cada uma das divisões que compõem as seções (Figura 10), com estes valores, pôde-se calcular o gradiente de umidade das fatias ao longo do ciclo de secagem.

FIGURA 10 - SEQUÊNCIA DE AVALIAÇÃO DAS DIVISÕES PARA DETERMINAÇÃO DOS GRADIENTES DE UMIDADE DA MADEIRA



FONTE: O autor (2019).

Onde:

E1 e E2: Divisões externas 1 e 2, respectivamente;

11 e l2: Divisões intermediárias 1 e 2, respectivamente;

C: Divisão central.

Para determinar o gradiente de umidade da madeira, adaptou-se a metodologia de cálculo do gradiente de umidade de Simpson (1991) para a realidade do método de divisões, calculando-se então um gradiente de umidade total (GRT), gradiente de umidade central (GRC) e gradiente de umidade periférico (GRP), conforme equações a seguir. O gradiente de umidade total (Equação 4) também pode ser obtido pela soma dos gradientes de umidade central (Equação 5) e periférico (Equação 6).

$$GRT = (TU_c) - \left(\frac{TU_{e1} + TU_{e2}}{2}\right)$$
(4)

$$GRC = (TU_c) - \left(\frac{TU_{i1} + TU_{i2}}{2}\right)$$
(5)

$$GRP = \left(\frac{TU_{i1} + TU_{i2}}{2}\right) - \left(\frac{TU_{e1} + TU_{e2}}{2}\right)$$
(6)

Onde: GRT: Gradiente de umidade total (%);

GRC: Gradiente de umidade central (%);

GRP: Gradiente de umidade periférico (%);

TUc: Teor de umidade da divisão central (%);

TUe1: Teor de umidade da divisão externa 1 (%);

TUe2: Teor de umidade da divisão externa 2 (%);

TUi1: Teor de umidade da divisão intermediária 1 (%);

TUi2: Teor de umidade da divisão intermediária 2 (%).

4.6.2. Método para avaliação da qualidade da secagem de Simpson (1991)

Para comparar a técnica das divisões, utilizou-se o método de Simpson (1991) de verificação de teor de umidade final de lote, gradiente de umidade e tensões de secagem, o qual consiste no corte de três seções de cada amostra (Figura 11), com dimensões de 140 x 40 x 25 mm, marcadas como A (Teor de umidade final), B (Gradiente de umidade da madeira) e C (Teste de garfo).



FIGURA 11 - AMOSTRAS DE COMPARAÇÃO DO MÉTODO DE SIMPSON

FONTE: O autor (2019).

4.6.2.1 Teste de garfo

Como métrica do teste de garfo, usou-se a mesma técnica utilizada por Füller (1995), que consiste em medir-se o topo da seção antes do corte do garfo, depois do corte (distância externa entre dentes) e comprimento do garfo, calculando-se a relação proposta pelo autor (Equação 7), como apresentado na Figura 12.

FIGURA 12 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO DO TESTE DE GARFO



FONTE: Adaptado de Füller (1995).

$$PR = \frac{(W - W')}{L^2} \qquad (7)$$

Onde:

 $PR = Resposta do garfo (mm^{-1})$

W = Dimensão pré corte do ápice do garfo (mm);

W' = Dimensão pós corte do ápice do garfo (mm);

L = Comprimento do garfo até a base (mm).

4.6.2.2 Teste de gradiente de umidade

Conforme a metodologia proposta por Simpson (1991), cortou-se uma seção da tábua amostrada e dividiu-se esta conforme Figura 13. Obteve-se as massas úmida e seca em estufa a 103°C por 24 horas, calculando-se então o teor de umidade de cada uma das peças.

FIGURA 13 - ESQUEMA DE CORTE DE AMOSTRAS DO GRADIENTE DE UMIDADE



FONTE: Klitzke (2002).

O gradiente de umidade é calculado pela seguinte equação (8):

$$GU = (TUc) - \left(\frac{TUs1 + TUs2}{2}\right) \tag{8}$$

Onde:

GU: Gradiente de umidade (%);

TUc = Teor de umidade da peça central (%);

TUs1 = Teor de umidade da peça superficial 1 (%);

TUs1 = Teor de umidade da peça superficial 2 (%);

4.7 ANÁLISE DOS DADOS

A avaliação dos dados obtidos foi realizada em planilhas do *Microsoft Office Excel*, versão 2013, calculando-se parâmetros de estatística descritiva (média, desvio padrão, coeficiente de variação).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CURVAS DOS CICLOS DE SECAGEM

O Gráfico 1 apresenta a evolução do ciclo de secagem com temperatura de até 70°C. Os "pulsos" que aparecem nas curvas de TBS e TBU são os momentos de intervenção realizados durante o ciclo de secagem, para retirada das amostras do método de divisões.



GRÁFICO 1 - CICLO DE SECAGEM COM TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 70°C

A secagem foi realizado em cinco dias, tendo uma duração total de 120 horas e 35 minutos. A primeira intervenção ocorreu quando a pilha atingiu o teor de umidade médio de 38,5%, aproximadamente 72 horas após o início da secagem. Pausou-se o andamento do ciclo durante um total de 23 minutos. A segunda intervenção ocorreu quando o teor de umidade atingiu 11,4%, 102 horas após o início da secagem, pausando-se e o ciclo durante 21 minutos.

O Gráfico 2 apresenta a evolução do ciclo de secagem com temperatura máxima de 90°C. O "pulso" nas curvas de TBS e TBU corresponde ao momento de intervenção no andamento do ciclo. A secagem foi realizado em quatro dias, tendo uma duração total de 90 horas e 44 minutos. A intervenção ocorreu aos 11% de

FONTE: O autor (2019).

umidade média da pilha, cerca de 68 horas após o início da secagem, pausando-se o ciclo durante 21 minutos.



GRÁFICO 2 - CICLO DE SECAGEM COM TEMPERATURA MÁXIMA DE ATÉ 90°C

5.2 RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela 3 a seguir apresenta os resultados médios obtidos nos testes de teor de umidade inicial e final da madeira, massa específica aparente verde e seca, bem como contração parcial tangencial e radial.

TABELA 3 - TESTES REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE PINUS E DOS DOIS CICLOS DE SECAGEM EXECUTADOS

Teste realizado	Parâmetros	Unidade	Ciclo 70°C	Ciclo 90°C
	Média	(%)	111,66	100,89
leor de umidade inicial	Desvio	(%)	22,16	26,67
inioidi	CV	(%)	19,85	26,44
	Média	(%)	13,57	12,69
Teor de umidade final (McMillen)	Desvio	(%)	4,41	4,09
	CV	(%)	32,45	32,19
	Média	(%)	13,92	9,78
leor de umidade final (Simpson)	Desvio	(%)	4,14	4,20
	CV	(%)	29,72	42,93

FONTE: O autor (2019).

Densidade aparente verde	Média	(kg/m³)	992,42	931,01
	Desvio	(kg/m³)	20,71	29,25
	CV	(%)	2,09	3,14
Densidade	Média	(kg/m³)	533,11	494,21
	Desvio	(kg/m³)	40,89	46,34
aparente seca	CV	(%)	7,67	9,38
Contração em	Tangencial	(%)	4,27	3,80
largura	Radial	(%)	2,55	2,88
Contração em	Tangencial	(%)	5,36	5,53
espessura	Radial	(%)	4,38	4,15

FONTE: O autor (2019).

Onde: Desvio = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação; kg = quilograma; m³ = metro cúbico.

5.2.1 Teor de umidade inicial e final da madeira

Kollmann e Côtè Júnior (1968) mencionam que o teor de umidade inicial e a densidade aparente são alguns dos fatores que influenciam no tempo de secagem da madeira, daí a importância de se determinar o teor de umidade inicial do lote.

Na Tabela 3 podem ser observados os resultados do teor de umidade inicial médio das cargas utilizadas nos ciclos de até 70 e 90°C. Em ambos os ciclos de secagem realizados, os lotes de madeira encontravam-se com elevado teor de umidade inicial médio, no entanto, não de forma homogênea, conforme o coeficiente de variação de 26,44%.

