

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Dissertação

Caracterização da madeira de três espécies florestais plasticizadas por tratamentos hidrotérmicos

Matheus Lemos de Peres

Pelotas, 2014

Matheus Lemos de Peres

**Caracterização da madeira de três espécies florestais plasticizadas por
tratamentos hidrotérmicos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Margarete Regina Freitas Gonçalves

Pelotas, 2014

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P434c Peres, Matheus Lemos de

Caracterização da madeira de três espécies florestais plasticizadas por tratamentos hidrotérmicos / Matheus Lemos de Peres ; Darci Alberto Gatto, orientador ; Margarete Regina Freitas Gonçalves, co-orientadora. - Pelotas, 2014.

90 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2014.

1. Propriedades físicas e mecânicas da madeira. 2. Plasticização. 3. Tratamentos térmicos. 4. Vergamento de madeira sólida. 5. Micro-ondas. I. Gatto, Darci Alberto, orient. II. Gonçalves, Margarete Regina Freitas, co-orient. III. Título.

CDD : 674

Elaborada por Aline Herbstrith Batista CRB: 10/1737

Matheus Lemos de Peres

Caracterização da madeira de três espécies florestais plasticizadas por tratamentos hidrotérmicos

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 13/03/2013

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Darci Alberto Gatto (Orientador)

Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Prof^a. Dr^a. Margarete Regina Freitas Gonçalves (Co-Orientadora)

Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Prof. Dr. Sergio da Silva Cava

Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR).

Prof. Dr. José Jurado Egea

Doutor em Ciências Físicas pela Universidad Complutense de Madrid (UCM).

*Dedico este trabalho aos meus pais Joaquim e Marizete,
Ao meu irmão Leandro,
E à minha companheira, Luane.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por permitir que tudo fosse realizado e por ajudar nas horas difíceis.

À família, providenciando o suporte necessário e o incentivo.

Em especial à minha companheira, por estar comigo em todos os momentos, ajudando de fato, ou com pequenos atos como almoçar comigo na bancada de trabalho quando foi preciso. Poucos hão de entender a importância deste gesto, espero sempre poder retribuir.

Ao meu irmão, por participar de todas as etapas da execução do projeto, com ideias para facilitar o trabalho ou mesmo com trabalho, quando as ideias já estavam em prática.

Ao meu orientador que além de orientar, muitas vezes atuou como pai, norteando quando o rumo se nublava.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, em especial a professora Margarete Gonçalves, o professor Sergio Cava e o professor José Jurado que sempre me incentivaram e acreditaram no meu trabalho.

Aos colegas de laboratório pela ajuda em diversos momentos.

RESUMO

PERES, Matheus Lemos de. **Caracterização da madeira de três espécies florestais plasticizadas por tratamentos hidrotérmicos**. 2014. 90f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

A madeira de três espécies florestais foi caracterizada física e mecanicamente. O presente estudo avaliou pré-tratamentos quanto ao seu potencial plasticizante para o processo de vergamento. A madeira foi submetida a pré-tratamentos de plasticização hidrotérmicos compreendendo variações de tempo de exposição ao cozimento, radiação por micro-ondas e vaporização. Foram analisadas as madeiras de *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Carya illinoensis* (nogueira-pecã), e *Platanus x acerifolia* (plátano) quanto às suas propriedades mecânicas, através do vergamento laboratorial e de ensaios de flexão estática (norma ASTM D143 - 94). Além disso foram avaliados os parâmetros colorimétricos no sistema CIEL*a*b*, a rugosidade superficial da madeira, a massa específica aparente a 12% de umidade e o teor de umidade em diferentes momentos dos ensaios de vergamento e de flexão estática. Quanto ao vergamento pode-se verificar que a madeira de noqueira-pecã apresenta melhor performance. A madeira de plátano apresenta maior resistência à flexão estática. Os tratamentos plasticizantes modificaram as propriedades mecânicas de forma a melhorar a qualidade de vergamento, reduzindo o módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR), a fragilidade e o módulo de resiliência das madeiras. Houve uma diminuição na rugosidade superficial da madeira bem como uma redução da luminosidade da cor (L), aumento no parâmetro a e leve queda no parâmetro b para todas as espécies quando comparados os tratamentos com o grupo controle. Pode-se concluir que a radiação por micro-ondas não apresenta diferenças com relação aos outros tratamentos quanto ao poder de plasticização uma vez que apresentou resultados equalizados para a qualidade de vergamento e modificação das propriedades mecânicas. Dessa forma pode ser eleito como mais favorável em razão da sua eficiência energética e de seu reduzido tempo de exposição para o mesmo resultado geral.

Palavras-chave: vergamento de madeira sólida, micro-ondas, plasticização, tratamentos hidrotérmicos, propriedades físicas e mecânicas da madeira, açoita-cavalo, noqueira-pecã, plátano.

ABSTRACT

PERES, Matheus Lemos de. **Caracterização da madeira de três espécies florestais plasticizadas por tratamentos hidrotérmicos**. 2014. 90f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Timber of three forestry species were characterized on its mechanical and physical properties. The present study evaluated the softening potential of hydrothermal pre-treatments for solid wood bending. The timber was subjected to boiling, microwave radiation and steaming treatments, with exposure time variation. Were analyzed *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Carya illinoensis* (nogueira-pecã), e *Platanus x acerifolia* (plátano) in its mechanical properties, through solid wood bending and static bending (ASTM D143 – 94). Furthermore were evaluated colorimetric parameters on CIEL a^*b^* system, surface roughness, apparent specific gravity at 12% moisture content, and the moisture content variation between treatments. Was found that noqueira-pecã timber is more suitable for bending. The *Platanus x acerifolia* wood presents better flexural resistance. The softening treatments modified the mechanical properties and increased bending quality reducing the modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR), the brittleness and the modulus of resilience. The surface roughness was reduced, as well as the lightness (L). Colorimetric parameter a was increased and was found a slight reducing of b parameter for all species compared treated and untreated groups. Thus, can be concluded that microwave does not presents significant difference comparing to other pre-treatments considering softening efficiency. It shows equalized results comparing with steaming and boiling treatments. This way, can be qualified as more favorable as function of its less exposure time and energetic expenses for the same general results.

Keywords: solid wood bending, microwave, softening, hydrothermal treatments, physical and mechanical wood properties, açoita-cavalo, noqueira-pecã, plátano.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Diferença de posicionamento da linha neutra em relação à altura da peça antes e após o tratamento. Fonte: VON ZUBEN (2010) adaptado de STEVENS; TURNER (1970)..... | 19 |
| Figura 2 – Posicionamento da peça de madeira vergada com cinta antitração e apoios de extremidade..... | 20 |
| Figura 3 – Diagrama $L^*a^*b^*$. Em que: A = ponto cujas coordenadas segundo o sistema CIELab são: $L^*= 43,31$; $a^*=47,63$; $b^*=14,12$. Fonte: Konica (2007), adaptado. | 32 |
| Figura 4 – Hierarquia da caracterização da madeira plasticizada hidrotérmicamente...34 | |
| Figura 5 – Representação gráfica das dimensões em cm do corpo de prova tipo A..... | 35 |
| Figura 6 – Representação gráfica do corpo de prova tipo B (dimensões em cm). | 36 |
| Figura 7 – Representação gráfica da caixa de vaporização utilizada..... | 37 |
| Figura 8 – Representação gráfica do tanque cozimento utilizado. | 38 |
| Figura 9 – Invólucro para manutenção das condições de tratamento para a flexão estática, em que: a=entrada de vapor d'água; b=saídas de vapor d'água. | 40 |
| Figura 10 – Dispositivo rotativo de vergamento com raio variável. Fonte: O autor..... | 42 |
| Figura 11 – Representação gráfica da forma de raio variável. Fonte: O autor. | 42 |
| Figura 12 – Defeitos ocorrentes no curvamento de madeira maciça. Fonte: Vorreiter (1958)..... | 44 |
| Figura 13 – Esquema de cálculo da perda de forma circular..... | 45 |
| Figura 14 – Regressão linear para a determinação do limite de proporcionalidade..... | 47 |
| Figura 15 – Corpos de prova vergados com incidência de defeitos do tipo e (estilhaço) e f (ruptura perpendicular). Fonte: O autor. | 53 |
| Figura 16 – Corpos de prova vergados com nota máxima de vergamento. Fonte: O autor. | 55 |
| Figura 18 – Médias para $ME_{12\%}$ em função das espécies estudadas, em que letras denotam diferença estatística em 5% de probabilidade de erro no teste de LSD-Fisher. | 67 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 – Teores de umidade anteriores e posteriores aos tratamentos para cada espécie..... | 70 |
| Figura 20 – Parâmetros de rugosidade variantes entre os tratamentos. | 73 |
| Figura 21 - Gradiente de cor para amostras tratadas e não tratadas..... | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabela 1 | – Identificação dos pré-tratamentos de plasticização utilizados..... | 39 |
| Tabela 2 | – Raios e coeficientes de flexionamento..... | 43 |
| Tabela 3 | – Notas adotadas para classificação das peças vergadas. Fonte: O autor..... | 44 |
| Tabela 4 | – Análise de variância fatorial para o número de defeitos por amostra..... | 51 |
| Tabela 5 | – Número médio de defeitos por peça..... | 51 |
| Tabela 6 | – Frequência de peças para cada tipo de defeito..... | 52 |
| Tabela 7 | – Análise de variância fatorial para as notas de qualidade de vergamento..... | 54 |
| Tabela 8 | – Médias para a nota de vergamento variantes entre espécies..... | 54 |
| Tabela 9 | – Distribuição de frequência para notas por espécies..... | 55 |
| Tabela 10 | – Análise de variância fatorial para o MRV..... | 56 |
| Tabela 11 | – Distribuição de frequência para MRV por espécie..... | 57 |
| Tabela 12 | – Análise de variância fatorial para a perda de forma circular..... | 58 |
| Tabela 13 | – Médias para PFC em razão dos tratamentos e das espécies..... | 58 |
| Tabela 14 | – Valores médios para PFC para os fatores isolados..... | 59 |
| Tabela 15 | – Análise de variância fatorial para MOE e MOR..... | 60 |
| Tabela 16 | – Médias para MOE e MOR em função dos tratamentos e espécies..... | 61 |
| Tabela 17 | – ANOVA fatorial para a fragilidade considerando os fatores de variação..... | 62 |
| Tabela 18 | – Comparação da fragilidade com o grupo controle..... | 62 |
| Tabela 20 | – Módulo de resiliência, fatores de influência e sua interação..... | 65 |
| Tabela 21 | – Médias para U_f em função dos tratamentos e espécies..... | 65 |
| Tabela 22 | – Médias da $ME_{12\%}$ para as espécies analisadas..... | 66 |
| Tabela 23 | – Análise de variância para ΔTU variantes entre espécie e tratamentos..... | 68 |
| Tabela 24 | – Análise de variância multifatorial para parâmetros de rugosidade..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Tabela 25 – Análise de variância para os parâmetros R_a , R_q , R_t e R_z variantes em tratamento. | 72 |
| Tabela 26 – Comparação dos parâmetros de rugosidade em função dos fatores..... | 74 |
| Tabela 27 – Análise de variância multifatorial para os parâmetros colorimétricos..... | 75 |
| Tabela 28 – Parâmetros $L^*a^*b^*$ em razão dos tratamentos e espécies..... | 76 |
| Tabela 29 – Variação colorimétrica média para espécies, tratamentos e planos anatômicos..... | 78 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA = Analysis of variance (Análise de variância);

ASTM = American Society for Testing and Materials;

CIE = Comissão Internacional de Iluminantes;

COPANT = Comisión Panamericana de Normas Técnicas;

CP = Corpos de prova;

Et al. = Abreviação de *et alli*, do latim “e outros”;

GL = Graus de Liberdade;

JIS = Japanese Industrial Standards;

LSD = Least Significance Difference (Diferença mínima significativa)

^{ns} = não significativo;

QM = Quadrado médio;

SQ = Soma de Quadrados;

USDA = United States Department of Agriculture;

LISTA DE SÍMBOLOS

°C = graus Celsius;

°F = graus Fahrenheit;

μm = micrometro;

a = coordenada vermelho-verde;

A_e = área abaixo da curva até o limite de proporcionalidade do gráfico tensão X deformação;

atm = atmosfera;

A_{Total} = área total do gráfico tensão X deformação;

b = coordenada amarelo-azul;

C = cromaticidade;

cm = centímetro;

C_v = Coeficiente de vergamento;

D_{forma} = distância entre as extremidades da amostra vergada na forma;

D_{frio} = distância entre as extremidades da amostra vergada após o resfriamento;

F = fragilidade;

$g.cm^{-3}$ = grama por centímetro cúbico;

GHz = gigahertz;

h = horas;

L = luminosidade;

$ME_{12\%}$ = massa específica aparente a 12% de umidade;

min = minutos;

mm = milímetro;

m_o = massa da amostra seca em estufa;

MOE = Módulo de Elasticidade;

MOR = Módulo de Ruptura;

MPa = megapascal;

MRV = Mínimo Raio de Vergamento;

m_u = massa úmida da amostra;

PFC = Perda de Forma Circular;

r = raio de vergamento;

R^2 = coeficiente de correlação;

R_a = Rugosidade média;

R_k = profundidade da rugosidade central;

R_{pk} = altura reduzida dos picos;

R_q = rugosidade quadrática;

R_t = soma da altura do pico mais alto do perfil e do vale mais profundo do perfil;

R_{vk} = profundidade reduzida dos vales;

R_z = média da altura pico-vale;

R_z = soma da altura média dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais profundos;

s = espessura da peça vergada;

T_u = teor de umidade;

TU_f = teor de umidade após o tratamento;

TU_i = teor de umidade anterior ao tratamento;

U_f = Módulo de Resiliência;

Δa = variação da coordenada vermelho-verde entre amostra tratada e não tratada;

Δb = variação da coordenada amarelo-azul entre amostra tratada e não tratada;

ΔE = variação colorimétrica total;

ΔL = variação entre luminosidade de amostra tratada e não tratada;

ΔTU = variação no teor de umidade perante os tratamentos;

ϵ_e = deformação no limite de escoamento;

σ_e = tensão no limite de escoamento;

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 2 OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 Objetivo geral..... | 18 |
| 2.2 Objetivos específicos | 18 |
| 3 REVISÃO DE LITERATURA | 19 |
| 3.1 Plasticização da Madeira..... | 19 |
| 3.2 Tratamentos..... | 20 |
| 3.2.1 Cozimento | 20 |
| 3.2.2 Vaporização | 22 |
| 3.2.3 Radiação por micro-ondas | 24 |
| 3.3 Vergamento de Madeira sólida..... | 25 |
| 3.4 Anatomia da madeira e a relação com o vergamento | 27 |
| 3.5 Determinação das propriedades mecânicas da madeira..... | 28 |
| 3.6 Rugosidade superficial da madeira..... | 29 |
| 3.7 Colorimetria da madeira..... | 31 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 34 |
| 4.1 Fluxograma da Metodologia | 34 |
| 4.2 Seleção do material de estudo | 34 |
| 4.3 Preparação dos corpos de prova..... | 35 |
| 4.4 Tratamentos..... | 36 |
| 4.4.1 Vaporização | 36 |
| 4.4.2 Cozimento | 37 |
| 4.4.3 Radiação por micro-ondas | 38 |
| 4.5 Delineamento Experimental..... | 38 |
| 4.6 Caracterização Mecânica da Madeira..... | 41 |
| 4.6.1 Vergamento Laboratorial..... | 41 |
| 4.6.2 Flexão Estática..... | 46 |
| 4.7 Caracterização Física da Madeira | 48 |
| 4.7.1 Variação no Teor de Umidade | 48 |
| 4.7.2 Determinação da massa específica aparente à 12% de umidade | 49 |

| | |
|--|----|
| 4.7.3 Colorimetria..... | 49 |
| 4.7.4 Rugosidade superficial..... | 49 |
| 4.8 Análise estatística dos dados..... | 50 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 51 |
| 5.1 Propriedades Mecânicas da Madeira..... | 51 |
| 5.1.1 Vergamento da Madeira..... | 51 |
| 5.1.2 Flexão Estática..... | 59 |
| 5.2 Propriedades Físicas da Madeira..... | 66 |
| 5.2.1 Massa específica da madeira..... | 66 |
| 5.2.2 Variação no Teor de Umidade..... | 68 |
| 5.2.3 Rugosidade Superficial..... | 70 |
| 5.2.4 Colorimetria da Madeira..... | 75 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 81 |
| 7 BIBLIOGRAFIA..... | 83 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de móveis vergados, no Brasil, teve como referência a técnica desenvolvida por Michael Thonet, tendo como principais fatores influentes ao sucesso o pré-tratamento da madeira e a sua anatomia. De acordo com Gatto et al. (2008), fatores inerentes à espécie como porosidade em anel são importantes e proporcionam boa qualidade para vergamento. Entretanto, o pré-tratamento é de suma importância, pois torna espécies de difícil vergamento mais favoráveis ao processo.

A técnica de pré-tratamento consiste na plasticização dos componentes da madeira, sejam eles celulose, hemicelulose ou lignina, através da adição de umidade e calor aos mesmos, o que aumenta o limite de ruptura, além proporcionar deformação plástica ao material, garantindo que não haja o retorno à forma original ou ruptura da peça.

Entre os métodos conhecidos de pré-tratamento da madeira existem a vaporização, utilizada por Von Zuben (2010) e Benson (2008), o cozimento, utilizado por Gatto et al. (2008), o tratamento por micro-ondas, utilizado por Norimoto et al. (1993) e o tratamento químico, comentado por Stevens e Turner (1970) sendo os dois primeiros os mais amplamente discutidos.

O pré-tratamento por radiação por micro-ondas (NORIMOTO et al., 1993) apresenta poucos estudos, porém é visto com grande potencial uma vez que com prévia impregnação da madeira com água, a adição de calor é praticamente instantânea quando comparada aos outros tratamentos citados.

Em um estudo comparativo entre processos de aquecimento convencionais, Vongpradubchai e Rattanadecho (2009) obtiveram resultados onde o aquecimento da madeira por um processo contínuo de radiação de micro-ondas apresentou muitas vantagens. Entre elas, menores tempos de processamento, dissipação volumétrica da energia através da peça, alta eficiência energética, bem como melhora na qualidade do produto.

É de suma importância o conhecimento e a discussão da influência de determinado tratamento na madeira, pois com isso pode-se comparar a eficiência de cada tratamento, bem como a sua escolha em diferentes situações.

Oloyede e Groombridge (2000) obtiveram diminuição das propriedades mecânicas da madeira após a aplicação de secagem por radiação de micro-ondas. Os autores citam que mesmo com a relativa diminuição nos valores representativos dessas propriedades,

o tempo de secagem é reduzido à minutos, o que torna o processo altamente eficiente do ponto de vista energético, além de ser industrialmente atrativo para situações em que as peças secas não sejam solicitadas de forma estrutural.

A comparação entre os métodos de tratamento deve levar em consideração a situação de utilização, isto é, para determinadas situações, a vaporização apresenta-se como melhor alternativa, e em contrapartida, o cozimento pode ser mais eficiente na adição de umidade.

Dessa forma o enfoque no desenvolvimento de técnicas de pré-tratamento da madeira apresenta como justificativa a inclusão de espécies madeireiras de maior disponibilidade, que podem não apresentar desempenho tão favorável ao vergamento quanto às estrangeiras *white oak*, *yellow birch* e *white ash* estudadas por Stevens e Turner (1970).

Assim, de acordo com Gatto et al. (2008), que características anatômicas ou inerentes à espécie em particular tendem a demonstrar mais adaptabilidade ao ensaio de flexão como no vergamento. Entretanto, para o desenvolvimento científico, não deve-se prender a pesquisa a uma solução que singulariza a utilização de uma determinada espécie. A evolução do vergamento deve priorizar o estabelecimento de um método aplicável a todos os tipos de madeiras, sendo assim melhor aproveitado comercialmente.

Portanto, o desenvolvimento da técnica de vergamento apresenta áreas carentes de estudo, sendo o conhecimento da espécie a ser utilizada e o aprimoramento do processo produtivo os fatores mais importantes. O pré-tratamento da madeira por radiação de micro-ondas se mostra um método alternativo potencial que necessita de estudos quanto à sua eficiência e viabilidade dentro da indústria, além da comparação com métodos consolidados. Dessa forma, a utilização de espécies florestais com características conhecidas como favoráveis deve ser estudada visando à união de uma utilização racional do material com a aplicação de um processo produtivo favorável ao aumento de produtividade e redução de custos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a plasticização da madeira de açoita-cavalo, noqueira-pecã e plátano a partir da caracterização do comportamento mecânico das mesmas.

2.2 Objetivos específicos

Caracterizar mecanicamente as espécies florestais quanto ao ensaio de flexão estática e de vergamento de madeira sólida;

Avaliar a eficiência em termos de plasticização da madeira proposta pelos tratamentos;

Avaliar a influência dos tratamentos na qualidade do vergamento bem como nas propriedades mecânicas analisadas;

Comparar o tratamento de radiação por micro-ondas com os outros tratamentos já consolidados;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Plasticização da Madeira

Segundo Gatto et al. (2008) com a plasticização da madeira é possível aumentar a deformação de ruptura. Na flexão de uma peça as tensões são máximas nas superfícies, sendo a maior tensão de tração no lado convexo e maior tensão de compressão no lado côncavo.

Após o processo de amolecimento da lignina, e conseqüentemente da madeira, a linha neutra, encontrada naturalmente pela diminuição das tensões à medida que se aproxima do centro da peça, desloca-se levemente para o lado convexo, como visto na Fig. 1.

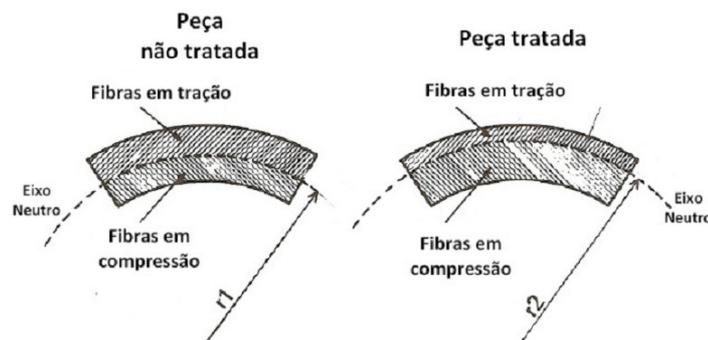


Figura 1 – Diferença de posicionamento da linha neutra em relação à altura da peça antes e após o tratamento. Fonte: VON ZUBEN (2010) adaptado de STEVENS; TURNER (1970).

Com a sucessão do processo de plasticização do material, o vergamento é substancialmente facilitado, entretanto a utilização de dispositivos mecânicos próprios de vergamento se torna imprescindível.

