

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS  
NA MADEIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Anderson Pertuzzatti**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2015**

# **INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS NA MADEIRA**

**Anderson Pertuzzatti**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Florestal**

**Orientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto**

Santa Maria, RS, Brasil  
2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pertuzzatti, Anderson  
Influência dos tratamentos termomecânicos na madeira /  
Anderson Pertuzzatti.-2015.  
97 p.; 30cm

Orientador: Darci Alberto Gatto  
Coorientadores: Clovis Roberto Haselein, Elio José  
Santini  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2015

1. Densificação da madeira 2. Staypak® 3. Propriedades  
físicas da madeira 4. Propriedades mecânicas da madeira 5.  
Superfície da madeira I. Gatto, Darci Alberto II.  
Haselein, Clovis Roberto III. Santini, Elio José IV.  
Título.

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS NA MADEIRA**

elaborada por  
**Anderson Pertuzzatti**

Como requisito parcial para obtenção de grau de  
**Mestre em Engenharia Florestal**

**Comissão Examinadora:**



**Darci Alberto Gatto, Dr.**  
(Presidente/Orientador)



**Diego Martins Stangerlin, Dr.**  
(Universidade Federal de Mato Grosso)



**Rômulo Trevisan, Dr.**  
(Universidade Federal de Santa Maria, campus de Frederico Westphalen)

Santa Maria, 25 de fevereiro de 2015

*Aos meus pais, AVELINO e INES*

*As minhas irmãs, ANDRÉIA e JAQUELINE*

*E minha companheira CLÁUDIA.*

**EU DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, bênção e proteção em todos os momentos.

Aos meus pais, Avelino e Ines, pelo exemplo de vida e todo o esforço que eles fizeram para que eu estivesse aqui hoje.

Às minhas irmãs, Andréia e Jaqueline, pelo incentivo e apoio incondicional.

À minha companheira Cláudia pelo amor, apoio e compreensão em todos os momentos.

À Universidade Federal de Santa Maria, principalmente o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de desenvolver a presente pesquisa.

Ao Prof. Dr. Darci Alberto Gatto, pelos dois anos de orientação, apoio, incentivo, confiança e principalmente pela amizade.

Aos professores Dr. Clovis Roberto Haselein, Dr. Elio José Santini, Dr. Luciano Denardi e Dra. Cristiane Pedrazzi pelos incentivos e ensinamentos durante a pesquisa.

Aos professores Dr. Diego Stangerlin e Dr. Rômulo Trevisan por terem aceitado participar na minha banca.

Aos meus colegas e amigos que sempre estiveram prontos a me ajudar, especialmente Bruno Conte, André Missio, Felipe Turchetto e Fernanda Andrade.

Aos funcionários Tarso e Nelson pela ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

À Capes, pela concessão da bolsa.

Aos demais professores, amigos e colegas, que de alguma forma participaram da minha formação.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria

### INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS NA MADEIRA

AUTOR: ANDERSON PERTUZZATTI

ORIENTADOR: DR. DARCI ALBERTO GATTO

DATA E LOCAL DA DEFESA: SANTA MARIA, 25 DE FEVEREIRO DE 2015

Os tratamentos termomecânicos visam aumentar a densidade da madeira, por meio da combinação entre temperatura e pressão, o que resulta em um material com as propriedades físico-mecânicas melhoradas. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência dos tratamentos termomecânicos na madeira. Para tanto, foram confeccionadas peças de madeira, a partir de cinco árvores de *Pinus elliottii* Engelm e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden que foram submetidas a seis tratamentos termomecânicos. Para tal, foi utilizado um banho de óleo laboratorial para realizar o pré-aquecimento da madeira e uma prensa hidráulica com a temperatura dos pratos variando de 150 a 190°C e o tempo de compressão entre 30 e 60 min. Na sequência, foram realizados os ensaios físicos (grau de compressão, perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, densidade, estabilidade dimensional e higroscopicidade), mecânicos (flexão estática, flexão dinâmica e dureza Janka), de superfície (colorimetria e rugosidade) e espectroscopia no infravermelho (ATR-IR). Para a análise estatística foi utilizado o arranjo fatorial qualitativo 3 x 2, com três níveis de temperatura (150, 170 e 190°C) e dois de tempo de compressão (30 e 60 min) e comparados pelo teste de Tukey. Além disso, foi realizado a comparação dos tratamentos com o controle pelo teste de Dunnett. Os principais resultados encontrados para as propriedades tecnológicas mostraram que o grau de compressão, a perda de massa e a densidade aumentaram com o acréscimo da temperatura, já o teor de umidade de equilíbrio apresentou decréscimo com a elevação da temperatura. Para a estabilidade dimensional foi observado que houve redução pelo efeito do retorno da madeira densificada e a higroscopicidade foi aumentada na madeira de ambas as espécies. As propriedades mecânicas apresentaram acréscimo com a densificação, com exceção para a dureza Janka e flexão dinâmica da madeira de *E. grandis* tratada com altas temperaturas. Por meio da espectrometria no infravermelho foi verificado a partir da razão de pico que houve degradação de hemiceluloses e celulose amorfa, proporcionando aumento proporcional de celulose cristalina e lignina. A coloração da madeira densificada foi alterada apresentando escurecimento superficial, quantificado pelo decréscimo do parâmetro de claridade  $L^*$ . Já a rugosidade foi reduzida, tornando a superfície da madeira mais suave. Diante das alterações ocorridas é indicado utilizar tratamento termomecânico com a temperatura de 150°C e o tempo de compressão de 60 min. Nesse aspecto, é recomendado a utilização da madeira densificada como assoalhos e revestimentos, mesmo para as madeiras macias (coníferas).

**Palavras-chave:** densificação da madeira; *Staypak*®; propriedades físicas da madeira; propriedades mecânicas da madeira; superfície da madeira.

# ABSTRACT

Master's Thesis  
Forest Engineering Post Graduation Program  
Federal University of Santa Maria

## INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL TREATMENTS ON WOOD

AUTOR: ANDERSON PERTUZZATTI  
ORIENTADOR: DR. DARCI ALBERTO GATTO  
DATE AND PLACE OF DEFENSE: SANTA MARIA, FEBRUARY 25<sup>th</sup>, 2015

Thermomechanical treatments seek to increase the wood density, through of the temperature and pressure combination, which results in a material with improved physical and mechanical properties. Thus, the study aimed to evaluate the influence of thermomechanical treatments in *Pinus elliottii* Engelm and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden wood. So, were prepared from five trees of each species, wood pieces that have been submitted to six different thermomechanical treatments. For this purpose, we used a laboratory oil bath to perform preheating of wood and a hydraulic press with the temperatures of the dishes ranging from 150 to 190°C. Compression time used was between 30 and 60 min. After, physical (compression rate, weight loss, equilibrium moisture content, density, dimensional stability and hygroscopicity), mechanical (static bending, dynamic bending and Janka hardness), surface (colorimetry and roughness) and infrared spectroscopy (ATR-IR) tests were performed. For statistical analysis, we used qualitative factorial 3 x 2, with three temperature levels and two compression time and Tukey test. Furthermore, it was performed to compare the treatments with the control. The main results for the technological properties showed that the degree of compression and mass loss increased with the temperature increase. The equilibrium moisture content decreased and the density obtained increases. For the dimensional stability was observed that there was a reduction of the effect of the return densified wood, and hygroscopicity was increased in both wood species. The mechanical properties showed increases with the densification, except for the Janka hardness and dynamic flexion in *E. grandis* wood treated with high temperatures. Infrared spectroscopy showed degradation of the amorphous cellulose and hemicellulose, providing a proportional increase of crystalline cellulose and lignin. The color of the densified wood was changed presenting surface browning, measured by decrease in brightness L\* parameter. Roughness was reduced, making the surface softer wood. Before the alterations, it is indicated using thermomechanical treatment with temperature of 150°C and the compression time of 60 min. In this respect, it is recommended the use of densified wood floors and coatings, even for softwoods (conifers).