A variação de umidade inicial entre lotes deve-se, em parte, a retirada prévia da carga da câmara fria do Laboratório de Secagem, na qual a madeira encontravase armazenada. A exposição da madeira à variação de umidade e temperatura do ar pode fazer com que esta perca um pouco de umidade, sobretudo na superfície e topos, e, uma vez que utilizou-se justamente das porções destopadas para verificar a umidade inicial, obteve-se esta variação.

Quanto ao teor de umidade final pelo método de McMillen (1958), obteve-se um teor de umidade médio para a seção com base na média das divisões que a compõem. Os teores de umidade finais para as duas cargas foram superiores ao teor de umidade desejado no fim do ciclo, de 10%. Além disto, a elevada variação interna da umidade, com coeficiente de variação superior a 30%, indica uma secagem desuniforme dos dois lotes.

No método de Simpson (1991), obteve-se uma umidade final média no ciclo de 70°C superior aos 10% desejados, com coeficiente de variação de 29,72%. No ciclo de 90°C, a umidade final média da madeira esteve muito próxima de 10%, mas com coeficiente de variação de 42,93% e valores situados entre 6% e 17%. Comparando-se métodos, no ciclo de 70°C a diferença do teor de umidade final entre McMillen e Simpson foi pequena, sendo mais divergente no ciclo de 90°C.

Muitos fatores podem ter influenciado os resultados de umidade final da madeira, dentre eles:

- O padrão de circulação do vento no interior da estufa: A circulação desuniforme favorece mais a retirada de umidade em uma região da pilha do que em outra, de modo que parte da madeira secará mais do que o desejado e outra parte não secará adequadamente. Esse fato também justifica o elevado coeficiente de variação.
- A possível aplicação não uniforme do produto selador nos topos das peças: Um mal selamento oferece pouca resistência à passagem de água no topo das peças, possibilitando a perda de umidade mais acentuada, ao passo que a aplicação do adesivo selante em demasia afeta significativamente essa região da peça, forçando a água a percorrer um caminho mais impeditivo pela estrutura da madeira.
- Formação de rachaduras nas peças: As rachaduras tornam-se caminhos preferenciais a passagem de água do que pela estrutura da madeira, promovendo uma perda de umidade mais acentuada.
- Anatomia da madeira: No caso de ciclos de secagem mais rigorosos, pode vir a ocorrer a aspiração de pontoação, que são estruturas que fazem as ligações entre células da madeira e por onde a água passa. A aspiração de pontoação é o fechamento dessa passagem, causada pela condição drástica de secagem. Desse modo, a passagem de água e a perda de umidade da madeira fica dificultada.
5.2.2 Massa específica aparente da madeira

Na Tabela 3 são apresentados os valores de massa específica aparente verde obtidos nos ciclos de secagem de 70 e 90°C. Obteve-se valores médios de massa específica aparente da madeira saturada de 992,42 kg/m³ para a carga do ciclo 70 e 931,01 kg/m³ para o lote do ciclo 90, valores estes distintos entre si, mas dentro da variação observada por Klitzke (2002), entre 850 kg/m³ e 1.070 kg/m³.

Quanto a densidade aparente da madeira seca (Tabela 3), obteve-se médias de 533,11 kg/m³ e 494,21 kg/m³, valores também dentro dos valores máximos obtidos por Klitzke (2002), de 380 kg/m³ à 570 kg/m³.

Com os dados levantados, fez-se também uma análise da perda de massa e de volume ao longo dos dois ciclos (Tabela 4).

Variável	Unidade	Ciclo 70	Ciclo 90
Volume da carga verde	(m³)	0,2268	0,2268
Massa específica aparente verde	(kg/m³)	992,42	931,01
Massa da carga verde	(kg)	225	211
Volume da carga seca	(m³)	0,2080	0,2080
Massa específica aparente seca	(kg/m³)	533,11	494,21
Massa da carga seca	(kg)	111	103
Redução de volume	(m³)	0,0188	0,0188
neudção de volume	(%)	8,3	8,3
Redução de neso	(kg)	114	108
Neudção de peso	(%)	50,7	51,2

TABELA 4 - PERDA DE MASSA E VOLUME NA SECAGEM DA MADEIRA

FONTE: O autor (2019).

A carga colocada em cada ciclo foi de 54 peças, nas dimensões 40 x 140 x 750 milímetros (0,00420 m³ individualmente), perfazendo um total de 0,2268 m³. Multiplicando-se pela densidade, tem-se que as duas cargas, ciclo 70 e ciclo 90 respectivamente, pesaram 225 e 211 quilogramas.

Contabilizada a contração em largura e em espessura no cálculo do volume da madeira seca, obtém-se um volume da carga de 0,2080 m³, uma redução de 8,3% ou 0,0188 m³ (volume médio individual de 0,00385 m³).

Obtendo-se a razão entre a diferença volumétrica entre lotes saturado e seco e o volume médio individual saturado, a redução seria equivalente a 4,5 peças de madeira com as mesmas dimensões das amostras saturadas.

Quanto a redução em massa, obteve-se um peso de carga seca de 111 kg no ciclo 70 e 103 kg no ciclo 90, com uma redução de 50,7% no primeiro lote e 51,2% no segundo lote.

Em processos industriais madeireiros, a redução de cerca de 50% no peso dos lotes de madeira serrada pode representar uma considerável redução nos custos, sobretudo na logística – transportar mais madeira e menos água – nos deslocamentos em pátio, no desempenho e desgaste de equipamentos, esta é a natureza estratégica da secagem da madeira.

5.2.3 Contração da madeira

Primeiramente, deve-se observar a relação entre as posições de medição e o plano em que estas posições encontram-se. Uma amostra caracterizada como pertencente ao plano de corte tangencial tem a lateral da espessura enquadrada no plano radial, sendo o contrário verdadeiro, sendo efetuadas as medições e os cálculos conforme esse critério.

Para a contração em largura (Tabela 3), obteve-se contrações médias de 2,55% no plano radial e 4,27% no plano tangencial, para o ciclo com temperatura máxima de até 70°C. Quanto ao ciclo com temperatura máxima de até 90°C, obteve-se contrações médias de 2,88% no plano radial e 3,80% no plano tangencial.

Ballarin e Palma (2003) obtiveram contração radial média de 4,84% e tangencial média de 7,42% para a madeira juvenil, obtidos com corpos de prova confeccionados conforme norma ABNT NBR 7190 (1997). Uma vez que a metodologia de Ballarin e Palma (2003) é mais precisa, os valores obtidos por eles são superiores aos obtidos neste estudo, mas seguem a mesma tendência daquele trabalho no tocante a variação do plano tangencial ser superior ao plano radial.

Klitzke (2002) obteve valores de contração em largura, para o ciclo com temperatura máxima de até 70°C, entre 3,37% e 4,12%, enquanto no ciclo de até

90°C, o autor obteve contrações em largura entre 3,52% e 4,14%. Tais valores são próximos aos atingidos neste estudo, porém não distinguidos entre planos de corte radial e tangencial.

Para a contração em espessura (Tabela 3), obteve-se contrações médias de 4,38% no plano radial e 5,36% no plano tangencial, para o ciclo 70. Quanto ao ciclo 90, obteve-se contrações médias de 4,15% no plano radial e 5,53% no plano tangencial.

Klitzke (2002) obteve valores de contração em espessura, para o ciclo de até 70°C, entre 3,81% e 4,09%, enquanto no ciclo de até 90°C, o autor obteve contrações em espessura entre 3,99% e 4,36%. Tais valores são próximos aos atingidos neste estudo e não distinguidos entre planos de corte radial e tangencial.

De acordo com Hann (1965) citado por Klitzke (2002), a contração em espessura é maior do que a contração em largura quando utiliza-se temperaturas de secagem superiores a 60°C, além de que a contração em espessura é maior em razão das células superficiais terem contração restringida em largura pelas células mais internas (as quais tendem a encontrar-se em teor de umidade superior ao ponto de saturação das fibras e, portanto, não iniciaram a contrair), mas podem contrair livremente em espessura, fato este observado neste trabalho.

5.3 TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE A 40%

A intervenção à 40% ocorreu apenas para o ciclo de 70°C. O Gráfico 3 apresenta o padrão de deformações e gradiente de umidade médios para as amostras do plano tangencial, enquanto o Gráfico 4 apresenta para o plano radial. Comparando-se os gráficos pode-se verificar principalmente a influência do plano de corte no comportamento do perfil do gradiente de umidade e na intensidade da deformação.