Para que o vergamento ocorra de forma bem sucedida, dependendo do nível de qualidade final requerido para as peças, deve-se contar com a cinta antitração e os apoios de extremidade que juntos realizam a fixação da peça de madeira no molde (Fig. 2).

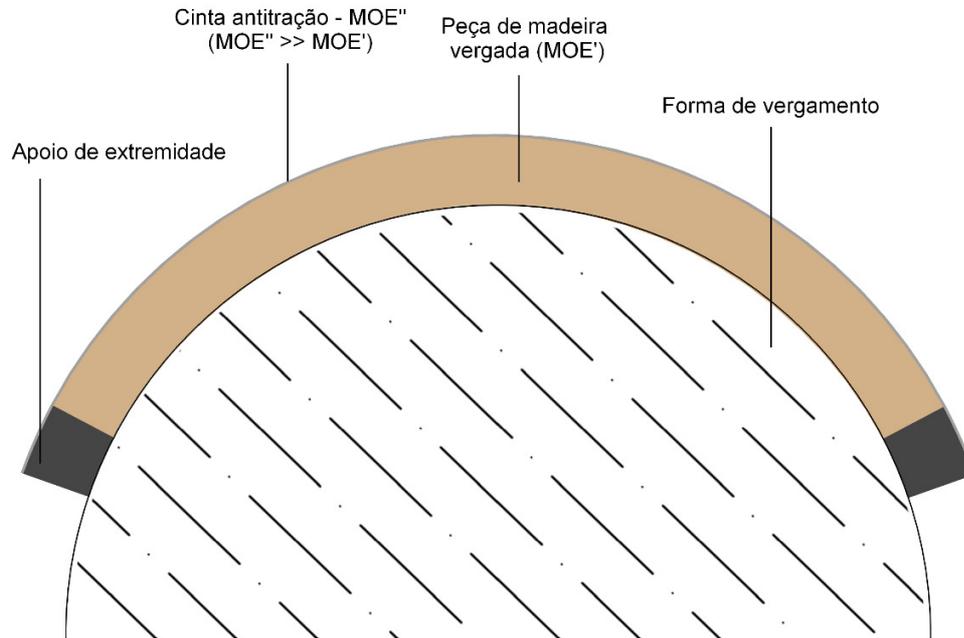


Figura 2 – Posicionamento da peça de madeira vergada com cinta antitração e apoios de extremidade.

A cinta antitração, que deve dispor de material metálico com módulo de elasticidade maior do que a madeira, deve realizar um perfeito contato com a peça no momento do vergamento. Aliado à cinta, os apoios de extremidade são fixados garantindo que não haja estiramento das fibras próximas à tira metálica.

3.2 Tratamentos

3.2.1 Cozimento

O cozimento da madeira é muito utilizado como método auxiliar para a produção de polpa celulósica e para a produção de painéis laminados. A razão pela qual o cozimento é aplicado nesses processos se fundamenta no fato de que com a adição de temperatura e umidade a madeira torna-se dúctil pelo amolecimento da lignina.

Segundo Ebringerová e Heinze (2000) os tratamentos da madeira por cozimento estão tendo considerável atenção atualmente. Através do cozimento com água quente as hemiceluloses são dissolvidas em um extrato aquoso e podem ser reconstituídas e convertidas em produtos de alto valor agregado. Como efeito do tratamento, o resíduo madeireiro restante após certos tratamentos de cozimento por água quente podem ser

conduzidos à polpação celulósica com menor adição de químicos do que em comparação com a madeira não tratada (YOON e VAN HEININGEN, 2008).

De acordo com Sixta (2006), tratamentos de cozimento por água quente são também chamados de auto-hidrólises, frequentemente utilizados para madeiras de folhosas. A maior quantidade de grupos acetila ligados às hemiceluloses e a boa eficiência na deslignificação com menor tendência à condensação da lignina tornam as folhosas mais aceitáveis para uso em extrações por água quente do que as coníferas.

Uma das consequências notadas no processo de plasticização da madeira por cozimento é a variação dimensional. Uma vez que a madeira é aquecida e encharcada as fibras ficam totalmente impregnadas com água quente. Com o amolecimento da lignina e o lúmen da célula contendo água, ocorre movimentação das células e posterior inchamento. As microfibrilas são dessa forma distanciadas pelas moléculas de água. Tal efeito é de grande influência no ambiente industrial, em que a precisão é fundamental. Na produção de móveis ou peças estruturais muitas vezes há utilização de encaixes, que precisam de medidas invariáveis. Com o inchamento da madeira após o tratamento de cozimento, e posterior conformação da madeira, a instabilidade dimensional deve ser controlada através de utilização de programas de secagem ou reusinagem como preparação para a montagem dos móveis.

Contextualizando o tratamento de cozimento como tema vergamento, pode-se considerar o mesmo como um tipo de pré-tratamento da madeira, em relação ao processo como um todo. Segundo Gatto et al. (2008) esse tipo de pré-tratamento apresenta como única desvantagem em relação ao pré-tratamento de vaporização o fato de ser maior a absorção de água pela madeira, pelo menos em sua camada superficial. Segundo Vorreiter (1958), para madeiras secas ao ar, com teores de umidade entre 15 e 20 % a plasticização pode ser feita por cozimento ou por simples imersão em água quente, a 98°C, tendo tempos de imersão, dependendo da espécie, de 12 a 15 minutos por centímetro de espessura. Entretanto para USDA (1999) o teor de umidade da madeira também pode influenciar no tempo de cozimento, sendo recomendados 15 minutos por centímetro de espessura para teores de umidade de 20 a 25 % e 30 minutos por centímetro de espessura para teores de umidade inferiores.

3.2.2 Vaporização

A adição de calor e umidade à madeira vem desempenhando inúmeras funções benéficas para a trabalhabilidade da mesma. Os estudos sobre as aplicações da vaporização na madeira vão desde o relaxamento de tensões de crescimento (CALONEGO; SEVERO, 2005) até a plasticização da madeira para a conformação através do vergamento (PECK, 1957).

Kubler (1987) cita que há a possibilidade de alívio das tensões de crescimento por meio de aplicação simultânea de umidade e calor, o que promove uma realocação das células ou dos componentes das paredes celulares. O autor cita que o processo ocorre de forma que a deformação proporcionada pela tensão interna de crescimento é admissível, o que não gera colapso. Outro fato é que essa deformação passa de elástica para plástica, se tornando assim permanente.

Com um período de vaporização de 20 h, Calonego e Severo (2005) obtiveram sucesso na redução de defeitos proporcionados pelas tensões de crescimento para toras de classes diamétrais de 30-35, de 25-30 e de 20-25 cm, quando analisada a madeira de *Eucalyptus grandis*. Da mesma forma, quando analisada a espécie madeireira *Eucalyptus dunnii*, (SEVERO; TOMASELLI, 2000) obtiveram alívio das tensões, entretanto, não houve a inibição dos defeitos de rachaduras, após o mesmo tempo de vaporização.

A vaporização acaba desempenhando um papel intimamente relacionado entre o alívio de tensões de crescimento e o vergamento, uma vez que considerando uma aplicação de tensão, o processo de vergamento age contra o estado natural da peça. O amolecimento da madeira proporcionado pelo vapor age mitigando o efeito reverso que a madeira tende a apresentar, isto é, no caso das tensões internas da madeira, tende a aliviá-las através da realocação das fibras. No vergamento esse pré-tratamento tende a facilitar a movimentação longitudinal das fibras, favorecendo os efeitos de tração e a compressão simultâneos característicos de um esforço de flexão.

Além disso, segundo Beer e Johnston (1995), há um terceiro esforço presente em um ensaio de flexão, que ocorre na linha neutra da peça. Uma vez que a face côncava é acometida por esforços de compressão e a face convexa por tração, em regiões próximas à linha neutra há vetores de forças opostos indicando presença de cisalhamento puro. A plasticização da madeira visa o amolecimento da lignina para que haja o deslocamento

das fibras sendo cisalhadas, mas sem a ocorrência de falha ou ruptura, isto é, fixando-as em posições secundárias, o que caracteriza o vergamento.

Como pré-tratamento visando o condicionamento da madeira, para o processo de vergamento, a vaporização pode ser feita de várias formas, entre elas com um prévio período de submersão das peças em água fria. Porém, de acordo com Von Zuben (2010), a melhor forma de realizar este pré-tratamento é a simples aplicação de vapor direto à madeira durante 45 minutos após o ambiente atingir 100 °C, pois não apresenta diferença notável em relação às outras tentativas que consistiram em submersão da madeira em água por dias ou horas como processo prévio à vaporização.

Segundo Benson (2008) é de suma importância que se ultrapasse os 93 °C dentro da caixa de cozimento, devendo-se manter a temperatura o perto dos 100 °C possível, para que a madeira possa ser vergada de forma correta. O autor ainda cita que quanto maior o volume da caixa de cozimento maior é a quantidade de vapor necessária, sendo que este deve entrar na caixa e fluir uniformemente através da madeira para somente assim sair na outra ponta. É ideal que a madeira seja suspensa dentro da caixa, tendo o mínimo de contato com as paredes da caixa para que o vapor possa cercar a peça totalmente. No dimensionamento da caixa de vaporização deve-se levar em consideração que o volume não deve ser muito maior do que o volume de madeira a ser vaporizado, a menos que a produção de vapor seja muito grande, pois dessa forma há grande perda calor e pouco vapor em contato com a madeira, ocasionando um baixo rendimento no processo.

Sabe-se que o teor de umidade da madeira influencia na qualidade da madeira vergada. Para Stevens e Turner (1970), teores de umidade de 25 a 30 % já são suficientes para tornar a madeira compressível quando aquecida. Muitos testes provaram que não há acréscimo de qualidade no vergamento quando a madeira é aquecida acima da temperatura de ebulição da água, ou seja 100 °C (212 °F). De acordo com os autores, o tempo necessário de exposição da madeira ao vapor é calculado com base na espessura da peça a ser vergada. É citado que o tempo ideal é de 1,8 minutos por milímetro de espessura, ou 45 minutos por cada polegada de espessura.

3.2.3 Radiação por micro-ondas

Desde a descoberta das micro-ondas este mecanismo de modificação dos materiais vem sendo utilizado. Entretanto, não só utilizada para fornos, esse tipo de radiação está presente em grande parte do mundo de transmissão de dados. Segundo Singh e Verma (2009), as técnicas de radiação por micro-ondas tem grande utilização nas áreas de astronomia, sistemas de radares, medicina, comunicações à distância e sistemas eletrônicos de mísseis.

Segundo Chang e Chang (2003), As micro-ondas são ondas eletromagnéticas cujas frequências vão de 1 a 1000 GHz. O termo micro-ondas é normalmente utilizado para ondas eletromagnéticas às quais podem ser mensuradas em centímetros. À grosso modo, o comprimento de onda das micro-ondas vai de 1 mm até 30 cm, significando que as frequências de micro-ondas estão acima do infravermelho e do espectro de luz visível.

A radiação por micro-ondas é transmitida para o material através de vibração, que é imediatamente absorvida pelas moléculas. A energia vibracional elétrica é convertida assim em calor. A temperatura que surge das amostras aquecidas por radiação por micro-ondas é proveniente da fricção das moléculas.

Ozarska e Daian (2010) apresentaram um perfil de conteúdo de umidade na seção transversal de peças destinadas ao vergamento tratadas por micro-ondas. Os autores citam que o teor de umidade afeta significativamente o comportamento da amostra durante o aquecimento e o resfriamento. Amostras com menores teores apresentam maior uniformidade no aquecimento quando comparados com amostras de maior conteúdo de umidade, além de gastarem menos energia para proporcionar o aquecimento.

Sendo um dos métodos eletromagnéticos de aquecimento, a radiação por micro-ondas foi muito utilizada para o aquecimento e consequente secagem de materiais lignocelulósicos. O principal benefício da secagem por micro-ondas é a diminuição pronunciada do tempo de secagem (CHANG; CHANG, 2003).

Em estudos para a comparação das estimativas teóricas e dados práticos da distribuição de calor em amostras aquecidas com micro-ondas, Zielonka et al. (1997) chegaram à conclusão de que quanto menor o teor de umidade da peça a ser aquecida, maior é a penetração das ondas no corpo sendo aquecido. De forma que para a

incidência da radiação em uma amostra de madeira totalmente saturada por água ocorre o aquecimento superficial da madeira, em detrimento do interior. Entretanto, à medida em que a água vai evaporando a radiação obtém a possibilidade de penetrar cada vez mais ao interior da peça.

Gasparik e Barcik (2013) avaliaram a deformação total da madeira de *Fagus* sp. plasticizada por micro-ondas através de testes de compressão paralela às fibras. Os autores verificaram deformações totais de 32,4, 35,8 e 37,2% para tratamentos de 2, 4 e 6 minutos de exposição à radiação de micro-ondas respectivamente. Em adição verificaram efeito significativo para os fatores tempo de plasticização e conteúdo de umidade inicial, além da significância na interação dos fatores, podendo concluir que o teor de umidade inicial e o tempo de plasticização são de forte influência na qualidade do vergamento, representada pelo percentual de deformação.

3.3 Vergamento de Madeira sólida

Na literatura há várias proposições para a mecânica do vergamento, inferindo sobre o desenvolvimento do dispositivo de vergamento e seus itens de construção. Para Von Zuben (2010), o equipamento necessário para o ensaio de vergamento consiste em uma forma com o raio desejado para o vergamento, uma cinta anti-tração e um dispositivo hidráulico de medição de pressão de extremidade.

Smith (2004) cita que a utilização de grampos para a fixação da peça vergada à forma é imprescindível, garantindo a fixação da mesma e a diminuição da perda de forma circular após 24 h de resfriamento.

Daian e Ozarska (2010) utilizaram-se de uma forma de raio variável movida mecanicamente por um eixo rotativo que pressiona a madeira entre a cinta antitração e o molde. Tal medida é de grande importância pois supre uma necessidade de determinação do mínimo raio de vergamento de cada espécie de madeira. Dessa forma torna-se maior o rendimento em experimento, podendo-se analisar vários raios em uma mesma amostra, isto é, no vergamento proporcionado pelos autores são utilizados diferentes coeficientes de vergamento.

Vorreiter (1958), citado por Gatto et al. (2008) apresenta como conceito de coeficiente de vergamento a relação entre a espessura da peça e o raio de vergamento

como expresso na Equação 1. Tal grandeza adimensional caracteriza a rigidez do vergamento de forma que quanto maior o valor final, mais agressivo é o vergamento.

$$C_v = \frac{s}{r} \quad (1)$$

Em que: C_v = coeficiente de vergamento; s = espessura da peça vergada; r = raio de vergamento.

O processo de vergamento é facilitado com uso de um dispositivo antitração para que haja a redução praticamente total da tensão de tração presente na parte convexa do corpo de prova. Com a pressão da cinta metálica sobre a madeira e os suportes nas extremidades do mesmo bem ajustados transfere-se teoricamente a linha neutra para a cinta metálica, resultando em uma zona de total compressão abaixo da linha da cinta. Dessa forma o raio de curvatura depende apenas da compressão das fibras da madeira. Entretanto uma pequena deformação provinda da tensão de tração ocorre no processo.

No vergamento da peça presa ao dispositivo e posto que há grande diferença entre os Módulos de Elasticidade (MOE) da madeira e do metal utilizado na cinta, de acordo com Beer e Johnston (1995), citado por Peres et al. (2013), a teoria de flexão mecânica de viga de um único material é desconsiderada, sendo o conjunto tratado como flexão de vigas compostas, onde pela diferença entre os MOEs dos materiais a linha neutra é deslocada fortemente para o lado convexo. Com essa mudança tem-se praticamente a extinção da tensão e deformação por tração, proporcionando à peça vergada tensões de compressão em toda a sua seção transversal, admitindo que a deformação da cinta antitração é desprezível e contida pelos apoios de extremidade.

Dependendo do tipo de madeira ou da espessura da peça a ser vergada, nem sempre é necessária a utilização de cintas antitração. Porém, quando a espessura da peça e o raio de curvatura exigem uma cinta, esta pode ser confeccionada de aço leve ou inox, podendo ter 1,2 mm de espessura para corpos-de-prova de até 38 mm, para espessuras superiores deve-se utilizar cintas de 2,0 mm (STEVENS; TURNER, 1970).

3.4 Anatomia da madeira e a relação com o vergamento

O fator anatomia da madeira é de grande importância para o vergamento, entretanto, não pode-se ficar dependente de um grupo de espécies que apresentem a anatomia desejada ou mais favorável para o processo. Gatto et al. (2008) obtiveram melhores resultados com a espécie madeireira nogueira-pecã. Esta espécie em particular apresenta porosidade em anel, o que segundo os mesmos autores, é um forte indicativo de qualidade de vergamento.

No interior da estrutura da madeira é necessário que haja o deslizamento das fibras para sentidos opostos durante a flexão. As paredes das fibras deve ser desligadas de suas vizinhas, protagonizar o deslocamento na direção em que o vergamento solicita e se fixarem em sua nova posição com o mínimo de ruptura. Para a face convexa, segundo Hwang (2002) as fibras devem afastar-se, gerando um estiramento, já para a face côncava as fibras devem se aproximar tomando-se como referência o sentido do comprimento da peça.

Para que o deslizamento das fibras tenha sucesso e a nova fixação das fibras ocorra sem falhas deve-se garantir que a peça de madeira a ser vergada não apresente defeitos anatômicos. Peres et al. (2013) citam como principais defeitos anatômicos os nós, que podem ser vivos ou mortos; as inclinações de grã; e os lenhos de reação, além dos defeitos relacionados aos citados, como excentricidade, conicidade, e defeitos de fuste.

Além da atenção às propriedades anatômicas da madeira, que são primordiais mas podem responder por falhas no produto final, é necessária a verificação e quantização das propriedades mecânicas da madeira, verificadas no estado *in natura* ou após tratamentos de plasticização anteriores ao processo de vergamento.

Para Zhao et al. (2012) o comportamento viscoelástico da madeira afeta os percentuais de peças finalizadas, enquanto que as características de relaxamento de estresses, referidas por Peres et al. (2013) e Gatto et al. (2008) como perda de forma circular, tem efeito direto na fixação de peças vergadas após o vergamento. Dessa forma o estudo do comportamento mecânico da madeira perante os tratamentos de plasticização visando a sua conformação é de suma importância, governando parâmetros de processo em busca da economia de energia e eficiência na produção.

3.5 Determinação das propriedades mecânicas da madeira

Estabilizadas com a temperatura ambiente e com a umidade relativa do ar, as propriedades mecânicas da madeira foram minuciosamente estudadas. Entretanto, recentemente se descobriu que essas propriedades são fortemente afetadas por alterações na temperatura ou na umidade relativa, tornando o comportamento da madeira muito diferente daquele encontrado em condições normais (WANG; MINATO; IIDA, 2007).

Durante a secagem, que compreende a perda de umidade e temperatura posterior ao vergamento, há uma influência na fluidez da madeira, bem como no desenvolvimento das tensões e deformações durante o processo (ZHAO et al., 2012).

Gasparik e Barcik (2013) avaliaram as propriedades de deformação total à compressão paralela à grã e as forças de carregamento no tratamento de plasticização por micro-ondas. Tal determinação é de grande importância para a caracterização do tratamento de plasticização utilizado. Através da análise das deformações totais e da força de carregamento foi possível concluir que o tempo de plasticização e o conteúdo inicial de umidade são fatores que produzem efeito significativo nos valores.

Ishimaru, Oshima e Iida (2001) objetivaram em seu trabalho avaliar propriedades mecânicas e viscoelásticas da madeira em condicionamentos de umidade até o equilíbrio em situações de adsorção e desorção de água e puderam concluir que a elasticidade e a resistência da madeira com teor de umidade condicionado por adsorção tiveram um incremento significativo. Além disso, a propriedade de relaxamento de estresses para conteúdos de umidade similares foi maior no grupo de amostras utilizadas no processo de adsorção do que de desorção.

As propriedades da madeira são transitórias, como citado por Wang, Minato e Iida (2007). Em razão disso é sempre necessário que sejam desenvolvidos métodos de determinação dessas propriedades de forma a acompanhar a sua modificação ao passar do tempo ou de outra variável como teor de umidade, temperatura, quantidade de algum agente de carga, ganho de massa em impregnante, etc.

Phuong, Shida e Saito (2007) avaliaram a fragilidade, a perda de massa, o conteúdo de lignina e as propriedades colorimétricas da madeira de *Styrax tonkinensis*

em função de tratamentos térmicos. Tais autores constataram que a fragilidade da madeira, determinada a partir de curvas tensão-deformação sofreram decréscimo significativo após o tratamento térmico, e ainda acrescentam que sob o mais severo tratamento térmico tal propriedade mecânica experimentou um acréscimo de até quatro vezes o valor da madeira *in natura*.

Utilizando-se do mesmo método de determinação da fragilidade da madeira, Taghiyari, Enayati e Gholamiyan (2013) objetivaram a observação do comportamento da referida propriedade, bem como o de outras físicas e mecânicas, referentes à madeira termorretrificada impregnada com nanopartículas de prata. Concluiu-se que a impregnação dessas partículas agrava os efeitos do tratamento térmico, culminando no aumento da fragilidade da madeira e na redução das outras propriedades mecânicas analisadas.

Portanto postula-se de grande importância a determinação ou acompanhamento das propriedades mecânicas, o quanto possível, ao longo dos procedimentos de modificação da madeira para que se tenha a certeza de que fatores produziram e produzirão efeitos de interesse.

3.6 Rugosidade superficial da madeira

Toda a técnica de tratamento, usinagem ou modificação da madeira implica em alterações, tênues ou pronunciadas, na rugosidade superficial da mesma. Atualmente muitos estudos foram conduzidos tendo como objetivo a determinação dessa propriedade da superfície da madeira, utilizando-se de metodologias diferentes bem como dispositivos variados.

Kiliç et al. (2008) avaliaram o efeito da vaporização na rugosidade da superfície da madeira de *Fagus orientalis* e *Entandrophragma cylindricum* tomando em suas análises cinco parâmetros que descrevem a rugosidade, R_a rugosidade média, R_z média da altura pico-vale, R_k profundidade da rugosidade central, R_{pk} altura reduzida dos picos e R_{vk} profundidade reduzida dos vales. Tais autores, com a utilização de um rugosímetro modelo SurfTest SJ-301, marca Mitutoyo, puderam concluir que o método referente ao aparelho utilizado foi capaz de avaliar com precisão os parâmetros de rugosidade da madeira.

Analisando a rugosidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* com superfície usinada por lixamento e plaina, Martins et al. (2011) coletaram os parâmetros R_a , R_z e R_t e não encontraram diferença significativa entre as superfícies com diferentes usinagens. Os autores ainda citam que atualmente são vários os equipamentos utilizados para a avaliação da superfície dos materiais, sendo que dispositivos que utilizam o método agulha ou haste são utilizados com sucesso e apresentam bons resultados na mensuração da superfície da madeira sólida e de compósitos de madeira.