**Keywords:** densification of wood; *Staypak*®; physical properties of wood; mechanical properties of wood; the wood surface.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	12
2.1 Geral.....	12
2.2 Específicos.....	12
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	13
3.1 Espécies estudadas.....	13
3.2 Anatomia da madeira.....	14
3.3 Química da madeira.....	15
3.4 Densificação da madeira.....	16
3.5 <i>Staypak</i> ®.....	19
3.6 Influência da densificação nas propriedades físicas e mecânicas da madeira.....	20
3.7 Influência da densificação na superfície da madeira.....	21
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
4.1 Seleção da matéria-prima e confecção dos corpos de prova.....	23
4.2 Tratamentos termomecânicos.....	24
4.3 Ensaios físicos.....	25
4.3.1 Grau de compressão (Gc).....	25
4.3.2 Teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ ).....	25
4.3.3 Perda de massa (PM).....	26
4.3.4 Densidade básica ( $\rho_b$ ) e aparente ( $\rho_{ap}$ ).....	27
4.3.5 Inchamento.....	27
4.3.6 Taxa de absorção ( $T_{AA}$ ) em água.....	28
4.4 Ensaios mecânicos.....	28
4.4.1 Flexão estática.....	28
4.4.2 Flexão dinâmica.....	29
4.4.3 Dureza Janka.....	29
4.5 Espectrometria no infravermelho (ATR – IR).....	29
4.6 Ensaios de superfície.....	30
4.6.1 Análise colorimétrica.....	30
4.6.2 Rugosidade.....	31
4.7 Análise dos dados.....	31
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
5.1 Propriedades físicas.....	33
5.1.1 Grau de compressão (Gc).....	33
5.1.2 Perda de massa (PM).....	35

5.1.3 Teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ ).....	36
5.1.4 Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) e básica ( $\rho_b$ ).....	38
5.1.5 Estabilidade dimensional.....	41
5.1.5.1 Inchamento radial ( $\alpha_r$ ) .....	41
5.1.5.2 Inchamento tangencial ( $\alpha_t$ ) e longitudinal ( $\alpha_l$ ).....	43
5.1.5.3 Variação volumétrica ( $\Delta V$ ) .....	45
5.1.6 Taxa de absorção em água ( $T_{AA}$ ) .....	46
<b>5.2 Propriedades mecânicas</b> .....	<b>48</b>
5.2.1 Flexão estática.....	48
5.2.2 Flexão dinâmica.....	51
5.2.3 Dureza Janka.....	52
5.2.3.1 Dureza radial ( $H_{rd}$ ).....	52
5.2.3.2 Dureza tangencial ( $H_{tg}$ ) e longitudinal ( $H_{lg}$ ) .....	55
<b>5.3 Espectrometria no infravermelho (ATR – IR)</b> .....	<b>57</b>
<b>5.4 Ensaio de superfície</b> .....	<b>60</b>
5.4.1 Colorimetria.....	60
5.4.2 Rugosidade de superfície.....	68
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>72</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS</b> .....	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>74</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>86</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material lenhoso, formado por células dispostas nos sentidos radial e axial, ligadas entre si pela lignina, que age como um agente ligante, conferindo sustentação ao tronco. Essas células passam por vários estágios de desenvolvimento, como a divisão celular, diferenciação e maturação, sendo influenciadas nesses estágios por fatores genéticos, edáficos, climáticos, silviculturais e geográficos. O que resulta em variações dimensionais e químicas, formando um material não uniforme, com alta variabilidade, entre e dentro das árvores (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989).

Segundo Lippke e Edmonds (2006) a madeira é considerada uma matéria-prima renovável, reciclável, biodegradável e apresenta um processamento com baixa demanda energética. Nesse aspecto, os produtos de madeira com vida útil prolongada podem ser considerados como repositórios para o CO<sub>2</sub>, caracterizando-se como um material que pode atingir o objetivo universal de desenvolvimento sustentável de baixo carbono, principalmente quando se utiliza madeira sólida proveniente de espécies com rápido crescimento, gerando benefícios econômicos, sociais e ambientais.

No entanto, com a substituição da utilização de árvores de grande porte provenientes de florestas nativas, por espécies de rápido crescimento, a madeira vem apresentando características tecnológicas diversas, principalmente referentes a resistência mecânica, restringindo a sua utilização e aumentando a concorrência com outros materiais. Nesse aspecto, vários métodos de modificação (térmica, química e de impregnação) têm sido desenvolvidos para tentar contornar esse problema (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

A modificação da madeira é um processo que melhora certas propriedades, produzindo um material que no final do seu ciclo de vida não apresente perigo ambiental superior ao da madeira não tratada (HILL, 2006). Nesse aspecto, a densificação da madeira visa aumentar a sua densidade, e conseqüentemente as propriedades mecânicas, ampliando a gama de aplicações de madeiras com baixa densidade (BELT et al., 2013).

De acordo com Welzbacher et al. (2004) existem basicamente dois tipos de processos de densificação utilizados para madeira maciça, dentre eles destacam-se o preenchimento dos espaços vazios com substâncias, enquanto que o segundo visa a compressão da madeira na direção radial por meio da aplicação de força mecânica e temperatura, definidos como tratamentos termomecânicos (*Staypak*®).

A compressão termomecânica é uma extensão da modificação térmica, o que resulta em um material com as propriedades mecânicas melhoradas, também conhecido como madeira densificada. Isso somente é possível devido à estrutura porosa da madeira e a capacidade dos seus componentes (lignina, celulose e hemicelulose) para amolecer na presença de calor e umidade (HILLIS; ROZSA, 1978; UHMEIER et al., 1998). Nesse aspecto, a madeira pode ser comprimida termomecanicamente sem qualquer quebra estrutural, pois a umidade e o calor atuam como agentes plasticizantes, tornando-a mais maleável (SEBORG; STAMM, 1941; KUTNAR; KAMKE, 2012).

O interesse na densificação de madeira tende a aumentar nos próximos anos devido a diminuição de sua qualidade estrutural, como consequência da utilização em grande escala de espécies com rápido crescimento. Nesse aspecto, a densificação torna possível que madeiras de baixa densidade possam ser utilizadas em locais que exigem alta resistência mecânica e assim diminuir a pressão sobre as madeiras densas, principalmente às provenientes de florestas nativas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Avaliar a influência dos tratamentos termomecânicos em madeiras de *Pinus elliottii* Engelm e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

### **2.2 Específicos**

- Investigar o efeito combinado da temperatura e do tempo de compressão nas propriedades físicas e mecânicas da madeira densificada;
- Caracterizar qualitativamente a degradação da estrutura química da madeira densificada;
- Caracterizar a superfície da madeira com ensaios de colorimetria e rugosidade;
- Orientar a indústria madeireira na utilização da madeira densificada.

## 3 REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 Espécies estudadas

Atualmente, o Brasil possui cerca de 7,1 milhões de hectares de florestas plantadas, principalmente com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, que representam cerca de 0,8% do território nacional. Essas florestas são responsáveis por abastecer quase a metade do mercado brasileiro de madeira (ABRAF, 2013).

O gênero *Eucalyptus* vem sendo intensivamente cultivado em decorrência do seu rápido crescimento, alta capacidade de rebrota e adaptação, além disso, possui eficientes programas de propagação clonal (DEL QUIQUI et al., 2001; RAMOS et al., 2011). Dentre as espécies do gênero, destaca-se *Eucalyptus grandis* que é a mais cultivada no Brasil, devido ao seu potencial produtivo e às características da madeira (SOUZA et al., 2004).

A madeira dessa espécie é considerada medianamente leve e de fácil trabalhabilidade em operações de usinagem, sendo indicada para usos múltiplos. No entanto, apresenta propensão ao colapso e altos níveis de tensões de crescimento, além da presença de empenamentos, contrações e rachaduras nas operações de desdobro e secagem (DEL MENEZZI, 1999; MCKENZIE et al., 2003; GONÇALEZ et al., 2006).

Por sua vez, o gênero *Pinus* ocupa, aproximadamente, 1,6 milhão de hectares, o que corresponde a 22% da área plantada com espécies exóticas no Brasil (ABRAF, 2013). O gênero foi introduzido especialmente para produção de celulose (fibra longa) e papel, no entanto, vêm sendo utilizado para diversas finalidades (DRESCHER et al., 2001).

Das espécies de *Pinus* cultivadas no Brasil, destaca-se *Pinus elliottii*, por apresentar características como: rusticidade, tolerância a baixas temperaturas e baixa exigência nutricional (HIGA, 2011; ABRAF, 2013). A madeira apresenta cerne e alburno indistintos pela cor branco-amarelado, maciez ao corte, grã direita, textura fina e a densidade variando de 0,50 a 0,56 g/cm<sup>3</sup> (IPT, 2003). Dentre suas utilizações se destacam a madeira serrada, celulose e papel, painéis e na produção de resinas (CADEMARTORI et al., 2012).

### 3.2 Anatomia da madeira

A madeira caracteriza-se como um material heterogêneo que apresenta estrutura complexa, o que reflete numa ampla gama de propriedades físicas (densidade, permeabilidade, capilaridade, condutividade térmica e difusão da água de impregnação). É anisotrópica, uma vez que apresenta diferentes propriedades nos três planos anatômicos: radial, tangencial e longitudinal (BLOMBERG, 2006). O arranjo de seus componentes físicos e químicos definem a estrutura lenhosa como uma engenhosa organização arquitetônica da madeira (SIAU, 1984).

Conforme Sandberg e Navi (2007) para usar a madeira de forma mais eficaz se requer o conhecimento não só das quantidades relativas dos diferentes constituintes (celulose, hemicelulose, lignina e extrativos) que compõem a madeira, mas também de como estão distribuídos nas paredes celulares e como reagem com o meio ambiente. Uma vez que é um produto natural proveniente de diferentes árvores individuais, o que impõe limites ao seu uso.