GRÁFICO 3 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS NO PLANO TANGENCIAL A 40% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)



FONTE: O autor (2019).

Como enunciado por Kollmann e Côtè Júnior (1968), a transmissão de umidade na madeira é fortemente afetada pela sua estrutura, sendo o plano radial mais impeditivo ao movimento do conteúdo de umidade ao longo da madeira do que o plano radial, fato este verificável no Gráfico 4.

GRÁFICO 4 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL A 40% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)



FONTE: O autor (2019).

A Tabela 5 apresenta os gradientes de umidade total, central e periférico para as amostras obtidas nesta intervenção. Observa-se que o gradiente de umidade total do plano radial é quase o dobro do plano tangencial.

TABELA 5 - GRADIENTE DE UMIDADE NA INTERVENÇÃO A 40%, MÉTODO DAS DIVISÕES

Plano de corte	Ciclo	GRT	GRC	GRP
(T/R)	(°C)	(%)	(%)	(%)
Tangencial	7000	22,46	8,26	13,84
Radial	70°C	42,02	12,06	29,96

FONTE: O autor (2019).

Onde: GRT = Gradiente de umidade total; GRC = Gradiente de umidade central; GRP = Gradiente de umidade periférico.

O gradiente de umidade central, em ambos os planos, indica que a diferença entre a divisão central e as intermediárias não é tão acentuada quanto a diferença entre as divisões intermediárias e as divisões externas (Gradiente de umidade periférico), devido à perda de umidade ser mais acentuada na superfície pela influência da circulação do vento no interior da câmara de secagem, e pela passagem de água ser mais impedida das zonas central e intermediária para a externa, sendo tal efeito mais acentuado no plano radial do que no tangencial.

Na análise da deformação, nota-se que o comportamento das peças radiais (Gráfico 4) é mais homogêneo que o das peças tangenciais (Gráfico 3), com alongamento médio mais acentuado na divisão central das amostras radiais e encurtamento médio mais acentuado na divisão de uma das bordas das amostras tangenciais. De modo geral isto não confere com o esperado, esperava-se um padrão do perfil de deformações mais suave no plano radial, em qualquer região da amostra, enquanto no plano tangencial a tal perfil seria mais destacado, devido a contração parcial tangencial ser maior do que a contração parcial radial, como visto anteriormente na Tabela 3.

5.4 TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE A 10%

Neste momento do ciclo de secagem observa-se significativa ação das tensões de secagem, principalmente no plano de corte tangencial. Há pouca distinção no padrão de deformações obtidas entre os gráficos do plano tangencial no ciclo de 70°C (Gráfico 5) e de 90°C (Gráfico 6), a não ser pelas divisões intermediárias, que apresentaram encurtamento maior no ciclo de 70°C.

GRÁFICO 5 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO TANGENCIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)



FONTE: O autor (2019).

O elevado gradiente de umidade observado para o plano tangencial do ciclo de 90°C (Gráfico 6) não era de todo esperado, mas pode ser derivado de alguns fatores, como:

- Um possível excesso de aplicação do adesivo selante nos topos das amostras, tornando o fluxo de água mais impeditivo do que o normal para o plano tangencial.
- O padrão de circulação do vento no interior da câmara de secagem, no caso de as amostras estarem numa região da pilha com pouca ventilação, o que impactaria na redução da perda de umidade.
- A nível celular, a aspiração de pontoações, o que dificultaria a passagem de água pelo lúmen celular, forçando-a a percorrer um caminho mais impeditivo (difusão impedida), situação essa causada pela condição mais rigorosa de secagem.

GRÁFICO 6 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO TANGENCIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 90°C)





No plano radial, as deformações foram mais acentuadas no ciclo com temperatura máxima de 90°C (Gráfico 8), bem como o gradiente de umidade nesse ciclo foi menos pronunciado do que no ciclo de 70°C (Gráfico 7), fatos estes esperados, pois a maior quantidade de energia disponível no ciclo de 90°C influenciaria na maior perda de umidade das amostras (mais energia para evaporar a água), bem como causaria um maior tensionamento da estrutura da madeira, provocando deformações mais proeminentes do que o ciclo mais brando.

GRÁFICO 7 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 70°C)



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 8 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL A 10% DE UMIDADE (CICLO DE 90°C)



FONTE: O autor (2019).

Número da divisão: (1) = Divisão externa 1; (2) = Divisão intermediária 1; (3) = Divisão central; (4) = Divisão intermediária 2; (5) = Divisão externa 2.

Quanto a Tabela 6, referente aos gradientes de umidade total, central e periférico, fica evidente a situação observada no Gráfico 6 para o plano tangencial do ciclo de 90°C. No plano radial, observa-se a influência da temperatura máxima, forçando o gradiente de umidade à uma situação mais equilibrada entre as zonas central, intermediária e externa, fato este esperado.

TABELA 6 - GRADIENTE DE U	MIDADE NA	INTERVENÇÃO	A 10%,	MÉTODO	DAS
DIVISÕES					

Plano de corte	Ciclo	GRT	GRC	GRP
(T/R)	(°C)	(%)	(%)	(%)
Tanganaial	70	7,55	4,20	3,35
i angenciai	90	22,73	13,77	8,96
Dediel	70	17,95	3,84	14,11
Radial -	90	13,86	5,54	8,32

FONTE: O autor (2019).

Onde: GRT = Gradiente de umidade total; GRC = Gradiente de umidade central; GRP = Gradiente de umidade periférico.

5.5 TENSÕES DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE AO FIM DO CICLO

Ao fim de um ciclo de secagem de madeira, espera-se atingir o teor de umidade desejado, bem como a uniformidade no teor de umidade das peças, fatos estes não conquistados de todo neste estudo.

O perfil de tensões foi mais acentuado no plano tangencial, indicando que o tempo de acondicionamento foi insuficiente para o alívio das tensões de secagem, em ambos os ciclos de 70°C (Gráfico 9) e 90°C (Gráfico 10), sendo, no entanto, mais destacado no ciclo de secagem mais rigoroso.

GRÁFICO 9 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO TANGENCIAL APÓS ACONDICIONAMENTO (CICLO DE 70°C)



FONTE: O autor (2019).





FONTE: O autor (2019).

Observou-se novamente a influência impeditiva do plano radial em ambos os ciclos de 70°C (Gráfico 11) e 90°C (Gráficos 11 e 12), no qual o teor de umidade da divisão central permaneceu acima de 20% para os dois ciclos de secagem, quando o teor de umidade médio da carga deveria estar em 10%.

GRÁFICO 11 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL APÓS ACONDICIONAMENTO (CICLO DE 70°C)



FONTE: O autor (2019).

O padrão de deformações foi pouco mais acentuado no ciclo de 90°C do que no ciclo de 70°C para o plano radial, fato este esperado em razão de o gradiente de umidade ser mais destacado neste ciclo, levando a uma maior contração das divisões externas e provocando maiores tensões na estrutura da madeira

GRÁFICO 12 - GRADIENTE E DEFORMAÇÃO MÉDIOS EM PLANO RADIAL APÓS ACONDICIONAMENTO (CICLO DE 90°C)



FONTE: O autor (2019).

O gradiente de umidade total da madeira (GRT) obtido no método de McMillen (Tabela 7) apresenta-se maior no ciclo de 90°C do que no ciclo de 70°C, sendo maior no plano radial do que no tangencial, resultados esperados dada a maior disponibilidade de energia para retirada de água no ciclo de 90°C, o que ressalta a diferença de teores de umidade entre centro e superfície e pela característica mais impeditiva do plano radial.

TABELA 7 - GRADIENTE DE UMIDADE APÓS ACONDICIONAMENTO, MÉTODO DAS DIVISÕES

Plano de corte	Ciclo	GRT	GRC	GRP
(T/R)	(°C)	(%)	(%)	(%)
Tangencial	70	1,22	0,19	1,03
	90	1,95	0,07	1,88
Dediel	70	8,61	3,84	4,77
Radial	90	11,08	4,99	6,09

FONTE: O autor (2019).

Onde: GRT = Gradiente de umidade total; GRC = Gradiente de umidade central; GRP = Gradiente de umidade periférico.