Embora tais estudos tenham sido desenvolvidos com sucesso e apresentarem a rugosidade superficial determinada com acurácia, não há estabelecido, segundo Zhong, Hiziroglu e Chan (2013), um método padrão para a análise de madeira sólida e de produtos de origem madeireira. Métodos de agulha (haste), óticos, por análise de imagem, e métodos pneumáticos foram e são usados, cada um apresentando vantagens e desvantagens.

Embora alguns métodos de avaliação da rugosidade superficial da madeira apresentem desvantagens e também não haja um método consolidado, existem muitos estudos em que a referida propriedade é utilizada para comparação entre tratamentos variados de modificação da madeira. Unsal, Candan e Korkut (2011) utilizaram a rugosidade como parâmetro para caracterização da madeira modificada termicamente e concluíram que a madeira tratada apresenta superfície mais suave.

Com o objetivo de avaliar a rugosidade de lâminas usinadas de *Fagus orientalis*, Dundar et al. (2008) verificaram lâminas das posições interna, central e externa das toras e constataram que para tratamentos de 40 e 60h os parâmetros de rugosidade da madeira diminuem do centro para a região da casca, todavia para o tratamento de 20h esta tendência se apresenta de forma inversa.

Através dos variados estudos encontrados na literatura é possível afirmar que os parâmetros de rugosidade determinados pelo método “*stylus*”, que corresponde ao método de agulha ou haste, são confiáveis na caracterização da madeira.

Segundo a norma JIS B 0601 (2002) a rugosidade é regida pelos parâmetros R_a , rugosidade média; R_z , soma da altura média dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais profundos; R_t , soma da altura do pico mais alto do perfil e do vale mais profundo do

perfil; e R_q rugosidade quadrática, ou raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios a partir da linha média, dentro do percurso de medição.

3.7 Colorimetria da madeira

Tratamentos térmicos têm como característica principal a modificação da madeira, independentemente das propriedades objetivadas pelo pesquisador. Na termorreificação da madeira há modificação da coloração em razão de variáveis como tempo e temperatura de tratamento (CAI; CAI, 2012; KAČÍKOVÁ et al., 2013).

A avaliação dos parâmetros colorimétricos da madeira é feita de diferentes formas e pode ser apresentada de forma empírica, comparativa ou paramétrica. Taghiyari, Enayati e Gholamiyan (2013) citam empiricamente em seu trabalho que após um tratamento térmico a 135 °C durante 24h foram observaram-se mudanças na coloração das amostras analisadas, mas para a madeira impregnada com nanopartículas de prata essa mudança foi leve.

Okino et al. (2006) analisaram a madeira de *Cupressus glauca* com a utilização de dois métodos conhecidos para a caracterização colorimétrica porém distintos quanto à sua exatidão e objetividade. Os autores analisaram a madeira através da comparação visual da sua cor com a tabela de coloração de solos de Munsell (1975) e através do método CIE $L^*a^*b^*$, utilizado também por Cai e Cai (2012).

Segundo Camargos e Gonzalez (2001) o sistema CIE $L^*a^*b^*$ (Comissão Internacional de Iluminantes) consta de um método que define a sensação de cor através de três parâmetros: luminosidade, matiz e saturação. A luminosidade (L) pode ser definida como a escala cinza entre branco e preto, assumindo o valor de 0 para preto absoluto e 100 para branco total.

O espaço colorimétrico $L^*a^*b^*$ é atualmente um dos mais utilizados espaços de cor para a mensuração da coloração de objetos e é largamente utilizado em todas as áreas da ciência. Nesse sistema os parâmetros a e b são as coordenadas de cromaticidade compreendendo os eixos vermelho-verde (a) e amarelo-azul (b). Como apresentado na Fig. 3, no gráfico, o centro é acromático, à medida em que os valores de a e b vão aumentando, o ponto de encontro das coordenadas se afasta do centro e a saturação da cor aumenta (KONICA, 2007).

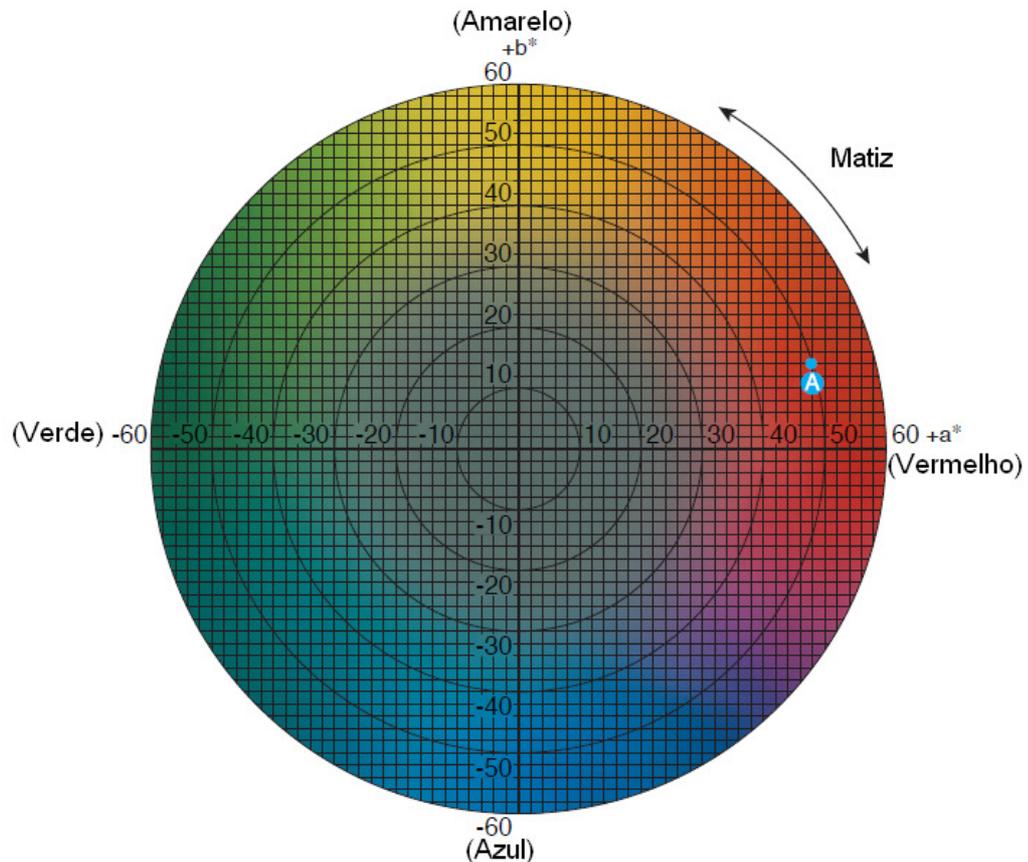


Figura 3 – Diagrama $L^*a^*b^*$. Em que: A = ponto cujas coordenadas segundo o sistema CIE Lab são: $L^*=43,31$; $a^*=47,63$; $b^*=14,12$. Fonte: Konica (2007), adaptado.

Utilizando-se do sistema $CIE L^*a^*b^*$, Tolvaj et al. (2012) analisaram as alterações colorimétricas da madeira submetida ao tratamento térmico por vaporização. Tais autores verificaram, após um tempo de vaporização de 22h, variações na matiz da coloração inicial da madeira. Ainda acrescentaram que ao longo do tratamento foram verificadas uma série de colorações entre a matiz inicial e a final, verificando como resultado final, madeiras com aparência envelhecida, como peças de mobiliário antigo e estruturas internas de madeira. Pode-se concluir no trabalho que a vaporização pode ser utilizada como tratamento estético para a reposição de peças de reparo para artefatos históricos ou móveis raros.

Comum entre os pesquisadores é a utilização de uma variável obtida através dos três parâmetros do sistema $CIE L^*a^*b^*$. Trata-se da variação total de cor, definida pela Equação 2 (KAČÍKOVÁ et al., 2013).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (2)$$

Em que ΔL , Δa e Δb são as variações entre mensurações nas amostras tratadas e não tratadas de madeira.

No tratamento térmico da madeira de *Styrax tonkinensis*, Phuong, Shida e Saito (2007) observaram que a 160°C a luminosidade decresce levemente, entretanto, a maiores temperaturas há um decréscimo significativo no referido parâmetro. Segundo os autores, a madeira torna-se escura e com coloração marrom.

Jiang, Zhou e Wang (2011) verificaram um acréscimo nos valores de L^* e ΔE , acompanhados de um decréscimo de b^* e C (cromaticidade), após tratamentos térmicos da madeira por radiação de micro-ondas seguidos de secagem ao ar livre.

A variedade de trabalhos abrangendo análises colorimétricas no sistema CIEL*a*b* consolida o sistema e a forma de caracterização. Dessa forma é evidente a importância da análise desses parâmetros colorimétricos perante as variações nas propriedades proporcionadas pelos tratamentos de modificação da madeira. Tais ações oferecem então a possibilidade de comparações entre esses tratamentos e de propriedades colorimétricas com propriedades físicas, químicas e mecânicas, uma vez que variam concomitantemente.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Fluxograma da Metodologia

De forma a facilitar o entendimento das análises propostas foi feita a esquematização hierárquica dos processos de caracterização envolvidos no presente estudo (Fig. 4).

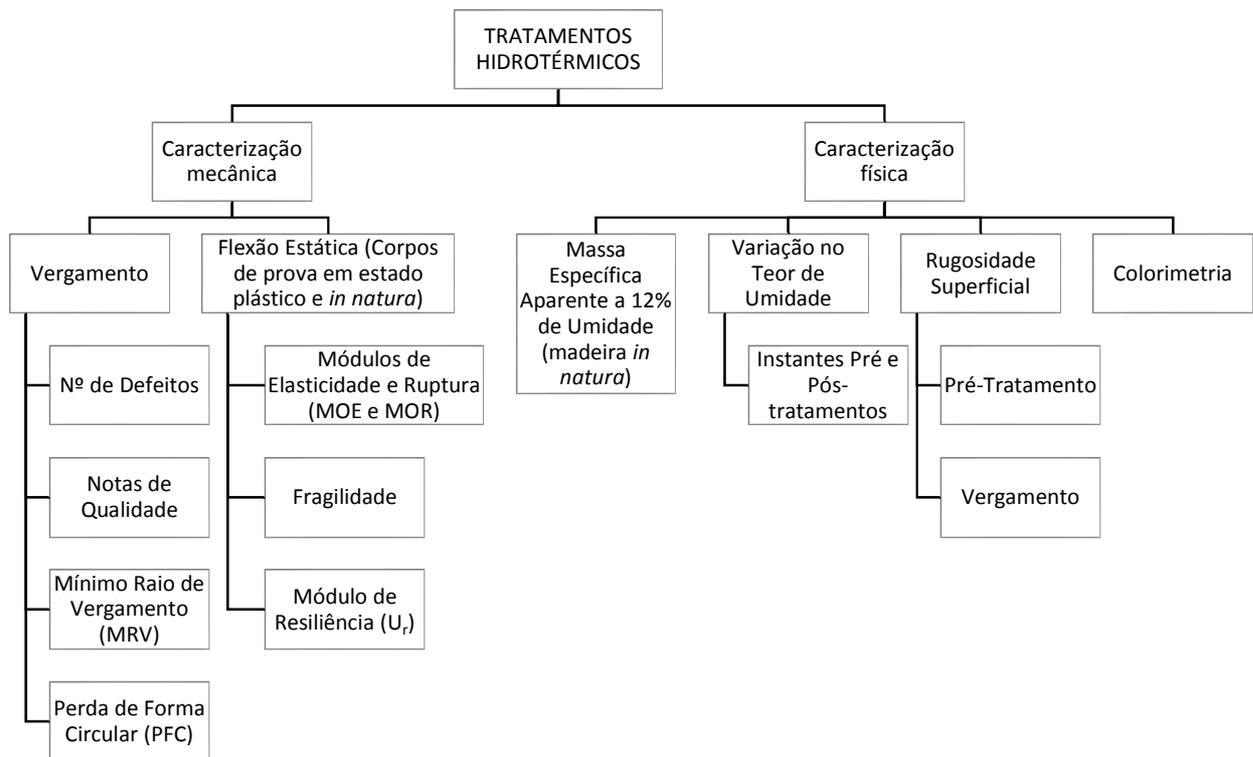


Figura 4 – Hierarquia da caracterização da madeira plasticizada hidrotermicamente.

4.2 Seleção do material de estudo

O material utilizado para os testes de vergamento foi fornecido por uma empresa parceira, localizada em Caxias do Sul, na serra gaúcha, compreendendo lotes de madeira das espécies *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Carya illinoensis* (noqueira-pecã), e *Platanus x acerifolia* (plátano). Os indivíduos de cada espécie foram selecionados em conformidade com as normas COPANT 30:1 - 001 (1971) e ASTM D5536-94 (1995).

A madeira da qual foram confeccionados os corpos de prova, doravante referidos como CPs, foi selecionada de forma a não conter defeitos inerentes ao crescimento e

desenvolvimento anormal do lenho, além de defeitos como ocorrência de nós, rachaduras e lenhos de reação. Defeitos inerentes à exposição do material a organismos xilófagos, como apodrecimento, galerias ou quaisquer danos estruturais causados por tais organismos também foram evitados.

4.3 Preparação dos corpos de prova

Para a obtenção dos dados foram produzidos dois tipos de CPs, destinados para os testes de vergamento (tipo A) e para as análises de propriedades mecânicas por flexão estática (tipo B).

Os corpos de prova tipo A foram confeccionados em orientação longitudinal, tendo 34 cm de comprimento, em adequação ao dispositivo de vergamento. A seção transversal da peça foi de 2 x 1 cm, sendo largura e espessura respectivamente (Fig. 5).

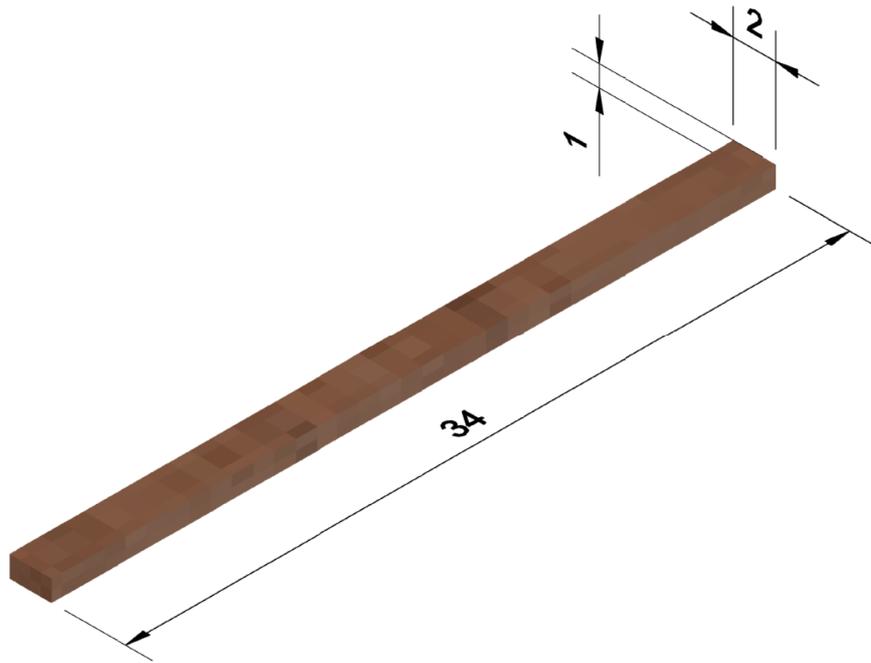


Figura 5 – Representação gráfica das dimensões em cm do corpo de prova tipo A.

Os corpos de prova usados nos tratamentos de vaporização e cozimento foram condicionados em câmara climatizada a 20°C e 65% de umidade, já os corpos de prova destinados aos tratamentos de micro-ondas, que têm por característica a adição prévia

de umidade, foram mantidos imersos em água durante 30 dias. Foram feitas 10 repetições para cada tratamento em cada espécie, totalizando 180 corpos de prova.

As peças foram confeccionadas de forma a manter os anéis de crescimento orientados eliminando a inclinação de grã e garantindo a estabilidade dimensional da peça, o que é extremamente apreciável para a qualidade do vergamento.

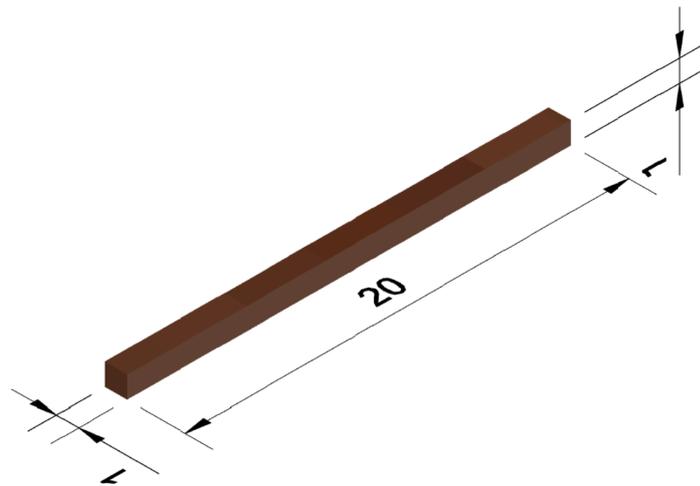


Figura 6 – Representação gráfica do corpo de prova tipo B (dimensões em cm).

Os corpos de prova do tipo B, produzidos para o ensaio de flexão estática seguiram a recomendação da norma ASTM D143 – 94, com 1 cm x 1 cm de seção transversal e 20 cm de comprimento (Fig. 6). Foram tomadas medidas para o alinhamento dos anéis de crescimento e condicionamento em câmara climatizada a 20°C e 65% de umidade relativa do ar assim como nos CPs do tipo A.

4.4 Tratamentos

4.4.1 Vaporização

O tratamento de vaporização (vapor d'água) foi realizado em uma caixa plástica, com abertura para a entrada e saída dos corpos de prova, além de um orifício para a entrada de vapor e outro para o escoamento da água condensada no interior e para a comunicação do ambiente interno com o externo, mantendo a pressão igual à atmosférica (Fig. 7).

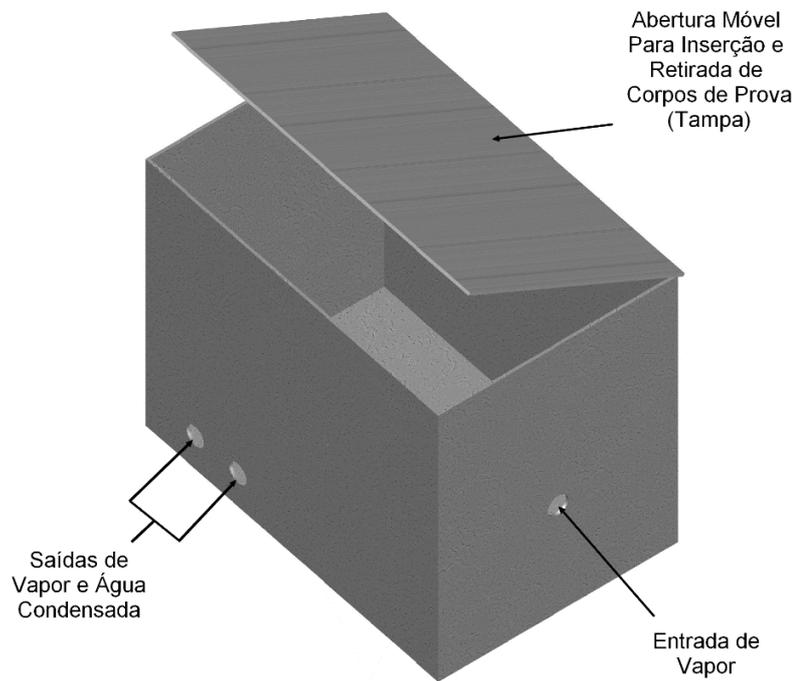


Figura 7 – Representação gráfica da caixa de vaporização utilizada.

Foram adotados tempos de 45 e 60 minutos, com 10 repetições para cada espécie, totalizando 60 corpos de prova.

4.4.2 Cozimento

O cozimento foi realizado à pressão atmosférica (1 atm) com água em ebulição (~100 °C) através de um ferro ebulidor do tipo “mergulhão” em um tanque com abertura na face superior para a entrada e saída dos corpos de prova (Fig. 8).

Foram adotados tempos de tratamento de 45, 60 minutos, apresentados na Tab. 1, com 10 repetições em cada espécie para cada tempo, sendo 60 corpos de prova.

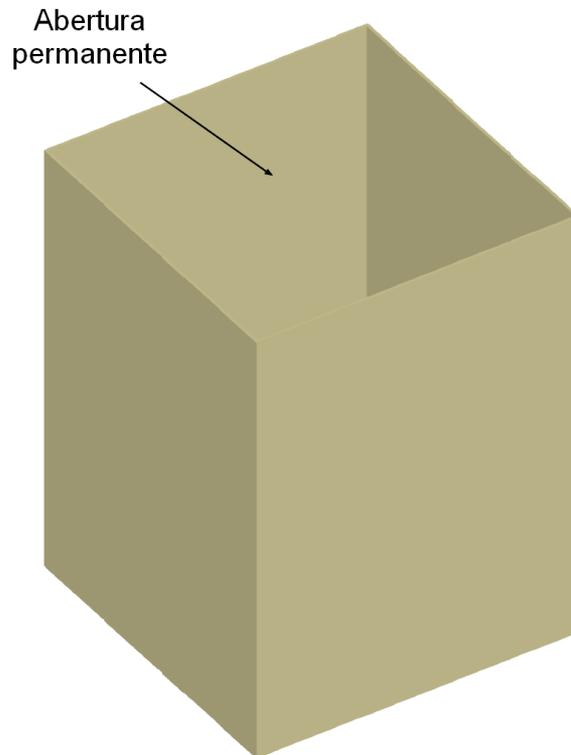


Figura 8 – Representação gráfica do tanque cozimento utilizado.

4.4.3 Radiação por micro-ondas

O tratamento de radiação por micro-ondas ocorreu em um forno laboratorial de micro-ondas com tempos de exposição de 60 e 90 segundos (Tab. 2), sendo 10 repetições por espécie em cada tempo, totalizando 60 corpos de prova.

4.5 Delineamento Experimental

Os experimentos foram divididos em duas etapas, sendo elas, o vergamento da madeira, conduzido sem a utilização de amostras testemunha, pela razão de que o vergamento não se dá sem prévio tratamento, e a caracterização da madeira por meio de ensaio de flexão estática.