Segundo Kennedy (1968) o arranjo dos traqueóides é diferente na direção radial e tangencial e a presença de raios também contribui para a anisotropia. Uma vez que os raios aumentam a força na direção radial, mas apresentam efeito negativo na direção tangencial, pois entram facilmente em colapso quando comprimidos. Conforme o mesmo autor, a variação do módulo de elasticidade é menor na direção tangencial e radial quando o volume de raios é grande e a quantidade de lenho tardio é baixa.

De acordo com Groom et al. (2002) a largura dos anéis de crescimento interfere na densidade da madeira e, conseqüentemente, nas propriedades físico-mecânicas, em que, o contraste entre lenho inicial e tardio é mais pronunciado em coníferas. Conforme os mesmos autores, a densidade do lenho inicial em coníferas decresce da medula para a casca e tende a diminuir da base para o topo. Em madeiras com quantidades elevadas de lenho tardio, a força tangencial é superior que a radial, enquanto o oposto é verdadeiro para madeira com raios grandes ou numerosos. Além disso, a força no sentido da fibra é muito superior que no sentido transversal (KOPONEN et al., 1991).

As deformações na madeira causadas por forças de compressão variam na direção radial e tangencial (KOLLMANN; CÔTÉ, 1984). Conforme Gibson e Ashby (1999) as curvas de tensão-deformação na compressão radial e tangencial são similares em forma, mas os mecanismos diferem na deformação. Já Bodig (1965) introduziu a teoria da camada mais fraca para o sentido radial, quando comparada com a tangencial.

Na compressão radial as paredes celulares se dobram elasticamente na primeira fase da deformação, seguida pelo colapso das células do lenho inicial (ANDO; ONDA, 1999; TABARSA;

CHUI, 2001). De acordo com Bodig (1965) o colapso ocorre na parte mais fraca dos raios e a principal função do lenho inicial é apoiar os raios. Já Tabarsa e Chui (2001) destacam que a força do lenho inicial é o fator que controla a compressão radial. Sendo que conforme o mesmo autor, o colapso prossegue até 30% do lenho inicial, permanecendo o lenho tardio quase inalterado. A partir disso, o estresse provoca deformação predominantemente elástica do lenho tardio, resultando em um aumento acentuado na curva de tensão-deformação quando a estrutura se aproxima da fase elástica, devido à disposição mais irregular das paredes nessa direção.

Conforme Blomberg (2006) o grau de compressão aumenta com a largura do anel de crescimento e diminui à medida que aumenta a proporção de lenho tardio, sendo considerado como um efeito da densidade da madeira. Nesse aspecto, utilizando-se parâmetros diferentes de pressão, temperatura e teor de umidade é possível projetar os materiais para fins diferentes. Os valores ótimos desses parâmetros diferem conforme a presença de defeitos, tipo de grã, a espécie e também em madeira com diferentes densidades na mesma espécie.

Ao comprimir hidrostáticamente (19 MPa), Bucur et al. (2000) descobriram que a madeira de *Picea abies* densificada na direção radial, não apresentou nenhuma deformação plástica no lenho tardio. Conforme Wolcott et al. (1994) isso ocorre por que a madeira é um material viscoelástico e reológico (dependente do tempo). Nesse contexto, se a tensão é mantida constante durante um longo período de tempo, o nível de estresse diminui, resultando em decréscimo na recuperação elástica da madeira densificada (BLOMBERG, 2006).

### 3.3 Química da madeira

A madeira é denominada quimicamente como um biopolímero tridimensional composto, primordialmente, de celulose (um polímero linear constituído por unidades de anidro-D-glucopiranosose ligadas por B (1-4) glicosídicas), hemicelulose (principalmente composto por glicose, manose, galactose, xilose e arabinose) e lignina (um polímero tridimensional reticulado aromático, formado a partir de unidades de fenilpropano, com/sem grupos metoxil ligados ao anel aromático ou entre si por ligações éter ou carbono-carbono) (ASSOR et al., 2009; CHANG et al., 2010). Esses polímeros formam a parede celular da madeira e são responsáveis pela maioria das suas propriedades físico-químicas (MORSING, 2000).

Conforme Dwianto et al. (1998) a madeira é composta por células alongadas, cujas paredes tem uma estrutura de multicamadas complexas. Em que, para cada camada as moléculas de celulose são agrupadas em longos filamentos chamados microfibrilas, que são imersas numa matriz composta por hemiceluloses e lignina. Nesse aspecto, a umidade e

temperatura agem de forma diferente sobre a matriz, pois a natureza cristalina da celulose permite que a água atinja somente as interfaces das microfibrilas, atuando como agente de inchaço e plasticizante. Com a elevação da temperatura na condição de alta umidade, ocorre o amolecimento dos principais componentes da madeira (hemicelulose e lignina), alterando assim o seu estado vítreo (MORSING, 2000).

De acordo com Kutnar e Sernek (2007) os polímeros amorfos (hemicelulose e lignina) da madeira apresentam estrutura molecular desordenada e comportamento vítreo quando estão em estado natural. No entanto, quando são aquecidos com a presença de alta umidade tornam-se maleáveis e sujeitos a deformações. A temperatura em que ocorre a alteração do comportamento da madeira é caracterizada como temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (WOLCOTT et al., 1994; KUTNAR; SERNEK, 2007). Assim, quando está acima da  $T_g$ , a madeira pode ser comprimida sem ruptura das paredes celulares. Pois é um material poroso e na teoria apresenta facilidade para ser comprimido até atingir a densidade da parede celular ( $1,50 \text{ g/cm}^3$ ). Cabe ressaltar que a lignina, hemicelulose e celulose exibem comportamentos diferentes de amolecimento, que variam com a temperatura e teor de umidade (RAUTKARI et al., 2010).

Segundo Lenth e Kamke (2001) a  $T_g$  da madeira é a mesma que a da lignina, encontrando-se entre  $60^\circ\text{C}$  e  $200^\circ\text{C}$ . No entanto, com a diminuição do teor de umidade a  $T_g$  é aumentada. Segundo Nakano (2006) para a lignina da madeira verde a  $T_g$  é em torno de  $60^\circ\text{C}$ . Já para a madeira de *Eucalyptus grandis* com umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF), a  $T_g$  é em torno de  $82^\circ\text{C}$  (QUIRINO; VALE, 2002).

Conforme Morsing (2000) a umidade atua como plasticizante dos polímeros da madeira, através da formação de ligações secundárias com os grupos polares, em que, as moléculas dos polímeros afastam-se e a umidade reduz a ligação secundária entre as cadeias poliméricas, oferecendo mais espaço para a sua movimentação e tornando a madeira mais facilmente deformada.

### **3.4 Densificação da madeira**

A densificação é um tratamento que visa aumentar a densidade da madeira, por meio da compressão ou impregnação com uma substância fluida, para reduzir o volume dos espaços vazios, ou por meio da combinação entre os dois. Esse processo tem a finalidade de melhorar as propriedades tecnológicas, principalmente a resistência mecânica do material (NAVI; HEGER, 2004; GONG; LAMASON, 2007).

As vantagens da madeira compactada já são conhecidas há mais de 100 anos e extensa investigação tem sido realizada. O conceito de compressão de madeira para melhorar as propriedades começou no final do século XIX, em que, as primeiras patentes foram registradas nos Estados Unidos (SEARS, 1900; WALSH; WATTS, 1923; OLESHEIMER, 1929; BROSSMAN, 1931; ESSELEN, 1934; OLSON, 1934). Essas patentes se baseavam essencialmente na compressão mecânica e não consideraram adequadamente a plasticização ou a estabilidade do produtos, conseqüentemente, nenhuma das patentes foram colocados em uso contínuo (MORSING, 2000).

Pesquisas posteriores sobre plasticização e eliminação do inchamento irreversível (*springback*) levaram ao desenvolvimento de novos produtos, utilizando tratamentos térmicos e químicos para alterar as propriedades da madeira. Os principais produtos desenvolvidos foram *Lignostone*, *Lignofol*, *Kunsthartzschichtholz*, *Compreg*, *Impreg* e *Staypak*® (MORSING, 2000; KAMKE; SIZEMORE, 2008) e mais recentemente foi desenvolvido o *Calignum* e *Viscoelastic Thermal Compression* (KUTNAR; SERNEK, 2007; KAMKE; SIZEMORE, 2008).

A madeira densificada foi introduzida na Alemanha antes da Segunda Guerra Mundial, sob o nome comercial de *Lignostone* (madeira maciça comprimida e estabilizada por tratamento térmico). Posteriormente, foram desenvolvidos produtos semelhantes designados *Lignofol* (madeira laminada comprimida) e *Kunsthartzschichtholz* (madeira laminada comprimida tratada com resina) (SEBORG; STAMM, 1941; STAMM et al., 1946; STAMM, 1964).

