

Universidade Federal do Rio Grande - FURG
Escola de Engenharia - EE
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - PPMec

**TRATAMENTOS TÉRMICOS EM ATMOSFERAS DISTINTAS E SUA
INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS EM MADEIRA DE
FOLHOSA.**

EDUARDO COSTELLA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

Co-orientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

RIO GRANDE
ABRIL/2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Á meus pais e avós!

“Não há palavras suficientes que eu possa dizer para descrever a importância que vocês têm para mim, além da poderosa influência que vocês exercem em minha vida.”

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força e principalmente paciência para superar as dificuldades.

Aos meus pais Claudio Costella e Rosa Maria Briedis Costella, meu irmão Fernando Costella e minha irmã Claudia Costella, pelo apoio incondicional.

A FURG – Universidade Federal do Rio Grande, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao professor orientador Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, pela forma excepcional de conduzir os estudos, sempre incentivando e motivando, grande exemplo.

Ao professor co-orientador Dr. Darci Alberto Gatto, pela orientação, apoio, confiança, e pelos ensinamentos compartilhados.

A Danusa Leidens, minha amiga e companheira que me incentivou a seguir em todos os momentos, e nunca me deixou desistir.

Aos amigos e colegas Henrique Romeo Schulz, Guilherme Vergara Nörnberg, Ezequiel Gallio, e a todos que de uma forma ou de outra participaram desta caminhada.

A CMPC - Celulose Riograndense, localizada em Guaíba, pelo fornecimento do material para o estudo.

A todos do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira, do curso de Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Federal de Pelotas.

A empresa Irgovel Indústria Riograndense de Óleos Vegetais Ltda, pelo fornecimento da goma de soja.

"...eu já lhe falei tudo, mas tudo isso é pouco diante do que sinto..."

Roberto Carlos

Resumo

O objetivo dessa pesquisa foi analisar a influência que duas atmosferas de modificação térmica, simples e banho de óleo, causaram em propriedades tecnológicas de interesse das espécies *Eucalyptus dunnii* Maiden e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Para isso, foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 2cm x 2cm x 33cm (nos planos radial, tangencial e longitudinal, respectivamente), os quais ficaram acondicionados em câmara climatizada, ajustada com 65% de umidade relativa e 20°C de temperatura, até que atingissem massa constante. Estes corpos de provas foram submetidos à tratamentos de termorretificação, por períodos de 2 horas, em atmosfera simples e com banho de óleo (utilizando resíduo do refino do óleo bruto de soja, denominado de “goma”), e temperaturas de 160°C, 180°C e 200°C, para cada uma das atmosferas. Ao final dos tratamentos, e posteriormente à estabilização dos corpos de prova, avaliou-se: a perda de massa (PM), a massa específica aparente ao teor de umidade de 12% ($\rho_{12\%}$), a tensão máxima obtida pelo ensaio de dureza Janka no plano tangencial, e as variações no módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), estes resultantes do ensaio de flexão estática, sendo os ensaios mecânicos conduzidos conforme adaptações da norma ASTM D 143-94 (2014). Percebeu-se que quanto mais agressivas ficavam as temperaturas de termorretificação, ocorriam aumentos significativos na PM ao passo que a $\rho_{12\%}$ diminuía independente da atmosfera de tratamento (simples ou banho de óleo) e da espécie madeireira (*E. dunnii* ou *E. grandis*). No que tange as propriedades mecânicas, a dureza Janka sofreu uma redução significativa para ambas as espécies, entretanto a atmosfera em banho de óleo apresentou alguns valores significativamente maiores em comparação à simples, sendo que a medida que aumentava-se a temperatura dos tratamentos, ocorria um acréscimo na dureza também. Quanto ao MOE, o mesmo não apresentou diferença significativa frente aos demais tratamentos em uma mesma atmosfera, e entre as atmosferas para uma mesma faixa de temperatura, apresentando valores variados. O MOR apresentou decréscimo significativo em relação ao tratamento controle, contudo, observou-se que conforme ocorria o aumento das faixas de temperatura, o MOR tinha um acréscimo, sendo que o maior ganho foi na temperatura de 200°C (inclusive para a madeira de *E. grandis* em atmosfera oleosa, o mesmo apresentou valor superior ao controle). Essas alterações possivelmente estão atreladas com a degradação dos componentes químicos principais da madeira, principalmente as hemiceluloses, as quais possuem menor estabilidade térmica, sendo degradadas em faixas de temperaturas inferiores a celulose e a lignina. Quanto ao resíduo de óleo de soja (goma), a mesma apresentou resultados satisfatórios, principalmente no que tange as propriedades físicas avaliadas, servindo como fonte de distribuição de calor no interior da madeira, aumentando a eficiência de tratamento.

Palavras-chave: banho de óleo; bora; *Eucalyptus*; tratamento térmico.

Abstract

The objective of this research was to analyze the influence that two thermal modification atmospheres, simple and oil bath, caused on technological properties of *Eucalyptus dunnii* Maiden and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden species. For this, were made specimens measuring 2cm x 2cm x 33cm (in the radial, tangential and longitudinal planes, respectively), which were conditioned in an air-conditioned room, adjusted with 65% relative humidity and 20 ° C temperature, until they reached constant mass. These specimens were subjected to heat treatments, for 2 hours period, in a simple atmosphere and with oil bath (using the refining crude soybean oil residue, referred to as "gum or bora"), and temperatures of 160 ° C, 180 ° C and 200 ° C for each of the atmospheres. At the end of the treatments, and after stabilization of the test specimens it were evaluated: the mass loss (PM), the apparent specific mass at the moisture content of 12% ($\rho_{12\%}$), the maximum stress obtained by the Janka hardness test in the tangential plane, and the variations in elasticity modulus (MOE) and rupture modulus (MOR), these resulting from the static bending test, where the mechanical tests were conducted according to adaptations of ASTM D 143-94 (2014) standard. It was observed that the more aggressive the temperatures of heat treatments temperatures were, the more significant increases were observed in PM, while the $\rho_{12\%}$ decreased, regardless of the treatment atmosphere (single or oil bath) and wood species (*E. dunnii* or *E. grandis*). Regarding the mechanical properties, the Janka hardness suffered a significant reduction for both species, however the oil bath atmosphere presented some values significantly larger in comparison to the simple one, being that as the temperature of the treatments increased, it occurred an increase in hardness as well. As for the MOE, it did not present significant difference in relation to the other treatments in the same atmosphere, and between the atmospheres for the same temperature range, presenting varied values. The MOR showed a significant decrease in relation to the control treatment, however, it was observed that as the increase of the temperature ranges occurred, the MOR had an increase, being that the greater gain was in the temperature of 200 ° C (including for the wood of *E. grandis* in oily atmosphere, it presented higher value than control). These changes are possibly related to the degradation of the main chemical components of the wood, mainly the hemicelluloses, which have lower thermal stability and are degraded in lower temperature ranges than cellulose and lignin. As for the residue of soybean oil (gum), it presented satisfactory results, mainly regarding the physical properties evaluated, serving as a source of heat distribution inside the wood, increasing the treatment efficiency.

Keywords: bora; *Eucalyptus*; heat treatment; oil bath.

Lista de Figuras

Figura 1	Etapas de processamento do óleo de seja e obtenção da goma.....	24
Figura 2	Fluxograma esquemático com a sequência da metodológica desenvolvida na pesquisa, em que PM corresponde à perda de massa e $\rho_{12\%}$ à massa específica aparente ao teor de umidade de 12%.....	25
Figura 3	Corpos de prova de <i>Eucalyptus dunnii</i> (A) e <i>Eucalyptus grandis</i> (B).....	26
Figura 4	Forno industrial utilizado para o processo de termorreificação simples.....	28
Figura 5	Equipamento para o tratamento de termorreificação em banho de óleo.....	29
Figura 6	Corpos de prova de <i>Eucalyptus</i> após tratamento de termorreificação em ambiente oleoso.....	29
Figura 7	Aparatos utilizados para a realização do ensaio de dureza Janka.....	31
Figura 8	Máquina universal de ensaios equipada com aparato para realização do ensaio de flexão estática.....	32
Figura 9	Corpos de prova dos tratamentos controle e termorreificação das madeiras de <i>E. dunnii</i> (A) e <i>E. grandis</i> (B).....	33

Lista de Tabelas

Tabela 1	Caracterização dos tratamentos de termorreificação das espécies <i>E. dunnii</i> e <i>E. grandis</i>	27
Tabela 2	Resumo estatístico e valores médios de massa específica aparente ($\rho_{12\%}$) da madeira de <i>Eucalyptus dunnii</i> antes e após os tratamentos.....	33
Tabela 3	Resumo estatístico e valores médios de massa específica aparente ($\rho_{12\%}$) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> antes e após os tratamentos.....	34
Tabela 4	Resumo estatístico e valores médios de perda de massa da madeira de <i>Eucalyptus dunnii</i> antes e após os tratamentos.....	35
Tabela 5	Resumo estatístico e valores médios de perda de massa da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> antes e após os tratamentos.....	36
Tabela 6	Resumo estatístico e valores médios para dureza Janka da madeira de <i>Eucalyptus dunnii</i> antes e após os tratamentos.....	38
Tabela 7	Resumo estatístico e valores médios para dureza Janka da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> antes e após os tratamentos.....	39
Tabela 8	Resumo estatístico e valores médios para o módulo de elasticidade (MOE) das madeiras de <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> antes e após os tratamentos.....	40
Tabela 9	Resumo estatístico e valores médios para o módulo de ruptura (MOR) das madeiras de <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> antes e após os tratamentos.....	41

Lista de Siglas e Abreviaturas

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores;

DAP – Diâmetro à altura do peito;

PSF – Ponto de saturação das fibras;

ASTM – American Society for Testing and Materials;

CP – Corpo de prova;

U. R. – Umidade relativa;

Anova – Análise da variância;

HSD – Honestly Significant Difference (Diferença Honestamente Significante);

CV – Coeficiente de variação;

F – Teste estatístico para definir heterogeneidade entre e dentre tratamentos;

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

ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro;

***** – significativo em 5% de probabilidade de erro;

Lista de Símbolos

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

cm – Centímetro

m – Metro

g – Gramas

cm³ – Centímetros cúbicos

MOR – Módulo de elasticidade

MOE – Módulo de ruptura

h – Hora

$\rho_{12\%}$ – Massa específica aparente ao teor de umidade de 12%

$M_{12\%}$ – Massa do corpo de prova ao teor de umidade de 12%

$V_{12\%}$ – Volume do corpo de prova ao teor de umidade de 12%

PM – Perda de massa do corpo de prova

M_I – Massa inicial do corpo antes do tratamento térmico

M_F – Massa final do corpo de prova após o tratamento térmico

kN – Quilonewton

MPa – Megapascal

cm² – Centímetros quadrados

mm/min. – Milímetros por minuto

ρ_b – Massa específica básica

kgf/cm² – Quilograma força por centímetro quadrado

Sumário

1	Introdução	13
2	Objetivos.....	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	Revisão de Literatura	16
3.1	<i>Eucalyptus</i>	16
3.1.1	<i>Eucalyptus dunnii</i>	16
3.1.2	<i>Eucalyptus grandis</i>	17
3.2	Caracterização da madeira	18
3.3	Propriedades tecnológicas da madeira.....	19
3.3.1	Propriedades físicas	19
3.3.2	Propriedades mecânicas.....	20
3.4	Termorretificação	21
3.5	Termorretificação em ambiente oleoso/úmido/goma de soja.....	23
4	Metodologia.....	25
4.1	Seleção e obtenção do material	25
4.2	Tratamentos de termorretificação.....	26
4.2.1	Tratamento de termorretificação simples	27
4.2.2	Tratamento de termorretificação com banho de óleo	28
4.3	Caracterização de propriedades físicas	30
4.3.1	Massa específica aparente a 12%	30
4.3.2	Determinação da perda ou ganho de massa pós-tratamento térmico	30
4.4	Caracterização de propriedades mecânicas	31
4.4.1	Dureza Janka	31
4.4.2	Flexão estática	32
4.5	Análise estatística dos resultados.....	32
5	Resultados e Discussão	33
5.1	Influência dos tratamentos em propriedades físicas.....	33
5.2	Influência dos tratamentos em propriedades mecânicas	38
6	Conclusões	44
	Referências	45

Introdução

Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). Nos últimos cinco anos, o crescimento da área de eucalipto foi de 2,4% ao ano. O Mato Grosso do Sul tem liderado esta expansão, registrando aumento de 400 mil hectares neste período, com uma taxa média de crescimento de 13% ao ano (IBA, 2017).