Nota-se também na Tabela 7 que o gradiente de umidade central é muito baixo no plano tangencial, o que demonstra que a diferença de teor de umidade entre as divisões central e intermediárias é próxima de zero. O gradiente de umidade periférico é maior em razão da fase de acondicionamento da madeira, em que elevase a umidade relativa do ar dentro da câmara de secagem, cedendo umidade para a superfície da madeira.

No método de Simpson (Tabela 8), o plano radial segue a mesma tendência observada no método de McMillen, em que o gradiente de umidade da madeira é maior no ciclo de 90°C em razão das diferenças de umidade entre zonas central e intermediária ser ressaltada, no entanto, o mesmo não é observado para o plano tangencial. Uma explicação para o fato seria a formação de rachaduras na madeira devido a condição mais rigorosa do ciclo. O rompimento da estrutura da madeira abre um caminho preferencial para a passagem da água, levando a uma perda de umidade mais acentuada.

Plano de corte	Ciclo	Gradiente de umidade
(T/R)	(°C)	(%)
Tongonaial	70	3,86
Tangenciai –	90	1,19
Padial	70	4,85
Radiai	90	5,34

TABELA 8 - GRADIENTE DE UMIDADE APÓS ACONDICIONAMENTO, MÉTODO DE SIMPSON (1991)

FONTE: O autor (2019).

A partir da análise realizada, pode-se dizer que o método das divisões ou fatias de McMillen (1958) é útil para avaliação de deformação causada pelas tensões de secagem e para verificação de sua relação com o gradiente de umidade.

Dado o trabalho de se interferir com frequência no ciclo de secagem, o método das divisões pode ser mais indicado para adequação de programas de secagem, por fornecer uma maior quantidade de informações, não da pilha como um todo, mas em cada uma das diferentes posições das amostras na pilha, mostrando a variação das condições de clima no interior da câmara de secagem mais detalhadamente.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados do teste de garfo, para os planos tangencial e radial nos ciclos de 70°C e 90°C. Realizou-se o teste conforme metodologia de Simpson (1991) e calculou-se utilizando a equação apresentada por Füller (1995).

		Ciclo 70°C		Ciclo	90°C
Amostra	Plano de	PR	Média	PR	Média
(n)	Medição	(mm-1)	(mm-1)	(mm-1)	(mm-1)
1	Radial	0,000645		0,000437	
2	Radial	0,000641	0,000675	0,000608	0,000531
3	Radial	0,000738		0,000546	
4	Tangencial	0,000713		0,000794	
5	Tangencial	0,000887	0,000830	0,000643	0,000632
6	Tangencial	0,000890	_	0,000459	
Média	-	0,000752	-	0,000581	-
Desvio Padrão	-	0,000102	-	0,000120	-

TABELA 9 - RESPOSTA DO TESTE DE GARFO

CV (%) - 13,58% - 20,70% -

FONTE: O autor (2019).

Onde: PR = Resposta do garfo (Prong response); CV = Coeficiente de variação.

Quando comparado o padrão de deformações do método de McMillen (1958) com os resultados do teste de garfo (Tabela 9) conforme metodologia de Simpson (1991) e Füller (1995), a resposta parece divergir dos resultados obtidos pelo primeiro método, apresentando-se mais pronunciada no ciclo de 70°C do que no ciclo de 90°C. Também a diferença das respostas do garfo entre planos foi mais acentuada no ciclo de 70°C (0,000155 mm-1) do que no de 90°C (0,000101 mm-1), fato este não esperado.

Uma das razões poderia ser que o tempo de acondicionamento utilizado no ciclo de 70°C foi de cinco horas, e não de seis horas como previsto no programa de secagem de Klitzke (2002), enquanto no ciclo de 90°C foi de seis horas, como consta naquele programa, falha esta que possa justificar uma menor resposta do garfo no ciclo de 90°C.

Outra explicação plausível para tal comportamento está no surgimento de rachaduras nas amostras do ciclo de 90°C, ou seja, as tensões de secagem podem ter atingido um nível de intensidade em que a estrutura da madeira não foi capaz de resistir e parte desse potencial foi empregado na formação de defeitos na madeira, como pode ser observado nas Figuras 14 e 15.



FIGURA 14 - SEÇÃO TANGENCIAL DO CICLO DE 90°C COM RACHADURAS

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 15 - VISTA LATERAL DE SEÇÕES RECÉM CORTADAS DO CICLO DE 90°C, COM PRESENÇÃO DE RACHADURAS INTERNAS E REGIÕES ÚMIDAS



FONTE: O autor (2019).

Tarmian, Sepeher e Rahimi (2009), avaliando madeira de *Populus nigra* L. nos planos tangencial e radial, bem como madeira com e sem tensões de crescimento, encontraram valores de resposta de garfo na ordem de 0,0007 mm-1 em suas amostras, nas dimensões de 40 x 25 mm de seção por 15 mm de espessura. A resposta do garfo foi pouco distinta entre os planos de corte, mas significativa na madeira tensionada, chegando a 0,0019 mm-1, quase o triplo da madeira normal.

De modo geral, as tensões de secagem são um problema de difícil controle na indústria madeireira, dada a influência dos parâmetros de secagem na formação e intensidade dessas tensões. O teste mais utilizado hoje é o teste de garfo, o qual é majoritariamente empregado de forma qualitativa, sendo uma indicação para futuros trabalhos a possível elaboração de uma escala de intensidade de tensões de secagem com base no cálculo da resposta do garfo, a qual seria útil aos trabalhos desse ramo.

6 CONCLUSÃO

- O método das divisões ou fatias de McMillen (1958) apresentou respostas similares aquelas obtidas pelo método de avaliação de tensões de secagem de Simpson (1991).
- O plano de corte da madeira influenciou na intensidade das tensões de secagem, sendo o plano radial aquele que apresentou menores níveis de tensões em ambas as temperaturas máximas utilizadas na secagem.
- 3. O gradiente de umidade foi maior no ciclo de 90°C e no plano radial.
- 4. No método de divisões, o ciclo de secagem com temperatura máxima de 70°C apresentou valores menores de deformação, o que indica que o ciclo mais brando promoveu menores níveis de tensões de secagem.
- 5. O ciclo de secagem com temperatura máxima de 90°C apresentou menores níveis de tensões de secagem residuais no teste de garfo em ambos os plano de corte, porque houve liberação parcial das tensões de secagem na formação de defeitos na madeira.

REFERÊNCIAS

ALLEGRETTI, O.; FERRARI, S. A sensor for direct measurement of internal stress in wood during drying: Experimental tests toward industrial application. **Drying Technology**, v. 26, n. 9, p. 1150–1154. 2008. Disponível em: ">http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselc&AN=edselc.2-52.0-49549088392&lang=pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 22 ago. 2019.

AMADEU, M. S. U. dos S.; MENGATTO, A. P. de F.; STROPARO, E. M.; ASSIS, T. T. S. de, Manual de normalização de documentos científicos de acordo com as normas da ABNT. Curitiba: Editora UFPR, 2017, 327 p.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. P. Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de Pinus taeda L. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 13-22, 2003. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/%0D/rarv/v27n3/a14v27n3.pdf>. Acesso em 06 ago. 2019.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT 460. Método de determinación de la humedad. 1972. 12 p.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT 461. Determinación del peso especifico aparente. 1972. 8 p.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT 462. Método de determinación de la contración. 1972. 8 p.

DIAWANICH, P.; MATAN, N.; KYOKONG, B. Evolution of internal stress during drying, cooling and conditioning of rubberwood lumber. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 68, p. 1-12, 2010. Disponível em: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbl&AN=RN264721797& lang=pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 22 ago. 2019.

FÜLLER, J. Modeling prong test response during conditioning of red oak lumber. Madison, Wisconsin: USDA, Forest Products Laboratory. Jul. 1995. 7 p.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. Secagem Racional da Madeira, Nobel, São Paulo, 1988. 112 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2017**. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2019.

JANKOWSKI, I. P.; SANTOS, G. R. V. dos; ANDRADE, A. de. Secagem da Madeira Serrada de Eucalipto. **XV Jornadas Forestales de Entre Rios**, Concordia, Argentina, 26 e 27 out. 2000. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ivaldo_Jankowsky/publication/242305966_SE CAGEM_DA_MADEIRA_SERRADA_DE_EUCALIPTO1/links/56c4729508ae736e70 46e672.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2019.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeira.** Tese de doutorado (Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2002. Disponível em: < https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/2236/Uso%20do %20inversor%20de%20frequ%EAncia%20na%20secagem%20de%20maderia.pdf?s equence=1>. Acesso em: 10 out. 2019.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JR., W. A. Principles of wood science and technology. Berlin: Springer-Verlag, 1968, v. 1, p. 592.