Nos Estados Unidos foram desenvolvidos outros produtos de madeira densificada, chamados de *Compreg* e *Impreg* (SEBORG; STAMM, 1941). O *Compreg* foi produzido a partir de madeira comprimida tratada com resina, principalmente o fenol-formaldeído solúvel em água que atuava como um plasticizador. Esse produto apresentava alta estabilidade dimensional, resistência biológica e ao fogo, devido a sua maior densidade. Todavia a resina apresentou tendência a endurecer dentro da parede celular, o que tornou a madeira quebradiça (KOLLMANN et al., 1975). Conforme Stamm e Chidester (1947) painéis confeccionados com lâminas modificadas pelo processo *Compreg* foram utilizados na fabricação de hélices de avião, peças de aeronaves, engrenagens e polias.

O *Impreg* consistiu na impregnação de uma resina (fenol-formaldeído ou termoplásticos) na madeira, que penetra e polimeriza os espaços vazios da parede celular. Nesse processo a madeira não é comprimida, somente é utilizado temperaturas entre 21-38°C para facilitar a penetração. Dessa forma a instabilidade dimensional é reduzida (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

O processo *Calignum* foi patenteado por Blomberg e Persson (2004) e consistiu em comprimir a madeira utilizando uma prensa especial com um diafragma de borracha, conhecido como compressão semi-isostática. São utilizadas pressões superiores aos processos anteriores (80 Mpa), pois não há aquecimento durante a densificação e a umidade permanece constante. A vantagem do método é que peças de todos os tamanhos, com nós e defeitos podem ser densificadas sem fissuras macroscópicas, no entanto deixa a madeira com formas irregulares (BLOMBERG, 2006).

O processo chamado de VTC (*Viscoelastic Thermal Compression*) patenteado por Kamke e Sizemore (2005), consiste no amolecimento da madeira acima da temperatura de transição vítrea utilizando vapor saturado, seguido de uma fase de compressão, tratamento térmico e refrigeração (RAUTKARI et al., 2010).

Um dos principais problemas associados com a maioria dos tipos de madeira densificada (exceto aquelas com alto teor de resina) é a falta de estabilidade dimensional. Quando embebido em água ou expostos a alta umidade relativa do ar, os produtos compactados tendem a apresentar o *springback* (MORSING, 2000). Conforme Bowyer et al. (2003) o inchamento da madeira é geralmente proporcional à quantidade de água absorvida e removida pela parede da célula, o que implica em maior instabilidade quando aumenta-se a sua densidade. Isso pode ser um problema grave quando a madeira densificada é usada em ambientes com umidade elevada ou exposta ao contato com o solo.

De acordo com Rowell (1995) o inchamento de madeira é causado pelo aumento de volume da parede celular, enquanto que para madeira densificada também é devido à recuperação da forma das células. Nesse aspecto, Scharfetter (1980) concluiu que a madeira densificada incha de forma irreversível e que o estresse causado pela recuperação da forma das células é substancialmente menor do que o estresse causado pelo volume da parede celular. De acordo com Gong e Lamason (2007) a pressão de inchaço diminuiu com o aumento temperatura, devido ao amolecimento da madeira e acima de 75°C torna-se negligenciável. Já conforme Tarkow e Turner (1958) ocorre um aumento exponencial da pressão de inchaço com o aumento do grau de compressão.

A madeira densificada apresenta maior inchamento, ocasionado tanto pelo aumento da densidade, quanto pela tendência de perder o seu estado comprimido (*springback*). Por conseguinte, a madeira densificada tem de ser submetida a um tratamento de estabilização (RAUTKARI et al., 2010). Conforme Seborg et al. (1956) para produzir um produto comprimido praticamente isento de *springback* é necessário comprimir por longo período de tempo, com temperatura e teor de umidade elevados. De acordo com o mesmo autor, propriedades altamente

estáveis são obtidas somente quando a madeira é completamente comprimida para uma densidade entre 1,3 e 1,4 g/cm<sup>3</sup>.

Para contornar o efeito do *springback*, Dwianto et al. (1996) e Tomme et al. (1998) investigaram a aplicação do pré-tratamento a vapor na madeira. Em que, realizaram um tratamento combinando vapor, temperatura e compressão a fim de produzir madeira densificada com deformação estável. A partir disso, verificaram que o pré-aquecimento apresentou elevada influência sobre a fixação permanente, provocando a hidrólise parcial de hemiceluloses em folhosas e coníferas, o que aumentou consideravelmente a capacidade de compressão da madeira.

Inoue et al. (1996) investigaram o efeito da pré-vaporização na madeira densificada e descobriram que a recuperação diminui quando se utiliza tempo de prensagem e temperaturas mais altas. Já a pré-vaporização atua no aumento da compressibilidade e reduz a quantidade de estresse armazenado devido ao fluxo viscoso de substâncias da madeira.

De acordo com o Forest Products Laboratory (2010) existe a possibilidade de consorciar temperatura e cargas de compressão a fim de obter um material densificado com baixa higroscopicidade. Esse tipo de tratamento é conhecido nos Estados Unidos como “*Staypak*®”, um processo similar que foi produzido na Alemanha antes da Segunda Guerra e foi denominado como “Lignostone”, todavia não sabe-se da utilização dessa técnica no Brasil.

### 3.5 *Staypak*®

*Staypak*® é um produto estabilizado termicamente coberto pela Patente dos EUA nº 2.453.679 (STAMM et al., 1948), obtido da compressão de madeira sob condições que causam o fluxo suficiente de lignina entre as microfibrilas de celulose, com a finalidade de aliviar as tensões internas resultantes da compressão. Embora a madeira apresente tendência de retornar a dimensão inicial, a denominação *Staypak*® está associada ao termo “*stays compressed*” que traduzido ao pé da letra significa “permanecer comprimida” (SEBORG et al., 1956). As principais aplicações para o *Staypak*® são cabos de ferramentas, cabeças de martelo e vários gabaritos de ferramentas (ROWELL; KONKOL, 1987).

Conforme Morsing (2000) para realizar a técnica de compressão da madeira, são necessárias quatro etapas básicas: I) amolecimento ou plasticização da parede celular; II) compressão da madeira; III) definição da deformação por resfriamento e secagem; IV) fixação do estado deformado. Conforme o mesmo autor, o amolecimento da parede celular ocorre graças à natureza viscoelástica dos polímeros da madeira. Já Seborg et al. (1956) comentam

que é possível confeccionar *Staypak*® a partir de diversas espécies, desde que apresente superfície plana e livre de nós, devido as dificuldades de comprimir.

No processo de produção do *Staypak*® utiliza-se a madeira com um teor de umidade igual ou superior ao que se terá em serviço (aproximadamente 12%). A temperatura do processo varia de 150°C a 180°C e a pressão aplicada varia de 98 a 175 kg/cm<sup>2</sup>, quando deseja-se uma densidade final de 1,3g/cm<sup>3</sup> (SEBORG et al., 1956; ROWELL; KONKOL, 1987). No entanto, o *Staypak*® deve ser arrefecido a 100°C ou menos, devido à natureza termoplástica da lignina e porque o teor de umidade da madeira é apenas ligeiramente menor após a compressão do que antes da prensagem, por isso, considerável *springback* irá ocorrer se o produto for removido quente da prensa (KOLLMANN et al., 1975).

Conforme Bucur et al. (2000) a madeira torna-se menos heterogênea devido ao esmagamento e deformação das células com paredes finas do lenho inicial. Além disso, descobriram que os raios assumem um caminho em ziguezague através da estrutura e a anisotropia diminuiu em torno de 56% ocasionado pelo efeito do dobramento dos traqueóides nesse sentido.

### **3.6 Influência da densificação nas propriedades físicas e mecânicas da madeira**

De acordo com Santos et al. (2012) as propriedades mecânicas podem ser modificadas e melhoradas por diferentes combinações de compressão, tratamentos térmicos e químicos. Além disso, a madeira pode ser comprimida no sentido transversal (radial e tangencial) em condições que não causam o colapso celular.

Por meio do adensamento, aproximadamente metade do volume vazio entre as células e o lúmen é removido, ocasionado pelo efeito da pressão e calor sobre os polímeros viscoelásticos, que provoca achatamento dos vasos e deixa os raios curvados (KUTNAR et al., 2009). Como consequência, a densidade da madeira, a dureza, resistência ao desgaste e muitas outras propriedades mecânicas são melhoradas (BLOMBERG et al., 2005; KUTNAR et al., 2008a).

A densidade básica da madeira tratada apresenta forte relação com o grau de compressão (INOUE et al., 1993). Conforme os mesmos autores, tal propriedade aumentou de 0,36 g/cm<sup>3</sup> para 0,50 g/cm<sup>3</sup> com um grau de compressão de 30%. Já com grau de compressão de 60% a densidade básica aumentou para 0,9 g/cm<sup>3</sup>.