O gênero *Eucalyptus* é bastante empregado nas empresas que trabalham com madeiras e indústrias do ramo de móveis. Esse gênero possui vantagens como boa adaptabilidade aos mais diversos ambientes com distintos climas e solos, como também alta capacidade produtiva, e principalmente grande quantidades de espécies, fornecendo madeira de boa qualidade para diversos ramos, tais como: móveis, painéis, lenha, carvão, postes, celulose, construções, embalagens, dentre outras (MENEZES, 2013).

Segundo Cademartori (2012), a madeira é um material de natureza anisotrópica e higroscópica que apresenta alta heterogeneidade em sua estrutura e também em seu comportamento se exposto a ambientes com diferentes condições climáticas. Da mesma forma, apresenta limitações comerciais e industriais quando utilizado de maneira incorreta.

Contudo, a qualidade desse material está diretamente relacionada às suas propriedades tecnológicas, sendo estas propriedades físicas, químicas, mecânicas, térmicas, elétricas e acústicas, os quais são importantes parâmetros para determinar a qualidade da madeira, e possibilitam entender o seu comportamento, fazendo assim um melhor uso da mesma (FIEDLER et al., 2009).

Com um apelo ambiental, a termoretificação da madeira é um tratamento que visa substituir o uso de produtos químicos e assim mesmo alterar positivamente as propriedades tecnológicas da madeira, baseando-se na exposição deste material ao calor, modificando sua estrutura química através da degradação de seus componentes básicos, principalmente as hemiceluloses e extrativos (CADEMARTORI, 2012). Visando a valorização da madeira de espécies cultivadas em larga escala e buscando a melhoria das suas propriedades físicas e mecânicas, a aplicação de temperatura se apresenta como uma alternativa viável.

O tratamento térmico da madeira pode ser realizado em ambiente seco ou úmido, e pode sofrer interferência desses ambientes nas propriedades da madeira. O tratamento térmico

normalmente é conduzido em temperaturas entre 180 e 260°C (HILL, 2006) ou 160 a 260°C (NEJAD et al., 2013)

A termorretificação é considerado um método de mudança em madeiras reflorestadas, fazendo com que fiquem com um maior valor agregado, resultando diferentes colorações as madeiras, que se assemelham à de espécies tropicais, que são madeiras de maiores valores econômico, que já estão praticamente extintas, além de melhorias em sua estabilidade dimensional. A retificação térmica deve ser empregada visando obter melhorias nas propriedades mecânicas da madeira.

Sendo assim com essas temperaturas altas há possibilidade de inserção de óleos vegetais no processo, pois o ponto de fulgor de muitos óleos está em faixas de calor bem mais elevadas e estes conseguem manter melhor o calor e aplica-lo mais uniformemente a madeira, quando comparado com o mesmo processo em outros tipos de meio de aquecimento, além de que a absorção deste óleo pode propiciar melhorias em algumas propriedades da madeira fazendo assim com que o tratamento seja ainda mais eficiente (CONTE, 2015). A realização de estudos utilizando temperaturas distintas aplicadas no tratamento térmico consegue-se uma mudança nas características das propriedades físico, mecânicas e colorimétricas, garantindo uma melhor qualidade das madeiras de *Eucalyptus*.

Devido à grande quantidade de soja produzida no país, buscando métodos inovadores e aproveitando um resíduo do processo de refino do óleo de soja, que é a goma de soja, utilizando esse subproduto, verificar se o tratamento de termorretificação em ambiente oleoso, melhora a qualidade da madeira através de alterações nas propriedades tecnológicas da madeira, sendo estas, propriedades físico-mecânicas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Comparar a influência que dois tratamentos de modificação térmica exercem em propriedades físicas e mecânicas das madeiras de *Eucalyptus dunnii* Maiden e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar dois tratamentos de modificação térmica em madeiras de duas espécies madeireiras de relevante interesse econômico, utilizando diferentes faixas de temperatura e atmosferas de tratamento;
- Avaliar o potencial de um resíduo do processamento do óleo da soja (goma) para aplicação na madeira durante processo de tratamento térmico, fornecendo ao resíduo uma possibilidade de uso alternativo;
- Comparar a eficácia dos dois tratamentos de modificação térmica;
- Caracterizar algumas propriedades físicas das madeiras tratadas;
- Caracterizar algumas propriedades mecânicas das madeiras tratadas;

3 Revisão de Literatura

3.1 *Eucalyptus*

A maioria das espécies do gênero *Eucalyptus* têm sua origem na Austrália, Tasmânia e ilhas da Oceania (LUTINSKY et al., 2006), sendo muito apreciadas no setor madeireiro nacional por apresentar diversas vantagens como fuste retilíneo, ótima capacidade silvicultural, rápido crescimento e capacidade produtiva, adaptabilidade a diversos ambientes de clima e solo, além de madeira de qualidade para diversos usos como: lenha, carvão, celulose, painéis, postes, construções, móveis, embalagens, dentre outras (SOUZA et al., 2007; BROCCO et al., 2012).

No Brasil, destacam-se os estudos com madeiras exóticas utilizadas em reflorestamentos, como as do gênero *Eucalyptus*, já que as mesmas são abundantes em plantios comerciais (DELUCIS et al., 2014). Segundo o IBA (2017), os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%).

3.1.1 *Eucalyptus dunnii*

O *Eucalyptus dunnii* Maiden ocorre naturalmente na Austrália, e devido a versatilidade de usos que sua madeira proporciona, bem como, apresentar bom desenvolvimento anual (aproximadamente 3cm em diâmetro e 3m de altura), é uma das espécies mais plantadas em climas temperados (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006), estando seu emprego na região sul atrelado principalmente ao seu desenvolvimento mesmo com geadas (ROCHA; TRUGILHO, 2006). Trata-se de uma espécie de rápido crescimento, a qual pode atingir até aproximadamente 50 metros de altura (30 á 35 de altura comercial ou fuste sem galhos) e 1,5 metros de altura ao diâmetro do peito – DAP (MCMAHON et al., 2010).

Calori; Kikuti (1997), analisando as propriedades físicas e mecânicas de *E. dunnii* recomendam tal madeira para situações que exigem resistências mecânicas como para fins estruturais, assoalhos, carrocerias e cabos de ferramentas. A madeira de *E. dunnii* pode ser utilizada na forma de madeira sólida para construção civil, móveis embalagens, postes e fins energéticos, de madeira processada para polpa de celulose, papel, carvão e painéis de madeira e laminados, uma vez que apresenta uma massa específica de $0,610\text{g/cm}^3$ (MCMAHON et al., 2010).

Já Paludzyszyn Filho et al. (2006) relataram que a madeira de *E. dunnii* por apresentar uma massa específica básica próxima a $0,500\text{g/cm}^3$ pode ser empregada na indústria de celulose, para energia e biomassa, além da possibilidade de utilização como estruturas leves. Entretanto, é caracterizada por apresentar uma retratibilidade elevada (PONCE, 1995), comprometendo seu uso para finalidades que necessitem de madeiras com significativa estabilidade dimensional. Tal fato foi observado por Batista et al. (2010), os quais observaram que clones de *E. dunnii* demonstraram maior instabilidade dimensional média frente os clones de *E. saligna* e *E. grandis*.

3.1.2 *Eucalyptus grandis*

A espécie *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden é nativa da Austrália, sendo amplamente empregada no Brasil por se adaptar satisfatoriamente aos diversos tipos de solos e climas, além de apresentar um elevado potencial produtivo e fornecer madeira de qualidade (ROCHA, 2000; BARREIROS et al., 2007; LIMA; GARCIA, 2011).

De acordo com Haselein et al. (2004), a madeira de *E. grandis* pode ser destinada aos mais diversificados usos em função de suas características tecnológica, dentre eles, a fabricação de móveis devido sua densidade, sendo que em seu estudo com madeiras de 27 anos, os autores encontraram uma massa específica básica de $0,460\text{g/cm}^3$.

Segundo Tomaselli (2000), por essa espécie apresentar uma massa específica considerada média, possui como característica uma boa trabalhabilidade e aceitação para a realização de acabamentos, o que proporciona sua utilização pela indústria moveleira. Além da fabricação de móveis, pode fornecer madeira serrada, empregada na construção civil e laminados (LIMA; GARCIA, 2011). Em estudos com clones de três espécies de *Eucalyptus*, Batista et al. (2010) observaram que o *E. grandis* apresentou a maior estabilidade dimensional frente o *E. dunnii* e *E. saligna*.

3.2 Caracterização da madeira

A madeira possui diversas características que a permitem ser utilizada em diversos setores: é esteticamente atraente, renovável, maleável, pode ser produzida com menos energia e poluição, em comparação com outros materiais como, por exemplo, o aço, concreto e plástico (WWF, 2012).

Por ser um material orgânico, composto pelos componentes químicos celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, a madeira apresenta variações na maioria de suas propriedades (SILVA et al., 2005). A proporção entre os componentes da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) depende da espécie vegetal e varia de camada para camada (CARVALHO et al., 2009).

Dentre os componentes químicos, o principal componente da parede celular de folhosas é a celulose, um polímero linear de grau de polimerização elevado, que pode ser comparado a um esqueleto que dá forma e estrutura à parede celular, representa 40 a 50% da estrutura da madeira (MILLER, 1999; FENGEL; WEGENER, 2003; HILL, 2006), sendo o responsável por grande parte das propriedades da madeira (MORAIS et al., 2005).

Já as hemiceluloses, também consideradas como polissacarídeos, são polímeros lineares ramificados com baixo grau de polimerização, compostas por um número de açúcares diferente da celulose, além de caracterizarem-se como amorfas e, por isso, menos estáveis. Além disso, a possível degradação das hemiceluloses faz com que a madeira se torne mais rígida e frágil. Melo (2013) destacou que esse componente químico é o mais hidrófilo na madeira. As espécies folhosas apresentam maior proporção de hemicelulose do que as espécies de coníferas (HILL, 2006).

A lignina constitui de 16 a 25% a estrutura da madeira de folhosas (MILLER, 1999). É um polímero fenólico altamente amorfo, de peso molecular indeterminado, formado por diversas unidades de fenilpropano (ROWELL et al., 2005), responsável por fornecer rigidez à parede celular e também resistência mecânica à madeira (SILVEIRA; MILAGRES, 2009).

Já os extrativos são moléculas pequenas, que podem exercer funções de defesa contra xilófagos, podendo ainda ser responsáveis pela cor e cheiro das madeiras (HILL, 2006). Esses metabólitos secundários são formados a partir de substâncias fenólicas, terpenos, gorduras, resinas, ceras (ROWELL et al., 2005).

Por se tratar de um material de natureza higroscópica e anisotrópica o qual apresenta alta heterogeneidade em sua estrutura (KLOCK et al., 2005), pode sofrer variações em suas

propriedades tecnológicas em função da composição química, limitando seu uso para uma determinada finalidade.