Os testes de vergamento compuseram parte da caracterização mecânica da madeira através da avaliação das espécies quanto a sua qualidade no processo. Para os ensaios, os tratamentos foram divididos por tipo e tempo. Foram efetuadas 10 repetições para cada espécie em cada tratamento, totalizando 180 corpos de prova do tipo A. A Tab.

1 apresenta nomenclatura dos tratamentos para o vergamento com base no tempo de exposição e no tipo de tratamento.

Tabela 1 – Identificação dos pré-tratamentos de plasticização utilizados.

| Tratamento | Tempo de Exposição | Tipo |
|------------|--------------------|--------------------------|
| C1 | 45 minutos | Cozimento |
| C2 | 60 minutos | Cozimento |
| M1 | 60 segundos | Radiação por micro-ondas |
| M2 | 90 segundos | Radiação por micro-ondas |
| V1 | 45 minutos | Vaporização |
| V2 | 60 minutos | Vaporização |

Já o ensaio de flexão, além da função de caracterizar mecanicamente a madeira, foi aplicado na caracterização dos tratamentos de plasticização da madeira. Os parâmetros levados em consideração para tal análise foram o módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR), a fragilidade e a resiliência da madeira através da análise da curva tensão-deformação fornecida pelo ensaio.

Com isso foi possível a avaliação da redução do módulo de elasticidade, do comportamento do módulo de ruptura, da fragilidade e módulo de resiliência de amostras em estado plástico e *in natura*.

Na execução dos testes de flexão estática garantiu-se que os corpos de prova tratados fossem ensaiados durante seu estado máximo de plasticização proporcionado pelo tratamento, uma vez que com o resfriamento da madeira a mesma volta a tornar-se rígida e perde gradativamente a ductilidade.

Para tanto foi utilizado um dispositivo plástico acoplado à máquina de ensaios universal (Fig. 9). Esse dispositivo plástico tem por função envolver o corpo de prova com vapor, não deixando com que o mesmo perca umidade nem temperatura.



Figura 9 – Invólucro para manutenção das condições de tratamento para a flexão estática, em que: a=entrada de vapor d'água; b=saídas de vapor d'água.

Com a utilização do referido aparato a peça flexionada apresentou-se em estado plasticizado, semelhante ao verificado no momento do vergamento. O dispositivo plástico consta de um invólucro com entradas e saídas de vapor, instalado junto aos cutelos do dispositivo de flexão. O sistema mantém-se à pressão atmosférica, temperatura a 100 °C, ambiente com 100% de umidade relativa do ar e é utilizado como forma de manutenção do estado tratado para todos os tipos de tratamentos, com exceção das amostras do grupo controle.

Os tratamentos utilizados para a plasticização anterior à flexão estática foram 45 minutos de cozimento, 60 minutos de vaporização e 90 segundos de radiação por micro-ondas. A escolha dos tratamentos foi feita com base na nota média de qualidade de vergamento apresentada por cada um, uma vez que cronologicamente os testes de flexão estática foram executados após os ensaios de vergamento. Foram feitas 15 repetições para cada grupo tratado e grupo controle para cada espécie, totalizando 180 corpos de prova do Tipo B.

Além da caracterização mecânica da madeira foram conduzidas análises de suas propriedades físicas. As propriedades analisadas foram a colorimetria da madeira, rugosidade superficial, massa específica aparente a 12% e teor de umidade.

Na colorimetria da madeira foram mensurados os parâmetros L , a e b de cada uma das amostras controle e tratadas. Tal delineamento visa a avaliação da possível mudança na coloração da madeira proporcionada pelos tratamentos de plasticização.

Quando analisada a rugosidade superficial a tomada dos dados foi dividida em duas etapas principais, a análise da rugosidade da madeira após o ensaio de vergamento, em CPs tipo A, comparando-se medidas entre os lados côncavo e convexo e após a ação dos tratamentos de plasticização, em CPs tipo B, comparando amostras após os tratamentos com amostras não tratadas.

A massa específica aparente a 12% foi tomada com o objetivo de correlação entre a propriedade física citada e as outras variáveis analisadas no estudo.

Por fim, o teor de umidade das amostras destinadas ao vergamento foi verificado antes e após o tratamento, com a finalidade de determinação da variação no teor de umidade proporcionado por cada um.

4.6 Caracterização Mecânica da Madeira

4.6.1 Vergamento Laboratorial

Para a caracterização mecânica da madeira quanto à qualidade de vergamento proporcionada pelos tratamentos foi utilizado um dispositivo de vergamento rotativo manual, com força aplicada com auxílio de braço de alavanca (Fig. 10).

O dispositivo utilizado contou com uma forma de raio variável ligado à um braço de alavanca. A mecânica utilizada seguiu proposições de autores como Stevens e Turner (1970) em que há a utilização de um rolete de pressão, acoplado com mola, que garante a fixação da peça e da cinta antitração à forma de vergamento. A ideia de forma rotativa justifica a análise do mínimo raio de vergamento, em diante referido como MRV para o restante do trabalho, para as espécies estudadas.

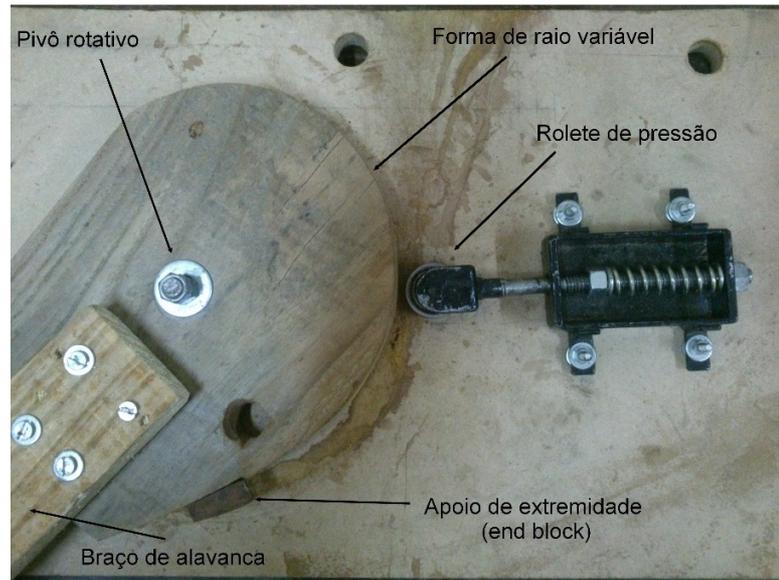


Figura 10 – Dispositivo rotativo de vergamento com raio variável. Fonte: O autor.

A peça sobre a qual a madeira é vergada apresenta diferentes coeficientes de vergamento, dimensionados de acordo com o proposto por Daian e Ozarska (2010). Uma vez fixa a espessura da peça (1 cm), o coeficiente de vergamento é variado com a utilização de diferentes raios na forma. A Fig. 11 traz a representação gráfica do dimensionamento da forma de raio variável.

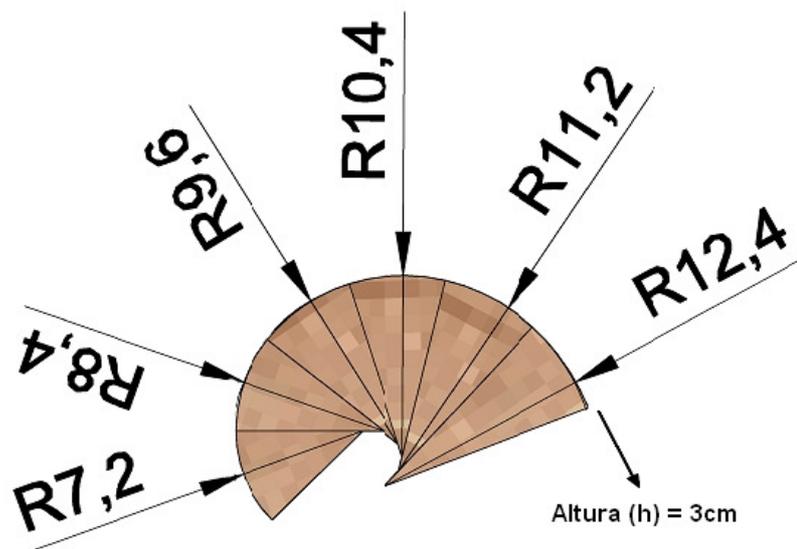


Figura 11 – Representação gráfica da forma de raio variável. Fonte: O autor.

A Tab. 2 apresenta a relação dos coeficientes de vergamento com e seus respectivos raios utilizados. Na Fig. 11 cada trecho corresponde a um raio específico, totalizando seis raios.

Tabela 2 – Raios e coeficientes de flexionamento.

| Espessura (s - cm) | Raio (r - cm) | Coeficiente de vergamento ($C_v = s/r$) |
|--------------------|---------------|---|
| 1 | 7,23 (6)* | 0,15 |
| 1 | 8,42(5) | 0,12 |
| 1 | 9,64 (4) | 0,11 |
| 1 | 10,43 (3) | 0,10 |
| 1 | 11,21 (2) | 0,09 |
| 1 | 12,44 (1) | 0,08 |

*Entre parênteses o parâmetro atribuído ao raio de vergamento para fins de análises estatísticas.

Seguindo o proposto pelos autores citados o dispositivo contou com a utilização de cinta antitração, que foi confeccionada de aço inox, de acordo com recomendações de experimentos anteriores (PERES, 2011). A utilização de apoios de extremidade, referidos como *end blocks* por Stevens e Turner (1970) foi conduzida de forma que houvesse a inibição de falhas de cisalhamento longitudinal.

4.6.1.1 Defeitos de vergamento

Para que pudesse ser feita a comparação estatística do resultado de um tratamento com relação a outro, a análise de ocorrência dos defeitos foi transformada em incidência numérica, isto é, todos os tipos de defeitos, apresentados e descritos por Vorreiter (1958) na Fig. 12, foram contabilizados. O autor apresenta sete tipos diferentes de falhas que podem ocorrer no processo de vergamento. Dessa forma, a incidência e recorrência destas falhas foi contabilizada, bem como a magnitude de cada defeito, para que se pudessem gerar dados numéricos, excluindo assim a subjetividade da avaliação.

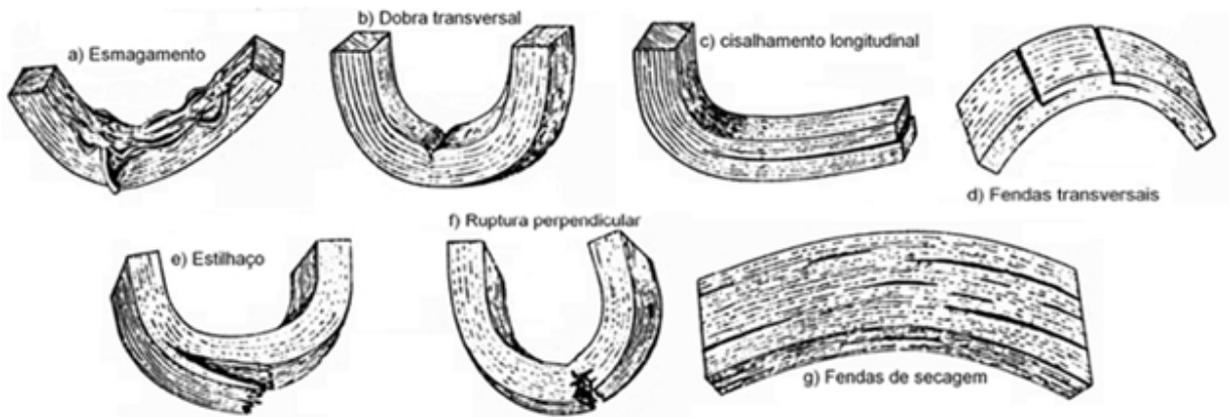


Figura 12 – Defeitos ocorrentes no curvamento de madeira maciça. Fonte: Vorreiter (1958).

4.6.1.2 Notas de peças vergadas

Foi utilizado um sistema de notas para as peças, sendo de 1 a 5. A aplicação desta metodologia justifica-se pelo fato de que os defeitos no ensaio de vergamento de madeira maciça nem sempre são motivos de exclusão da peça, ou seja, com posterior usinagem leve ou acabamento podem ser contornados os problemas, que são normalmente estéticos.

Tabela 3 – Notas adotadas para classificação das peças vergadas. Fonte: O autor.

| Nota | Descrição | Situação da Peça |
|------|--------------------|--|
| 1 | Ruim | Quebra da peça; Perda de Resistência; 3 ou mais tipos de defeitos presentes; |
| 2 | Moderadamente Ruim | Defeitos Visuais acentuados; até 2 tipos de defeitos presentes; |
| 3 | Média | Defeitos Visuais moderados; até 2 defeitos por peça; |
| 4 | Moderadamente boa | Defeito visual leve; máximo de 1 defeito ocorrente; |
| 5 | Boa | Peça perfeita, livre de defeitos. |

A Tab. 3 apresenta a relação das notas com a situação da peça. Foram adotadas como peças reutilizáveis, ou seja, onde a ocorrência de defeitos não comprometeu seu uso, as que receberam notas de 3 a 5. Peças com notas ruins ou moderadamente ruins não foram consideradas reutilizáveis, mesmo após reusinagem.

4.6.1.3 Perda de forma circular

O efeito conhecido como *spring back* (BENSON, 2008) é o que ocorre quando a peça é liberada da forma e da cinta antitração. O cálculo da magnitude da perda de forma circular, avante referida como PFC, foi feito de acordo com a metodologia descrita por Gatto et al. (2008), que não consideraram corpos de prova com falha estrutural ou quebra.

Para a medição da perda de forma circular foi tomada a distância entre as pontas da peça vergada em dois momentos (Fig. 13). Foram feitas medições na forma e desenformado, após 24h de resfriamento e condicionamento em câmara climatizada a 20 °C e 65% de umidade relativa do ar.

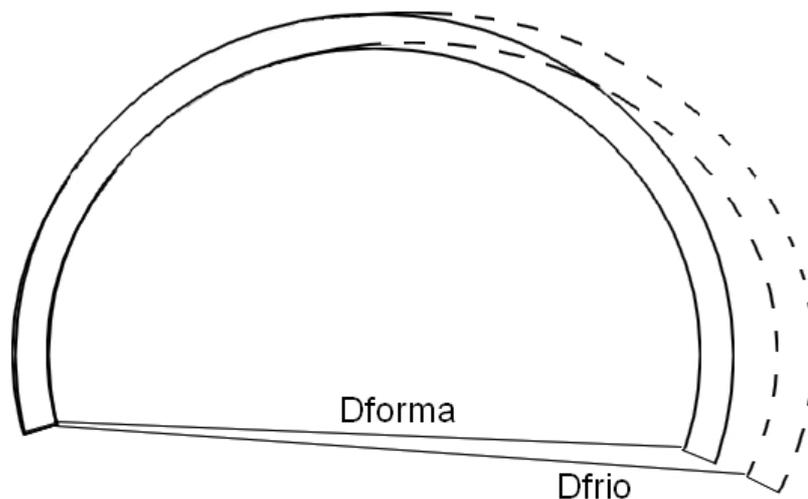


Figura 13 – Esquema de cálculo da perda de forma circular.

Após tomadas as medidas foi calculada a diferença entre elas. O valor da diferença foi tido como a perda da forma circular, expresso em percentagem (Equação 3).

$$PFC = \frac{D_{frio} - D_{forma}}{D_{forma}} \times 100 \quad (3)$$

Em que: PFC = Perda de forma circular (%); D_{forma} = distância entre as pontas na forma (cm); D_{frio} = distância entre as pontas após o resfriamento (cm).

4.6.2 Flexão Estática

Nos ensaios de flexão estática foi utilizada a norma de procedimento ASTM D143 – 94, em uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC com capacidade para 300kN. Foram obtidos de forma direta através do software da máquina os módulos de Elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR) da madeira. Foi utilizada uma velocidade de ensaio de 0,52 mm/min, como é definido na norma.

Indiretamente, por meio da análise das curvas tensão-deformação fornecidas pelo ensaio, correspondentes a cada corpo de prova, foram tomadas outras propriedades mecânicas de suma importância para a caracterização da atuação dos tratamentos e da madeira *in natura*. Tais propriedades são a Fragilidade e o Módulo de Resiliência da madeira.

4.6.2.1 Módulo de Resiliência

A determinação do módulo de resiliência (U_r) foi feita com base na análise do gráfico tensão deformação fornecido pelo ensaio de flexão estática numa máquina universal de ensaios mecânicos.

O módulo em questão é referido no meio computacional, para uma amostra submetida a um teste de tensão uniaxial, como a área abaixo da curva tensão-deformação de engenharia, tomada até o ponto de escoamento segundo a Equação 4 (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma_e d\varepsilon \quad (4)$$

Em que: U_r = módulo de resiliência; ϵ_e = deformação no limite de escoamento; σ_e = tensão no limite de escoamento.

4.6.2.2 Fragilidade da madeira

Para tal análise a metodologia utilizada considera a relação entre as áreas elástica e total sob a curva do gráfico tensão-deformação. A fragilidade pode ser obtida por meio da relação entre as áreas determinadas por integral como expresso na Equação 5 (PHUONG; SHIDA; SAITO, 2007).

$$F = \frac{A_e}{A_{Total}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

Em que: A_e = área abaixo da curva até o limite de proporcionalidade do gráfico; A_{Total} = área total do gráfico; F = fragilidade (%);

A área elástica, ou seja, até o limite de proporcionalidade foi determinado por regressão linear com coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,99 tomando-se por base do ponto zero até o onde a reta torna-se tangente ao gráfico (Fig. 14).

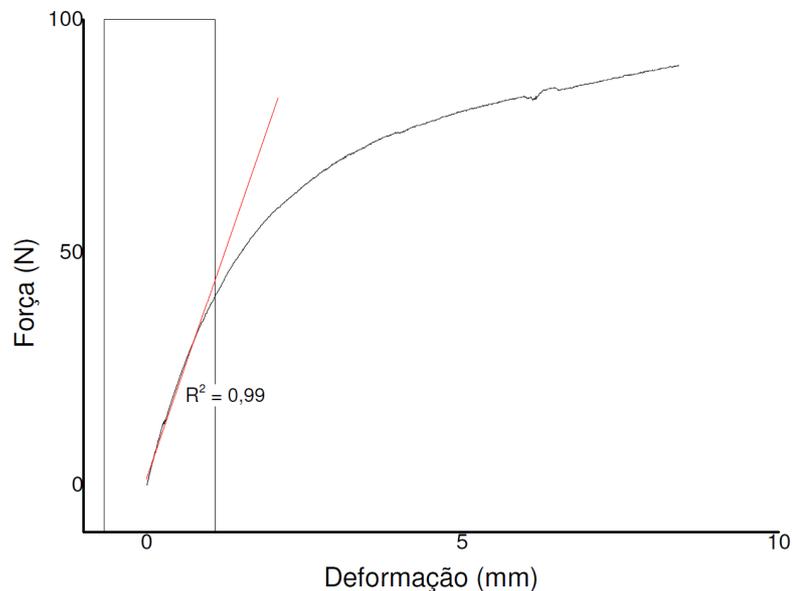


Figura 14 – Regressão linear para a determinação do limite de proporcionalidade.

Uma vez determinado o limite de proporcionalidade é calculada a área abaixo do mesmo e confrontada com a área total do gráfico. O resultante da referida sequência de

análises matemáticas é a propriedade de fragilidade da madeira, expressa em percentagem.

4.7 Caracterização Física da Madeira

4.7.1 Variação no Teor de Umidade

Foram feitas medições dos teores de umidade imediatamente anteriores e posteriores ao tratamento, com a finalidade de mensuração da eficiência do tratamento relacionado à adição de umidade à madeira, parâmetro de suma importância para o sucesso do vergamento. No tratamento de radiação por micro-ondas não ocorreu adição de umidade durante o tratamento, pois constou de um processo de célula cheia, portanto, o dado de variação de teor de umidade representou a diminuição na quantidade de água no interior do corpo de prova saturado em diferentes tempos de exposição às micro-ondas.

O teor de umidade utilizado no presente trabalho foi o de base seca. A metodologia seguida por Gatto et al. (2008) mostra que a variação do teor de umidade de base seca pode ser obtido dividindo-se o valor da variação entre a massa da madeira seca e a massa úmida pela massa úmida de acordo com a Equação 6.

$$Tu = \frac{m_u - m_o}{m_o} \times 100 \quad (6)$$

Em que: Tu = teor de umidade da madeira (%); m_o = massa de madeira seca (g); m_u = massa úmida (g).

A variação no teor de umidade é dada em percentagem de acordo com a metodologia descrita por Peres (2011), representada pela Equação 7.

$$\Delta TU = TU_f - TU_i \quad (7)$$

Em que: TU_f = teor de umidade após o tratamento (TU final, em %); e TU_i = teor de umidade anterior ao tratamento (TU inicial, em %).

4.7.2 Determinação da massa específica aparente à 12% de umidade

A massa específica básica foi determinada por meio da norma ASTM D 2395 - 93 (ASTM, 1997), através da relação entre massa e volume, com volume determinado a partir da medição das três dimensões da amostra com paquímetro digital com precisão de 0,01 mm e massa mensurada com balança analítica de 0,01 g de precisão.

4.7.3 Colorimetria

Após os tratamentos de plasticização os corpos de prova do tipo B foram submetidos a análises colorimétricas nos planos radial e tangencial, sendo posto em análise estatística o valor médio resultante de três medições em cada plano anatômico de cada corpo de prova. Foram tomados parâmetros colorimétricos do sistema CIE $L^*a^*b^*$. Sendo eles L (luminosidade), a (coordenada do eixo vermelho-verde) e b (coordenada do eixo azul-amarelo).

Para a caracterização dos parâmetros colorimétricos da madeira foi utilizado um colorímetro da marca Konica, modelo DR-400 acoplado a um computador com iluminante padrão A10 e ângulo do observador de 10°.

De posse dos dados colorimétricos foi feita a mensuração da diferença total de cor (ΔE), através das Equações 8 e 9 (CAI; CAI, 2012; KAČÍKOVÁ et al., 2013).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (8)$$

$$\Delta L = L_T - L_{NT}; \Delta a = a_T - a_{NT}; \Delta b = b_T - b_{NT} \quad (9)$$

Em que: ΔE = diferença total de cor; L_T , a_T , b_T parâmetros referentes à madeira tratada; L_{NT} , a_{NT} , b_{NT} parâmetros da madeira não tratada.

4.7.4 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial foi determinada através de um rugosímetro da marca Homis, modelo 899. Foram feitas mensurações nas seções radial e tangencial das amostras do tipo B e nas faces côncava e convexa dos corpos de prova do tipo A, de maneira a se obter quatro parâmetros, a saber: R_a , rugosidade média, R_z , média da distância entre pico e vale; R_q , rugosidade quadrática média e R_t , rugosidade máxima, expressos na norma JIS B 0601 (2002).