MCMILLEN, J. M. et al. **Stresses in wood during drying**. Madison, Wis.: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1958. 52 p.

PRATA, J. G. Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (Edge Glued Panels -EGP). Tese de doutorado (Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.92D8 0FE0&lang=pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 16 ago. 2019.

RÉMOND, R.; PERRÉ, P. Drying Strategies Capable of Reducing the Stress Level of a Stack of Boards as Defined by a Comprehensive Dual Scale Model. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 10, n. 1, p. 3–18, 2008. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=32428511&lang= pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 22 ago. 2019.

SALINAS, C. et al. Unidimensional Simulation of Drying Stress in Radiata Pine Wood. **Drying Technology**, [s. l.], v. 33, n. 8, p. 996–1005, 2015. Disponível em:

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fsr&AN=102603112&lang= pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 13 ago. 2019.

SÁNCHEZ, J. Y. C. S. Extensometria aplicada à determinação das deformações resultantes das tensões de secagem em madeira de *Corymbia citriodora*. Dissertação de mestrado (Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2017. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.5374 C015&lang=pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 14 ago. 2019.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln Operator's Manual**. Madison, Wisconsin, USA. USDA Forest Service. Agriculture Handbook, v. 188, 274 p, 1991.

SKAAR, C. J. Water in Wood. Syracuse University Press, 1972. 218 p.

SKAAR, C. J. Wood-Water Relation. Springer-Verlag, 1988. 283 p.

SUSIN, F. SANTINI, E. J.; STANGERLIN, D. M.; MORAIS, W. W. C.; MELO, R. R. Taxa de secagem e qualidade da madeira serrada de Hovenia dulcis submetida a dois métodos de secagem. **Floresta e Ambiente**, n. 2, p. 243, 2014. Disponível em: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S2179. 80872014000200012&lang=pt-br&site=eds-live>. Acesso em: 22 ago. 2019.

TARMIAN, A.; SEPEHER, A.; RAHIMI, S. Drying Stress and Strain in Tension Wood: A Conventional Kiln Schedule to Efficiently Dry Mixed Tension/Normal Wood Boards in Poplar. **Drying Technology**, v. 27, n. 10, p. 1033–1040, 2009. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fsr&AN=44651837&lang=pt -br&site=eds-live>. Acesso em: 13 ago. 2019.

APÊNDICE

FICHA TÉCNICA DA CÂMARA DE SECAGEM UTILIZADA NESTE TRABALHO

	Modelo semi-industrial com estrutura metálica em aço, parede
	dupla de alumínio e isolamento térmico em lã de vidro com 5,0 cm
Características	de espessura, com dimensão nominal útil de 0,8 x 0,8 x 4,0 m
gerais	(altura, largura e comprimento) e capacidade nominal de 1,0 m ³ de
	madeira, gradeada com sarrafos separadores de 25 mm de
	espessura.
Comando	Ligação trifásica (necessitando de corrente nominal de 70 A);
elétrico central	sistemas comandados por contactores (relés magnéticos).
Sistema de	Composto por três resistências blindadas, ligadas em triângulo.
	Tensão nominal 3 x 220 V; corrente nominal: 24 A; potência: 9,0
aquecimento	kW.
Sistoma do	Composto por uma caldeira elétrica, com tensão nominal: 3 x 220
	V; corrente nominal: 16 A; frequência: 60 Hz; potência 6,0 kW.
umumcaçao	Capacidade de produção de 40 kg de vapor por hora.
	Composto por um ventilador e motor quatro polos, com potência
Sistema da	nominal: 1,5 kW; tensão nominal: 220 V; corrente nominal:7,5 A;
	frequência: 60 Hz; rotação nominal 1.750 rpm. O ventilador é de
circulação de ar	alumínio fundido, com acionamento direto do eixo; possui diâmetro
	de 60 cm e produz uma vazão de até 3.600 m³/h.
Sistema de	Composto por um comando elétrico para abertura e fechamento
ventilação	das válvulas, com tensão nominal de 220 V e frequência de 50 Hz.

FONTE: Adaptado de Klitzke (2002).

Amostra	Massa úmida	Massa seca	Teor de umidade
	(kg)	(kg)	(%)
1	83,28	37,28	123,39
2	75,29	38,16	97,30
3	87,3	39,93	118,63
4	127,53	58,30	118,75
5	96,91	43,48	122,88
6	120,06	47,17	154,53
7	89,48	51,07	75,21
8	85,80	44,26	93,85
9	90,01	48,37	86,09
10	117,64	52,06	125,97
Média	97,33	46,01	111,66
Desvio Padrão	16,95	6,36	22,16
CV (%)	17,42	13,82	19,85

TEOR DE UMIDADE INICIAL DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 70°C

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma.

Amostra	Massa úmida	Massa seca	Teor de umidade
	(kg)	(kg)	(%)
1	94,41	47,59	98,38
2	122,64	47,75	156,84
3	103,85	52,37	98,30
4	118,54	84,4	40,45
5	88,72	42,05	110,99
6	119,78	61,8	93,82
7	93,64	46,52	101,29
8	156,93	74,45	110,79
9	114,28	59,05	93,53
10	88,32	43,19	104,49
Média	110,11	55,92	100,89
Desvio Padrão	20,05	13,38	26,67
CV (%)	18,21	23,93	26,44

TEOR DE UMIDADE INICIAL DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 90°C

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma.

Amostra	Massa úmida	Massa seca	Teor de umidade
	(kg)	(kg)	(%)
1	75,25	69,27	8,63
2	64,05	52,88	21,12
3	78,77	71,93	9,51
4	69,45	60,11	15,54
5	59,2	51,56	14,82
6	78,89	69,26	13,90
Média	70,94	62,50	13,92
Desvio Padrão	7,42	8,15	4,14
CV (%)	10,46	13,04	29,72

TEOR DE UMIDADE FINAL DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 70°C PELO MÉTODO DE SIMPSON (1991)

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma.

TEOR DE UMIDADE FINAL DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 90°C PELO MÉTODO DE SIMPSON (1991)

Amostra	Massa úmida	Massa seca	Teor de umidade
	(kg)	(kg)	(%)
1	68,28	64,39	6,04
2	72,52	68,35	6,10
3	70,39	66,24	6,27
4	63,11	57,03	10,66
5	73,02	65,12	12,13
6	56,39	47,99	17,50
Média	67,29	61,52	9,78
Desvio Padrão	5,87	6,99	4,20
CV (%)	8,73	11,37	42,93

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma.

Amostra	Plano	Massa verde	Volume verde	MEap verde
		(kg)	(m³)	(kg/m³)
1	Tangencial	4,20	0,0042	1002,28
2	Tangencial	4,10	0,0042	964,84
3	Tangencial	4,20	0,0042	1008,54
4	Radial	4,20	0,0043	987,33
5	Radial	4,20	0,0041	1022,31
6	Radial	4,20	0,0043	969,24
Média	-	4,18	0,0042	992,42
Desvio Padrão	-	0,04	0,0001	20,71
CV (%)	-	0,89	1,71	2,09

MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEap) VERDE DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 70°C

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma; m³ = Metro cúbico.

MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEap) VERDE DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 90°C

Amostra	Plano	Massa verde	Volume verde	MEap verde
		(kg)	(m³)	(kg/m³)
1	Tangencial	4,00	0,0041	976,11
2	Tangencial	3,80	0,0041	919,55
3	Tangencial	3,80	0,0042	911,60
4	Radial	4,00	0,0042	951,37
5	Radial	3,80	0,0043	885,60
6	Radial	4,00	0,0042	941,83
Média	-	3,90	0,0042	931,01
Desvio Padrão	-	0,10	0,0001	29,25
CV (%)	-	2,56	1,57	3,14

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma; m³ = Metro cúbico

Amostra	Plano	Massa seca	Volume seco	MEap seca
		(kg)	(m³)	(kg/m³)
1	Tangencial	2,20	0,0038	581,85
2	Tangencial	2,00	0,0040	497,67
3	Tangencial	2,20	0,0038	575,04
4	Radial	2,00	0,0039	512,50
5	Radial	1,80	0,0038	473,27
6	Radial	2,20	0,0039	558,33
Média	-	2,07	0,0039	533,11
Desvio	-	0,15	0,0001	40,89
CV (%)	-	7,21	2,16	7,67

MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEap) SECA DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 70°C

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma; m³ = Metro cúbico

MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEap) SECA DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 90°C

Amostra	Plano	Massa seca	Volume seco	MEap seca
		(kg)	(m³)	(kg/m³)
1	Tangencial	2,00	0,0037	538,52
2	Tangencial	2,00	0,0039	519,44
3	Tangencial	2,00	0,0038	528,37
4	Radial	1,80	0,0039	464,34
5	Radial	2,00	0,0039	509,73
6	Radial	1,60	0,0040	404,84
Média	-	1,90	0,0039	494,21
Desvio	_	0,15	0,0001	46,34
CV (%)	-	8,04	2,10	9,38

FONTE: O autor (2019).

Onde: CV = Coeficiente de variação; kg = Quilograma; m³ = Metro cúbico

Amostra	Plano	Largi	ura verde	(mm)	Larg	ura seca (m	Contração	Média	
(n)	(T/R)	LA	LB	Média	LA	LB	Média	(%)	(%)
1		138,57	138,68	138,63	131,83	132,05	131,94	4,82	
2	Tangencial	138,48	139,09	138,79	134,56	136,54	135,55	2,33	3,80
3	-	138,64	138,47	138,56	132,79	132,58	132,69	4,24	-
4		139,35	139,57	139,46	135,25	135,93	135,59	2,77	_
5	Radial	138,27	138,7	138,49	134,92	135,83	135,38	2,25	2,88
6		139,29	139,76	139,53	135,00	133,94	134,47	3,62	

CONTRAÇÃO EM LARGURA DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 70°C

FONTE: O autor (2019).

Onde: LA = Largura da extremidade A; LB = Largura da extremidade B.

CONTRAÇÃO EM LARGURA DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 90°C

Amostra	Plano	Larg	ura verde	(mm)	Larg	Largura seca (mm)			Média
(n)	(T/R)	LA	LB	Média	LA	LB	Média	(%)	(%)
1	_	140,34	139,25	139,80	134,17	133,57	133,87	4,24	_
2	Tangencial	139,28	138,93	139,11	132,97	132,96	132,97	4,41	4,27
3	-	140,20	141,11	140,66	134,87	134,77	134,82	4,15	-
4		138,93	138,25	138,59	134,82	134,87	134,85	2,70	_
5	Radial	139,09	139,21	139,15	135,16	134,61	134,89	3,07	2,55
6		139,33	139,28	139,31	136,50	136,89	136,70	1,87	_

FONTE: O autor (2019).

Onde: LA = Largura da extremidade A; LB = Largura da extremidade B.

Amostra	Plano	Espes	sura verde	e (mm)	Espes	ssura seca (r	Contração	Média	
(n)	(T/R)	EA	EB	Média	EA	EB	Média	(%)	(%)
1		40,52	40,09	40,31	38,38	38,04	38,21	5,20	
2	Radial	40,99	40,66	40,83	39,58	39,48	39,53	3,17	4,15
3	-	40,35	39,8	40,08	38,78	38,11	38,45	4,07	-
4		40,66	40,68	40,67	38,16	38,59	38,38	5,64	
5	Tangencial	39,99	39,12	39,56	38,01	36,91	37,46	5,30	5,53
6		41,82	41	41,41	39,65	38,49	39,07	5,65	

CONTRAÇÃO EM ESPESSURA DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 70°C

FONTE: O autor (2019).

Onde: EA = Espessura da extremidade A; EB = Espessura da extremidade B.

CONTRAÇÃO EM ESPESSURA DAS AMOSTRAS DO CICLO DE ATÉ 90°C

Plano	Espes	sura verde	e (mm)	Espes	sura seca (r	Contração	Média	
(T/R)	EA	EB	Média	EA	EB	Média	(%)	(%)
	39,48	38,69	39,09	37,00	36,98	36,99	5,36	
Radial	39,42	39,8	39,61	38,50	38,72	38,61	2,52	4,38
	39,23	39,8	39,52	37,09	37,78	37,44	5,26	
	40,24	40,66	40,45	38,11	38,55	38,33	5,24	
Tangencial	41,26	40,97	41,12	38,57	39,00	38,79	5,67	5,36
	40,31	40,99	40,65	38,10	39,00	38,55	5,17	
	Plano (T/R) Radial Tangencial	Plano Espess (T/R) EA 39,48 39,42 39,23 39,23 40,24 41,26 40,31 40,31	Plano Espessive verde (T/R) EA EB 39,48 38,69 39,42 39,8 39,23 39,8 40,24 40,66 41,26 40,97 40,31 40,99	Plano Espessura verde (mm) (T/R) EA EB Média 39,48 38,69 39,09 39,42 39,8 39,61 39,23 39,8 39,52 40,24 40,66 40,45 41,26 40,97 41,12 40,31 40,99 40,65	Plano Espessive verde (mm) Espessive (T/R) EA EB Média EA 39,48 38,69 39,09 37,00 39,42 39,8 39,61 38,50 39,23 39,8 39,52 37,09 40,24 40,66 40,45 38,11 41,26 40,97 41,12 38,57 40,31 40,99 40,65 38,10	Plano Espessura verde (mm) Espessura seca (mm) (T/R) EA EB Média EA EB 39,48 38,69 39,09 37,00 36,98 39,42 39,8 39,61 38,50 38,72 39,23 39,8 39,52 37,09 37,78 40,24 40,66 40,45 38,11 38,55 41,26 40,97 41,12 38,57 39,00	PlanoEspessure verde (m)Espessure (m)(T/R)EAEBMédiaEAEBMédiaA9,4838,6939,0937,0036,9836,9939,4239,839,6138,5038,7238,6139,2339,839,5237,0937,7837,4440,2440,6640,4538,1138,5538,3341,2640,9741,1238,5739,0038,5540,3140,9940,6538,1039,0038,55	PlanoEspesser verde (m)Espesser (m)Contração(T/R)EAEBMédiaEAEBMédia(%)Anama39,4838,6939,0937,0036,9836,995,3639,4239,839,6138,5038,7238,612,5239,2339,839,5237,0937,7837,445,2640,2440,6640,4538,1138,5538,335,2441,2640,9741,1238,5739,0038,795,6740,3140,9940,6538,1039,0038,555,17

FONTE: O autor (2019).

Onde: EA = Espessura da extremidade A; EB = Espessura da extremidade B.

Amostra	Plano	E	Externa 1			Interna			Externa 2		
		Mu	Ms	TU	Mu	Ms	TU	Mu	Ms	TU	
(N)	(T/R)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)	(%)
1	Т	18,99	17,47	8,70	36,43	33,78	7,84	15,14	13,85	9,31	-1,16
2	R	12,93	11,40	13,42	31,32	24,62	27,21	15,44	13,37	15,48	12,76
3	Т	22,14	20,32	8,96	32,38	29,67	9,13	17,40	15,91	9,37	-0,03
4	R	14,60	12,98	12,48	32,37	27,53	17,58	16,46	14,69	12,05	5,32
5	Т	13,66	12,29	11,15	26,40	22,61	16,76	14,20	12,66	12,16	5,11
6	R	17,67	15,83	11,62	33,16	28,63	15,82	20,73	18,55	11,75	4,13

GRADIENTE DE UMIDADE APÓS ACONDICIONAMENTO NO CICLO DE 70°C CONFORME METODOLOGIA DE SIMPSON (1991)

FONTE: O autor (2019).

Onde: Mu = Massa úmida; Ms = Massa seca; TU = Teor de umidade; GU = Gradiente de umidade; T = Tangencial; R = Radial; N = Unidade amostral; g = Grama; Externa 1 e 2 = "Conchas" ou peças da camada externa da metodologia de Simpson (1991); Interna = Peça interna obtida na metodologia de Simpson (1991).