3.3 Propriedades tecnológicas da madeira

As variações nas propriedades tecnológicas da madeira podem ocorrer principalmente entre espécies, dentro da mesma espécie, em uma mesma árvore, no sentido axial e no sentido transversal (BODIG; JAYNE, 1982). Para uma boa utilização da madeira é necessário que se tenha conhecimento sobre as suas propriedades físico-mecânicas, visto que são importantes parâmetros para determinar a qualidade da madeira, e possibilitam uma recomendação adequada para sua utilização (FIEDLER et al., 2009).

3.3.1 Propriedades físicas

A higroscopicidade é a capacidade do material de estabelecer uma troca de umidade com o ambiente, sendo capaz de absorver ou perder água (BORGES; QUIRINO, 2004). Essa característica é explicada pela constituição química da madeira, constituída pelos extrativos, lignina, celulose e as hemiceluloses, sendo que essas últimas possuem maior capacidade de ganho e perda de umidade, por serem muito hidrofílicas.

A variação de umidade dentro das peças do material promove defeitos quando a peça atinge um teor de umidade inferior ao ponto de saturação das fibras - PSF (em torno de 25 a 30% de umidade). O teor de umidade da madeira pode interferir nos tratamentos, tais como curvamento, preservação, secagem, colagem, fabricação de compensados e aglomerados, produção de carvão vegetal, processamento mecânico, entre outros (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). O comportamento higroscópico é uma das características mais importantes no estudo do comportamento da madeira, influenciando nas propriedades físicas, propriedades mecânicas, na durabilidade natural, trabalhabilidade, acabamentos e produtos derivados (SILVA; OLIVEIRA, 2003).

Devido à sua natureza anisotrópica a madeira apresenta comportamentos diferentes de acordo com a direção em relação às fibras e aos anéis de crescimento, ocorrendo em porcentagens diferentes nas direções tangencial, radial e longitudinal (CALIL, 1999). A contração na direção tangencial é sempre maior que na direção radial, sendo que na direção

longitudinal ela é praticamente desprezível (SILVA; OLIVEIRA, 2003). A anisotropia da madeira é determinante para se estabelecer algumas de suas propriedades físicas como a estabilidade dimensional.

A retratibilidade resulta das variações do teor de umidade abaixo do PSF, que produzem variações dimensionais na madeira, pois esta só tem a estabilidade dimensional quando seu teor de umidade está acima do PSF. A contração e a expansão higroscópica da madeira são dois dos mais relevantes problemas práticos encontrados durante a sua utilização, como consequência da mudança do teor de umidade e também de alguns tipos de preservantes utilizados (OLIVEIRA; SILVA, 2003). A madeira por se tratar de um material anisotrópico, apresenta variações dimensionais diferentes em cada uma das suas três direções estruturais, sendo que comumente a variação na secção tangencial é aproximadamente duas vezes maior que na radial (PANSIN; DE ZEEUW, 1980).

A massa específica é um parâmetro de grande importância para a determinação da qualidade da madeira. Por ser de fácil determinação é uma das propriedades físicas mais estudadas e importantes da madeira, pois está relacionada diretamente com propriedades tecnológicas como, por exemplo, alteração dimensional, resistência mecânica e perda ou absorção de água, entre outras (TREVISAN et al., 2008; BATISTA et al., 2010).

3.3.2 Propriedades mecânicas

Conforme Colenci; Ballarin (2008), a dureza Janka representa a resistência que a madeira oferece à penetração de uma esfera de aço (com aproximadamente 1cm de diâmetro) até uma profundidade aproximada de 5,5mm, sendo afetada de maneira inversa pelo teor de umidade da madeira.

O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) são os parâmetros determinados por meio de ensaios de flexão estática da madeira. Tais são muito importantes na caracterização tecnológica da mesma, servindo como indicadores de resistência e deformação do material, qualificando ou não sua utilização para fins estruturais (SCANAVACA JUNIOR; GARCIA, 2004; OLIVEIRA et al., 2005). Os seus valores expressam uma série de fatores, como, morfologia, estrutura anatômica e química da madeira, teor de umidade entre outros (LIMA et al., 2000).

A elasticidade é uma propriedade que os materiais apresentam, em maior ou menor grau, de se deformarem dentro de certos limites, por efeito de uma ação exterior de flexão e

recuperarem a sua forma ou dimensões iniciais quando essa ação exterior cessa. O parâmetro mais usual para representar a elasticidade é o módulo de elasticidade (MOE), permitindo realizar os cálculos que definem a forma e as dimensões das peças para satisfazer pré determinadas condições de utilização (SANTOS, 2007).

O MOE é obtido com a aplicação de uma carga com velocidade constante, sendo seu valor o limite em que a madeira volta ao seu estado normal quando a carga é retirada, sem que haja qualquer deformação permanente. O MOR é o valor a partir do ponto em que, após ser submetida a um valor extremo de carga, a madeira deforma e não volta ao seu estado original (RIBEIRO, 2009).

A resistência de uma peça de madeira submetida à flexão é expressa em termos de esforços por unidade de área, através do MOR, representando o máximo esforço que é aplicado sobre as fibras nos extremos superior e inferior da seção transversal da peça (MATOS, 1997). Tanto as propriedades de elasticidade quanto as de resistência diferem de acordo com a direção das fibras em relação à direção de aplicação da força na madeira, devido ao seu caráter anisotrópico. A alteração dimensional resultante da atuação de esforços é chamada de deformação, e a relação entre esforço e deformação é proporcional dentro do chamado regime elástico; ou esta relação perde esta proporcionalidade, dentro do chamado regime plástico.

Entretanto, de maneira geral, algumas espécies madeireiras apresentam características indesejáveis, as quais comprometem sua utilização, como alta higroscopicidade, anisotropia e susceptibilidade de degradação biológica, necessitando assim da implementação de técnicas que visem a melhora ou conservação de suas propriedades. Nesse contexto, insere-se o procedimento de termorreificação da madeira, o qual é capaz de melhorar a estabilidade dimensional e aumentar a durabilidade biológica (MOURA et al., 2012).

3.4 Termorreificação

A termorreificação surgiu como alternativa de tratamento para a valorização da madeira de espécies cultivadas em larga escala, buscando a melhoria das suas propriedades físicas e mecânicas. O processo de termorreificação, conhecido também como retificação ou modificação térmica é um tratamento de baixo impacto ambiental, que não utiliza produtos químicos e altera positivamente as propriedades tecnológicas da madeira, através da exposição deste material a temperaturas altas, modificando a sua estrutura química por meio

da degradação de seus componentes básicos, principalmente as hemiceluloses e extrativos (CADEMARTORI, 2012).

A taxa de degradação térmica é diferente para os diferentes constituintes da madeira: é mais alta para hemicelulose, muito menor para celulose e menor para lignina (SANDBERG et al., 2012) O conteúdo de polissacarídeos diminui quando exposto a altas temperaturas (acima de 100°C) devido a sua maior quantidade reatividade sensível em comparação com a celulose.

Como principais vantagens desse tratamento, o tratamento térmico influencia significativamente as propriedades da madeira, como por exemplo, apresentando aumento da estabilidade dimensional (ALMEIDA et al., 2009; PRIADI; HIZIROGLU, 2013), alterações nas características estéticas da madeira (alterações na cor da madeira) (PINCELLI et al., 2012; TUONG; LI, 2010), redução da higroscopicidade (HILL, 2006; AYDEMIR et al., 2011), e aumento da resistência biológica (CALONEGO et al., 2012; DUBEY et al., 2012).

Os principais nichos de mercado para madeira termorretificada compreendem a produção de portas e janelas, produtos para jardim, uso como revestimentos e pisos, móveis de cozinha tetos, além de produtos especiais como composição de banheiros e saunas (MILITZ, 2002).

Normalmente, os tratamentos térmicos são realizados com temperaturas altas entre 180 e 260°C (HILL, 2006) ou 160 a 260°C (NEJAD et al., 2013), abaixo de 140°C, as modificações ocorridas são irrelevantes e, acima de 260°C passam a comprometer a integridade das amostras, quando se inicia a combustão espontânea da madeira. O tratamento térmico da madeira acima de 300°C causa grave degradação do material de madeira (HILL, 2006). O efeito do tratamento de retificação térmica não depende somente das temperaturas elevadas, depende de outros fatores como o método de modificação térmica, das espécies de madeira e suas propriedades características, teor de umidade da madeira, meio de aquecimento e tempo de exposição (KAMDEM et al., 2002; HILL, 2006).

O processo de tratamento térmico é, na maioria dos casos, realizado no vácuo, no ar ou com um gás inerte, como nitrogênio. A realização de estudos utilizando temperaturas distintas aplicadas no tratamento térmico consegue-se uma mudança nas características das propriedades físico, mecânicas, garantindo uma melhor qualidade das madeiras de *Eucalyptus*. O resultado seria a obtenção de um produto sólido apresentando características diferenciadas, comparativamente à sua madeira original (BRITO et al., 2008).

Conforme Wang; Cooper (2003) e Esteves; Pereira (2009), o óleo também pode ser usado no processo de termorretificação, sendo que esse método consiste na imersão de peças

de madeira em óleo quente, principalmente de origem vegetal (óleo de semente de colza, de girassol ou de linhaça).

3.5 Termorreificação em ambiente oleoso com goma de soja

As principais modificações durante a termorreificação ocorrem na faixa entre 180 e 260°C (HILL, 2006) e 160 a 260°C (NEJAD et al., 2013), sendo assim pode-se inserir óleos vegetais como atmosfera do tratamento, pois o ponto de fulgor de muitos óleos está em faixas de calor bem mais elevadas e estes conseguem manter melhor o calor e aplica-lo mais uniformemente a madeira, quando comparado com o mesmo processo em atmosfera simples e outras, além de que a absorção deste óleo pode acarretar em melhorias em algumas propriedades da madeira fazendo assim com que o tratamento seja ainda mais efetivo (MILITZ, 2002; CONTE, 2015)

O óleo de soja refinado é obtido de grãos de soja (*Glycina max*). A sua utilização na culinária apresenta diversas vantagens, como: conteúdo alto de ácidos graxos essenciais; geração de cristais grandes, que são facilmente filtráveis quando o óleo é hidrogenado e fracionado; índice alto de iodo, que permite a sua hidrogenação produzindo grande variedade de gorduras plásticas, e refino com baixas perdas, estas vantagens fazem com que ele seja o óleo vegetal mais comercializado e de menor preço do mercado (POUZET, 1996).

A goma de soja é obtida através do processamento do óleo de soja, com o processo químico da gomagem, relativo ao início do processo de refinamento do óleo, através da centrifugação, ela é precipitada e removida. Os fosfatídeos hidratáveis e as gomas são reconhecidos como agentes emulsionantes, conhecidos também como lecitina. Esse resíduo é utilizado na indústria química. Os produtos removidos por centrifugação são o óleo de soja degomado e a goma de soja (AKECHI, 2015).

O processamento da soja resulta em uma grande variedade de produtos, entre eles temos o óleo que é destinado para alimentação animal, humana, ou produção de biocombustíveis, e o farelo de soja, que é a parte sólida do processo e é utilizada como principal fonte proteica de aves e suínos nas formulações de rações. O refino do óleo para consumo humano resulta numa série de outros subprodutos que necessitam de um destino ecologicamente viável. Um destes compostos obtidos durante o refino do óleo bruto para óleo degomado é a goma de soja, obtida através da centrifugação do óleo bruto após este ser

hidratado (MANDARINO; ROESSING, 2001). A figura 1 apresenta uma representação esquemática da obtenção da goma.