Segundo Peres et al. (2013) no vergamento há um estiramento das fibras na face convexa e uma compressão das mesmas na face côncava. A avaliação da rugosidade após o vergamento torna-se de grande importância para a caracterização estética da peça vergada.

Para as análises de rugosidade no presente trabalho foram utilizados parâmetros *cut-off* distintos em razão do tamanho do corpo de prova. Foram escolhidos 2,5 e 0,8 mm para amostras tipo A e B respectivamente.

4.8 Análise estatística dos dados

Para a comparação dos dados obtidos foram utilizadas análises estatísticas de variadas abordagens. A finalidade da utilização dessas análises estatísticas foi a eleição de um método de pré-tratamento ótimo para o vergamento. Através da obtenção de dados originais dos corpos de prova foi possível a utilização de análises de variância para a comparação dos resultados entre espécies e tratamentos.

Os dados unitários obtidos foram referentes às propriedades físicas (coloração, rugosidade, massa específica e teor de umidade) e à caracterização mecânica (vergamento e flexão estática), com isso foram caracterizados os tratamentos e sua influência e capacidade de modificação da madeira.

Para as análises citadas foram utilizados programas estatísticos em configurações padrão, isto é, como são predefinidos pelos programadores. É de importância a menção deste fato uma vez que podem ser alterados os tipos de testes e os níveis de significância dos mesmos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades Mecânicas da Madeira

5.1.1 Vergamento da Madeira

5.1.1.1 Defeitos de Vergamento

A Tab. 4 apresenta a análise de variância fatorial para o número de defeitos por amostra em razão dos fatores espécie (três níveis) e tratamento (seis níveis). Pode-se observar que não houve significância no efeito do fator tratamento, bem como na interação entre os fatores observados. Todavia, para o fator espécie, o efeito significativo foi verificado.

Tabela 4 – Análise de variância fatorial para o número de defeitos por amostra.

| Fonte de Variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|-------------------|---------|-----|----------|--------------------|
| A:Tratamento | 3,31667 | 5 | 0,663333 | 0,62 ^{ns} |
| B:Espécie | 51,1 | 2 | 25,55 | 23,8* |
| Interações | | | | |
| AxB | 10,6333 | 10 | 1,06333 | 0,99 ^{ns} |
| Resíduos | 173,9 | 162 | 1,07346 | |

Em que: SQ=soma de quadrados; GL=graus de liberdade; QM=quadrado médio; *significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste LSD-Fisher; ^{ns}=não significativo;

Verificada a significância para o fator espécie, foi efetuada uma análise de variância considerando o fator em questão isolado (Tab. 5). Verificou-se maior número médio de defeitos por peça em todos os tratamentos para o açoita-cavalo.

Tabela 5 – Número médio de defeitos por peça.

| Tratamentos | Nº de defeitos por peça | | | Teste F |
|-------------|-------------------------|---------------|---------|---------|
| | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | |
| C1 | 0,8 B | 0 A | 0,6 AB | 3,9 |
| C2 | 1,2 B | 0 A | 1 AB | 3,32 |
| M1 | 1,5 B | 0,1 A | 0,8 AB | 5,75 |
| M2 | 1,9 B | 0 A | 0,4 A | 4,42 |
| V1 | 1,7 B | 0,1 A | 0,2 A | 7,09 |
| V2 | 0,9 B | 0 A | 0,5 AB | 4,1 |

Em que: Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente em 5% de probabilidade de erro no teste LSD-Fisher.

A madeira de noqueira-pecã colocou-se como espécie com melhor qualidade de vergamento quando analisada a média de defeitos por peça, seguida da madeira de plátano, que apresentou-se no mesmo grupo homogêneo da espécie anterior em todos os tratamentos.

Foram avaliadas quantitativamente as ocorrências de cada tipo de defeito de vergamento, descrito por Vorreiter (1958). Tais dados são apresentados na Tab. 6 em forma de número de peças com cada defeito, além do número de peças livres de defeito. Foi também avaliada a frequência de ocorrência de cada tipo de defeito no total de amostras, bem como o total de peças livres de defeitos.

Tabela 6 – Frequência de peças para cada tipo de defeito.

| Tratamentos | Espécies | Defeitos | | | | | | | |
|-------------|----------|----------|---|---|---|---|----|----|---|
| | | S/D | a | b | c | d | e | f | g |
| C1 | Açoita | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| | Nogueira | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Plátano | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| C2 | Açoita | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| | Nogueira | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Plátano | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 |
| M1 | Açoita | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| | Nogueira | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Plátano | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| M2 | Açoita | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 3 | 0 |
| | Nogueira | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Plátano | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| V1 | Açoita | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 6 | 2 | 0 |
| | Nogueira | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | Plátano | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| V2 | Açoita | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 4 | 2 | 0 |
| | Nogueira | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Plátano | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| Total | | 112 | 7 | 0 | 0 | 3 | 55 | 12 | 0 |

Em que: Letras de a até g representam defeitos descritos por Vorreiter (1958); S/D=amostras livres de defeitos.

Pode-se observar, com o exposto na Tab. 6 que o número de peças livres de defeitos foi expressivo, ultrapassando a metade do total de amostras vergadas, contabilizado em 180.

O defeito mais incidente foi o do tipo e, conhecido como estilhaço. Burvil, Ozarska e Juniper (2013) citam que sem o ajuste dos apoios de extremidade, de forma a reduzir

a força axial, há ocorrência de falhas mais severas de tração comparadas com falhas de compressão. A grande incidência do defeito observado (Fig. 15) é explicada pelo dispositivo utilizado que consta com apenas um apoio de extremidade.



Figura 15 – Corpos de prova vergados com incidência de defeitos do tipo *e* (estilhaço) e *f* (ruptura perpendicular). Fonte: O autor.

Além da fraca pressão de extremidade, uma das causas que apontam a maior ocorrência de defeitos tipo *e* é a inclinação de grã. Gatto et al. (2008) corroboram esta afirmação e citam que o preparo da peça a ser vergada deve atentar para a inibição deste defeito de usinagem.

5.1.1.2 Notas de Qualidade

Foram avaliadas as notas das amostras com base na metodologia citada, levando-se em consideração os defeitos e a integridade da peça. A Tabela 7 apresenta uma análise de variância fatorial em razão dos fatores espécie em três níveis e tratamento em seis níveis.

Tabela 7 – Análise de variância fatorial para as notas de qualidade de vergamento.

| Fonte de Variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|-------------------|---------|-----|---------|---------|
| A:Tratamento | 5,16111 | 5 | 1,03222 | 0,56ns |
| B:Espécie | 97,0111 | 2 | 48,5056 | 26,34* |
| Interações | | | | |
| AxB | 24,3889 | 10 | 2,43889 | 1,32ns |
| Resíduos | 298,3 | 162 | 1,84136 | |

Em que: SQ=soma de quadrados; GL=graus de liberdade; QM=quadrado médio; *significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste LSD-Fisher; ^{ns}=não significativo;

Observou-se que o fator tratamento não desempenha efeito significativo na distribuição das notas de vergamento, sendo apenas o fator espécie influente com significância. A interação entre os fatores denotou-se não significativa. Uma vez apresentado efeito significativo para o fator espécie foi feito o desdobramento em análise de variância para o fator isolado. A Tabela 8 apresenta as médias para as notas de qualidade de vergamento para as espécies dentro de cada tratamento.

Tabela 8 – Médias para a nota de vergamento variantes entre espécies.

| Tratamentos | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | Teste F |
|-------------|---------------|---------------|---------|---------|
| C1 | 4,1 AB | 5 B | 3,2 A | 4,91 |
| C2 | 3 A | 5 B | 3,2 A | 4,85 |
| M1 | 2,8 A | 4,9 B | 3,7 A | 7,04 |
| M2 | 3,5 A | 5 B | 4 AB | 3,12 |
| V1 | 2,4 A | 4,9 B | 4,4 B | 10,81 |
| V2 | 3,5 A | 5 B | 3,9 AB | 3,3 |

Em que: Médias seguidas de letras iguais horizontalmente não apresentam diferença significativa ao nível de 5% no teste LSD-Fisher.

Verificou-se que para a espécie de açoita-cavalo (Tab. 8) o tratamento que proporcionou melhor média de notas de qualidade foi o C1, correspondente a 45 minutos de cozimento. A madeira de nogueira-pecã apresentou-se de forma unanime como a melhor espécie, considerando-se as médias das notas de vergamento. O tratamento que gerou peças com maior média de nota de qualidade para a espécie de plátano foi o de vaporização por 45 minutos.

Levando-se em consideração o gasto energético e a não diferença significativa entre as notas proporcionadas pelos tratamentos, é possível verificar que os tratamentos

C1 e V1 apresentam-se como melhores alternativas, proporcionando notas altas para a maioria das espécies (nogueira-pecã e plátano para a vaporização; nogueira-pecã e açoita-cavalo para o cozimento) em comparação com tratamentos do mesmo tipo e tempos de exposição maiores e mais dispendiosos do ponto de vista econômico e industrial.

Tabela 9 – Distribuição de frequência para notas por espécies.

| Notas | Distribuição de frequência para notas (%) | | |
|-------|---|---------------|---------|
| | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano |
| 5 | 36,7 | 96,7 | 56,7 |
| 4 | 13,3 | 3,3 | 8,3 |
| 3 | 11,7 | - | 6,7 |
| 2 | 11,7 | - | 8,3 |
| 1 | 26,7 | - | 20,0 |

Verificou-se através da Tab. 9 que a madeira de nogueira pecã não apresentou peças defeituosas com notas abaixo de 4, sendo caracterizada como de alta qualidade de vergamento. A Fig. 16 apresenta peças com nota máxima para as três espécies.



Figura 16 – Corpos de prova vergados com nota máxima de vergamento. Fonte: O autor.

Kuljich, Cáceres e Hernández (2013) efetuaram uma análise qualitativa do vergamento de sete espécies de *Populus* sp. Os autores definiram a nota ótima na ordem

inversa, sendo de 1 a 5, decrescendo a qualidade de vergamento. Na melhor colocação houve ausência de amostras, na segunda ordem de qualidade encontraram-se 13% das amostras, na terceira 39%, 36% na quarta e 12% na quinta e pior nota de qualidade.

No presente estudo foi verificado que a maioria das amostras analisadas para as três espécies obtiveram a melhor nota de vergamento, constando de peças de qualidade boa, sendo perfeitas e livre de defeitos de vergamento.

5.1.1.3 Mínimo raio de vergamento

A forma de raio variável construída desempenhou o papel de verificação do mínimo raio de vergamento (MRV) das espécies. A Tab. 10 apresenta a análise de variância fatorial para a variável em questão em função dos tratamentos em seis níveis e da espécie em três.

Tabela 10 - Análise de variância fatorial para o MRV.

| Fonte de Variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|-------------------|---------|-----|---------|--------------------|
| A:Tratamento | 8,96111 | 5 | 1,79222 | 0,76 ^{ns} |
| B:Espécie | 142,478 | 2 | 71,2389 | 30,09* |
| Interações | | | | |
| AxB | 22,7222 | 10 | 2,27222 | 0,96 ^{ns} |
| Resíduos | 383,5 | 162 | 2,36728 | |

Em que: SQ=soma de quadrados; GL=graus de liberdade; QM=quadrado médio; *significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste LSD-Fisher; ^{ns}=não significativo;

Observa-se a partir da Tab. 10 que o fator espécie apresentou efeito significativo no mínimo raio de vergamento. O fator tratamento bem como a interação entre os fatores não se mostrou significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A Tab. 11 apresenta a percentagem de peças para com o MRV para cada espécie. Pode-se verificar que a noqueira-pecã apresentou melhor desempenho, tendo 98,3% de suas amostras no raio de número 6, correspondente ao mais rigoroso coeficiente de flexionamento.

Tabela 11 – Distribuição de frequência para MRV por espécie.

| MRV (mm) | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano |
|----------|---------------|---------------|---------|
| 12,4 (1) | 11,7 | 0,0 | 8,3 |
| 11,2 (2) | 23,3 | 0,0 | 8,3 |
| 10,4 (3) | 13,3 | 1,7 | 16,7 |
| 9,6 (4) | 13,3 | 0,0 | 8,3 |
| 8,4 (5) | 1,7 | 0,0 | 1,7 |
| 7,2 (6) | 36,7 | 98,3 | 56,7 |

A exemplo da variável nota de vergamento, para o MRV as espécies também apresentaram a maior parte de suas amostras na colocação que lhes confere melhor qualidade de vergamento. A espécie de plátano apresentou 56,7% das peças com raio 6, sendo que para o açoita-cavalo esse valor foi de 36,7%.

Baseado no apresentado pela Tab. 11, pode-se afirmar que o mínimo raio de vergamento para as espécies estudadas é o de número 6, correspondente a 7,2cm com coeficiente de flexionamento de 0,15.

Daian e Ozarska (2010) avaliaram o mínimo raio de vergamento de uma série de espécies australianas e puderam concluir que das madeiras estudadas, apresentaram-se com pior e melhor performance junto ao vergamento, respectivamente, *E. pilularis*, *C. maculata*, *E. cloeziana*, com MRV na faixa de 400-340mm; e *E. nitrens* e *E. dunnii* com MRV entre 280 e 260mm. Tais autores citam que na busca por qualidade do vergamento deve-se optar por espécies que suportem raios de vergamento tão baixos quanto possível.

Em concordância com os autores, cita-se como espécie de melhor qualidade para o vergamento a noqueira-pecã, por apresentar maior frequência de peças no raio de vergamento mais baixo, isto é, de 7,2 cm. Em seguida tem-se o plátano, em que se verificou mais da metade das amostras no mínimo raio utilizado no presente trabalho.

5.1.1.4 Perda de forma circular

A Tab. 12 apresenta a análise de variância fatorial para a perda de forma circular em função dos fatores tratamento, subdivido em seis níveis (C1, C2, M1, M2, V1 e V2) e espécie, dividido em três níveis.

Tabela 12 – Análise de variância fatorial para a perda de forma circular.

| Fonte de variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|-------------------|---------|-----|---------|---------|
| A:Tratamento | 374,555 | 5 | 74,9109 | 8,81* |
| B:Espécie | 130,577 | 2 | 65,2886 | 7,68* |
| Interações | | | | |
| AxB | 500,924 | 10 | 50,0924 | 5,89* |
| Resíduos | 1105,19 | 130 | 8,50147 | |

Em que: *significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste LSD-Fisher. SQ=soma dos quadrados; GL=graus de liberdade; QM=quadrado médio.

Verificou-se através do exposto na Tab. 12 que os fatores tratamento e espécie apresentaram efeito significativo. Foi observada também interação significativa entre esses fatores. Dessa forma, a Tab. 13 apresenta o desdobramento estatístico em análise de variância para a avaliação do comportamento da PFC em razão dos tratamentos e espécies.

Tabela 13 – Médias para PFC em razão dos tratamentos e das espécies.

| Tratamento | | Médias PFC (%) | | | Valor F |
|-------------|----|----------------|---------------|----------|--------------------|
| | | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | |
| Cozimento | C1 | 5,66 Bab | 3,84 Aa | 3,66 Ab | 3,72 |
| | C2 | 8,83 Bbc | 4,11 Aa | 4,63 Ac | 9,45 |
| Micro-ondas | M1 | 7,53 Abc | 4,21 Aa | 4,39 Abc | 1,42 ^{ns} |
| | M2 | 10,51 Bc | 12,07 Bb | 2,70 Aa | 9,75 |
| Vaporização | V1 | 5,04 Bab | 3,56 Aa | 6,33 Cd | 13,28 |
| | V2 | 2,68 Aa | 3,28 ABa | 4,02 Bbc | 3,75 |
| Valor F | | 4,63 | 10,03 | 18,14 | |

Em que: Médias com letras iguais, maiúsculas horizontalmente e minúsculas verticalmente, não apresentam diferença estatisticamente significativa de acordo com o teste de LSD-Fisher, em 5% de probabilidade de erro; ^{ns}=não significativo.

Pode-se notar diferença estatística nos níveis dos fatores tratamento e espécie, entretanto, não foi verificada uma tendência na diferença. A madeira de nogueira-pecã apresentou menor variabilidade quando levado em consideração o fator tratamento, uma vez que o único valor que se destacou foi a média para o tratamento M2, correspondente ao tratamento de micro-ondas com tempo de exposição de 90 segundos.

O tratamento M1 não proporcionou perda de forma circular diferente estatisticamente para as três espécies. Por outro lado, o tratamento V1 colocou as espécies em três grupos diferentes estatisticamente, o que elucida o diferente comportamento das mesmas perante o tratamento de vaporização.

Tabela 14 – Valores médios para PFC para os fatores isolados.

| Tratamento | PFC (%) | | | | | | Teste F |
|------------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------|-----------|---------|
| | <i>C1</i> | <i>C2</i> | <i>M1</i> | <i>M2</i> | <i>V1</i> | <i>V2</i> | |
| | 4,53 ab | 5,47 b | 5,23 ab | 8,71 c | 4,85 ab | 3,35032 a | 6,81 |
| Espécie | <i>Açoita-cavalo</i> | | <i>Nogueira-pecã</i> | | <i>Plátano</i> | | |
| | 6,71 b | | 5,20 a | | 4,32 a | | 4,7 |

Em que: Médias com letras iguais não apresentam diferença estatisticamente significativa de acordo com o teste de LSD-Fisher, em 5% de probabilidade de erro; ^{ns}=não significativo.

Foram efetuadas análises de variância tomando-se por base os fatores isolados, isto é, considerando-se um efeito de cada vez sem a separação ou seleção de forma a proporcionar homogeneização (Tab. 14).

Nota-se que a espécie que apresentou maior PFC foi a de açoita-cavalo, sendo a menor para a madeira de plátano. O tratamento que proporcionou maior valor para a variável em questão foi o de micro-ondas durante 90 segundos, sendo o menor proporcionado pelo tratamento de vaporização por 60 minutos.

O valor médio de 5,2% de PFC para madeira de noqueira-pecã encontrou-se inferior ao menor valor encontrado por Gatto (2006), que obteve 7% para a mesma espécie. O mesmo autor obteve como pior resultado, ou seja, maior valor de perda de forma circular, uma média de 21% para a madeira de açoita-cavalo vergada a um raio de curvatura de 21cm.

Tais valores encontrados confrontados com o do referido autor mostram-se salientemente inferiores, o que é um indício de consolidação da metodologia aplicada. A diferença entre os resultados do presente estudo e o encontrado por Gatto (2006) justifica-se pela desigualdade entre os tempos de resfriamento e remoção da forma aplicados nos dois experimentos.

No presente trabalho a adoção de tempo de resfriamento de 24h mostrou-se satisfatória de forma a reduzir os valores médios de PFC quando comparado com a literatura.

5.1.2 Flexão Estática

5.1.2.1 Módulos de Elasticidade e Ruptura

Como forma de caracterização da madeira e dos tratamentos plasticizantes para o vergamento foram avaliadas as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), também conhecido como tensão máxima. A Tab. 15 apresenta uma análise de variância fatorial para as propriedades citadas variantes entre os fatores espécie (três níveis) e tratamento (cozimento, micro-ondas, vaporização e controle).

Tabela 15 – Análise de variância fatorial para MOE e MOR.

| Variável | Fonte de Variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|----------|-------------------|--------------------|-----|--------------------|----------|
| MOE | A:Espécie | $3,01 \times 10^7$ | 2 | $1,51 \times 10^7$ | 12,89* |
| | B:Tratamento | $1,32 \times 10^9$ | 3 | $4,41 \times 10^8$ | 377,47* |
| | AxB | $3,66 \times 10^7$ | 6 | $6,10 \times 10^6$ | 5,22* |
| | Resíduos | $1,86 \times 10^8$ | 160 | $1,17 \times 10^6$ | - |
| MOR | A:Espécie | 365,194 | 2 | 182,597 | 3,66* |
| | B:Tratamento | 206840 | 3 | 68946,8 | 1383,08* |
| | AxB | 915,282 | 6 | 152,547 | 3,06* |
| | Resíduos | 7826,5 | 157 | 49,8503 | - |

Em que: SQ=soma de quadrados; GL=graus de liberdade; QM=quadrado médio; *significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ao teste de LSD-Fisher.

Pode-se observar através da Tab. 15 que para as duas variáveis houve efeito significativo para os dois fatores, além da interação entre os mesmos. Posto que tal interação foi verificada, assim como a significância dos efeitos tratamento e espécie, os dados foram desdobrados em análise de variância considerando-se os fatores isolados.

Esse tipo de análise tem por objetivo a verificação do comportamento das médias em função dos tratamentos e das espécies (Tab. 16). Verificou-se que para a madeira *in natura*, isto é, para o grupo controle, a madeira de plátano apresentou maiores valores de MOE e MOR comparado com o restante das espécies analisadas.

Através da Tab. 16 observa-se que entre espécies os módulos de elasticidade e ruptura apresentaram diferenças significativas dentro de cada tratamento, bem como para o grupo controle. Entretanto, para o MOR, nos tratamentos de cozimento e micro-ondas essa diferença não foi observada, sinalizando que os tratamentos citados provocam uma homogeneização para esta variável entre as espécies.

Tabela 16 – Médias para MOE e MOR em função dos tratamentos e espécies.

| MOE (MPa) | | | | |
|-----------------|---------------|-----------------|----------------|--------------------|
| Tratamento | Espécies | | | Valor F |
| | <i>Açoita</i> | <i>Nogueira</i> | <i>Plátano</i> | |
| Cozimento (1) | 3070,72 Ca | 1316,91 Aa | 2248,84 Ba | 14,86 |
| Micro-ondas (2) | 2610,38 Ba | 1541,8 Aa | 1967,22 Aa | 9,04 |
| Vaporização (3) | 2551,34 Ba | 1626,25 Aa | 2645,55 Ba | 4,17 |
| Controles (0) | 7864,75 Ab | 8465,63 Ab | 9876,49 Bb | 5,79 |
| Valor F | 71,2 | 130,31 | 211,89 | |
| MOR (MPa) | | | | |
| Tratamento | Espécies | | | Valor F |
| | <i>Açoita</i> | <i>Nogueira</i> | <i>Plátano</i> | |
| Cozimento (1) | 15,0793 Aa | 14,5355 Aa | 15,818 Aa | 0,68 ^{ns} |
| Micro-ondas (2) | 16,5053 Aab | 14,2987 Aa | 14,396 Aa | 3,1 ^{ns} |
| Vaporização (3) | 19,5614 Bb | 16,3371 Aa | 21,7575 Bb | 5,53 |
| Controles (0) | 90,085 Ac | 96,462 ABb | 101,944 Bc | 3,18 |
| Valor F | 544,05 | 293,37 | 785,33 | |

Em que: Médias com letras iguais maiúsculas horizontalmente e minúsculas verticalmente não apresentam diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste de LSD-Fisher; ^{ns}= não significativo;

Isso prova que o tratamento plasticizante exerce função de suma importância para o vergamento, uma vez que inibe o efeito espécie, colocando as madeiras de açoita-cavalo, noqueira-pecã e plátano em um grupo homogêneo de tensão máxima. Tal constatação assinala para a viabilidade da inclusão de espécies desfavoráveis para o processo de vergamento.