Segundo Cloutier et al. (2008) a resistência à flexão e o módulo de elasticidade (MOE) parecem ser linearmente dependentes da densidade, enquanto a dureza é exponencialmente

dependente dessa propriedade. Conforme os mesmos autores, o MOE de madeiras tratadas termomecanicamente foi quase duas vezes maior que as não tratadas.

Conforme Bergander e Salmén (2002) o MOE é afetado pela diferença entre os lenhos (tardio e inicial), plano anatômico, ângulo e distância das microfibrilas. De acordo com Blomberg (2006) o MOE aumentou com o nível de compressão e a temperatura, com exceção para a madeira comprimida a 100°C, em que apresentou menor resistência. Esse fato está relacionado com a temperatura de transição vítrea da madeira, em que a temperatura de ensaio não proporcionou o amolecimento suficiente, provocando fraturas na parede celular responsáveis por reduzir certas propriedades de resistência em níveis de alta compressão e baixa temperatura. Já conforme Kamke e Sizemore (2008) as propriedades mecânicas (dureza e flexão estática) diminuem em madeiras tratadas em temperaturas severas (220°C e 240°C), ocasionado pela maior degradação dos polímeros da parede celular.

### **3.7 Influência da densificação na superfície da madeira**

Mudanças colorimétricas ocasionadas pela aplicação de altas temperaturas na madeira são caracterizadas por um escurecimento homogêneo da superfície e ocorrem devido às modificações na sua estrutura química, principalmente relacionadas a diminuição no conteúdo de hemiceluloses, condensação e migração de extrativos para a superfície (CADEMARTORI et al., 2014). De acordo com o mesmo autor, alterações colorimétricas são vantajosas principalmente quando a madeira é escolhida com base em fatores estéticos, aumentando assim o seu valor de mercado.

Alterações colorimétricas após aplicação de altas temperaturas podem servir como base para identificar modificações nas propriedades tecnológicas (BEKHTA; NIEMZ, 2003; JOHANSSON; MORÉN, 2006; GONZÁLEZ-PEÑA; HALE, 2009). Já a razão para as diferenças de cor entre as espécies, deve-se a composição química, em especial por causa da variação no teor de extrativos (GREKIN, 2007; PERSZE; TOLVAJ, 2012).

De acordo com Bekhta et al. (2014) a temperatura de densificação é o fator que mais tem influência na alteração da cor, em que, as maiores modificações ocorrem acima de 150°C, mesmo em curto período de tempo.

Os tratamentos termomecânicos além de provocar alterações na cor da madeira, afetam a rugosidade de superfície (BEKHTA et al., 2014), que influencia os processos de industrialização, principalmente o acabamento das peças e a resistência adesiva (KARAGOZ et al., 2011). Segundo Bajic et al. (2008) essa propriedade é afetada por diversos fatores relativos

a madeira (densidade, umidade, defeitos, dureza e proporção de lenho inicial e tardio) e aos parâmetros de usinagem (velocidade de avanço, profundidade de corte e ângulo de corte).

De acordo com Candan et al. (2010) e Bekhta et al. (2012) o tratamento termomecânico torna a superfície da madeira mais regular, diminuindo a rugosidade de superfície, ocasionado principalmente pelo efeito da compressão.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Seleção da matéria-prima e confecção dos corpos de prova

O material utilizado foi proveniente de povoamentos homogêneos localizados na Universidade Federal de Santa Maria (29°43'1.95"S, 53°43'33.7"O, 110 metros de altitude), situados no município de Santa Maria - RS. Segundo a classificação de Köppen, a região apresenta clima subtropical úmido Cfa, isso é, subtropical úmido sem estação seca definida e com verões quentes. A precipitação anual varia de 1600 a 1900 mm (ALVARES et al., 2013) e o solo predominante classifica-se como Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (EMBRAPA, 2013).

Os povoamentos de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* utilizados possuem 22 e 21 anos, respectivamente. Em que, as árvores apresentavam espaçamento inicial de 3 x 2 metros, entretanto, após intervenções de desbaste, o espaçamento final encontrado foi de 6 x 6 metros.

Para a seleção das árvores adotou-se a amostragem conforme a norma da *American Society for Testing and Materials* – ASTM D5536-94 (ASTM, 2000). Posteriormente, foram selecionadas cinco árvores de ambas as espécies com diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 38,43 cm (*P. elliottii*) e 43,4 cm (*E. grandis*).

As árvores selecionadas foram derrubadas em março de 2013, com o auxílio de motosserra, retirando-se somente a primeira tora com aproximadamente três metros de comprimento. Na sequência as toras foram transportadas para o Laboratório de Produtos Florestais 2 (LPF 2).

O desdobro das toras de ambas as espécies foi realizado com auxílio de uma serra de fita horizontal, retirando-se pranchões laterais e o central, incluindo a medula, com 8 cm de espessura. Em seguida, os mesmos foram gradeados no pátio de secagem até outubro de 2013.

Após o período de secagem dos pranchões, a espessura foi reduzida de 8,0 cm para 7,0 cm por meio de uma plaina desengrossadeira. Em seguida, com auxílio de uma serra circular e destopadeira foram confeccionadas as peças de madeira, com dimensões de 3,5 x 7,0 x 40,0 cm (radial, tangencial e longitudinal) para posterior prensagem.

As peças de madeira foram levadas para climatização (20°C e 65 % de UR), onde foram mantidas até atingir o equilíbrio higroscópico (~12%). Em seguida, foram pesadas em balança digital com precisão de 0,01g e mensuradas (radial, tangencial e longitudinal) com o uso de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

## 4.2 Tratamentos termomecânicos

O processo teve início com o aquecimento das peças de madeira em um banho de óleo laboratorial contendo água a 100°C, por um período de 20 minutos. Em seguida, foram transportadas para uma prensa hidráulica da marca Omeco® (capacidade de 100 toneladas com aquecimento por resistência elétrica e área de prensagem máxima de 0,36 m<sup>2</sup>), com a temperatura dos pratos de acordo com cada tratamento (Tabela 1). A pressão aplicada foi de 50 kgf/cm<sup>2</sup>, distribuída em duas aplicações de carga (25 kgf/cm<sup>2</sup> no momento do fechamento da prensa e o restante da pressão foi aplicado quando se atingia 50% do tempo estipulado de cada tratamento). Sendo que as peças de madeira foram prensadas, no sentido radial e a determinação dos parâmetros de densificação foram realizados por meio de testes pilotos.

Tabela 1 – Parâmetros dos tratamentos termomecânicos realizados na madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Espécie	Tratamento	Temperatura (°C)	Tempo (min)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Controle	-	-
	E150-1	150	30
	E150-2		60
	E170-1	170	30
	E170-2		60
	E190-1	190	30
	E190-2		60
	<i>Pinus elliottii</i>	Controle	-
P150-1		150	30
P150-2			60
P170-1		170	30
P170-2			60
P190-1		190	30
P190-2			60

Após atingir o tempo de prensagem do referido tratamento, a pressão da prensa foi reduzida, mantendo-se a pressão mínima para que a prensa permanecesse fechada e o aquecimento da prensa foi desligado. As peças de madeira ficaram na prensa até atingir a temperatura de 100°C, evitando assim o choque de temperatura com o ambiente externo no momento da retirada do material da prensa.

Na sequência, foi realizada a pesagem e a medição das peças de madeira comprimidas. Em seguida, as mesmas retornaram a câmara climatizada, para obtenção do equilíbrio higroscópico.

Após a climatização, procedeu-se a confecção dos corpos de prova conforme as normas ASTM D143 (ASTM, 2000) e NBR 7190 (ABNT, 1997) para determinação das propriedades tecnológicas da madeira densificada. Foram utilizadas 12 repetições para os ensaios físicos e mecânicos, desse modo cada tratamento teve 48 corpos de prova, totalizando 672 no experimento, distribuídos nas espécies *E. grandis* e *P. elliptii*.

### 4.3 Ensaios físicos

Para a realização dos ensaios físicos foram utilizados 12 corpos de prova com dimensões de 2 x 2 x 5 cm (radial, tangencial e longitudinal) por tratamento, retirados aleatoriamente das peças de madeira densificada. Foi determinado o grau de compressão, teor de umidade de equilíbrio, perda de massa, densidade básica e aparente, estabilidade dimensional e higroscopicidade.