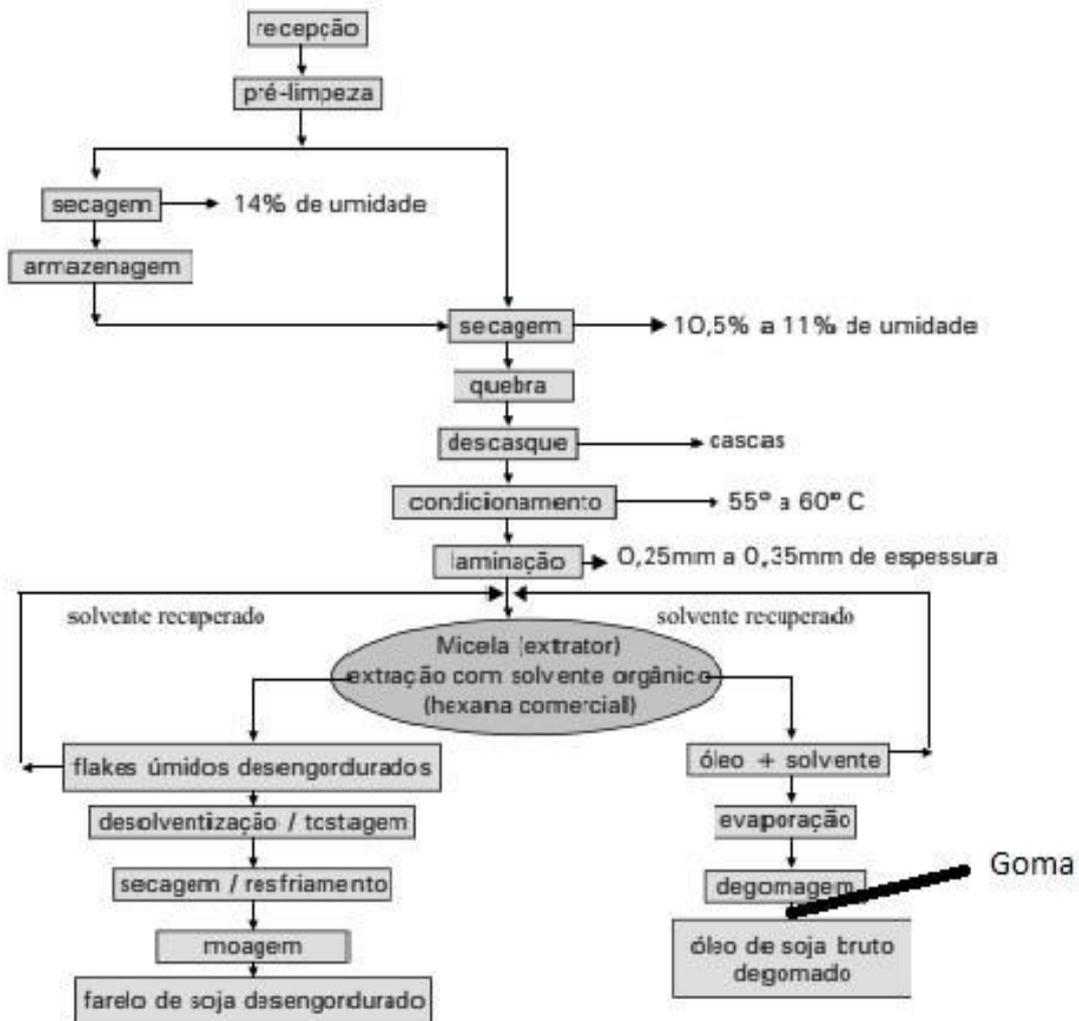


Figura 1 – Etapas de processamento do óleo de soja e obtenção da goma.
Fonte: Adaptado de MANDARINO; ROESSING (2001).

A utilização deste óleo vegetal ou da goma residual é excelente, ambientalmente, pois é proveniente de matéria prima renovável e segundo Neto et al. (2000) é de fácil descarte, tendo em vista que após saturado, este óleo pode ser transformado em diversos outros produtos, como: massa de vidraceiro, ração animal e sabão.

4 Metodologia

Na figura 2 é possível observar o fluxograma com as etapas contempladas, visando o desenvolvimento desta pesquisa.

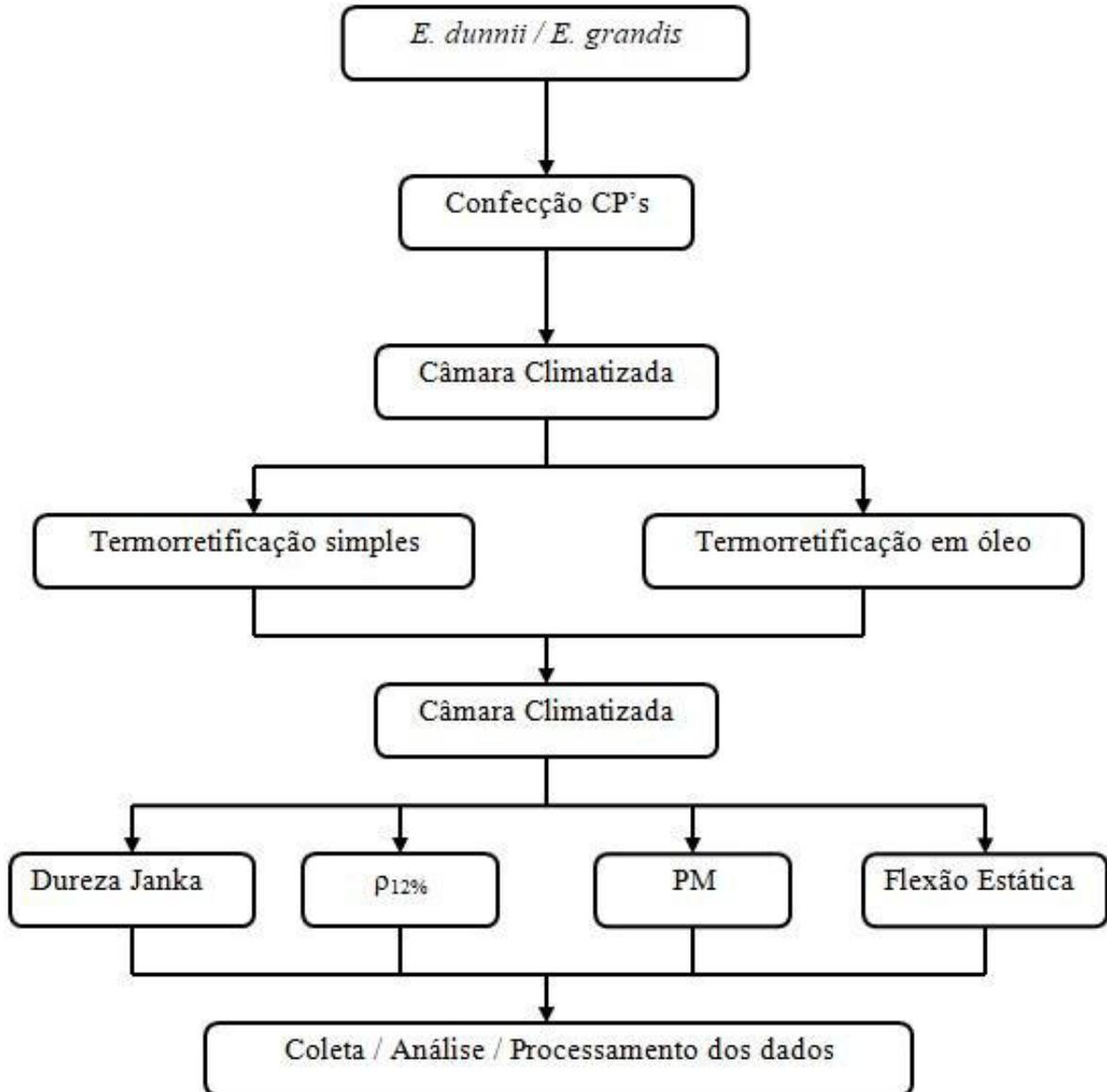


Figura 2 – Fluxograma esquemático com a sequência da metodologia desenvolvida na pesquisa, em que PM corresponde à perda de massa e $\rho_{12\%}$ à massa específica aparente ao teor de umidade de 12%.
Fonte: O Autor (2018).

4.1 Seleção e obtenção do material

O material para o estudo foi fornecido pela indústria CMPC - Celulose Riograndense, localizada em Guaíba, outra parte do material e as análises foram realizadas no Laboratório de

Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira, do curso de Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Federal de Pelotas e no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPMec – FURG, sendo as espécies utilizadas *Eucalyptus dunnii*, e *Eucalyptus grandis*, com idade de 22 anos. A goma de soja utilizada para o trabalho foi fornecida pela Irgovel Indústria Riograndense De Óleos Vegetais Ltda.

Depois de selecionadas as espécies madeireiras, o material foi amostrado conforme a normatização American Society for Testing and Materials – ASTM D 5536 (1995), sendo estes livres de quaisquer defeitos como rachaduras, nós, empenos, ou danificados por agentes biodegradadores.

Posteriormente, foram confeccionados os corpos de prova (CP): 2,0 x 2,0 x 33,0 cm (radial x tangencial x longitudinal), sendo feitas 36 amostras para cada espécie, totalizando 72 amostras por ensaio, para a determinação de propriedades físicas e mecânicas (Figura 3).

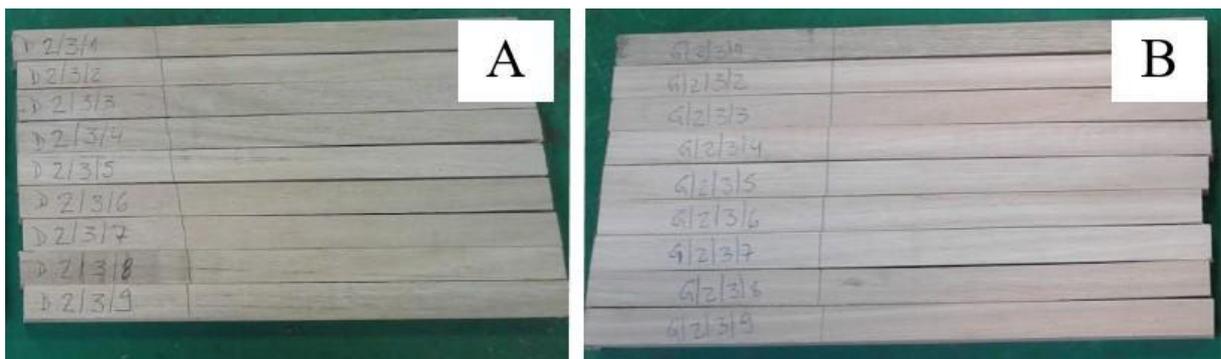


Figura 3 – Corpos de prova de *Eucalyptus dunnii* (A) e *Eucalyptus grandis* (B).
Fonte: O Autor (2018).

Depois de dimensionados, esses corpos de prova ficaram acondicionados em câmara climatizada (temperatura de 20°C e 65% de umidade) até que atingiram massa constante em um teor de umidade de equilíbrio de 12%.

4.2 Tratamentos de termorretificação

Os tratamentos foram definidos em função da espécie (*E. dunnii* e *E. grandis*), temperatura (160°C, 180°C, 200°C) e do tempo (2 h) de exposição das amostras no processo de termorretificação em óleo de soja, além dos tratamentos controle, totalizando 14 tratamentos (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização dos tratamentos de termorretificação das espécies *E. dunnii* e *E. grandis*.

<i>Eucalyptus grandis</i>		
Tratamento	Temperatura (°C)	Nomenclatura
Controle	-	EG _{Contr.}
Termorretificação	160	EG _{T160°C}
	180	EG _{T180°C}
	200	EG _{T200°C}
Termorretificação em ambiente oleoso	160	EG _{O160°C}
	180	EG _{O180°C}
	200	EG _{O200°C}
<i>Eucalyptus dunnii</i>		
Tratamento	Temperatura (°C)	Nomenclatura
Controle	-	ED _{Contr.}
Termorretificação	160	ED _{T160°C}
	180	ED _{T180°C}
	200	ED _{T200°C}
Termorretificação em ambiente oleoso	160	ED _{O160°C}
	180	ED _{O180°C}
	200	ED _{O200°C}

Posterior a cada tratamento, os corpos de prova foram dispostos novamente na câmara climatizada (condições citadas anteriormente), permitindo após novamente estabilizadas a realização dos ensaios das propriedades físicas e das propriedades mecânicas. Vale ressaltar que os corpos de prova do tratamento controle permaneceram na câmara climatizada desde o momento de confecção dos mesmos até a realização dos ensaios de caracterização.