Os valores verificados através da Tab. 16 encontram-se distantes em comparação com o apresentado por Stangerlin et al. (2010), de 10101,65 e 82,96 MPa respectivamente para MOE e MOR a 12% de umidade.

Relativo ao efeito dos tratamentos pode-se notar uma redução no MOE, contribuindo para a caracterização do efeito plasticizante dos mesmos, isto é, quanto ao vergamento, há uma necessidade de diminuição da resistência da madeira sem que haja a fragilização da mesma. A redução do MOE e do MOR indicam a plasticização do material.

Através da Tab. 16 pode-se observar que os tratamentos não diferem entre si, uma vez que para cada espécie um tratamento diferente apresentou melhor desempenho plasticizante quanto à redução do MOE. Todavia pode-se destacar que todos os

tratamentos apresentam eficiência comprovada pela diferença estatística entre os valores médios da referida propriedade para os tratamentos e para o grupo controle.

5.1.2.2 Fragilidade da Madeira

Foram feitas análises afim de se verificar a fragilidade da madeira in natura e após os tratamentos de plasticização. A Tab. 17 apresenta uma ANOVA fatorial da referida propriedade em razão dos fatores espécie, subdividida em três níveis, e tratamento, subdividida em 4 níveis incluindo o grupo controle.

Tabela 17 – ANOVA fatorial para a fragilidade considerando os fatores de variação.

| Variável | Fonte de Variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|-------------|-------------------|---------|-----|---------|---------|
| Fragilidade | A:Espécie | 74,0991 | 2 | 37,0495 | 9,27* |
| | B:Tratamento | 1358,85 | 3 | 452,951 | 113,29* |
| | AxB | 535,52 | 6 | 89,2533 | 22,32* |
| | Resíduos | 623,737 | 156 | 3,99832 | - |

Em que: SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F= valor de F calculado; *= significativo em 5% de probabilidade de erro;

Uma vez observada a significância no efeito interação entre os fatores procedeu-se ao desdobramento das médias para cada situação afim de que se avaliasse o comportamento dos fatores com relação à propriedade mecânica em questão (Tab. 18).

Tabela 18 – Comparação da fragilidade com o grupo controle.

| Tratamento | Espécies | | | Valor F |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------|---------|
| | <i>Açoita-cavalo</i> | <i>Nogueira-pecã</i> | <i>Plátano</i> | |
| Cozimento (1) | 1,5 Aa | 2,72 Ba | 1,3 Aa | 13,73 |
| Micro-ondas (2) | 1,96 ABa | 2,21 Ba | 1,52 Aa | 2,79 |
| Vaporização (3) | 2,74 Ba | 3,6 Cb | 1,8 Aa | 11,65 |
| Controles (0) | 12,44 Bb | 3,59 Ab | 10,0 Bb | 20,67 |
| Valor F | 49,6 | 5,87 | 92,63 | |

Em que: Médias com letras iguais, maiúsculas horizontalmente e minúsculas verticalmente, não apresentam diferença estatisticamente significativa de acordo com o teste de LSD-Fisher, em 5% de probabilidade de erro.

Pode-se notar através da Tab. 18 que os valores médios de fragilidade para as espécies apresentaram-se diferentes estatisticamente do grupo de amostras controle, com exceção do encontrado para a madeira de nogueira, para a qual a fragilidade média do grupo controle difere estatisticamente apenas dos tratamentos de cozimento e micro-

ondas, mostrando maior eficiência na plasticização da madeira apresentada por estes tratamentos.

Nas análises da referida propriedade para o grupo de amostras controle pode-se notar que a noqueira apresenta um valor de 3,59% para fragilidade, o que se mostra inferior significativamente quando comparado com as demais espécies. Tal constatação é um indicativo de que a madeira de noqueira apresenta alta qualidade de vergamento e um comportamento dúctil, ou seja, absorve grande quantidade de energia e protagoniza grande deformação plástica até se romper.

Ainda sobre a madeira de noqueira ressalta-se que a mesma mostrou-se pouco suscetível aos tratamentos aplicados quando comparado com as outras espécies, a exemplo do plátano e do açoita-cavalo que tiveram sua fragilidade reduzida de 10% para 1,3% e de 12,44% para 1,5% respectivamente, para o tratamento de cozimento.

Pode-se verificar que os tratamentos de cozimento e micro-ondas apresentam um mecanismo de plasticização semelhante por não apresentarem médias estatisticamente diferentes (Fig. 17). Nesses tipos de tratamento a água encontra-se no interior da madeira e então plasticiza a lignina por aumento de temperatura.

Em contrapartida, para a vaporização a adição de temperatura e umidade ocorre no sentido da superfície para o interior da peça, apresentando maior conteúdo de umidade nas zonas externas, dessa forma, o tratamento apresenta uma maior fragilidade média.

Tratando-se dos valores médios entre espécies, pode-se verificar que para a madeira de noqueira-pecã plasticizada, além colocar-se como superior entre espécies, encontra-se próximo do valor para a madeira da mesma espécie in natura (3,59%, Tab. 18), classificando a espécie como naturalmente menos frágil.

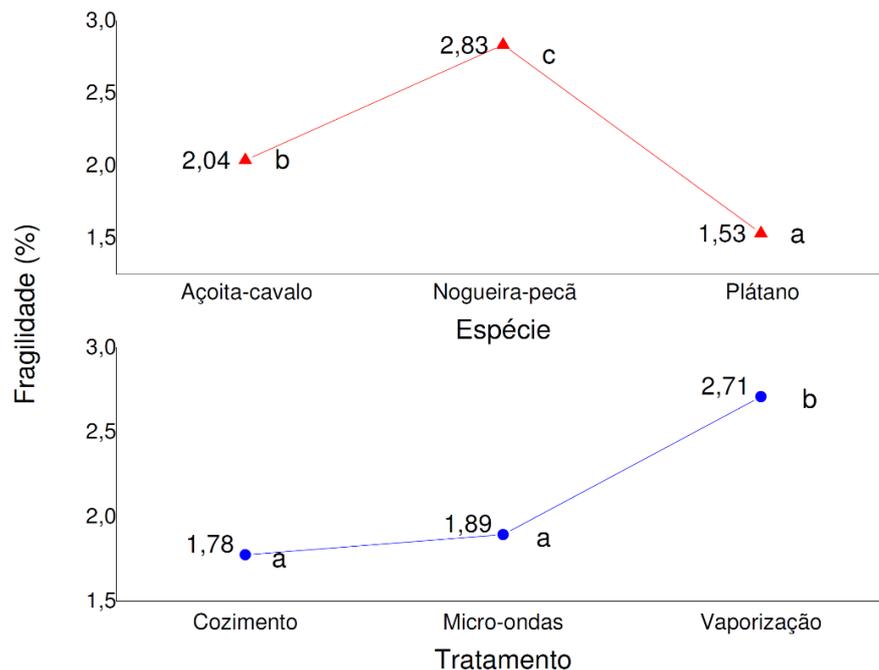


Figura 17 – Médias de fragilidade separadas por tratamento e por espécie.

De posse desses dados é possível, através da propriedade mecânica analisada, confirmar o comportamento plástico natural da madeira de *Carya illinoensis* encontrado por Gatto et al. (2008) e constatar que a espécie além de ser dúctil e suportar grande quantidade de deformação plástica até a ruptura, apresenta-se pouco suscetível aos tratamentos de plasticização.

A fragilidade foi utilizada por Phuong, Shida e Saito (2007) e Taghiyari, Enayati e Gholamiyan (2013) para a caracterização da madeira submetida a tratamentos térmicos de forma a descrever a mudança no seu comportamento mecânico. Tratamentos de termorretificação têm por consequência o aumento da fragilidade da madeira.

Nos tratamentos de plasticização a análise é inversa, objetivando-se a redução desta propriedade para fins de caracterização da qualidade de vergamento. Assim, pode-se observar que os três tratamentos foram efetivos uma vez que reduziram significativamente a fragilidade. Ainda é possível ressaltar que os tratamentos de cozimento e micro-ondas foram mais contundentes desempenhando a função plasticizante ao apresentarem médias da referida propriedade inferiores ao tratamento de vaporização.

A fragilidade é a propriedade responsável por denotar um comportamento em que a madeira rompe-se com pouca ou nenhuma deformação perpendicular à grã. Dessa forma, para fins de qualidade de vergamento é necessário que haja a redução dessa propriedade, caracterizando um comportamento plástico.

5.1.2.3 Módulo de Resiliência

A Tab. 19 apresenta a ANOVA fatorial para o módulo de resiliência (U_f) em razão dos fatores tratamento e espécie. Foi observada interação entre esses fatores ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 19 – Módulo de resiliência, fatores de influência e sua interação.

| Variável | Fonte de Variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|----------|-------------------|------|-----|------|---------|
| U_f | A:Espécie | 0,01 | 2 | 0,00 | 20,32* |
| | B:Tratamento | 0,55 | 3 | 0,18 | 745,96* |
| | AxB | 0,03 | 6 | 0,01 | 23,06* |
| | Resíduos | 0,04 | 157 | 0,00 | |

Em que: *significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste LSD-Fisher; SQ=soma dos quadrados; GL=graus de liberdade; QM=quadrado médio.

Uma vez verificada interação significativa entre os fatores tratamento e espécie foi efetuada uma análise de variância simples para a verificação do comportamento de U_f quando tomadas as situações particulares de combinações entre fatores (Tab. 20).

Tabela 20 – Médias para U_f em função dos tratamentos e espécies.

| Tratamento | U_f (*0,01 %) | | | Valor F |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|
| | Espécies | | | |
| | <i>Açoita</i> | <i>Nogueira</i> | <i>Plátano</i> | |
| Cozimento (1) | 0,35 Aa | 0,90 Ba | 0,32 Aa | 23,96 |
| Micro-ondas (2) | 0,66 Ba | 0,55 ABa | 0,40 Aa | 5,97 |
| Vaporização (3) | 1,15 Aa | 1,03 Aa | 1,16 Aa | 0,26 ^{ns} |
| Controles (0) | 16,6 Bb | 9,31 Ab | 16,01 Bb | 22,28 |
| Valor F | 211,62 | 284 | 424,61 | |

Em que: Médias com letras iguais, minúsculas verticalmente e maiúsculas horizontalmente, não apresentam diferença estatisticamente significativa de acordo com o teste de LSD-Fisher, em 5% de probabilidade de erro; ^{ns}= não significativa.

Pode-se observar através da Tab. 20 que para todas as espécies os grupos tratados diferem significativamente dos grupos controle, confirmando a eficiência dos mesmos quando analisada a propriedade em questão.

Segundo Callister e Rethwisch (2010), a resiliência é propriedade do material que deforma-se elasticamente enquanto carregado e retorna sem deformação residual à sua forma inicial. Através do observado na Tab. 20 há uma redução geral no U_f , o que sinaliza a plasticização da madeira e seu condicionamento para a conformação, a exemplo do vergamento.

A interpretação do módulo de resiliência deve ser feita no sentido de que quanto menor a resiliência, mais rápida é a transição do regime elástico para o regime plástico da madeira quando sujeita à aplicação da carga. A ductilidade é inversamente proporcional à resiliência, isto é, quanto menos resiliente é o material, mais ele se deforma plasticamente.

Considerando os valores médios de U_f em razão do fator espécie, pode-se notar que para a vaporização as espécies não apresentam diferença significativa. A exemplo da fragilidade, é possível notar também através do módulo de resiliência que a madeira de nogueira apresenta uma plasticidade natural representada pelo menor valor de U_f , de $9,31 \times 10^{-2}\%$ (Tab. 20).

5.2 Propriedades Físicas da Madeira

5.2.1 Massa específica da madeira

Foi feita a análise de variância para a propriedade de massa específica aparente à 12% de umidade das madeiras analisadas (Tab. 21).

Tabela 21 - Médias da $ME_{12\%}$ para as espécies analisadas.

| Espécie | Médias ($g \cdot cm^{-3}$) |
|---------------|------------------------------|
| Açoita-cavalo | 0,62 a |
| Nogueira-pecã | 0,78 c |
| Plátano | 0,70 b |
| Valor F | 266,54* |

Em que: Médias com letras diferentes apresentam diferença estatística em 5% de probabilidade de erro no teste de LSD-Fisher.

Pode-se observar através do apresentado na Tab. 21 que foi encontrada diferença estatística entre as médias para $ME_{12\%}$ das espécies estudadas. Gatto (2006), embora analisando a propriedade de massa específica básica a 12% de umidade das mesmas madeiras, encontrou tendência semelhante no comportamento dos valores quando comparado com o presente estudo.

Tal autor verificou a mesma ordem para as espécies, sendo o açoita-cavalo de menor massa específica ($0,54 \text{ g.cm}^{-3}$), o plátano em posição intermediária ($0,6 \text{ g.cm}^{-3}$) e a noqueira-pecã ($0,71 \text{ g.cm}^{-3}$) como espécie de maior massa específica.

A Fig. 18 apresenta o gráfico de caixa e bigodes para o grupo de dados da $ME_{12\%}$ para as espécies analisadas.

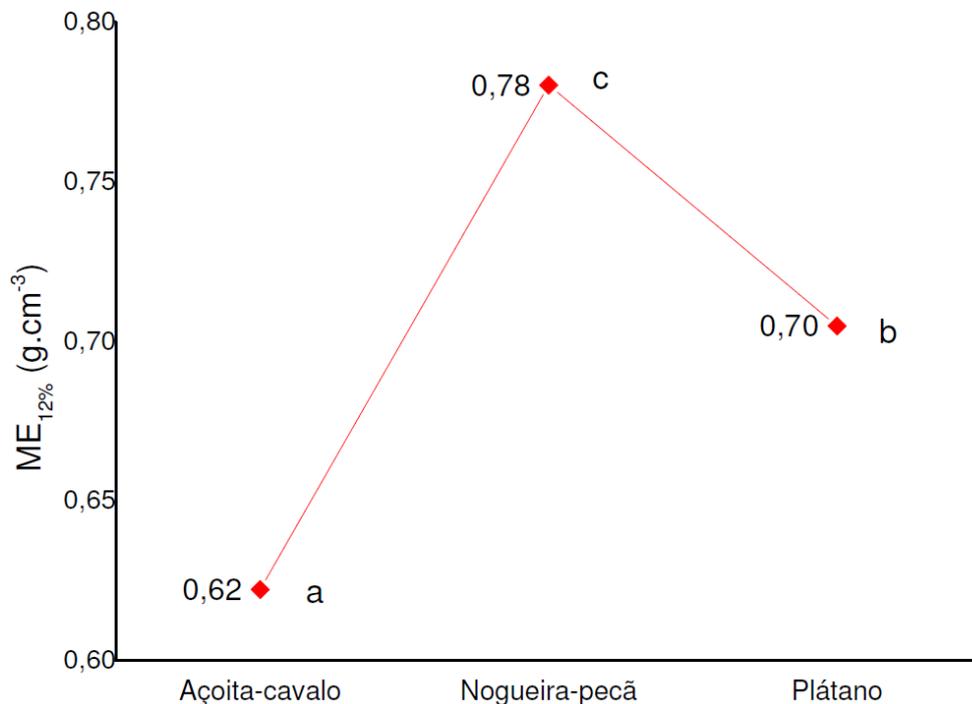


Figura 18 – Médias para $ME_{12\%}$ em função das espécies estudadas, em que letras denotam diferença estatística em 5% de probabilidade de erro no teste de LSD-Fisher.

Modes et al. (2012), analisando a resistência natural de sete espécies florestais ao ataque de um fungo de podridão-branca, verificaram valores de massa específica aparente a 12% de umidade respectivos de 0,63, 0,66 e $0,69 \text{ g.cm}^{-3}$ para açoita-cavalo, plátano e noqueira-pecã. Tais valores encontram-se levemente abaixo do verificado no presente trabalho.

Todavia, em comparação com o estudo de Stangerlin et al. (2010), onde foram avaliadas as propriedades da madeira em dois estados de umidade, o valor de $0,80 \text{ g.cm}^{-3}$ apresenta-se equalizado com o presente estudo, para a madeira de nogueira-pecã.

Determinando a idade de segregação entre os lenhos adulto e juvenil da madeira de açoita-cavalo através da variação radial da massa específica, Peres et al. (2012) obtiveram valores de $0,52$ e $0,53 \text{ g.cm}^{-3}$ para lenhos inicial e tardio respectivamente, valores tenuemente inferiores ao de $0,62 \text{ g.cm}^{-3}$ verificado no trabalho em questão. Já para Beltrame et al. (2010), o valor médio de $0,63 \text{ g.cm}^{-3}$ para a massa específica aparente a 12% encontrado mostrou-se equalizado.

Wiemann e Green (2007) verificaram para a madeira de plátano uma massa específica de $0,52 \text{ g.cm}^{-3}$, resultado que se mostra acentuadamente abaixo do encontrado. Entretanto, quando confrontado com o valor médio encontrado por Beltrame et al. (2013) ($0,68 \text{ g.cm}^{-3}$) o valor do presente trabalho encontra-se apenas levemente superior.

5.2.2 Variação no Teor de Umidade

Foi verificada a variação no conteúdo de umidade das amostras proporcionada pelos tratamentos. A Tab. 22 apresenta as análises de variância para o ΔTU levando-se em consideração os tratamentos expressos na Tab. 1, os tipos de tratamento (cozimento, vaporização e micro-ondas) e o fator espécie.

Pode-se notar que os tratamentos de cozimento (C1 e C2) e vaporização (V1 e V2) não diferem estatisticamente em adição de umidade à madeira nas duas primeiras espécies. Não obstante, para o Plátano o ΔTU apresenta diferença estatística dentro dos tratamentos citados.

Tabela 22 – Análise de variância para ΔTU variantes entre espécie e tratamentos.

| Tratamentos | ΔTU | | | | | | | Teste F |
|-------------|-------------------|----------|---------------|----------|-----------|----------|-----------|---------|
| | Açoita-cavalo | | Nogueira-pecã | | Plátano | | | |
| Cozimento | C1 | 34,2 d | 35,08 Bc | 21,36 d | 23,31 Ac | 35,7 e | 38,15 Bc | 25,95 |
| | C2 | 35,96 d | | 25,26 d | | 40,6 f | | |
| Micro-ondas | M1 | -12,65 b | -17,39 Ba | -9,43 b | -12,02 Ca | -16,21 b | -21,16 Aa | 12,04 |
| | M2 | -22,13 a | | -14,62 a | | -26,10 a | | |
| Vaporização | V1 | 12,76 c | 14,29 Bb | 10,65 c | 11,70 Ab | 10,63 c | 12,85 ABb | 2,7 |
| | V2 | 15,82 c | | 12,75 c | | 15,06 d | | |
| Teste F | | 200,15 | 389,04 | 129,75 | 277,58 | 296,1 | 498,57 | |

Em que: Médias com letras iguais, maiúsculas horizontalmente e minúsculas verticalmente não apresentam diferença estatística ao nível de 95% de confiança no teste de LSD-Fisher.

Para os tratamentos de micro-ondas um valor negativo é expresso para sinalizar que a variação do teor de umidade ocorre de forma inversa, isto é, há perda de umidade, uma vez que a madeira destinada ao referido tratamento foi mantida em estado de saturação de água. Dessa forma, com a ação da radiação por micro-ondas a plasticização se deu do interior do corpo de prova para sua parte externa, liberando água em forma de vapor.

Segundo a Tab. 22 pode-se notar que entre os tratamentos M1 e M2 houve diferença estatisticamente significativa para as três espécies, denotando influência do efeito tempo de exposição às micro-ondas. A relação entre a perda de umidade e o tempo é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o tempo, maior a perda de umidade proporcionada pelo aquecimento em micro-ondas.

O tratamento de micro-ondas apresenta-se como boa alternativa para o aquecimento rápido da madeira, e conseqüentemente plasticização da mesma. Studhalter, Ozarska e Siemon (2009), analisando a distribuição de temperatura ao longo seção transversal de peças de madeira de *Eucalyptus regnans* irradiadas citam que micro-ondas podem aquecer a madeira muito facilmente de dentro pra fora até altas temperaturas, mas as menores temperaturas próximo à superfície da peça são menos satisfatórias para o vergamento.

Uma vez verificado que há perda de umidade crescente ao aumentar-se o tempo de exposição à micro-ondas, a alternativa de secagem da madeira pelo referido método torna-se viável. De acordo com o verificado por Oloyede e Groombridge (2000), as propriedades de resistência da madeira podem decrescer dramaticamente para peças secas por micro-ondas a 100% da potência. Segundo os autores, dependendo da aplicação, essas conseqüências podem ser ou não significantes.

A partir da Fig. 19 é possível observar o comportamento do teor de umidade referente às situações anterior e posterior aos tratamentos. Pode-se verificar que o tratamento de cozimento é responsável pela maior diferença no teor de umidade das amostras, isto é, é o que adicionou maior quantidade de água à amostra.

Peres et al. (2013) citam que para vergamentos menos agressivos, 15% de umidade na madeira é o suficiente para governar a sua plasticização juntamente com a adição de energia calorífica, entretanto, para vergamentos mais agressivos o ideal é que

se atinja uma faixa de umidade de 20 a 25%, não necessitando maiores adições de água, exceto reforços superficiais.