#### 4.3.1 Grau de compressão (Gc)

O Gc do material foi calculado a partir da relação entre espessura final e inicial das peças de madeira (Equação 1). Em que, a espessura das peças foi medida com um paquímetro digital (0,01 mm) imediatamente após o tratamento termomecânico.

$$Gc = \frac{E_i - E_f}{E_f} \cdot 100 \quad \text{Equação 1.}$$

Em que: Gc = grau de compressão (%);  $E_i$  = espessura inicial (mm);  $E_f$  = espessura final (mm);

#### 4.3.2 Teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ )

O  $TU_{eq}$  foi calculado (Equação 2) de acordo com a ASTM D143-94 (ASTM, 2000). Para tanto, os corpos de prova foram pesados com auxílio de balança digital com precisão de 0,01 gramas e encaminhados para secagem em estufa laboratorial a 103°C até massa constante.

$$TU_{eq} = \frac{M_{clim} - M_{seca}}{M_{seca}} \cdot 100 \quad \text{Equação 2.}$$

Em que:  $TU_{eq}$  = teor de umidade de equilíbrio (%);  $M_{clim}$  = massa dos corpos de prova climatizados (g);  $M_{seca}$  = massa dos corpos de prova após secagem em estufa laboratorial a 103°C (g).

#### 4.3.3 Perda de massa (PM)

A caracterização física de PM foi realizada utilizando a variação de massa das peças antes e após a densificação. Para as avaliações de PM foi utilizado uma balança e paquímetro digital. Para tanto, considerou-se a massa seca dos corpos de prova (Equação 3), obtida em função da massa e do teor de umidade de equilíbrio alcançado durante a climatização (20°C e 65% de umidade relativa - UR).

$$M_{BH} = \frac{M_{Clim}}{1 + TU_{eq}/100} \quad \text{Equação 3.}$$

Em que:  $M_{BH}$  = massa seca dos corpos de prova (g);  $M_{clim}$  = massa dos corpos de prova na condição 20°C e 65% de UR (g);  $TU_{eq}$  = teor de umidade de equilíbrio na condição 20°C e 65% de UR (%).

Dessa forma determinou-se a PM por meio da Equação 4.

$$PM = \frac{M_{BH} - M_{AH}}{M_{BH}} \cdot 100 \quad \text{Equação 4.}$$

PM = perda de massa (%);  $M_{BH}$  = massa seca dos corpos de prova antes da densificação;  $M_{AH}$  = massa seca dos corpos de prova depois da densificação.

#### 4.3.4 Densidade básica ( $\rho_b$ ) e aparente ( $\rho_{ap}$ )

Para as avaliações de  $\rho_b$  e  $\rho_{ap}$  foi utilizado uma balança digital e paquímetro digital. Em que, a massa seca dos corpos de prova foi obtida pela Equação 3, conforme explicado anteriormente. Já a  $\rho_b$  e  $\rho_{ap}$  foram calculadas a partir das Equações 5 e 6.

$$\rho_b = \frac{M_{\text{seca}}}{V} \quad \text{Equação 5.}$$

$$\rho_{ap} = \frac{M_{\text{clim}}}{V_{\text{clim}}} \quad \text{Equação 6.}$$

Em que:  $\rho_b$  = densidade básica dos corpos de prova ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $M_{\text{seca}}$  = massa seca dos corpos de prova (g);  $V$  = volume saturado dos corpos de prova ( $\text{cm}^3$ );  $\rho_{ap}$  = densidade aparente dos corpos de prova ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $M_{\text{clim}}$  = massa climatizada dos corpos de prova (g);  $V_{\text{clim}}$  = volume climatizado dos corpos de prova ( $\text{cm}^3$ ).

#### 4.3.5 Inchamento

Para os ensaios de inchamento (tangencial, radial e longitudinal) e variação volumétrica ( $\Delta V$ ) foi utilizada uma balança digital e paquímetro digital. Para tal, o ciclo de imersão foi iniciado com os corpos de prova secos em estufa laboratorial a  $103^\circ\text{C}$  até massa constante e os ensaios foram realizados em função das dimensões dos corpos de prova nas condições saturadas e secas, por meio das Equações 7 e 8.

$$\alpha_{t,r,i} = \frac{L_{\text{sat}} - L_{\text{seco}}}{L_{\text{seco}}} \cdot 100 \quad \text{Equação 7.}$$

$$\Delta V = \frac{V_{\text{sat}} - V_{\text{seco}}}{V_{\text{seco}}} \cdot 100 \quad \text{Equação 8.}$$

Em que:  $\alpha_{t,r,i}$  = inchamento tangencial, radial e longitudinal dos corpos de prova (%);  $L_{\text{sat}}$  = dimensão do corpo de prova saturado nas direções tangencial, radial e longitudinal (mm);  $L_{\text{seco}}$  = dimensão do corpo de prova seco nas direções tangencial, radial e longitudinal (mm);  $\Delta V$  =

variação volumétrica (%);  $V_{sat}$  = volume do corpo de prova saturado ( $mm^3$ );  $V_{seco}$  = volume do corpo de prova seco ( $mm^3$ ).

#### 4.3.6 Taxa de absorção ( $T_{AA}$ ) em água

Para determinação da  $T_{AA}$ , os corpos de prova foram secos em estufa laboratorial a  $103^\circ C$  até massa constante, em seguida, foram imersos em água e realizado a pesagem de cada corpo de prova em 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192 e 216 horas. A taxa de absorção ( $T_{AA}$ ) em água para cada tempo de imersão foi calculada de acordo com a Equação 9.

$$T_{AA} = \frac{M_u - M_i}{T_f - T_i} \quad \text{Equação 9.}$$

Em que:  $T_{AA}$ : taxa da absorção em água (g/h);  $M_u$  = massa úmida do corpo de prova (g);  $M_i$  = massa inicial do corpo de prova seco em estufa laboratorial a  $103^\circ C$  (g);  $T_f$  = tempo final do ciclo de imersão (h);  $T_i$  = tempo inicial do ciclo de imersão (h).

### 4.4 Ensaio mecânicos

Para os ensaios mecânicos foram utilizados os corpos de prova retirados aleatoriamente das peças de madeira densificada, em que, foi avaliado a flexão estática, flexão dinâmica e dureza Janka.

#### 4.4.1 Flexão estática

Os ensaios de flexão estática foram realizados a partir de adaptações da norma ASTM D143-94 (ASTM, 2000), em que, foram utilizados corpos de prova com as dimensões de 2 x 2 x 30 cm (radial, tangencial e longitudinal) e a velocidade de ensaio foi de 1,04 mm/min.

Os corpos de prova climatizados ( $20^\circ C$  e 65% de UR) foram ensaiados com auxílio de uma máquina universal de ensaios EMIC® com capacidade de 30kN e utilizando uma célula de carga de 5000N. Dessa forma, foram obtidos o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), isto é, a rigidez e a resistência do material analisado, respectivamente.

#### 4.4.2 Flexão dinâmica

O teste de flexão dinâmica (resistência ao impacto) foi realizado conforme norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Para tal, foi utilizado um equipamento denominado Pêndulo de Charpy, em que, o procedimento consistiu na queda de um pêndulo, de uma altura de 1 m, diretamente no corpo de prova, disposto em um vão de 24 cm. Dessa forma, foi obtido o trabalho absorvido (W) e calculado a resistência máxima ao impacto ( $F_{m\acute{a}x}$ ) por meio da Equação 10.

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad \text{Equação 10.}$$

Em que:  $F_{m\acute{a}x}$  = resistência máxima ao impacto ( $\text{kJ/m}^2$ ); W = trabalho absorvido (J); b e h = dimensões transversais dos corpos de prova (mm).

#### 4.4.3 Dureza Janka

O ensaio de dureza Janka foi realizado com auxílio de uma máquina universal de ensaios (EMIC). Foram realizadas duas penetrações em cada extremidade (radial, tangencial e axial) dos corpos de prova com as dimensões de 10 x 4 x 2 cm (L, R e T). O ensaio consistiu na inserção de uma esfera com 1  $\text{cm}^2$  de área diametral, até a metade de seu diâmetro nos corpos de prova, com velocidade de 6 mm/min.

### 4.5 Espectrometria no infravermelho (ATR – IR)

Com a finalidade de se visualizar a influência da densificação na degradação dos constituintes químicos da madeira foi utilizada a técnica de espectroscopia no infravermelho por refletância total atenuada (ATR – IR). Em que os dados foram registrados em um espectrômetro Nicolet Nexus 470, equipado com um instrumento MKII Golden Gate SPECAC, com o dispositivo de refletância total atenuada (ATR) fixado na parte superior à uma unidade de condensação do feixe ótico com cristal de ZnSe.

Foram realizadas 32 varreduras de absorvância com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e leituras entre 4000 e 700  $\text{cm}^{-1}$ . Para cada teste, fez-se o alinhamento da lâmpada do equipamento e coletou-se os espectros de fundo. Os picos foram normalizados na banda de absorção máxima a 1030  $\text{cm}^{-1}$  (banda que não sofre alterações pelo aquecimento), conforme proposto por Windeisen e

Wegener (2008). Na sequência, foram realizadas as razões de pico para identificar a variação dos constituintes químicos da madeira após os tratamentos termomecânicos.

Para tal análise foram utilizadas quatro amostras de flexão estática (após o ensaio e climatizadas a 20°C e 65% de UR), no qual foram moídas em um moinho tipo Willey modelo – TE 680. Posteriormente a serragem foi disposta em uma peneira de 60 mesh, em que foi coletado o material que passou pela mesma.