4.2.1 Tratamento de termorretificação simples

A modificação térmica foi realizada após os espécimes terem sido colocados em uma câmara climática (20°C e 65% U.R.) para estabilizar o teor de umidade a 12%. Ocorrida a estabilização (verificada por meio da massa constante), os corpos de prova foram modificados termicamente em um forno elétrico industrial (Figura 4) modelo Linn Elektro Therm (Typ KK 260.16 60.1060), instalado junto ao laboratório do Programa de Pós-graduação em

Engenharia Mecânica- PPMec – FURG, este possui controlador lógico programável, e pré-testes demonstraram que ele satisfaz as exigências para o processo de termorretificação.

O tempo de tratamento foi fixado em 2 horas, tempo este mensurado a partir do ponto em que a temperatura atinge o valor previamente programado, ou seja, 160°C, 180°C e 200°C, a retirada do material já termorretificado foi feita no momento em que o forno estava com temperatura de 100°C.



Figura 4 – Forno industrial utilizado para o processo de termorretificação simples.
Fonte: Autor (2018)

4.2.2 Tratamento de termorretificação com banho de óleo

O processo de termorretificação em ambiente oleoso foi executado com auxílio de um equipamento de banho de óleo (Figura 5), sendo o óleo proveniente da goma da soja. O equipamento possui capacidade de 16 litros, com sensor de temperatura tipo “J” encapsulado em aço inox e sua faixa de trabalho está entre 50°C a 300°C, com precisão do sistema de $\pm 0,6^\circ\text{C}$. Para proporcionar a homogeneização do fluido, este possui um tanque em inox sem soldas e com cantos arredondados, além de um motor elétrico com eixo rotativo visando à circulação e homogeneização da temperatura do óleo entre as peças de madeira.



Figura 5 – Equipamento para o tratamento de termorreificação em banho de óleo.
Fonte: Autor (2018)

Optou-se pela não reutilização do óleo em tratamentos posteriores, visando evitar influências das possíveis alterações físicas ocorridas no óleo após a aplicação da temperatura e conseqüentemente no tempo de exposição, podendo este fator ser influente na penetração do fluido na madeira.

Os corpos de prova tratados termicamente em banho de óleo (Figura 6) foram colocados no óleo a uma temperatura inicial de aproximadamente 100C° e a rampa de aquecimento foi desconsiderada, sendo que o tempo de duas horas de exposição foi considerado a partir do momento em que a temperatura de exposição determinada fosse alcançada.



Figura 6 – Corpos de prova de *Eucalyptus* após tratamento de termorreificação em ambiente oleoso.
Fonte : O Autor (2018).

Após o tempo de exposição, desligou-se o banho de óleo e retirou-se os corpos de prova. Em seguida foram transferidos para um “estrado” onde permaneceram em temperatura ambiente, para que o excesso de óleo saísse da peça e a mesma atingisse a temperatura ambiente.

4.3 Caracterização de propriedades físicas

4.3.1 Massa específica aparente a 12%

A massa específica aparente ao teor de umidade de 12% ($\rho_{12\%}$) foi determinada por meio da norma ASTM D 143 – 93 (ASTM, 2000), com auxílio de um paquímetro digital (com resolução de 0,01mm) e balança analítica (com resolução de 0,001g), os quais permitiriam a determinação das dimensões e massa dos corpos de prova, respectivamente, e por meio da Equação 1.

$$\rho_{12\%} = \frac{M_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (1)$$

Em que: $\rho_{12\%}$ = massa específica aparente ao teor de umidade de 12% (g/cm³); $M_{12\%}$ – massa do corpo de prova ao teor de umidade de 12% (g); $V_{12\%}$ – volume do corpo de prova ao teor de umidade de 12% (cm³).

4.3.2 Determinação da perda ou ganho de massa pós tratamento térmico

A determinação da perda de massa deu-se na totalidade dos corpos de prova a partir da variação entre os valores de massa antes e após os tratamentos de retificação térmica, expresso em porcentagem, conforme a Equação 2.

$$PM = \left(\frac{M_I - M_F}{M_I} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que: PM – perda de massa (%); MI – massa dos corpos de prova antes dos tratamentos de termorreificação (g); MF – massa dos corpos de prova após tratamentos de termorreificação (g).

4.4 Caracterização de propriedades mecânicas

Utilizando uma máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade de carga de 300kN, realizaram-se os ensaios mecânicos de flexão estática e dureza Janka. Para ambos os ensaios, adaptou-se a metodologia proposta normatização da ASTM D143-94 (2014).

4.4.1 Dureza Janka

Determinou-se a dureza Janka no plano anatômico tangencial dos corpos de prova por meio da avaliação do esforço, em MPa, necessário para introduzir na madeira, à uma profundidade da metade dos seu diâmetro, uma semiesfera de aço com 1,13 cm² de secção diametral, conforme visualizado na figura 7.



Figura 7 – Aparatos utilizados para a realização do ensaio de dureza Janka.
Fonte: Autor (2018)

4.4.2 Flexão estática

Desenvolveu-se o ensaio de flexão estática (Figura 8) com uma velocidade de ensaio de 1,3mm/min., utilizando-se um vão de 28 centímetros (14 vezes a dimensão no plano radial) e célula de carga de 3 toneladas. Por meio da realização desse ensaio, obteve-se o módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR), e o gráfico tensão x deformação, sendo essas informações obtidas diretamente do software do equipamento (TESC).

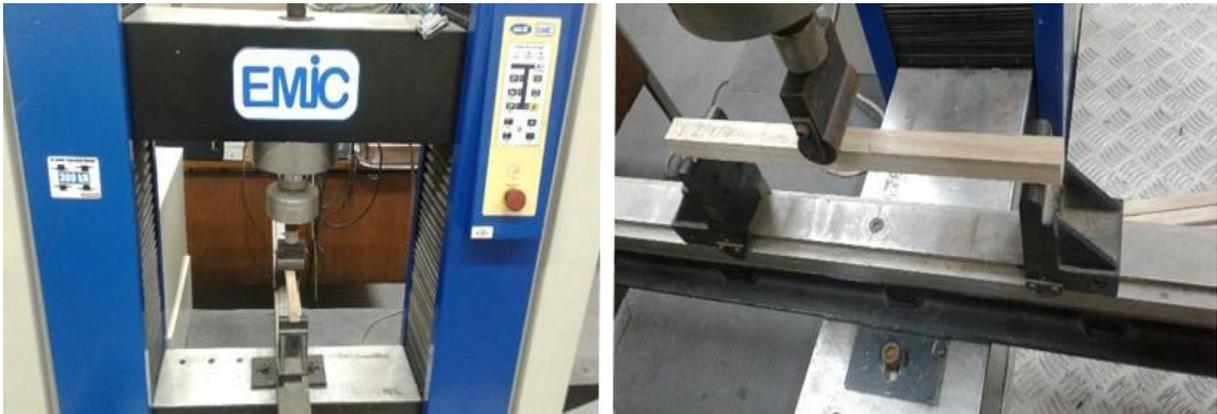


Figura 8 – Máquina universal de ensaios equipada com aparato para realização do ensaio de flexão estática.
Fonte: Autor (2018)

4.5 Análise estatística dos resultados

Realizaram-se todas as análises as quais os dados foram submetidos com o software Statgraphics Centurion XV. Após coletados e agrupados por tratamento, submeteram-se os dados à análise da variância (ANOVA) simples, visando verificar diferenças significativas entre as diferentes temperaturas de uma mesma atmosfera de tratamento e na mesma temperatura entre diferentes atmosferas, considerando 5% de probabilidade de erro. Por meio do teste *Honest Significant Difference* (HSD) de Tukey (5% de probabilidade de erro), efetuou-se a comparação das médias dos diferentes tratamentos.

5 Resultados e Discussão

5.1 Influência dos tratamentos em propriedades físicas

Percebe-se que os tratamentos acarretaram mudanças na aparência das madeiras após a realização dos tratamentos de termorretificação simples e em ambiente oleoso (Figura 9).

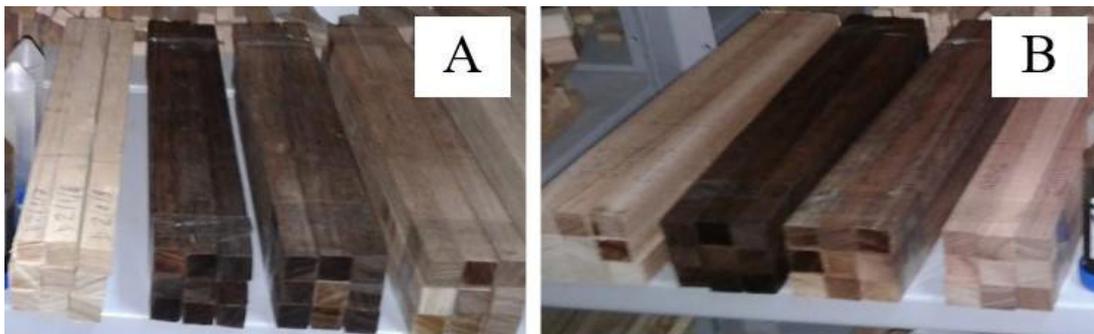


Figura 9 – Corpos de prova dos tratamentos controle e termorretificação das madeiras de *E. dunnii* (A) e *E. grandis* (B).

Fonte: O Autor (2018).

Nota-se que em ambas as atmosferas de retificação térmica ocorreram decréscimos significativos (em 5% de probabilidade de erro) na massa específica aparente a 12% de umidade ($\rho_{12\%}$), conforme se aumentava a temperatura para a madeira de *Eucalyptus dunnii* (Tabela 2).

Tabela 2 – Resumo estatístico e valores médios de massa específica aparente ($\rho_{12\%}$) da madeira de *Eucalyptus dunnii* antes e após os tratamentos.

Tratamento	$\rho_{12\%}$ (g/cm ³)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	0,869 ^(0,007) A	0,869 ^(0,007) A	-	-
160°C	0,793 ^(0,011) B a	0,809 ^(0,027) B a	2,78	2,03 ns
180°C	0,769 ^(0,042) B a	0,747 ^(0,024) C a	4,65	1,96 ns
200°C	0,712 ^(0,035) C a	0,721 ^(0,007) C a	3,74	0,42 ns
CV (%)	8,13	7,59		
F	36,35 *	81,25 *		

Em que: Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Na atmosfera em que somente efetuou-se procedimento de termorretificação, obtiveram-se decréscimos de $\rho_{12\%}$ de 8,75%, 11,51% e 18,07% para os tratamentos ED $T_{160^{\circ}\text{C}}$, ED $T_{180^{\circ}\text{C}}$ e ED $T_{200^{\circ}\text{C}}$, respectivamente. Na termorretificação em ambiente oleoso, percebeu-se a mesma tendência de decréscimo em relação ao tratamento controle (ED_{TC}Contr.): 6,90% (ED $O_{160^{\circ}\text{C}}$), 14,04% (ED $O_{180^{\circ}\text{C}}$) e 17,03% (ED $O_{200^{\circ}\text{C}}$). Observando individualmente os tratamentos, e considerando diferentes atmosferas, nota-se a ausência de diferenças significativas para todos os tratamentos.