GRADIENTE DE UMIDADE APÓS ACONDICIONAMENTO NO CICLO DE 90°C CONFORME METODOLOGIA DE SIMPSON (1991)

Amostra	Plano	Externa 1				Interna			Externa 2		
		Mu	Ms	TU	Mu	Ms	TU	Mu	Ms	TU	
(N)	(T/R)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(%)	(%)
1	Т	16,56	15,50	6,84	23,95	22,45	6,68	22,06	20,62	6,98	-0,23
2	R	16,23	15,19	6,85	27,98	26,22	6,71	20,8	19,46	6,89	-0,15
3	Т	16,60	15,52	6,96	25,01	23,42	6,79	20,79	19,42	7,05	-0,22
4	R	16,59	15,26	8,72	21,78	19,31	12,79	17,35	15,85	9,46	3,70
5	Т	18,07	16,30	10,86	27,47	24,08	14,08	21,11	19,32	9,27	4,02
6	R	12,89	11,53	11,80	18,97	15,25	24,39	18,01	16,07	12,07	12,46

FONTE: O autor (2019).

Onde: Mu = Massa úmida; Ms = Massa seca; TU = Teor de umidade; GU = Gradiente de umidade; T = Tangencial; R = Radial; N = Unidade amostral; g = Grama; Externa 1 e 2 = "Conchas" ou peças da camada externa da metodologia de Simpson (1991); Interna = Peça interna obtida na metodologia de Simpson (1991).

TESTE DE GARFO APÓS ACONDICIONAMENTO NO CICLO DE 70°C CONFORME METODOLOGIA DE SIMPSON (1991) E CÁLCULO DA RESPOSTA DO GARFO CONFORME METODOLOGIA DE FÜLLER (1995)

Amostra	Plano de Medição	W	W'	L	PR	PR/Plano
(N)	(T/R)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm-1)	(mm-1)
1	Т	39,19	30,59	115,46	0,000645	
2	Т	38,69	30,09	115,79	0,000641	0,000675
3	Т	38,23	28,19	116,66	0,000738	
4	R	38,75	28,99	116,99	0,000713	
5	R	38,63	26,25	118,16	0,000887	0,000830
6	R	39,63	27,17	118,3	0,000890	

FONTE: O autor (2019).

Onde: W = Distância externa entre dentes pré corte; W' = Distância externa entre dentes após corte; L = Comprimento do dente; PR = Resposta do garfo (*Prong response*); PR/Plano = Resposta do garfo por plano de medição; T = Tangencial; R = Radial; N = Unidade amostral; mm = milímetro.

TESTE DE GARFO APÓS ACONDICIONAMENTO NO CICLO DE 90°C CONFORME METODOLOGIA DE SIMPSON (1991) E CÁLCULO DA RESPOSTA DO GARFO CONFORME METODOLOGIA DE FÜLLER (1995)

Amostra	Plano de Medição	W	W'	L	PR	PR/Plano
(N)	(T/R)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm-1)	(mm-1)
1	Т	37,01	31,67	110,48	0,000437	
2	Т	37,62	30,7	106,65	0,000608	0,000531
3	Т	36,92	30,33	109,85	0,000546	_
4	R	39,62	29,89	110,67	0,000794	
5	R	39,27	31,45	110,29	0,000643	0,000632
6	R	39,06	33,33	111,77	0,000459	_

FONTE: O autor (2019).

Onde: W = Distância externa entre dentes pré corte; W' = Distância externa entre dentes após corte; L = Comprimento do dente; PR = Resposta do garfo (*Prong response*); PR/Plano = Resposta do garfo por plano de medição; T = Tangencial; R = Radial; N = Unidade amostral; mm = milímetro.

DEFORMAÇÃO E TEOR DE UMIDADE DAS DIVISÕES A 40% DE UMIDADE MÉDIA DA PILHA NO CICLO DE ATÉ 70°C

Seção	Divisão	Comprimento	Comprimento	Deformação	Massa	Massa	Teor de
(N)	(n)	pré corte (mm)	pós corte (mm)	(mm)	úmida (g)	seca (g)	umidade (%)
	1		132,82	-0,02	11,87	10,23	16,03
	2		132,68	-0,16	10,30	8,62	19,49
1	3	132,84	132,68	-0,16	11,94	9,99	19,52
	4		132,49	-0,35	9,76	8,24	18,45
	5		132,73	-0,11	8,97	7,93	13,11
	1		132,86	-0,85	9,17	7,99	14,77
Seção (N) 1 2 3 4 5 6	2		133,40	-0,31	8,44	6,91	22,14
	3	133,71	133,73	0,02	9,26	6,70	38,21
	4		133,77	0,06	9,72	6,39	52,11
	5		133,52	-0,19	11,24	9,54	17,82
	1		134,11	-0,27	8,57	7,47	14,73
	2		134,19	-0,19	9,72	7,63	27,39
3	3	134,38	134,97	0,59	9,55	6,14	55,54
	4		134,87	0,49	10,25	7,58	35,22
	5		134,47	0,09	9,10	7,89	15,34
	1		135,79	-0,06	14,15	9,66	46,48
	2		136,02	0,17	16,29	8,23	97,93
4	3	135,85	135,93	0,08	16,39	8,34	96,52
	4		135,83	-0,02	14,66	8,28	77,05
	5		135,37	-0,48	10,97	8,93	22,84
	1		135,98	-0,30	5,97	5,16	15,70
	2		136,60	0,32	9,60	7,31	31,33
5	3	136,28	136,60	0,32	12,08	7,76	55,67
	4		136,44	0,16	10,63	7,49	41,92
	5		136,53	0,25	9,42	8,20	14,88
	1		136,40	-0,20	10,38	8,90	16,63
	2		136,74	0,14	10,80	8,23	31,23
1 2 3 4 5 6	3	136,60	136,92	0,32	12,80	8,95	43,02
	4		136,82	0,22	11,42	8,24	38,59
	5		136,46	-0,14	10,86	8,92	21,75

FONTE: O autor (2019).

DEFORMAÇÃO E TEOR DE UMIDADE DAS DIVISÕES A 10% DE UMIDADE MÉDIA DA PILHA NO CICLO DE ATÉ 70°C

Seção	Divisão	Comprimento	Comprimento	Deformação	Massa	Massa	Teor de
(N)	(n)	pré corte (mm)	pós corte (mm)	(mm)	úmida (g)	seca (g)	umidade (%)
	1		130,70	0,40	9,92	9,22	7,59
	2		129,87	-0,43	9,36	8,28	13,04
1	3	130,30	129,65	-0,65	9,77	8,44	15,76
	4		129,70	-0,60	9,31	8,24	12,99
	5		130,29	-0,01	10,07	9,32	8,05
	1		130,46	-0,05	10,71	9,80	9,29
Seção (N) 1 2 3 4 5 6	2		130,16	-0,35	7,02	6,38	10,03
	3	130,51	130,16	-0,35	7,14	6,54	9,17
	4		130,54	0,03	7,92	7,42	6,74
	5		130,95	0,44	8,68	8,21	5,72
	1		133,68	0,38	7,14	6,64	7,53
	2		132,89	-0,41	8,11	7,31	10,94
3	3	133,30	133,08	-0,22	14,09	11,67	20,74
	4		132,85	-0,45	7,17	6,38	12,38
	5		133,24	-0,06	5,64	5,23	7,84
	1		134,49	-0,52	8,43	7,55	11,66
	2		134,82	-0,19	9,23	7,20	28,19
4	3	135,01	135,04	0,03	15,35	11,82	29,86
	4		134,78	-0,23	8,36	7,25	15,31
	5		135,14	0,13	8,17	7,53	8,50
	1		137,40	-0,21	7,60	6,72	13,10
	2		137,70	0,09	8,91	6,16	44,64
5	3	137,61	137,80	0,19	11,34	7,97	42,28
	4		137,78	0,17	9,24	6,81	35,68
Seção (N) 1 2 3 4 5 6	5		137,55	-0,06	7,72	6,90	11,88
	1		137,73	0,34	9,25	8,59	7,68
	2		137,33	-0,06	8,52	7,70	10,65
6	3	137,39	137,09	-0,30	11,85	10,58	12,00
	4		137,05	-0,34	8,11	7,32	10,79
	5		137,33	-0,06	7,88	7,31	7,80

FONTE: O autor (2019).