#### 4.6 Ensaio de superfície

Para avaliar as alterações na superfície da madeira densificada foram realizadas análises colorimétricas e de rugosidade para verificar as modificações na cor e na suavidade, respectivamente.

##### 4.6.1 Análise colorimétrica

As análises colorimétricas foram realizadas no espaço de cor CIE-L\*a\*b, para tal, foi utilizado um colorímetro portátil Konica Minolta, modelo CR-400, com abertura do sensor de 8 mm e ângulo de 2°. Esse equipamento permite realizar medições de cor através do contato direto entre a superfície da amostra, em pontos pré-determinados.

Foram realizadas análises de cor na face tangencial, visando identificar a influência da prensagem na alteração colorimétrica. Para tal, utilizou-se seis corpos de prova por tratamento, sendo que para cada um, realizou-se três medições. Esse ensaio foi realizado anteriormente ao de dureza Janka, aproveitando os mesmos corpos de prova, que apresentavam as dimensões de 10 x 4 x 2 cm (L, R, T).

Os parâmetros colorimétricos avaliados foram: claridade  $L^*$  (preto, 0 – branco, 100), coordenada cromática  $a^*$  (+ vermelho, - verde), coordenada cromática  $b^*$  (+ amarelo, - azul), saturação de cor  $C^*$  e ângulo de tinta  $h$ .

Por meio da equação 11 foi possível quantificar a variação de cor ( $\Delta E$ ) da madeira densificada em comparação com os corpos de prova controle. Para tanto, foi medida a variação das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ .

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

Equação 11.

Em que:  $\Delta E$  = variação de cor;  $\Delta L$  = variação dos parâmetros de claridade;  $\Delta a$  = variação da coordenada cromática vermelho – verde;  $\Delta b$  = variação da coordenada cromática amarelo – azul. Variação dos parâmetros entre corpos de prova densificados com relação as amostras controle.

#### 4.6.2 Rugosidade

A rugosidade superficial foi realizada utilizando-se um rugosímetro- SE 1200 da marca Kosaka Lab-Sufcorder, acoplado a um computador com o software instalado. A resolução vertical do equipamento é de 0,0064  $\mu\text{m}$ , a magnitude vertical (V) é 100  $\mu\text{m}$ , e a horizontal (H) é de 25  $\text{mm } \lambda\text{c}^{-1}$ , o comprimento da avaliação ( $\lambda\text{c}$ ) foi regulado para 2,5 mm (medida extra L de 4x) e velocidade de medição de 0,5  $\text{mm.s}^{-1}$ .

Os parâmetros mensurados foram Ra, Rq, Rz e Rt (rugosidade média, quadrática, de profundidade média e total, respectivamente), de acordo com a norma *International Organization for Standardization – ISO 4287 (1997)*. Foram utilizadas as mesmas amostras da colorimetria, em que as leituras foram realizadas no sentido longitudinal as fibras e no centro da amostra, para evitar os efeitos de usinagem das bordas no corpo de prova.

#### 4.7 Análise dos dados

A análise estatísticas dos dados foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA) fatorial. Primeiramente foram verificadas a normalidade e homogeneidade de variância dos dados, pressupostos antes de qualquer teste paramétrico, respectivamente com os testes White e Shapiro-Wilk. Foi Verificado que os conjuntos de dados, em todas as propriedades, apresentaram normalidade ( $p > 0,05$ ) e homogeneidade de variância ( $p > 0,05$ ).

Para a ANOVA foi utilizado arranjo fatorial qualitativo 3 x 2, com temperatura (3 níveis: 150, 170 e 190°C) e tempo (2 níveis: 30 e 60 min), sem a utilização do tratamento controle. Pois o objetivo da pesquisa foi verificar as temperaturas e tempos específicos, e não o intervalo compreendido entre os níveis. Essa análise foi utilizada para identificar o efeito isolado de cada um dos fatores e a interação entre eles. Em caso de rejeição da hipótese nula ( $p < 0,05$ ) foi realizado desmembramento dos dados e as médias comparadas pelo teste de Tukey, em nível de 5% de significância.

Na sequência, as médias dos tratamentos foram comparadas com o controle pelo teste Dunnett em nível de 5% de significância, em que, as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa ASSISTAT (*Statistical Assistance*), versão 7.7 beta.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Propriedades físicas

Foram avaliadas as propriedades físicas objetivando identificar as alterações que os tratamentos termomecânicos proporcionaram na madeira, principalmente relacionados a densidade, estabilidade dimensional e higroscopicidade.

#### 5.1.1 Grau de compressão (Gc)

Por meio da ANOVA fatorial (Apêndice A) foi verificado que a interação entre os fatores foi significativa somente para madeira de *P. elliottii*, indicando que para o *E. grandis* os fatores temperatura e tempo agiram de modo independente sobre o Gc. Já os fatores tempo e temperatura foram significativos para o grau de compressão, em ambas as espécies, assim pelo menos duas temperaturas e tempos diferiram em relação ao efeito sobre o Gc.

Para madeira de *P. elliottii* o Gc apresentou acréscimo (13%) nas temperaturas de 170 e 190°C quando comparadas com a temperatura de 150°C (Tabela 2). Já o aumento do tempo só foi favorável no Gc quando em conjunto com a temperatura de 150°C, em que, obteve-se um acréscimo de 11%. Entre as temperaturas de 170 e 190°C não foram constadas diferenças no Gc, mesmo com a variação de tempo.

Tabela 2 - Desmembramento fatorial do grau de compressão (Gc) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
<i>P. elliottii</i>	Gc (%)	30	36,20 <sup>±1,56</sup> bB	40,76 <sup>±1,27</sup> aA	40,82 <sup>±0,94</sup> aA
		60	40,14 <sup>±2,37</sup> aA	40,44 <sup>±1,43</sup> aA	41,04 <sup>±1,86</sup> aA
		-	40,23 <sup>±1,50</sup> c	42,89 <sup>±1,78</sup> b	45,85 <sup>±1,58</sup> a
<i>E. grandis</i>	Gc (%)	Tempo (min)			
		30	60		
		42,36 <sup>±2,50</sup> b	43,61 <sup>±2,97</sup> a		

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>; Gc: grau de compressão. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Para a madeira de *E. grandis*, foram observados acréscimos de 14% e 3% com o aumento da temperatura (150-190°C) e do tempo de compressão (30-60 min), respectivamente.

Isso demonstra que a temperatura apresenta maior influência no Gc, conforme já relatado por Laine et al. (2013) e Bekhta et al. (2012).

Analisando a Figura 1, foi verificado que ambas as espécies obtiveram o mesmo comportamento, em que, os tratamentos P150-1 e E150-1 apresentaram valores 10% menores que os tratamentos P190-2 e E190-2, respectivamente. Isso pode ser explicado pelo comportamento viscoelásticos dos polímeros (lignina, celulose e hemiceluloses) da madeira, em que, a menor temperatura e tempo proporcionaram um amolecimento insuficiente da lignina, o que dificultou a compressão da madeira (ARRUDA, 2012).

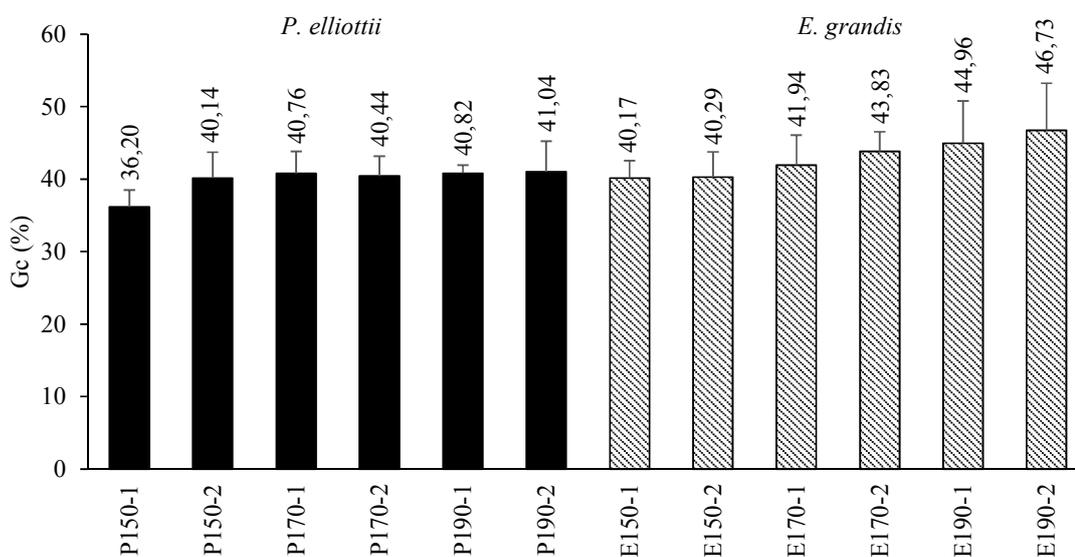


Figura 1 – Grau de compressão (Gc) para a madeira de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Bekhta e Marutzky (2007) obtiveram Gc de 33% utilizando pressão de 150 kgf/cm<sup>2</sup> a 200 °C em lâminas de 1,8 mm de espessura de beech (*Fagus* sp.), valor esse inferior ao que foi conseguido para a madeira de *Pinus* e *Eucalyptus*, utilizando temperaturas e pressões menores. Já Gong e Lamason (2007) obtiveram Gc de 24% para espécies de *Pinus strobus* e *Populus tremuloides* utilizando a temperatura de 205°C por 4 minutos. Conforme os mesmos autores, a madeira resinosa foi classificada como menos comprimida tanto para o cerne e alborno, pois apresenta diferenças de densidade mais pronunciadas ao longo dos anéis de crescimento.