Para a madeira de *E. dunnii*, Paludzyszyn Filho et al. (2006) e Batista et al. (2010) determinaram valores de massa específica básica (ρ_b) de 0,500g/cm³ e 0,560g/cm³, respectivamente, ambas inferiores ao presente estudo, enquanto Iwakiri et al. (2008) encontraram uma $\rho_{12\%}$ de 0,680g/cm³ para uma madeira com idade de 15 anos.

Entretanto, é relevante ressaltar que a superioridade da $\rho_{12\%}$ frente ρ_b possivelmente está associada às condições em que são determinadas essas propriedades, pois, enquanto a $\rho_{12\%}$ possui a sua massa e volume determinadas à 12% de umidade, a ρ_b é obtida à partir da razão entre a massa seca em estufa (103±2°C) e o volume saturado.

Quanto á madeira de *Eucalyptus grandis*, nota-se a inexistência de diferenças significativas da $\rho_{12\%}$ em função do aumento da temperatura, em 5% de probabilidade de erro (Tabela 3).

Tabela 3 – Resumo estatístico e valores médios de massa específica aparente ($\rho_{12\%}$) da madeira de *Eucalyptus grandis* antes e após os tratamentos.

Tratamento	$\rho_{12\%}$ (g/cm ³)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	0,688 ^(0,121) A -	0,688 ^(0,121) A -	-	-
160°C	0,580 ^(0,055) A b	0,671 ^(0,084) AB a	13,35	6,01 *
180°C	0,647 ^(0,111) A a	0,587 ^(0,077) AB a	15,89	1,62 ns
200°C	0,658 ^(0,105) A a	0,566 ^(0,083) B a	16,90	4,22 ns
CV (%)	16,32	16,5		
F	1,47 ns	3,67 *		

Em que: Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Perceberam-se reduções significativas nessa propriedade para as médias dos tratamentos submetidos à termorretificação em óleo: EG_{O160°C} (2,47%), o EG_{O180°C} (14,68%) e o EG_{O200°C} (17,73%), todos comparados com o controle. Comparando as atmosferas, a termorretificação em óleo acarretou acréscimo significativo em relação à termorretificação (15,69%), na faixa de temperatura de 160°C.

Para a madeira de *E. grandis* com 17 anos de idade, Gonzalez et al. (2006) obtiveram uma ρ_b de 0,590g/cm³, semelhante à média determinada por Serpa et al. (2003), analisando a madeira dessa espécie com aproximadamente 50 anos de idade. Já Iwakiri et al. (2008) e Eleotério et al. (2014) determinaram para o *E. grandis* com 14 e 18 anos de idade, $\rho_{12\%}$ de 0,502g/cm³ e 0,600g/cm³, respectivamente, ambas inferiores ao presente estudo.

Conforme a classificação proposta por Carvalho (1996), o *E. dunnii* enquadra-se na classe de madeira pesada (0890g/cm³ – 0,950g/cm³), enquanto o *E. grandis* insere-se como moderadamente pesada (0,650g/cm³ – 0,790g/cm³), de acordo com a $\rho_{12\%}$ obtidas.

Analisando a perda de massa (PM) para a espécie *E. dunnii*, visualiza-se que quanto mais agressivo o tratamento térmico, mais significativas eram as perdas de massa, independente das atmosferas de tratamento, as quais apresentaram diferenças significativas quando comparadas entre si (Tabela 4), em 5% de probabilidade de erro. Nos tratamentos que sofreram somente termorretificação, a maior variação foi observada entre as faixas de temperatura de 160°C e 180°C (127,98%), sendo tal fato notado nas referidas faixas de temperatura nos tratamentos de retificação térmica em ambiente oleoso (296,33%).

Tabela 4 – Resumo estatístico e valores médios de perda de massa da madeira de *Eucalyptus dunnii* antes e após os tratamentos.

Tratamento	PM (%)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
160°C	5,36 ^(0,39) A b	2,45 ^(1,67) A a	60,24	12,68 *
180°C	12,22 ^(0,74) B a	9,71 ^(0,89) B b	14,05	23,96 *
200°C	16,59 ^(0,27) C b	13,60 ^(0,45) C a	9,63	22,18 *
CV (%)	40,72	57,42		
F	952,38 *	209,18 *		

Em que: Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Entre diferentes atmosferas, e mesma faixa de temperatura, nota-se a existência de reduções significativas na PM dos tratamentos em ambiente oleoso em relação àqueles submetidos somente à retificação térmica.

No que tange a PM para a espécie *E. grandis* (Tabela 5), o comportamento foi semelhante ao obtido para o *E. dunnii*. O tratamento EG T160°C teve uma PM aproximadamente três vezes inferior em relação ao EG T180°C, que por sua vez, apresentou PM duas vezes menor quando comparado com o EG T200°C. Percebe-se que na atmosfera em ambiente oleoso os tratamentos mostraram comportamento semelhante aqueles submetidos à termorretificação simples, possuindo aumento significativo e progressivo da PM conforme o aumento da temperatura.

Tabela 5 – Resumo estatístico e valores médios de perda de massa da madeira de *Eucalyptus grandis* antes e após os tratamentos.

Tratamento	PM (%)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
160°C	1,11 ^(0,28) A b	- 0,69 ^(0,62) A a **	316,32	61,04 *
180°C	3,53 ^(0,24) B b	0,70 ^(1,90) AB a	97,85	17,31 *
200°C	7,35 ^(0,41) C b	2,67 ^(1,92) B a	57,04	45,33 *
CV (%)	68,15	207,54		
F	816,16 *	8,31 *		

Em que: ** – sinal negativo (-) corresponde ao ganho de massa; Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Verifica-se que os tratamentos com óleo acarretaram reduções significativas na PM quando comparados aos tratamentos sob atmosfera de termorretificação simples. Submetendo a espécie *E. grandis* à processo de termorretificação por 2 horas, Moura et al. (2012) obtiveram PM de 4,03% e 5,40% nas temperaturas de 160°C e 180°C, respectivamente. Já Cademartori et al. (2012) determinaram PM de 12,74% e 14,89% para madeira de *E. grandis* (17 anos) termorretificada por um período de 4 horas.

Estudos que abordem a influência da termorretificação em atmosfera oleosa na perda ou ganho de massa ainda são escassos, limitando a busca por referencial literário visando à comparação dos resultados obtidos no presente estudo.

O decréscimo na $\rho_{12\%}$ em função do aumento da temperatura pode estar relacionado com o fato de o calor reduzir a massa da madeira em uma proporção superior ao volume, enquanto o aumento dessa propriedade apresenta uma relação inversa, ou seja, a medida que o calor aumenta, a massa é menos afetada que o volume (BRITO et al., 2006).

Nos tratamentos de termorretificação em ambiente oleoso, devido ao óleo conduzir de maneira mais homogênea o calor no interior da madeira (MOHEBBY et al., 2014), ele pode contribuir com a degradação dos componentes químicos, acarretando na redução da massa em função do aumento da temperatura.

Em geral, madeiras com maior massa específica, possuem um melhor fluxo de calor no seu interior (menos porosidade e ar), sendo que em contrapartida, permitem um fluxo reduzido de fluidos em seu interior, quando comparadas àquelas com massa específica inferior. Cabe destacar a existência de propriedades inerentes que interferem diretamente na impregnação de fluidos no interior da madeira, como o cerne e o alburno.

Assim como visto no comportamento da $\rho_{12\%}$, a maior PM conforme o aumento de temperatura deve-se provavelmente a degradação dos componentes da madeira. Acima de 100° , tem-se a perda de umidade da madeira e volatilização de compostos de baixo peso molecular e início de degradação das hemiceluloses (KRAUSS et al., 2016; ESTEVES; PEREIRA, 2009), as quais são caracterizadas por apresentar menor estabilidade térmica (ALFREDSSEN et al., 2012) frente aos demais componentes primários (celulose e lignina). Nas faixas de temperatura que compreenderam os tratamentos de termorretificação (160 a 200°C), a degradação da hemicelulose é ainda mais intensa, ocorrendo também à despolimerização da celulose e conversão química da lignina (MODES et al., 2017).

Quanto a PM dos tratamentos efetuados em atmosfera oleosa, como visto anteriormente, o óleo funciona como um distribuidor homogêneo de calor no interior da madeira, à medida em que ocorre a degradação da celulose e das hemiceluloses principalmente, o óleo possivelmente fica retido no interior da madeira, ocasionando a variação da massa.

Logo, a menor perda de massa dos tratamentos com óleo pode estar relacionada com a deposição do mesmo no interior da madeira, o que acabaria acarretando um aumento na massa após o tratamento com o óleo. Entretanto, existem outros fatores que limitam a impregnação e o fluxo de fluidos no interior da madeira, e que podem apresentar interferência na $\rho_{12\%}$ e PM, tais como: a porosidade, a estrutura anatômica, a viscosidade do fluido, o cerne e alburno, dentre outras.

5.2 Influência dos tratamentos em propriedades mecânicas

Em relação à dureza Janka da espécie *E. dunnii* (Tabela 6), ambos os tratamentos nas duas atmosferas causaram decréscimos significativos quando comparados ao grupo controle, enquanto que à comparação entre as duas atmosferas apresentam diferenças estatísticas em duas faixas de temperatura (160°C e 200°C), em 5% de probabilidade de erro. Mesmo que em ambas as atmosferas (termorretificação e termorretificação em ambiente oleoso) tenha se observado decréscimo das amostras tratadas, percebe-se relação direta entre a temperatura e a dureza em todos os tratamentos, devido ao aumento desta propriedade.

Tabela 6 – Resumo estatístico e valores médios para dureza Janka da madeira de *Eucalyptus dunnii* antes e após os tratamentos.

Tratamento	Tensão Máxima (MPa)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	50,93 ^(5,37) A a	48,92 ^(3,38) A a	9,29	1,49 ns
160°C	12,98 ^(2,17) C b	15,27 ^(2,37) D a	16,11	11,25 *
180°C	15,97 ^(3,29) C a	17,88 ^(3,23) C a	19,83	3,07 ns
200°C	24,42 ^(8,47) B b	29,89 ^(2,36) B a	25,1	6,58 *
CV (%)	61,19	48,60		
F	184,76 *	430,28 *		

Em que: Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Comparando as duas atmosferas de tratamento, notou-se aumento de dureza nas temperaturas de 160°C (17,64%) e 180°C (22,40%). Analisando a espécie *E. dunnii*, Gallio et al. (2017) observaram uma dureza Janka de aproximadamente 53,44 MPa para a madeira com a mesma idade da empregada neste estudo. Já Caixeta et al. (2003), estudando 44 clones de diversos gêneros de *Eucalyptus*, com idade variando de 13 à 17 anos e $\rho_{12\%}$ média de 0,707g/cm³ (semelhante à do presente estudo), obtiveram uma dureza média 81,79 MPa.

A espécie *E. grandis* apresentou perfil de variação de dureza Janka (Tabela 7) semelhante ao do *E. dunnii*, aonde todos os tratamentos, independente da atmosfera, ocasionaram reduções significativas dessa propriedade mecânica em 5% de probabilidade de erro.

As maiores reduções em comparação ao tratamento controle foram observadas nos tratamentos EG_{T160°C} e EG_{O160°C}, com aproximadamente 51,75% e 50,11%, respectivamente. O tratamento de termorretificação em ambiente oleoso a 180°C (EG_{O180°C}) foi o único que apresentou acréscimo significativo na dureza Janka (18,35%), quando comparado aos tratamentos em que somente efetuou-se processo de termorretificação. Já para a madeira de *E. grandis* com 17 anos de idade, González et al. (2006) encontraram um valor de dureza de aproximadamente 52,07 MPa.

Tabela 7 – Resumo estatístico e valores médios para dureza Janka da madeira de *Eucalyptus grandis* antes e após os tratamentos.