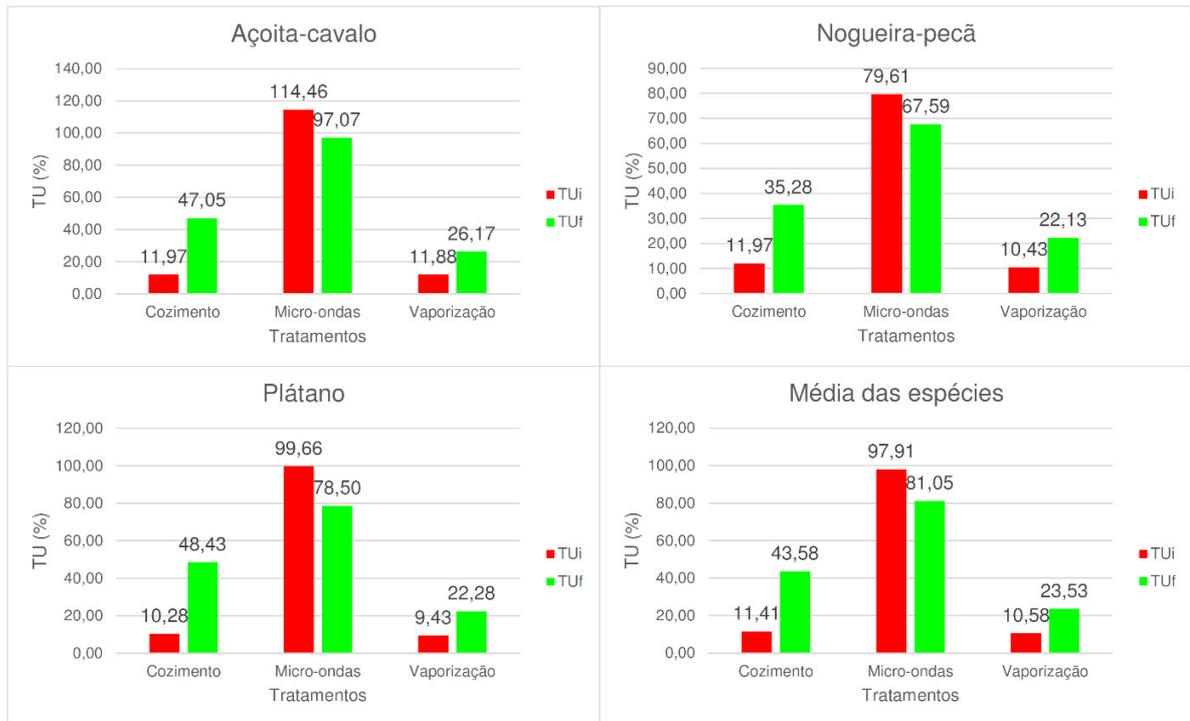


Figura 19 – Teores de umidade anteriores e posteriores aos tratamentos para cada espécie.

De acordo com o verificado através da Fig. 19 é possível concluir que os tratamentos cumprem com a referida recomendação, atingindo a faixa citada como na vaporização ou até mesmo ultrapassando-a nos tratamentos de cozimento e micro-ondas (por impregnação prévia).

5.2.3 Rugosidade Superficial

5.2.3.1 Rugosidade ao Pré-tratamento

Foram feitas análises da rugosidade superficial da madeira para a caracterização dos pré-tratamentos. Tal análise foi efetuada anterior e posteriormente ao tratamento através da verificação dos parâmetros R_a , R_t , R_q e R_z que descrevem o perfil de rugosidade do material.

De posse dos dados variantes entre os fatores plano anatômico (radial e tangencial), espécie (Açoita-cavalo, noqueira-pecã e plátano) e tratamento (cozimento, vaporização, micro-ondas e grupo controle) foi feita uma análise de variância multifatorial (Tab. 23).

Tabela 23 – Análise de variância multifatorial para parâmetros de rugosidade.

| Parâmetro | Efeito | Quadrado médio | Teste F | Interações | Parâmetro | Quadrado médio | Teste F |
|---------------------|---------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| R _a (µm) | A: Espécie | 2,61 | 0,29 ^{ns} | AB | R _a | 21,62 | 2,42 ^{ns} |
| | B: Plano | 29,4 | 3,29 ^{ns} | | R _q | 28,33 | 2,23 ^{ns} |
| | C: Tratamento | 108,57 | 12,14* | | R _t | 176,3 | 2,42 ^{ns} |
| R _q (µm) | A: Espécie | 16,41 | 1,29 ^{ns} | AC | R _z | 172,9 | 2,41 ^{ns} |
| | B: Plano | 57,38 | 4,51* | | R _a | 3,25 | 0,36 ^{ns} |
| | C: Tratamento | 179,84 | 14,15* | | R _q | 4,60 | 0,36 ^{ns} |
| | | | | | R _t | 26,48 | 0,36 ^{ns} |
| R _t (µm) | A: Espécie | 21,3 | 0,29 ^{ns} | BC | R _z | 25,96 | 0,36 ^{ns} |
| | B: Plano | 239,96 | 3,29 ^{ns} | | R _a | 0,92 | 0,10 ^{ns} |
| | C: Tratamento | 886,76 | 12,15* | | R _q | 1,42 | 0,11 ^{ns} |
| | | | | | R _t | 7,52 | 0,10 ^{ns} |
| R _z (µm) | A: Espécie | 20,86 | 0,29 ^{ns} | ABC | R _z | 7,38 | 0,10 ^{ns} |
| | B: Plano | 235,18 | 3,29 ^{ns} | | R _a | 4,72 | 0,53 ^{ns} |
| | C: Tratamento | 869,55 | 12,15* | | R _q | 5,08 | 0,40 ^{ns} |
| | | | | | R _t | 38,5 | 0,53 ^{ns} |
| | | | | R _z | 37,74 | 0,53 ^{ns} | |

Em que: * significativo ao nível de 95% de confiança ao teste LSD-Fisher; ^{ns} = não significativo.

Foram analisados os efeitos de interação de terceira ordem entre fatores espécie, plano e tratamento e verificou-se que não há significância para nenhuma das combinações.

Quando analisados os efeitos, os fatores espécie e plano não apresentaram diferença significativa para nenhum dos casos, com exceção do parâmetro R_q, que difere significativamente ao nível de 95% de confiança entre os planos anatômicos, apresentando valores médios de 8,43 e 9,21µm para os planos tangencial e radial respectivamente.

Kiliç et al. (2008) verificaram diferença nos parâmetros de rugosidade estudados entre os planos radial e tangencial. Tais autores, entretanto, notaram aumento da rugosidade superficial após a vaporização pelo levantamento das fibras causado pela

aquisição de umidade, contrapondo-se ao resultado de melhora da superfície verificado na Tab. 24.

Para o fator tratamento todos os parâmetros de rugosidade apresentaram diferença estatística. A Tab. 24 apresenta o desdobramento em forma de análise de variância dos parâmetros tomando-se como base o fator tratamento.

Tabela 24 – Análise de variância para os parâmetros R_a , R_q , R_t e R_z variantes em tratamento.

| Tratamento | R_a (μm) | | | Teste F | R_q (μm) | | | Teste F |
|-------------|-------------------------|---------------|---------|--------------------|-------------------------|---------------|---------|--------------------|
| | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | |
| Cozimento | 7,06Aa | 7,58Aa | 7,00Aa | 0,6 ^{ns} | 7,73Aa | 8,21Aa | 7,9Aa | 0,27 ^{ns} |
| Micro-ondas | 7,33Aa | 7,54Aa | 7,44Aab | 0,04 ^{ns} | 7,96Aa | 8,22Aa | 8,42Aa | 0,13 ^{ns} |
| Vaporização | 6,85Aa | 7,55Aa | 7,89Aab | 0,73 ^{ns} | 7,47Aa | 8,27Aa | 8,96Aab | 1,05 ^{ns} |
| Controle | 9,73Ab | 9,43Ab | 9,49Ab | 0,07 ^{ns} | 10,77Ab | 10,48Ab | 11,58Ab | 0,58 ^{ns} |
| Teste F | 11,48 | 5,1 | 2,03 | | 12,21 | 5,91 | 3,02 | |

| Tratamento | R_t (μm) | | | Teste F | R_z (μm) | | | Teste F |
|-------------|-------------------------|---------------|--------------|--------------------|-------------------------|---------------|--------------|--------------------|
| | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | |
| Cozimento | 20,17Aa | 21,64Aa | 20,0Aa | 0,6 ^{ns} | 19,97Aa | 21,43Aa | 19,80Aa | 0,59 ^{ns} |
| Micro-ondas | 20,94Aa | 21,54Aa | 21,24Aa b | 0,04 ^{ns} | 20,74Aa | 21,33Aa | 21,03Aa b | 0,04 ^{ns} |
| Vaporização | 19,57Aa | 21,57Aa | 22,52Aa b | 0,73 ^{ns} | 19,38Aa | 21,36Aa | 22,3Aab | 0,73 ^{ns} |
| Controle | 27,78Aa | 26,93Ab | 27,11Ab | 0,07 ^{ns} | 27,51Ab | 26,67Ab | 26,84Ab | 0,07 ^{ns} |
| Teste F | 11,49 | 5,11 | 2,03 | | 11,49 | 5,11 | 2,03 | |

Em que: Médias com letras iguais minúsculas verticalmente e maiúsculas horizontalmente não apresentam diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro ao teste de LSD-Fisher; ^{ns}=não significativo.

Pode-se notar através da Tab. 24 que o fator espécie não produziu efeito significativo em nenhuma das situações, isto é, para todos os parâmetros, dentro de cada grupo de tratamentos os valores não diferiram estatisticamente.

O fator tratamento produziu efeito significativo para todos os parâmetros e todas as espécies, provocando um decréscimo da rugosidade da madeira como pode ser visto na Fig. 20. Tal efeito de melhora na qualidade da superfície foi verificado também por Dundar et al. (2008) quando analisou o efeito do tempo de vaporização em lâminas da porção próxima a casca de toras de *Fagus orientalis*.

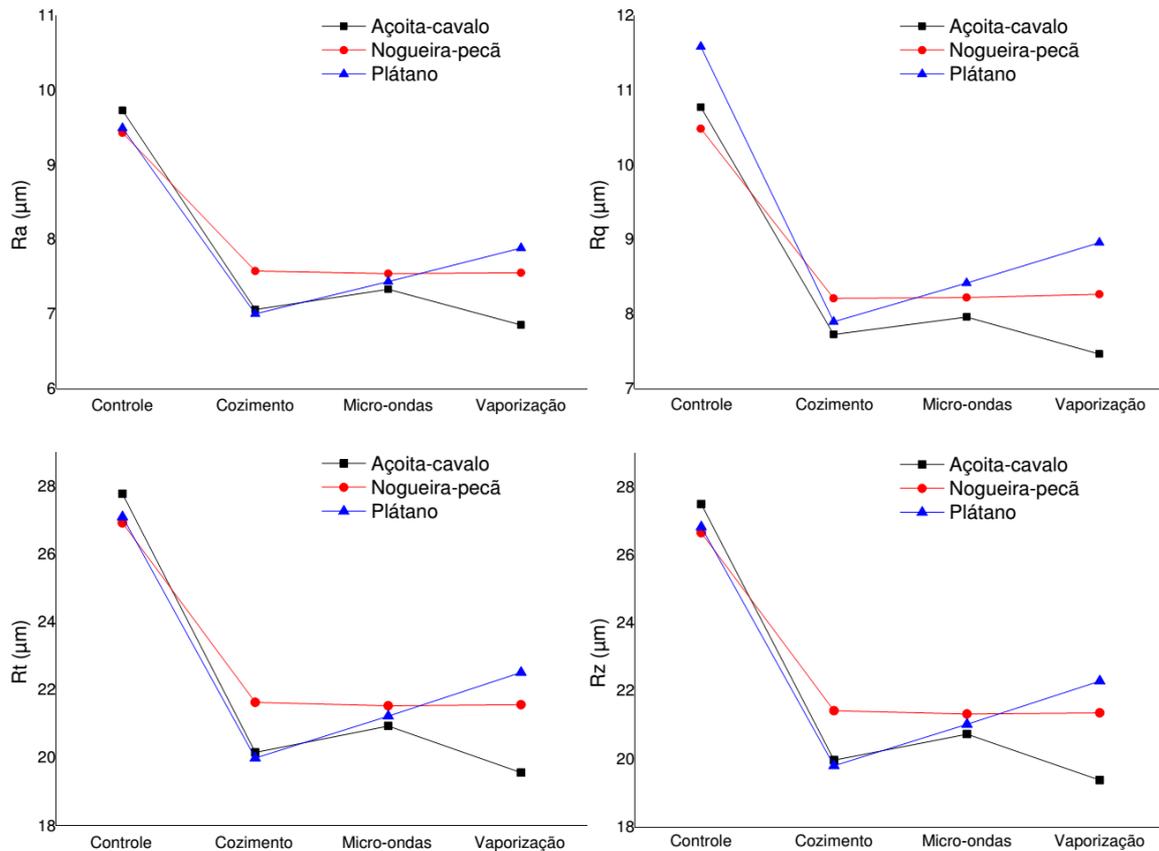


Figura 20 – Parâmetros de rugosidade variantes entre os tratamentos.

Para tempos de vaporização altos de 20, 40 e 60h (DUNDAR et al., 2008; TANRITANIR; HIZIROGLU; AS, 2006) é notado que não há uma melhora significativa nos parâmetros de qualidade superficial. Tal afirmação coincide com o verificado no presente estudo, em que há uma redução da rugosidade da madeira em todos os tratamentos quando comparados com o grupo controle.

A rugosidade da superfície da madeira de noqueira mostra-se com menor variação (Fig. 20). Segundo Kiliç (2008) isto se deve à maior massa específica apresentada pela espécie, resultando numa melhor estabilidade dimensional. Os autores verificaram resultado semelhante em seu estudo, com menor variação na rugosidade protagonizada pela espécie de maior massa específica.

5.2.3.2 Rugosidade ao vergamento

Foi efetuada a análise da variação da rugosidade superficial nos corpos de prova destinados ao vergamento. Uma vez que há um estiramento e uma compressão nas diferentes faces da amostra vergada, essa análise foi conduzida para fins de confirmação.

Foram levados em consideração apenas os fatores lado, dividido em dois níveis (convexo e côncavo) e tratamento, desconsiderando-se o grupo controle, dividido em três níveis (cozimento, micro-ondas e vaporização). O fator espécie não foi avaliado uma vez que não foram encontradas diferenças estatísticas nos parâmetros de rugosidade verificados na análise da rugosidade quanto ao tratamento (Item 5.2.3.1).

A Tab. 25 apresenta a análise de variância fatorial para os parâmetros de rugosidade superficial em razão do lado da peça vergada e dos tratamentos de plasticização, bem como a interação entre os dois fatores.

Tabela 25 – Comparação dos parâmetros de rugosidade em função dos fatores.

| Variável | Fonte de Variação | SQ | GL | QM | Valor F |
|---------------------|-------------------|---------|-----|---------|--------------------|
| R _a (μm) | A:Lado | 2,64076 | 1 | 2,64076 | 0,4 ^{ns} |
| | B:Tratamento | 3,45862 | 2 | 1,72931 | 0,26 ^{ns} |
| | Interação | | | | |
| | AxB | 12,6454 | 2 | 6,32271 | 0,95 ^{ns} |
| | Resíduos | 2374,49 | 356 | 6,66992 | |
| R _q (μm) | A:Lado | 0,52469 | 1 | 0,52469 | 0,06 ^{ns} |
| | B:Tratamento | 9,38429 | 2 | 4,69214 | 0,51 ^{ns} |
| | Interação | | | | |
| | AxB | 16,9345 | 2 | 8,46725 | 0,92 ^{ns} |
| | Resíduos | 3279,34 | 356 | 9,21162 | |
| R _t (μm) | A:Lado | 21,4861 | 1 | 21,4861 | 0,39 ^{ns} |
| | B:Tratamento | 28,2484 | 2 | 14,1242 | 0,26 ^{ns} |
| | Interação | | | | |
| | AxB | 103,295 | 2 | 51,6476 | 0,95 ^{ns} |
| | Resíduos | 19380,8 | 356 | 54,4405 | |
| R _z (μm) | A:Lado | 21,118 | 1 | 21,118 | 0,4 ^{ns} |
| | B:Tratamento | 27,7256 | 2 | 13,8628 | 0,26 ^{ns} |
| | Interação | | | | |
| | AxB | 101,205 | 2 | 50,6023 | 0,95 ^{ns} |
| | Resíduos | 19001,4 | 356 | 53,3748 | |

Em que: ^{ns}= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste LSD-Fisher; SQ=soma dos quadrados; GL=graus de liberdade; QM=quadrado médio.

Pode-se observar que os fatores não produziram efeito significativo nos parâmetros de rugosidade superficial quanto ao estiramento e encolhimento provocado pelo vergamento nas faces.

Para Von Zuben (2010) e Peres et al. (2013) o vergamento é responsável por estiramentos das fibras na face de tração e retrações das mesmas na face de compressão. Tal fenômeno mecânico modifica de certa forma a superfície da madeira, podendo influenciar na rugosidade da mesma.

De acordo com o apresentado pela Tab. 25, não há diferença estatística entre os parâmetros de rugosidade tomados após o vergamento nas faces côncava e convexa, ressaltando que a movimentação das fibras não proporciona efeito sobre a rugosidade.

5.2.4 Colorimetria da Madeira

Foram analisados os parâmetros colorimétricos *L*, *a*, e *b*, em amostras dos grupos tratado e controle e avaliadas as influências dos fatores espécie, tratamento e plano anatômico bem como as suas interações (Tab. 26).

Tabela 26 – Análise de variância multifatorial para os parâmetros colorimétricos.

| Variável | Fonte de Variação | QM | Teste F | Interações | Variável | QM | Teste F |
|----------|-------------------|---------|---------|------------|----------|-------|---------|
| L | A: Espécie | 2032,64 | 95,75* | AB | L | 2,25 | 0,11 |
| | B: Plano | 526,47 | 24,8* | | a | 2,34 | 1,67 |
| | C: Tratamento | 440,60 | 20,76* | | b | 11,06 | 3,71* |
| a | A: Espécie | 84,75 | 60,72* | AC | L | 79,76 | 3,76* |
| | B: Plano | 1,34 | 0,96 | | a | 6,83 | 4,89* |
| | C: Tratamento | 12,59 | 9,02* | | b | 18,14 | 6,09* |
| | BC | | | | L | 1,23 | 0,06 |
| | | | | | a | 0,39 | 0,28 |
| | | | | | b | 1,08 | 0,36 |
| b | A: Espécie | 5,94 | 1,99 | ABC | L | 1,39 | 0,07 |
| | B: Plano | 0,40 | 0,13 | | a | 0,38 | 0,27 |
| | C: Tratamento | 47,40 | 15,9* | | b | 0,49 | 0,16 |

Em que: * significativa ao nível de 95% de confiança no teste de LSD-Fisher; QM=quadrado médio.

Pode-se observar que o parâmetro luminosidade (L) mostrou sofrer efeito significativo dos três fatores analisados, entretanto apenas o fator A e C apresentaram interações significativas. O parâmetro *a* (eixo vermelho-verde) apresentou diferença estatística apenas quando levados em consideração os fatores espécie e tratamento, sendo verificada interação significativa entre os fatores tratamento e espécie. Não foi verificada significância para o fator espécie no parâmetro *b*, apenas para o fator tratamento. Para a variável referida foram observadas interações tipo AB e AC.

Foi verificada diferença para a luminosidade entre planos. A diferença deve-se ao fato de que na face radial há maior brilho devido às bandas dos raios, segundo Burger e Richter (1991). Para Nishino et al. (2000) a variação colorimétrica entre os planos radial e tangencial se dá pelo arranjo celular, largura dos raios e presença de grã espiralada. A Tab. 27 apresenta uma análise de variância para os parâmetros colorimétricos desconsiderando-se os grupos controles, para a verificação do comportamento das variáveis citadas sob influência dos diferentes tratamentos de plasticização.

Tabela 27 – Parâmetros $L^*a^*b^*$ em razão dos tratamentos e espécies.

| <i>L</i> | | | | |
|-------------|--------------------|---------------|-----------|--------------------|
| | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | Valor F |
| Cozimento | 64,08 Ba | 73,01 Cb | 61,66 Aa | 61,48 |
| Micro-ondas | 63,26 Aa | 69,24 Ba | 63,58 Aab | 20,46 |
| Vaporização | 64,47 Aa | 71,09 Ba | 65,3 Ab | 16,16 |
| Valor F | 0,88 ^{ns} | 7,88 | 3,12 | |
| <i>a</i> | | | | |
| | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | Valor F |
| Cozimento | 5,11 Aa | 5,61 Ba | 7,32 Cb | 43,48 |
| Micro-ondas | 4,99 Aa | 5,41 Aa | 6,14 Ba | 8,25 |
| Vaporização | 5,18 Aa | 6,87 Bb | 7,19 Bb | 20,64 |
| Valor F | 0,41 ^{ns} | 36,39 | 4,69 | |
| <i>b</i> | | | | |
| | Açoita-cavalo | Nogueira-pecã | Plátano | Valor F |
| Cozimento | 16,83 Ba | 15,58 Aa | 17,05 Ba | 13,15 |
| Micro-ondas | 17,24 Aa | 16,92 Ab | 17,17 Aa | 0,24 ^{ns} |
| Vaporização | 17,38 Aa | 18,64 Bc | 18,3 ABb | 3,45 |
| Valor F | 0,77 ^{ns} | 42,48 | 3,74 | |

Em que: Médias com letras iguais, maiúsculas horizontalmente e minúsculas verticalmente, não apresentam diferença estatisticamente significativa de acordo com o teste de LSD-Fisher, em 5% de probabilidade de erro. ^{ns}= não significativo.

A madeira de açoita-cavalo não apresentou diferença estatística quanto aos tratamentos nos três parâmetros analisados. O parâmetro b não apresentou diferença estatística entre espécies quando analisado o tratamento de micro-ondas, sinalizando que o tratamento desempenha homogeneização das cores no eixo azul-amarelo. O tratamento de cozimento executa um papel inverso, propiciando às amostras diferenciação entre os parâmetros L e a em três grupos homogêneos e b em dois.

Pode-se observar um escurecimento da madeira através da redução da luminosidade L apresentada na Tab. 28. Tal resultado corrobora o verificado por Cao et al. (2012), para o tratamento térmico de vaporização. Tais autores também verificaram um aumento do ΔE durante o tempo de tratamento, sinalizando que a mudança de cor é função do tempo de exposição ao tratamento.

Pode-se notar que o tratamento de micro-ondas apresentou maior modificação na coloração, expressa pela variação total da cor em todas as espécies excetuando-se o plátano, o qual sofreu maior variação colorimétrica no tratamento de cozimento. Verificou-se que o parâmetro L em todas as espécies sofreu um decréscimo proporcionado pelo tratamento de vaporização.

Tolvaj et al. (2012) encontrou resultado semelhante na vaporização da madeira, observando decréscimo na luminosidade da madeira nos primeiros dias de tratamento. O autor também verificou um aumento no parâmetro a nas fases iniciais da vaporização, coincidindo com o encontrado no presente estudo para mesmo tipo de tratamento.

A modificação da cor, proporcionada pela interação com a água também foi observada também por Schnabel, Zimmer e Petutschnigg (2009) na exposição da madeira à ambientes externos.

Assim, a alteração nos parâmetros colorimétricos e consequente tendência para a coloração acinzentada para a madeira tratada por tratamentos de cozimento, micro-ondas e vaporização é explicada pela lixiviação dos extrativos solúveis em água.