DEFORMAÇÃO E TEOR DE UMIDADE DAS DIVISÕES APÓS ACONDICIONAMENTO NO CICLO DE ATÉ 70°C

Seção	Divisão	Comprimento	Comprimento	Deformação	Massa	Massa	Teor de
(N)	(n)	pré corte (mm)	pós corte (mm)	(mm)	úmida (g)	seca (g)	umidade (%)
	1		131,61	0,14	10,80	9,79	10,32
	2		131,33	-0,14	9,74	8,83	10,31
1	3	131,47	131,14	-0,33	10,54	9,56	10,25
	4		131,40	-0,07	9,12	8,28	10,14
	5		131,77	0,30	10,33	assaMassada (g)seca (g)),809,79,748,83),549,56,128,28),339,35,977,21,447,44,736,74,056,99,378,35,388,57,147,42,526,85,507,76,326,71,567,70,527,49,457,20,817,502,4710,92,347,35,626,64,877,35,626,81,878,95,688,73,648,63,358,370,519,50	10,48
	1		129,99	0,42	7,97	7,21	10,54
	2		129,42	-0,15	8,44	7,44	13,44
2	3	129,57	129,34	-0,23	7,73	6,74	14,69
	4		129,33	-0,24	8,05	6,99	15,16
	5		129,56	-0,01	9,37	8,35	12,22
	1		130,87	0,32	9,38	8,57	9,45
	2		130,32	-0,23	8,14	7,42	9,70
3	3	130,55	130,26	-0,29	7,52	6,85	9,78
	4		130,49	-0,06	8,50	7,76	9,54
	5		131,18	0,63	7,32	Sa Massa seca (g) 30 9,79 4 8,83 34 9,56 2 8,28 33 9,35 7 7,21 4 7,44 3 6,74 5 6,99 7 8,35 8 8,57 4 7,42 2 6,85 0 7,76 2 6,71 6 7,70 2 6,85 0 7,76 2 6,85 0 7,76 2 6,71 6 7,70 2 7,49 5 7,20 1 7,50 17 10,92 4 7,35 2 6,81 7 8,95 8 8,73 4 8,63 5 8,37 5 8,37 <td>9,09</td>	9,09
	1	133,00	133,08	0,08	8,56	7,70	11,17
	2		132,83	-0,17	8,52	7,49	13,75
4	3		132,74	-0,26	8,45	7,20	17,36
	4		132,83	-0,17	8,81	7,50	17,47
	5		132,95	-0,05	12,47	10,92	14,19
	1		135,64	-0,09	8,34	7,32	13,93
	2		135,68	-0,05	8,26	6,64	24,40
5	3	135,73	135,80	0,07	9,87	7,35	34,29
	4		135,75	0,02	8,62	6,87	25,47
	5		135,59	-0,14	7,82	6,81	14,83
	1		135,87	0,33	9,87	8,95	10,28
	2		135,53	-0,01	9,68	8,73	10,88
6	3	135,54	135,47	-0,07	9,64	8,63	11,70
	4		135,36	-0,18	9,35	8,37	11,71
	5		135,53	-0,01	10,51	9,50	10,63

FONTE: O autor (2019).

DEFORMAÇÃO E TEOR DE UMIDADE DAS DIVISÕES A 10% DE UMIDADE MÉDIA DA PILHA NO CICLO DE ATÉ 90°C

Seção	Divisão	Comprimento	Comprimento	Deformação	Massa	Massa	Teor de
(N)	(n)	pré corte (mm)	pós corte (mm)	(mm)	úmida (g)	seca (g)	umidade (%)
	1		130,71	0,45	9,74	9,12	6,80
	2		129,69	-0,57	9,65	8,87	8,79
1	3	130,26	129,41	-0,85	8,72	7,87	10,80
	4		129,47	-0,79	9,15	8,27	10,64
	5		130,15	-0,11	13,47	12,54	7,42
	1		135,51	0,01	10,65	9,49	12,22
	2		135,45	-0,05	8,39	6,10	37,54
2	3	135,50	135,55	0,05	11,00	6,39	72,14
	4		135,49	-0,01	8,23	6,43	27,99
	5		135,50	0,00	7,20	6,65	8,27
	1		134,20	0,41	7,11	6,71	5,96
	2		133,56	-0,23	6,81	6,37	6,91
3	3	133,79	133,32	-0,47	6,77	6,19	9,37
	4		133,67	-0,12	6,18	5,61	10,16
	5		133,95	0,16	8,07	7,50	7,60
	1		132,60	-0,18	7,71	7,03	9,67
	2		132,93	0,15	8,76	6,71	30,55
4	3	132,78	132,90	0,12	9,76	6,61	47,66
	4		132,80	0,02	7,76	5,67	36,86
	5		132,38	-0,40	8,41	7,48	12,43
	1		126,41	0,15	9,94	9,40	5,74
	2		126,15	-0,11	13,60	12,85	5,84
5	3	126,26	126,01	-0,25	11,84	11,16	6,09
	4		126,09	-0,17	10,50	9,89	6,17
	5		126,28	0,02	11,54	Massa seca (g) 9,12 8,87 7,87 8,27 12,54 9,49 6,10 6,39 6,43 6,65 6,71 6,37 6,19 5,61 7,50 7,03 6,71 6,61 5,67 7,48 9,40 12,85 11,16 9,89 10,89 6,05 7,52 7,57 7,50	5,97
	1		132,38	-0,72	6,47	6,05	6,94
	2		132,86	-0,24	8,23	7,52	9,44
Seção (N) 1 2 3 4 5 6	3	133,10	132,61	-0,49	8,47	7,57	11,89
	4		132,74	-0,36	8,68	7,95	9,18
	5		133,20	0,10	8,05	7,50	7,33

FONTE: O autor (2019).

DEFORMAÇÃO E TEOR DE UMIDADE DAS DIVISÕES APÓS ACONDICIONAMENTO NO CICLO DE ATÉ 90°C

Seção	Divisão	Comprimento	Comprimento	Deformação	Massa	Massa	Teor de
(N)	(n)	pré corte (mm)	pós corte (mm)	(mm)	úmida (g)	seca (g)	umidade (%)
	1		131,16	0,43	10,00	9,14	9,41
	2	120 72	130,70	-0,03	10,27	9,36	9,72
1	3	130,73	130,49	-0,24	9,38	8,56	9,58
	4		130,61	-0,12	9,90	9,04	9,51
	5		131,08	0,35	8,41	7,74	8,66
	1		135,06	-0,11	6,46	5,80	11,38
	2		135,08	-0,09	8,93	7,24	23,34
2	3	155,17	135,06	-0,11	9,79	7,52	30,19
	4		135,09	-0,08	8,48	7,42	14,29
	5		135,22	0,05	mação úmida (g)4310,00,0310,27,249,38,129,90358,41,116,46,098,93,119,79,088,48,058,61,218,95,566,44,426,64,387,51,066,87,318,01,268,31,038,56,037,63,107,99,057,81,2310,78,3211,63,1012,52,2511,05,089,25,278,67,308,58,007,78,356,51	7,85	9,68
	1		135,81	-0,21	8,95	8,01	11,74
	2	126.02	135,46	-0,56	6,44	5,50	17,09
3	3	136,02	135,60	-0,42	6,64	5,66	17,31
	4		135,64	-0,38	7,51	6,53	15,01
	4 5		136,08	0,06	6,87	6,24	10,10
	1	135,30	134,99	-0,31	8,01	7,14	12,18
	2		135,04	-0,26	8,31	6,91	20,26
4	3		135,33	0,03	8,56	6,94	23,34
	4		135,33	0,03	7,63	6,35	20,16
	5		135,40	0,10	7,99	7,12	12,22
	1		131,65	0,05	7,81	7,26	7,58
	2	121 60	131,37	-0,23	10,78	10,02	7,58
5	3	151,00	131,28	-0,32	11,63	10,91	6,60
	4		131,50	-0,10	12,52	11,63	7,65
	5		131,85	0,25	11,05	10,25	7,80
	1		133,09	0,08	9,25	8,54	8,31
	2		132,74	-0,27	8,67	7,85	10,45
6	3	133,01	132,71	-0,30	8,58	7,74	10,85
	4		133,01	0,00	7,78	7,05	10,35
	5		133,36	0,35	6,51	6,00	8,50

FONTE: O autor (2019).