Tratamento	Tensão Máxima (MPa)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	40,29 ^(10,67) A a	41,81 ^(11,34) A a	26,5	0,17 ns
160°C	19,44 ^(3,04) C a	20,86 ^(5,25) C a	21,41	0,94 ns
180°C	23,94 ^(4,31) C b	29,32 ^(6,95) B a	23,74	7,79 *
200°C	29,93 ^(3,99) B a	30,02 ^(3,35) B a	12,19	0,00 ns
CV (%)	35,01	34,72		
F	36,04 *	23,89 *		

Em que: Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Com base nos valores médios de dureza Janka obtidos, o *E. dunnii* pode ser enquadrado na classe de madeiras de alta dureza (500 – 700kgf/cm²), enquanto o *E. grandis* na classe de dureza média (300 – 500kgf/cm²), adaptando-se a classificação descrita por Carvalho (1996).

Quanto aos parâmetros relacionados ao ensaio de flexão estática, verifica-se a inexistência de diferenças significativas, em 5% de probabilidade de erro, para os módulos de elasticidade (MOE) da madeira de *E. dunnii* submetida aos tratamentos de termorretificação e termorretificação em ambiente oleoso em diferentes faixas de temperaturas (Tabela 8).

Entretanto, percebe-se que em ambas as atmosferas, considerando a faixa de temperatura de 200°C, ocorreram aumentos no MOE em comparação ao grupo controle: 5,60% para o tratamento ED_{T200°C} e 6,34% para o ED_{O200°C}. Destaca-se que o tratamento em meio oleoso acarretou aumento no MOE em todas as faixas de temperatura quando comparado à termorretificação simples.

Assim como o observado para a espécie *E. dunnii* acima, o MOE dos tratamentos do *E. grandis* não foram estatisticamente diferentes do grupo controle, em 5% de probabilidade de erro. Entretanto, notou-se uma sensível redução desse parâmetro em comparação aos do tratamento controle: 5,25% (EG T160°C), 15,78% (EG O160°C), 3,05% (EG T180°C), 11,46% (EG O180°C), 7,38% (EG T200°C) e 5,12% (EG O200°C).

Tabela 8 – Resumo estatístico e valores médios para o módulo de elasticidade (MOE) das madeiras de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis* antes e após os tratamentos.

Tratamento	<i>E. dunnii</i> – MOE (MPa)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	15.813,3 ^(2.588,2) A -	15.813,5 ^(2.588,2) A -	-	-
160°C	14.388,1 ^(1.255,6) A a	15.401,6 ^(1.248,5) A a	8,85	2,45 ns
180°C	14.610,3 ^(1.598,8) A a	15.262,0 ^(1.652,6) A a	10,80	0,72 ns
200°C	16.751,8 ^(1.517,0) A a	16.884,5 ^(1.467,8) A a	8,62	0,04 ns
CV (%)	12,93	11,83		
F	3,17 ns	1,39 ns		
Tratamento	<i>E. grandis</i> – MOE (MPa)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	15.123,5 ^(2.607,1) A -	15.123,5 ^(2.607,1) A -	-	-
160°C	14.329,5 ^(2.300,0) A a	12.737,2 ^(2.492,4) A a	18,22	1,98 ns
180°C	14.662,6 ^(2.894,9) A a	13.389,8 ^(2.646,6) A a	19,74	0,95 ns
200°C	14.007,9 ^(3.002,3) A a	14.349,5 ^(2.085,3) A a	17,73	0,08 ns
CV (%)	18,1	18,23		
F	0,28 ns	1,63 ns		

Em que: Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Quanto o MOE entre as diferentes atmosferas, as diferenças recorrentes não foram significativas para uma mesma faixa de temperatura. Em seus estudos com a espécie *E. grandis*, Moura et al. (2012) e Cademartori et al. (2012) encontraram valores médios de MOE 13.587,0MPa e 11.496,8MPa, respectivamente, ambas inferiores ao encontrado no presente estudo. Já Conte (2015) observou que à medida que as temperaturas de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis* em ambiente oleoso aumentavam, o MOE apresentava

comportamento variável, sendo que se encontrou um aumento significativo na temperatura de 220°C em relação aos demais tratamentos (em temperaturas de 160°C e 190°C).

No que tange ao módulo de ruptura (MOR) da espécie *E. dunnii* (Tabela 9), tratamentos em ambas as atmosferas ocasionaram decréscimos significativos, em 5% de probabilidade de erro, nesse parâmetro tecnológico quando comparados aos tratamentos controle (ED T160°C – 59,50%, ED T180°C – 50,95%, ED T200°C – 27,01%, ED O160°C – 60,48% e o ED O180°C – 51,62%). A exceção foi o ED O200°C, o qual mesmo apresentando redução no MOR, não diferiu estatisticamente do respectivo tratamento controle. Observando as diferentes atmosferas de tratamento, nota-se aumento significativo no MOR da atmosfera de termorretificação oleosa em comparação à simples, somente na temperatura de 200°C (15,49%).

Tabela 9 – Resumo estatístico e valores médios para o módulo de ruptura (MOR) das madeiras de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis* antes e após os tratamentos.

Tratamento	<i>E. dunnii</i> – MOR (MPa)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	128,73 ^(25,26) A -	128,73 ^(25,26) A -	-	-
160°C	52,14 ^(14,47) C a	50,87 ^(11,95) B a	25,03	0,04 ns
180°C	63,14 ^(13,91) C a	62,28 ^(7,45) B a	17,55	0,02 ns
200°C	93,96 ^(13,18) B b	111,18 ^(12,27) A a	14,88	6,79 *
CV (%)	41,43	42,27		
F	34,48 *	46,66 *		
Tratamento	<i>E. grandis</i> – MOR (MPa)		CV (%)	F
	Termorretificação (T)	Termorretificação + Óleo (O)		
Controle	113,01 ^(21,46) A -	113,01 ^(21,46) A -	-	-
160°C	77,92 ^(22,74) A a	57,72 ^(19,44) B a	33,92	4,10 ns
180°C	90,85 ^(32,93) A a	82,45 ^(26,25) B a	33,71	0,36 ns
200°C	99,23 ^(28,15) A a	114,12 ^(31,74) A a	23,37	1,67 ns
CV (%)	30,06	34,55		
F	2,74 ns	13,65 *		

Em que: Médias seguidas por mesma, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em 5% de probabilidade de erro; Valores entre parênteses, e sobescritos, representam o desvio padrão das médias. * – significativo em 5% de probabilidade de erro conforme o teste F ($p < 0,05$); ns – não significativo em 5% de probabilidade de erro pelo teste F ($p \geq 0,05$); CV – coeficiente de variação.

Acerca das variações do MOR na madeira de *E. grandis*, observam-se diferenças significativas em 5% de probabilidade de erro somente para os tratamentos que sofreram

termorreificação em ambiente oleoso: EG_{O160°C} (-48,92%), EG_{O180°C} (-27,04%) e EG_{O200°C} (0,98%), sendo que este último não diferiu do controle. Nos tratamentos em que foi efetuado o processo de termorreificação simples, observaram-se reduções no MOR de 31,05%, 19,61% e 12,19%, para os tratamentos EG_{T160°C}, EG_{T180°C} e EG_{T200°C}, respectivamente.

Moura et al. (2012) e Cademartori et al. (2012) encontraram valores de MOR inferiores aos determinados neste estudo para a madeira de *E. grandis*, 103MPa e 82,77 MPa, respectivamente. Fato oposto foi obtido por Conte (2015), o qual percebeu a ocorrência de decréscimos significativos no MOR da madeira de *E. cloeziana* em função do aumento da temperatura de tratamento de termorreificação em banho de óleo. Considerando esse parâmetro tecnológico (MOR) e a classificação proposta por Carvalho (1996), é possível enquadrar as espécies *E. dunnii* e *E. grandis* na classe de madeiras com resistência média (1100 à 1800kgf/cm² ou 107,87 à 176,52MPa, aproximadamente).

Nesse contexto, as diferenças nas propriedades mecânicas encontradas nesse estudo com as referenciadas na literatura podem ser atribuídas a fatores como ambientes e condições de crescimento, idade, variabilidade química, genética e anatômica, destaca-se aqui a constituição e tipo de elementos anatômicos, percentual de lenho inicial e tardio, dentre outras características inerentes a cada indivíduo. É relevante ressaltar a escassez de estudos que abordem a caracterização de propriedades mecânicas da madeira de *E. dunnii*.

No que tange a variabilidade das propriedades mecânicas em função dos tratamentos de termorreificação simples e em ambiente oleoso, à degradação dos componentes estruturais devido às altas temperaturas acarretaram variações na resistência mecânica das madeiras tratadas. Isso foi corroborado por Bak; Németh (2012) os quais observaram que o tratamento de termorreificação em ambiente oleoso, com três tipos diferentes temperaturas e de óleos vegetais, causaram redução nos parâmetros mecânicos relacionados ao ensaio de compressão paralela às fibras nas espécies *Populus × euramericana* Pannónia e *Robinia pseudoacacia* L.. Uma vez que a madeira é rica em carboidratos, sua degradação em função das altas temperaturas pode ocasionar decréscimos nas propriedades mecânicas, uma vez que Moura et al. (2012) destacaram a existência de evidências que comprovem esse fato.

Tal argumento pode ser empregado para explicar os decréscimos na dureza Janka e MOR das espécies madeireiras tratadas em função da aplicação de elevadas temperaturas de termorreificação, uma vez que as hemiceluloses, degradadas sob tais condições térmicas agressivas, são responsáveis por conferir resistência mecânica à madeira (ESTEVES; PEREIRA, 2009). Assim como no presente estudo, esse comportamento (redução no MOR)

em função da aplicação de tratamentos de termorretificação ocorreu também nas pesquisas realizadas por Cademartori et al. (2012) e Moura et al. (2012).

Entretanto, Calonego et al. (2012) observaram que o MOE aumentou conforme aumentavam-se as temperaturas de termorretificação. Isso possivelmente está associado com a conversão da celulose amorfa em cristalina (CALONEGO et al., 2013), aumentando assim os valores desse parâmetro tecnológico. A conversão da celulose e a redução do montante de grupos hidroxilas (OH) da madeira, em função das altas temperaturas, podem contribuir para o aumento da resistência mecânica (BOONSTRA et al., 2007).

6 Conclusões

Com base na análise dos resultados obtidos, conclui-se que:

- Os tratamentos de modificação térmica simples e em atmosfera oleosa causaram alterações significativas em propriedades físicas e mecânicas das madeiras de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*;
- A aplicação do resíduo do óleo de soja (goma) acarretou aumento significativo na massa específica aparente ao teor de umidade de 12% ($\rho_{12\%}$) e reduziu a perda de massa (PM) das madeiras tratadas quando comparado aos tratamentos de termorretificação em atmosfera simples;
- Quanto as propriedades mecânicas, a dureza Janka teve uma redução significativa em ambas as atmosferas de tratamento frente ao tratamento controle, enquanto o módulo de elasticidade e ruptura apresentaram tendência semelhante, entretanto, com menor intensidade.
- Percebeu-se que quanto maior a agressividade dos tratamentos térmicos, maiores eram as perdas de massa (PM) e redução da massa específica aparente ($\rho_{12\%}$), enquanto observou-se resultados opostos nos parâmetros relacionados às propriedades mecânicas, ou seja, a medida que aumentava-se a temperatura, na maioria dos parâmetros mecânicos, ocorria um aumento possivelmente devido a degradação e conversão dos componentes químicos no interior da madeira;
- No geral, o tratamento com atmosfera a base de óleo com goma de soja apresentou resultados superiores e satisfatórios frente aos obtidos pela termorretificação simples, possivelmente pela distribuição mais homogênea do calor no interior da madeira;
- Sugere-se o desenvolvimento de pesquisas futuras que relacionem a goma resultante do processamento do óleo de soja, abordando principalmente suas características químicas e sua influência na higroscopicidade e durabilidade biológica da madeira, tendo vista que a goma é um material com menos beneficiamento e desta forma pode servir aos alimentos xilófagos.
- Além disso, comparar as propriedades físico-mecânicas entre o tratamento de goma com o tratamento utilizando óleo refinado de soja, e considerar assim a viabilidade de substituir um produto de maior valor agregado por uma goma oriunda de um beneficiamento primário.