Tabela 28 – Variação colorimétrica média para espécies, tratamentos e planos anatômicos.

| Espécie | Tratamento | Plano | L | a | b | ΔE | |
|---------------|---------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| Açoita-cavalo | Controle | T | 65,63 <i>3,99</i> | 4,85 <i>0,49</i> | 16,89 <i>2,41</i> | - | |
| | | R | 67,88 <i>3,50</i> | 4,97 <i>0,80</i> | 17,17 <i>2,46</i> | - | |
| | Cozimento | T | 63,20 <i>2,54</i> | 5,10 <i>0,56</i> | 16,87 <i>1,03</i> | 2,44 | |
| | | R | 64,96 <i>2,52</i> | 5,13 <i>0,45</i> | 16,80 <i>1,21</i> | 2,95 | |
| | Micro-ondas | T | 62,18 <i>5,05</i> | 4,97 <i>0,78</i> | 17,19 <i>2,30</i> | 3,46 | |
| | | R | 64,34 <i>3,46</i> | 5,02 <i>1,20</i> | 17,29 <i>2,15</i> | 3,54 | |
| | Vaporização | T | 63,30 <i>3,85</i> | 5,27 <i>0,72</i> | 17,46 <i>2,15</i> | 2,44 | |
| | | R | 65,64 <i>2,77</i> | 5,10 <i>1,03</i> | 17,31 <i>1,68</i> | 2,25 | |
| | Nogueira-pecã | Controle | T | 73,69 <i>4,16</i> | 6,76 <i>1,00</i> | 19,14 <i>1,55</i> | - |
| | | | R | 75,55 <i>4,23</i> | 6,05 <i>1,34</i> | 18,65 <i>1,42</i> | - |
| | | Cozimento | T | 71,71 <i>4,08</i> | 5,65 <i>0,68</i> | 15,69 <i>1,04</i> | 4,13 |
| | | | R | 74,31 <i>3,17</i> | 5,57 <i>0,36</i> | 15,47 <i>0,63</i> | 3,45 |
| Micro-ondas | | T | 67,76 <i>4,12</i> | 5,65 <i>0,50</i> | 17,41 <i>0,97</i> | 6,27 | |
| | | R | 70,72 <i>1,67</i> | 5,17 <i>0,45</i> | 16,43 <i>0,71</i> | 5,39 | |
| Vaporização | | T | 69,89 <i>3,49</i> | 7,12 <i>0,76</i> | 18,85 <i>1,52</i> | 3,83 | |
| | | R | 72,29 <i>3,74</i> | 6,63 <i>1,15</i> | 18,43 <i>2,11</i> | 3,32 | |
| Plátano | | Controle | T | 68,52 <i>6,88</i> | 6,07 <i>1,59</i> | 17,07 <i>1,20</i> | - |
| | | | R | 71,23 <i>1,26</i> | 6,35 <i>1,93</i> | 17,96 <i>1,26</i> | - |
| | | Cozimento | T | 60,56 <i>5,35</i> | 7,22 <i>1,50</i> | 16,57 <i>1,27</i> | 8,06 |
| | | | R | 62,77 <i>5,67</i> | 7,43 <i>1,54</i> | 17,54 <i>1,67</i> | 8,54 |
| | Micro-ondas | T | 62,38 <i>4,34</i> | 6,30 <i>1,59</i> | 17,09 <i>0,17</i> | 6,15 | |
| | | R | 64,78 <i>4,09</i> | 5,99 <i>1,57</i> | 17,25 <i>2,32</i> | 6,50 | |
| | Vaporização | T | 63,61 <i>7,00</i> | 7,15 <i>1,72</i> | 17,93 <i>1,99</i> | 5,11 | |
| | | R | 66,98 <i>6,36</i> | 7,23 <i>1,98</i> | 18,66 <i>2,06</i> | 4,39 | |

Em que: T e R= planos anatômicos tangencial e radial; Valores em itálico correspondem ao desvio padrão.

O tratamento de cozimento apresentou-se com efeito homogeneizado, não apresentando padrão de modificação colorimétrica da madeira quando analisados os parâmetros $L^*a^*b^*$. Entretanto, quando levado em consideração a ΔE , o cozimento conduz uma mudança na coloração colocando-se em posição intermediária em relação aos tratamentos de vaporização e cozimento.

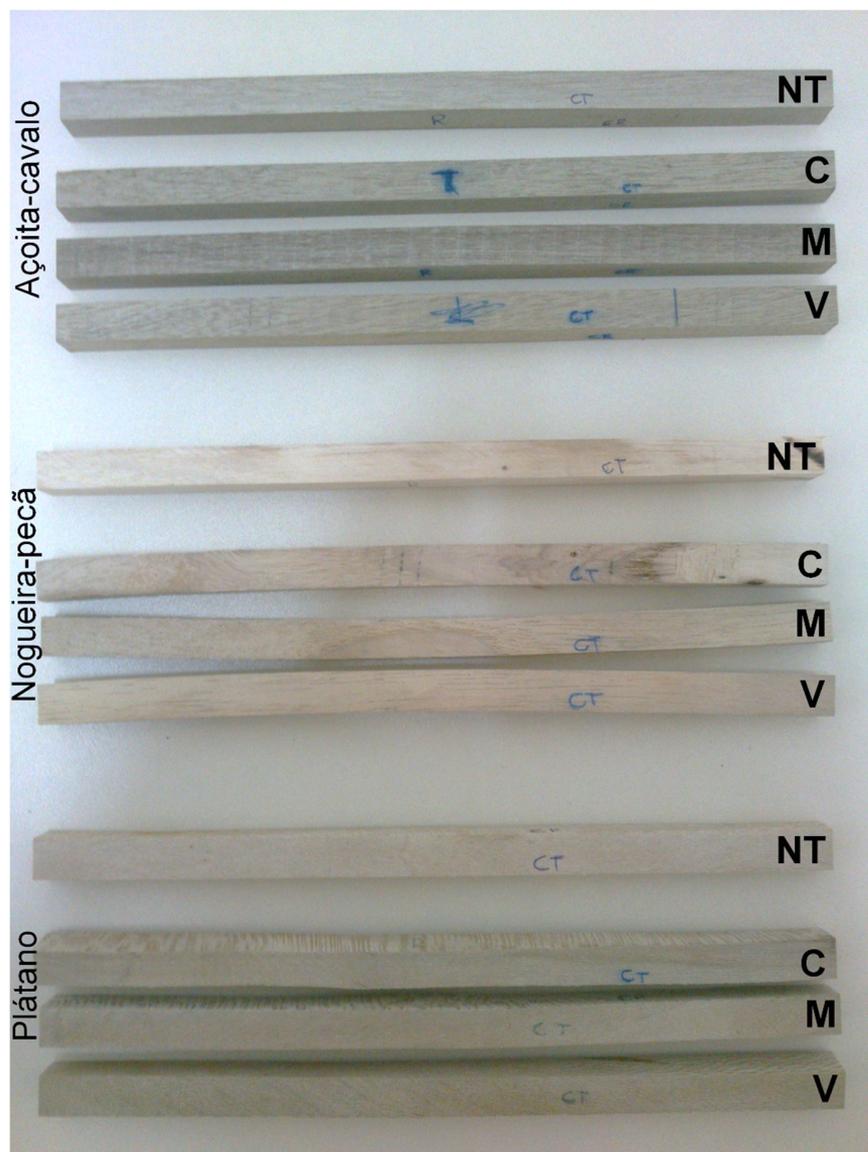


Figura 21 - Gradiente de cor para amostras tratadas e não tratadas.

Essa modificação consiste na redução da luminosidade e aumento no parâmetro a , permanecendo o parâmetro b inalterado. Charrier et al. (2002) observaram o mesmo

comportamento para o cozimento da madeira. Para os autores, a modificação da cor da madeira deve-se à oxidação de substâncias constituintes e em alguns casos, da migração de substâncias coloridas do cerne para o alburno.

A exemplo do expresso na Tab. 28, Todaro et al. (2012a) e Todaro (2012b) verificaram um decréscimo na luminosidade da madeira, um aumento leve no parâmetro a e uma leve diminuição do parâmetro b para o tratamento de vaporização.

6 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Os tratamentos mostraram-se efetivos na plasticização da madeira, possibilitando o vergamento com qualidade e modificando significativamente as propriedades mecânicas de MOE, MOR, fragilidade e resiliência;
- Os tratamentos foram eficientes na plasticização da madeira, todavia não apresentaram, entre si, diferença significativa no efeito com base no número de defeitos por peça, notas de qualidade, e no mínimo raio de vergamento;
- A madeira de nogueira-pecã apresentou-se como de maior qualidade de vergamento e a madeira de plátano apresentou maior resistência à flexão estática;
- Os tratamentos não apresentaram entre si diferenças expressivas quanto às propriedades de MOE, fragilidade e resiliência, excetuando-se o MOR, para o qual os tratamentos diferiram nas madeiras de açoita-cavalo e plátano, sendo o valor mais alto proporcionado pelos tratamentos de vaporização;
- Os tratamentos de micro-ondas mostraram-se eficientes na plasticização, com base na análise das propriedades mecânicas da madeira, entretanto não diferiram significativamente dos tratamentos de vaporização e cozimento quando comparados quanto ao todo de propriedades avaliadas;
- Tratamentos de cozimento adicionam maior conteúdo de umidade à madeira;
- Os parâmetros de rugosidade superficial foram reduzidos pelos tratamentos de plasticização;
- Quando comparados os lados côncavo e convexo, o vergamento não proporcionou diferença estatisticamente significativa nos parâmetros de rugosidade superficial;
- A luminosidade da madeira é maior no plano radial, sendo que esse parâmetro, de forma geral e para todas as espécies, foi reduzido pela ação dos tratamentos aplicados;

De posse das conclusões possibilitadas pelo estudo sugere-se para trabalhos futuros:

- A utilização do tratamento de micro-ondas para as espécies estudadas, pois o mesmo apresenta-se como uma solução apreciável para o vergamento uma vez que apresenta maior eficiência energética, justificado pelo menor tempo de tratamento, mostrando resultados equalizados com o restante dos tratamentos avaliados;
- Caracterizar futuras espécies para o vergamento com base nas propriedades de fragilidade e resiliência;
- Caracterizar os tratamentos de plasticização com base em ensaios de compressão paralela às fibras;

7 BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standards methods of testing small clear specimens of timber: ASTM D143-94**. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials: ASTM D 2395 – 93**. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, PA: 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties. ASTM D5536-94**. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, PA. 1995.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3. São Paulo: Makron Books, 1995.

BELTRAME, R. et al. Resistência ao impacto da madeira de açoita-cavalo em diferentes condições de umidade. **Cerne**, v. 16, n. 4, p. 499-504, 2010.

BELTRAME, R. et al. Resistência ao choque da madeira de platanus x acerifolia em diferentes condições de umidade. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 771-778, 2013. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84887297758&partnerID=40&md5=ae8928a9b8ddeb700b2e8d8005775480> >.

BENSON, J. **Woodworker`s Guide to Bending Wood**. Petersburg, PA: Fox Chapel Publishing, 2008. 179.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction, Eighth Edition Binder Ready Version**. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470556733. Disponível em: < <http://books.google.com.br/books?id=jUI4QAAACAAJ> >.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D. Efeito da vaporização de toras na redução de defeitos associados a tensões de crescimento de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 4, p. 341-440, 2005.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A Colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, v. 71, p. 30-41, 2001.

CAI, J.; CAI, L. Effects of thermal modification on mechanical and swelling properties and color change of lumber killed by mountain pine beetle. **BioResources**, v. 7, n. 3, p. 3488-3499, // 2012. ISSN 19302126 (ISSN). Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84865800278&partnerID=40&md5=cae30f6a6b223d0380ddaf377d242ce2> >.

CAO, Y. et al. Color change of chinese fir through steam-heat treatment. **Bioresoures**, v. 7, n. 3, p. 2809-2819, 2012.

CHANG, H.-T.; CHANG, S.-T. Improvements in dimensional stability and lightfastness of wood by butyrylation using microwave heating. **Journal of Wood Science**, v. 49, n. 5, p. 455-460, 2003/10/01 2003. ISSN 1435-0211. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-002-0504-8> >.

CHARRIER, B. et al. Study of industrial boiling process on walnut colour: Experimental study under industrial conditions. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 60, n. 4, p. 259-264, 2002/08/01 2002. ISSN 0018-3768. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-002-0305-1> >.

COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **Selección y colección de maderas**. COPANT 30:1- 001 1971.

DAIAN, G.; OZARSKA, B. **Impact of sapwood and the properties and market utilisation of plantation and young hardwoods: Determination of minimum radius of bending curvature of heartwood and sapwood from plantation and young hardwood species using microwave wood bending technology (PART B)**. Forest & Wood Products Australia (FWPA). Melbourne, p.35. 2010

DUNDAR, T. et al. The effect of boiling time on the surface roughness of rotary-cut veneers from oriental beech (*Fagus orientalis* L.). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 199, n. 1–3, p. 119-123, 4/1/ 2008. ISSN 0924-0136. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607007327> >.

EBRINGEROVÁ, A.; HEINZE, T. Xylan and xylan derivatives – biopolymers with valuable properties, 1. Naturally occurring xylans structures, isolation procedures and properties. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 21, n. 9, p. 542-556, 2000. ISSN 1521-3927. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1002/1521-3927\(20000601\)21:9<542::AID-MARC542>3.0.CO;2-7](http://dx.doi.org/10.1002/1521-3927(20000601)21:9<542::AID-MARC542>3.0.CO;2-7) >.

GATTO, D. A. **Características tecnológicas do vergamento das madeiras de *Luehea divaricata*, *Carya illinoensis* e *Platanus x acerifolia* como subsídios para o manejo**

florestal. 2006. 109 (Doutorado). Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GATTO, D. A. et al. Características tecnológicas das madeiras de *Luehea divaricata*, *Carya illinoensis* e *Platanus x acerifolia* quando submetidas ao vergamento. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 121-131, 2008.

HWANG, K. et al. Bending Quality of Main Korea Wood Species. **Wood Research**, v. 89, p. 6-10, 2002.

ISHIMARU, Y.; OSHIMA, K.; IIDA, I. Changes in the mechanical properties of wood during a period of moisture conditioning. **Journal of Wood Science**, v. 47, n. 4, p. 254-261, 2001/08/01 2001. ISSN 1435-0211. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/BF00766710> >.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. **Geometrical Products Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters**. JIS B 0601:2002. Tokyo 2002.

JIANG, T.; ZHOU, Z. F.; WANG, Q. W. Effect of treatments of microwave radiation and steaming on color of larch wood. In: TIAN, J. (Ed.). **Multi-Functional Materials and Structures Engineering, Icmmse 2011**. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, v.304, 2011. p.124-130. (Advanced Materials Research). ISBN 1022-6680 978-3-03785-200-2.

KAČÍKOVÁ, D. et al. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. **Bioresource Technology**, v. 144, n. 0, p. 669-674, 9// 2013. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413010390> >.

KILIÇ, M. et al. Influence of steaming on surface roughness of beech and sapele flooring material. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 199, n. 1–3, p. 448-451, 4/1/ 2008. ISSN 0924-0136. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607007364> >.

KONICA. **Precise Color Communication**. MINOLTA, K. Japan: AJFIPK 2007.

KUBLER, H. Growth Stresses in Trees and Related Wood Properties. **Forest Products Abstracts**, v. 10, n. 3, p. 61-119, 1987.

KULJICH, S.; CÁCERES, C.; HERNÁNDEZ, R. Steam-bending properties of seven poplar hybrid clones. **International Journal of Material Forming**, p. 1-6, 2013/09/20 2013. ISSN 1960-6206. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-013-1148-5> >.

MARTINS, S. A. et al. Efeito da Usinagem na Rugosidade da Superfície da Madeira de *Eucalyptus benthamii* **Floram**, v. 18, n. 2, p. 135-143, 2011.

MODES, K. S. et al. Resistência natural da madeira de sete espécies florestais ao fungo *Pycnoporus sanguineus* causador de podridão-branca. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 407-411, 2012. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/cerne/v18n3/a07v18n3.pdf> >.

MUNSELL, C. **Soil color charts**. Baltimore: Koelmorgen, 1975.

NISHINO, Y. et al. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v. 46, n. 4, p. 267-272, 2000/08/01 2000. ISSN 1435-0211. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/BF00766215> >.

NORIMOTO, M. et al. **Permanent fixation of bending deformation in wood by heat treatment**. Wood Research Institute Kyoto University. Kyoto, p.23-33. 1993

OKINO, E. Y. A. et al. Descrição dos caracteres tecnológicos da madeira de *Cupressus glauca* Lam. **Scientia florestalis**, v. 72, n. 5, p. 39-48, 2006.

OLOYEDE, A.; GROOMBRIDGE, P. The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 100, n. 1-3, p. 67-73, 4/3/ 2000. ISSN 0924-0136. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013699004549> >.

OZARSKA, B.; DAIAN, G. Assessment of microwave bending capabilities for Australian wood species. **Forest products journal**, v. 60, n. 1, p. 64-68, / 2010. Disponível em: < <http://europepmc.org/abstract/AGR/IND44398472> >.

PECK, E. C. **Bending solid wood to form. Agriculture handbook No.125**. AGRICULTURE, U. S. D. O. Washington: USDA: 39 p. 1957.

PERES, M. L. **Qualidade da madeira vergada de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden**. 2011. 57 (Graduação). Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, Brasil.

PERES, M. L. et al. Idade de segregação do lenho juvenil e adulto pela variação da massa específica de açoita-cavalo. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1596-1602, 2012.

PERES, M. L. et al. Vergamento de Madeira Sólida: Qualidade de Processo e Matéria-prima. **Nativa**, v. 01, n. 01, p. 56-61, 2013.

PHUONG, L.; SHIDA, S.; SAITO, Y. Effects of heat treatment on brittleness of *Styrax tonkinensis* wood. **Journal of Wood Science**, v. 53, n. 3, p. 181-186, 2007. ISSN 1435-0211. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-006-0841-0> >.

SCHNABEL, T.; ZIMMER, B.; PETUTSCHNIGG, A. On the modelling of colour changes of wood surfaces. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 67, n. 2, p. 141-149, 2009/05/01 2009. ISSN 0018-3768. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-008-0293-x> >.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Vaporização no alívio das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus dunnii* de duas procedências. **Scientia Agraria**, v. 1, n. 1-2, p. 29-32, 2000.

SINGH, A.; VERMA, S. **Fundamentals Of Microwave Engineering**. Prentice-Hall Of India Pvt. Ltd., 2009. ISBN 9788120337169.

SIXTA, H. Multistage kraft pulping. **Handbook of Pulp**, p. 325-365, // 2006.

SMITH, D. Steam Bending. In: LULU ENTERPRISES, I. (Ed.). **Information Unlimited**. Canada: Lulu Press, 2004.

STANGERLIN, D. M. et al. Propriedades de flexão estática da madeira de *Carya illinoensis* em duas condições de umidade. **Ciência da Madeira**, v. 1, n. 2, p. 70-79, 2010.

STEVENS, W. C.; TURNER, N. **Wood Bending Handbook**. East Petersburg: Fox Chapel Publishing, 1970.

STUDHALTER, B.; OZARSKA, B.; SIEMON, G. Temperature and moisture content behaviour in microwave heated wood prior to bending – Mountain Ash (*Eucalyptus regnans*). **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 67, n. 2, p. 237-239, 2009/05/01 2009. ISSN 0018-3768. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-008-0300-2> >.

TAGHIYARI, H.; ENAYATI, A.; GHOLAMIYAN, H. Effects of nano-silver impregnation on brittleness, physical and mechanical properties of heat-treated hardwoods. **Wood Science and Technology**, v. 47, n. 3, p. 467-480, 2013/05/01 2013. ISSN 0043-7719. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-012-0506-7> >.

TANRITANIR, E.; HIZIROGLU, S.; AS, N. Effect of steaming time on surface roughness of beech veneer. **Building and Environment**, v. 41, n. 11, p. 1494-1497, 11// 2006. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305002076> >.

^aTODARO, L. et al. Influence of combined hydro-thermal treatments on selected properties of Turkey oak (*Quercus cerris* L.) wood. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1-3, p. 563-578, 2012/01/01 2012. ISSN 0043-7719. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-011-0430-2> >.

^bTODARO, L. et al. Steaming effects on selected wood properties of Turkey oak by spectral analysis. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1-3, p. 89-100, 2012/01/01 2012. ISSN 0043-7719. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-010-0377-8> >.

TOLVAJ, L. et al. Effect of steaming on the colour change of softwoods. **Bioresources**, v. 7, n. 3, p. 2799-2808, 2012. ISSN 1930-2126. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000307639900008 >.

UNSAL, O.; CANDAN, Z.; KORKUT, S. Wettability and roughness characteristics of modified wood boards using a hot-press. **Industrial Crops and Products**, v. 34, n. 3, p. 1455-1457, 11// 2011. ISSN 0926-6690. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669011001348> >.

USDA. **Wood as an engineering material**. Washington: U.S Department of Agriculture - Forest Service. Agriculture Handbook n°72 1999.

VON ZUBEN, D. L. **Desenvolvimento de processo de fabricação por vergamento de madeira maciça**. 2010. 46 Graduation Dissertation (Graduation). Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco, Campinas.

VONGPRADUBCHAI, S.; RATTANADECHO, P. The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 5, p. 997-1003, 5// 2009. ISSN 0255-2701. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270109000105> >.

VORREITER, L. **Holztechnologischeshandbuch**. 2. Wien und München: Verlag Georg Fromme & CQ, 1958.

WANG, Y.; MINATO, K.; IIDA, I. Mechanical properties of wood in an unstable state due to temperature changes, and analysis of the relevant mechanism III: effect of quenching on stress relaxation of chemically modified woods. **Journal of Wood Science**, v. 53, n. 2, p. 94-99, 2007/04/01 2007. ISSN 1435-0211. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-006-0831-2> >.

WIEMANN, M. C.; GREEN, D. W. **Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species. Research Paper FPL-RP-643**. USDA. Madison: Forest Products Laboratory 2007.

YOON, S. H.; VAN HEININGEN, A. Kraft pulping and papermaking properties of hot-water pre-extracted loblolly pine in an integrated forest products biorefinery. **Tappi Journal**, v. 7, n. 7, p. 22-27, // 2008. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70349567841&partnerID=40&md5=3321e887f1308147363a5902fa0ccc9d> >.

ZIELONKA, P. et al. The comparison of experimental and theoretical temperature distribution during microwave wood heating. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 55, n. 6, p. 395-398, 1997/11/01 1997. ISSN 0018-3768. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s001070050253> >.

ZHAO, Y.-K. et al. Viscoelastic properties of wood from Chinese-fir and poplar plantations. *Forestry Studies in China*, v. 14, n. 2, p. 107-111, 2012/06/01 2012. ISSN 1008-1321. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s11632-012-0201-7> >.

ZHONG, Z. W.; HIZIROGLU, S.; CHAN, C. T. M. Measurement of the surface roughness of wood based materials used in furniture manufacture. **Measurement**, v. 46, n. 4, p. 1482-1487, 5// 2013. ISSN 0263-2241. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112004629> >.