Referências

- AKECHI, B. V. **Goma de soja na alimentação de frangos de corte: digestibilidade e desempenho**. 2015. 43 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia Animal) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.
- ALFREDSSEN, G.; BADER, T. K.; DIBDIAKOVA, J.; FILBAKK, T.; BOLLMUS, S.; HOFSTETTER, K. Thermogravimetric analysis for wood decay characterization. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 4, p. 527-530, 2012.
- ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRE, P. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three Eucalyptus species. **Holzforschung**, v. 63, n. 1, p. 80-88, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. - ASTM D 143-94. West Conshohocken, PA, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties** - ASTM D5536-94. Philadelphia: 2010, 9p.
- AYDEMIR, D.; GUNDUZ, G.; ALTUNTAS, E.; ERTAS, M.; SAHIN, H. T.; ALMA, M. H. Investigating changes in the chemical constituents and dimensional stability of heat-treated hornbeam and uludag fir wood. **BioResource**, v. 6, n. 2, p.1308-1321, 2011.
- BAK, M.; NÉMETH, R. Modification of wood by oil heat treatment. **International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint**, Sopron, Hungary, 2012. 6 p.
- BARREIROS, R. M.; GONÇALVES, J. L. M.; SANSÍGOLO, C. A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 1, p.103-111, 2007.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BODIG, J.; JAYNE, B. Mechanics of wood and wood composites. **Nova York: Van Nostrand Reinhold**, 1982. 712 p.

BOONSTRA, M. J.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA, B. F.; KEGEL, E. V. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, v. 64, p. 679-690, 2007.

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

BRITO, J. O.; SILVA, F. G.; LEÃO, M. M.; ALMEIDA, G. Chemical composition changes in *Eucalyptus* and *Pinus* woods submitted to heat treatment. **Bioresource technology**, v. 99, n. 18, p. 8545-8548, 2008.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.

BROCCO, V. F.; LOIOLA, P. L.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. S. Efeito do tempo e pressão de tratamento nas propriedades mecânicas das madeiras de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 777-787, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R.; STAGERLIN, D. M. Modification of static bending strength properties of *Eucalyptus grandis* heat-treated wood. **Materials Research**, v. 15, n. 6, p. 922-927, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G. **Propriedades tecnológicas da madeira termorreificada de três espécies de *Eucalyptus***. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas.

CAIXETA, R. P.; CARVALHO, D.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; Variações genéticas em populações de *Eucalyptus* spp. detectadas por meio de marcadores moleculares. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 357-363, 2003.

CALIL, J. C. O potencial do uso da madeira de pinus na construção civil. **Revista da Madeira**, n. 52, 1999.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BALLARIN, A. W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 4, p. 453-460, 2012.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BRITO, A. F. Tipos de ruptura em madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente. *Silva Lusitana*, n. **Especial**, p. 153-161, 2013.

CALORI, J. V.; KIKUTI, P. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus dunii* aos 20 anos de idade. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 1997, Salvador. **Anais**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, 1997. v. 3, p. 321-326.

CARVALHO, A. **Denominações convencionais para propriedades de madeira. In:_____ Madeiras portuguesas: estrutura anatômica, propriedades, utilizações**. Instituto Florestal, Lisboa, v. 1, 1996, 415 p. Disponível em: <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/jqomarcelo/Tim3/tim3_TP1_Na2.pdf>. Acesso em: 23/13/2018.

CARVALHO, A. M. et al. Characterization by solid-state CPMAS ¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 1, p. 144-150, 2009.

COLENCI, R. A.; BALLARIN, A. W. Utilização de dureza Brinell na avaliação de resistência mecânica de madeiras. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 88-99, 2008.

CONTE, B. **Propriedades tecnológicas de madeiras do gênero Eucalyptus submetida a termorreificação em óleo vegetal**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais e Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; SCHNEID, E. Propriedades físicas da madeira termorreificada de quatro folhosas. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 99-107, 2014.

DUBEY, M., K; PANG, S.; WALKER, J. Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of *Pinus radiata* D. don wood with oil heat-treatment. **Holzforschung**, v. 66, n. 1, p.49, 2012.

ELEOTÉRIO, J. R.; REICHERT, D.; HORNBURG, K. F.; MENEGUELLI, I. Massa específica e retratibilidade de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 329-336, 2014.

ESTEVEES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. *BioResources*, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. **Berlin/New York: Walter de Gruyter**, 2003, 400 p.

FIEDLER, N. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; GUIMARÃES, P. P.; ALVES, R. T.; WANDERLEY, F. B.; OLIVEIRA, J. G. L.; MORA, R. Influência da massa específica aparente da madeira no ruído produzido durante o processamento secundário: estudo de caso. *Floresta*, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 401-408, 2009.

GALLIO, E.; GATTO, D. A.; LAZAROTTO, M.; BELTRAME, R. Eficiência de preservantes fungicidas em madeiras de duas espécies florestais submetidas à deterioração por fungo. *Nativa*, Sinop, v. 5, n. 6, p. 434-439, 2017.

GALVÃO, A. P. M. de; JANKOWSKY, I. P. Secagem racional da madeira. **São Paulo: Nobel**, 1985.

GONÇALEZ, J. C.; BRENDA, L. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F.; VALE, A. T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

HASELEIN, C. R.; LOPES, M. C.; SANTINI, E. J.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; FERNANDES, D. L. G.; MENEZES, L. F. Características tecnológicas da madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 145-155, 2004.

HILL, C. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. **England: John Wiley & Sons**, 2006. 239 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Ibá 2017: ano base 2016**. 80 f. 2017.

IWAKIRI, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; PRATA, J. G.; COSTA, A. C. B. Utilização de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* para produção de painéis de partículas orientadas – OSB. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 265-270, 2008.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **Holz Als Roh-Und Werkstoff**, Berlim, v. 60, n. 1, p. 1-6, 2002.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Apostila, 3ª edição, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. 86 p.

KRAUSS, A.; PIERNIK, M.; PINKOWSKI, G. Cutting power during milling of thermally modified pine wood. **Drvna Industrija**, v. 67, n. 3, p. 215-222, 2016.

LIMA, I. L.; GARCIA, J. N. Efeito da fertilização em propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 601-608, 2011.

LIMA, J. T. et al. Variation in wood density and mechanical properties in Eucalyptus clones. In: THE FUTURE OF EUCALYPTUS FOR WOOD PRODUCTS. 2000, Launceston, Tasmania. Proceedings. **Launceston: IUFRO**, 2000. p. 282-291.

LUTINSKI, J. A.; C. J. LUTINSKI; F. R. M. GARCIA. Primeiro registro de *Glycaspis brimblecombei* Moore 1964, (Hemiptera: Psyllidae) em Eucalipto no Estado de Santa Catarina, Brasil. **Ciência Rural**, v. 36, p. 653-655, 2006.

MANDARINO, J. M. G.; ROESSING, A. C. Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos. **Embrapa Soja**. Documentos, 2001.

MATOS, J. L. M. Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. Curitiba. Tese (Doutorado) – **Setor de Ciências Agrárias**, Universidade Federal do Paraná: 117 p., 1997.

MCMAHON, L.; GEORGE, B.; HEAN, R. *Eucalyptus dunnii*. Prime facts. Primefact 1071. A TreeSmart Factsheet. Department of Industry and Investment, **State of New South Wales**, 2010. 5 p.

MELO, R. R. Estabilidade dimensional de compostos de madeira. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 4, n. 2, p. 152-175, 2013.

MENEZES, W. M. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades físico mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna***. 2013. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

MILITZ, H. Heat treatment technologies in Europe: scientific background and technological state-of-art. Enhancing the durability of lumber and engineered wood products. **Forest Products Society**, Kissimmee, FL, USA, February 11-13, 2002, 2002.

MILLER, R. B. Structure of wood. In: Wood handbook: wood as an engineering material. **Madison: USDA Forest Service**, 1999. p. 2.1-2.4. (General Technical Report FPL. GTR, 113).

MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A.; HASELEIN, C. R. Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 291-302, 2017.

MOHEBBY, B.; KEVILY, H.; NAJAFI, S. K. Oleothermal modification of fir wood with a combination of soybean oil and maleic anhydride and its effects on physico-mechanical properties of treated wood. **Wood Science Technology**, v. 48, n. 4 p. 797-809, 2014.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 145-155, 2005.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 305-314, 2012.

NEJAD, M. et al. Coating performance on oil-heat treated wood for flooring. **Bio Resources**, v. 8, n. 2, p. 1881-1892, 2013.

NETO, P.R. C.; ROSSI, L.F.S.; ZAGONEL, G.F.; RAMOS, L.P., Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.

OLIVEIRA, J. T. S.; SOUZA, L. C.; DELLA LUCIA, R. M.; JÚNIOR, W. P. S. Influência dos extrativos na resistências ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 819-826, 2005.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T.; FERREIRA, C. A. Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná. Documentos – 129. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Colombo, PR, 45 p., 2006.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. Textbook of wood technology. 3.ed. **New York: McGraw-Hill**, 1980. v.1 705p.

PONCE, R. H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, **Anais**. p. 50-58, 1995.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of thermal rectification on colors of *Eucalyptus saligna* and *Pinus caribaea* woods. **Maderas. Ciencia y tecnología, Concepcion**, v. 14, n. 2, p.239 - 249, 2012.

POUZET, A. Presentation of some results of the concerted action on the management of oilseed crops in the European Union. **OCL- Oleagineux Corps Gras Lipides**, v. 6, n. 1, p. 6-21, 1996.

PRIADI, T.; HIZIROGLU, S. Characterization of heat treated wood species. **Materials & Design**, v. 49, p. 575-582, 2013.

RIBEIRO, P. G. **Utilização de Técnicas não Destrutivas para Caracterização de madeiras de *Pinus Caribaea* Var. *Hondurensis* e de *Eucalyptus grandis***. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade de Brasília. Brasília. 2009.

ROCHA, M. P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias**. 2000. 186f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ROCHA, M. P.; TRUGILHO, P. F. Qualidade de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* em função do método de desdobro e condição de umidade. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 4, p. 314-321, 2006.

ROWELL, R. M.; PETERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Cell wall chemistry. In: **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton, CRC Press LLC, 2005. p. 35-74.

SANDBERG, D.; HALLER, P.; NAVI, P. Thermo-hydro and thermo-hydro- mechanical wood processing: an opportunity for future environmentally friendly wood products. **Wood Material Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 64–88, 2012.

SANTOS, J. A. **Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira**. Guimarães, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica. Portugal. 300 pág. 2007.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v.65, p.120-129, 2004.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 455-460, 2005.

SILVEIRA, M. A. L.; MILAGRES, A. M. F. Obtenção e caracterização de lignina de madeiras. In: VIII **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. Uberlândia, MG. 2009.

SOUZA, C. C.; MOREIRA, A. A.; SCHIMITH, R. S.; BRANDÃO, P. C.; SILVA, E. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil – uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 409-417, 2007.

TOMASELLI, I. **Tendências de mudanças na indústria de painéis**. Revista da Madeira, Caxias do Sul, p. 36-40, 2000.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 553-559, 2008.

TUONG, V. M.; LI, J. Effect of heat treatment on the change in color and dimensional stability of acacia hybrid wood. **BioResources**, Raleigh, v. 5, n. 2, p.1257-1267, 2010.

WANG, J. Y.; COOPER, P. A. Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 63, n. 6, p. 417-422, 2005.

WWF-BRASIL, ICMBio. Efetividade da gestão das Unidades de Conservação federais do Brasil resultados de 2010. **WWF**, Brasília, v. 72, 2012.