### 5.1.2 Perda de massa (PM)

Para a perda de massa, verificou-se por meio da ANOVA fatorial (Apêndice A) que as interações e os fatores (tempo e temperatura) foram significativos em ambas as espécies, indicando que os fatores agiram de modo dependente sobre a PM.

Avaliando a interação entre os fatores temperatura e tempo para a madeira de ambas as espécies (Tabela 3), observou-se que a PM foi maior conforme se aumentou a intensidade dos fatores. Na madeira de *P. elliotii*, a PM obteve acréscimos médios de ~50 e 20% quando foi aumentada a temperatura (150-190°C) e o tempo de compressão (30-60 min), respectivamente. Na madeira de *E. grandis* foi verificado que a PM aumentou 3,5 vezes com o acréscimo da temperatura e ~35% com o aumento do tempo de compressão.

Tabela 3 – Desmembramento fatorial da perda de massa (PM) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
<i>P. elliotii</i>	PM (%)	30	1,98 <sup>±0,25</sup> bA	2,15 <sup>±0,24</sup> bB	2,88 <sup>±0,25</sup> aB
		60	2,11 <sup>±0,16</sup> cA	2,85 <sup>±0,50</sup> bA	3,30 <sup>±0,44</sup> aA
<i>E. grandis</i>	PM (%)	30	1,08 <sup>±0,14</sup> cA	2,21 <sup>±0,40</sup> bB	3,73 <sup>±0,40</sup> aB
		60	1,41 <sup>±0,13</sup> cA	3,01 <sup>±0,30</sup> bA	4,78 <sup>±0,36</sup> aA

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>; PM: perda de massa. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Por meio da Figura 2, foi observado que a PM variou de 1,98 a 3,30% para a madeira de *P. elliotii*, em que, o tratamento P190-2 foi 67% superior que o P150-1. Para o *E. grandis*, verificou-se que a PM no tratamento E190-2 foi 4,4 vezes superior que o E150-1, demonstrando a influência da temperatura e do tempo de compressão na PM. Conforme Esteves et al. (2007) a PM da madeira após a aplicação de altas temperaturas está relacionada a baixa estabilidade térmica das hemiceluloses, que são degradadas durante o tratamento. Nesse aspecto, quanto maior a temperatura empregada, maior também será a PM (BAL; BEKTAS, 2012; CADEMARTORI et al., 2013a). De acordo com Morsing (2000) a PM abaixo de 160°C é limitada, demonstrando que a degradação térmica dos componentes da madeira é mais efetiva acima de tal temperatura.

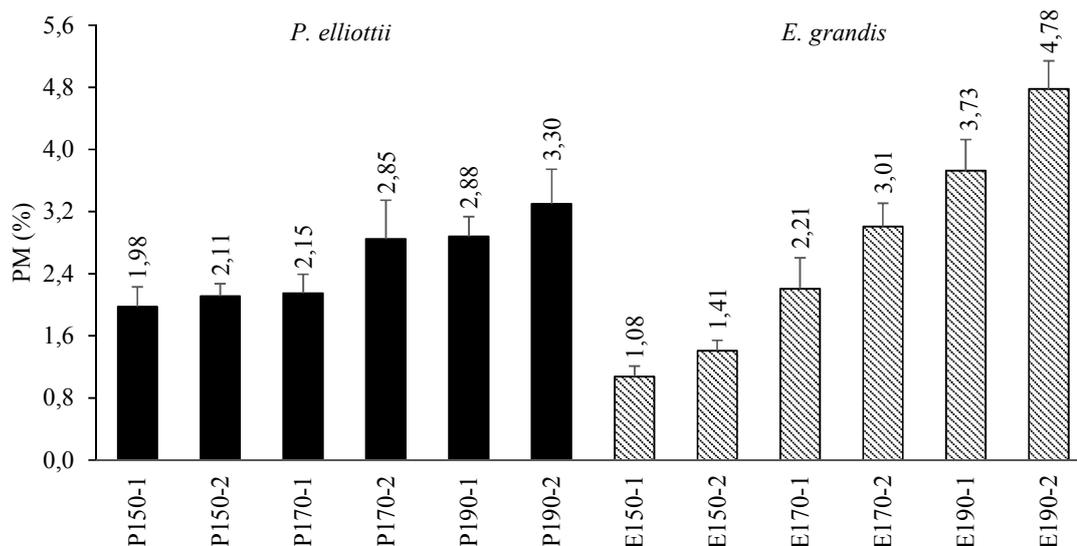


Figura 2 – Perda de massa (PM) para a madeira de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Resultados semelhantes de PM foram encontrados por Arruda e Del Menezzi (2013) densificando lâminas de *Amescla (Trattinnickia burseraefolia)* a 180°C, em que obtiveram valores variando entre 2,87 e 2,95%. Já Santos et al. (2012) encontraram valores de PM variando entre 4,8 a 6%, para a madeira de *Pinus caribaea*, densificada a 170°C.

### 5.1.3 Teor de umidade de equilíbrio (TU<sub>eq</sub>)

Por meio da ANOVA fatorial (Apêndice B) verificou-se que a interação entre os fatores foi significativa somente para madeira de *P. elliottii*, indicando que no *E. grandis* os fatores temperatura e tempo agiram de modo independente sobre o TU<sub>eq</sub>. Já os fatores tempo e temperatura foram significativos para o TU<sub>eq</sub>, em ambas as espécies.

Para a madeira de *P. elliottii* o TU<sub>eq</sub> apresentou decréscimo médio de ~7% nas temperaturas de 170 e 190°C quando comparadas com a temperatura de 150°C (Tabela 5). Já o aumento do tempo só foi favorável no TU<sub>eq</sub> quando em conjunto com a temperatura de 150°C, em que obteve-se decréscimo de 8%. Entre as temperaturas de 170 e 190°C não foram constadas diferenças no TU<sub>eq</sub>, mesmo com a variação de tempo, demonstrando que no presente trabalho o tempo de compressão teve maior efeito na temperatura mais amena.

Tabela 4 – Desmembramento fatorial do teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
<i>P. elliottii</i>	$TU_{eq}$ (%)	30	10,52 <sup>±0,37</sup> aA	9,52 <sup>±0,16</sup> bA	9,40 <sup>±0,13</sup> bA
		60	9,69 <sup>±0,26</sup> aB	9,43 <sup>±0,16</sup> bA	9,32 <sup>±0,14</sup> bA
		-	9,85 <sup>±0,68</sup> c	8,23 <sup>±0,67</sup> b	7,24 <sup>±0,74</sup> a
<i>E. grandis</i>	$TU_{eq}$ (%)	Tempo (min)			
		30	60		
		8,86 <sup>±1,22</sup> b	8,02 <sup>±1,22</sup> a		

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $TU_{eq}$ : teor de umidade de equilíbrio. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Para a madeira densificada de *E. grandis* foi verificado que o acréscimo da temperatura (150-190°C) e do tempo (30-60min) provocaram diminuições de 26% e 9% no  $TU_{eq}$ , respectivamente. Conforme Cloutier et al. (2008) isso pode ser explicado pela redução dos espaços vazios entre as paredes celulares após a compressão da madeira. Segundo Boonstra e Tjeerdsma (2006) a redução do  $TU_{eq}$  também é afetada pela degradação térmica das hemiceluloses, o que provoca aumento proporcional do grau de cristalinidade da celulose (caráter hidrofóbico), reduzindo assim o acesso das moléculas de água aos grupos hidroxilos e consequentemente a capacidade da madeira de absorver umidade (AKGÜL et al., 2008; KOCAEFE et al., 2008).

Por meio da ANOVA (Apêndice H) foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para o  $TU_{eq}$  em ambas as espécies, apresentando decréscimo nessa propriedade (Figura 3). Em que, na madeira de *P. elliottii* e *E. grandis* foi observado que os tratamentos P190-2 e E190-2 proporcionaram decréscimos de 29% e 52% no  $TU_{eq}$ , respectivamente.

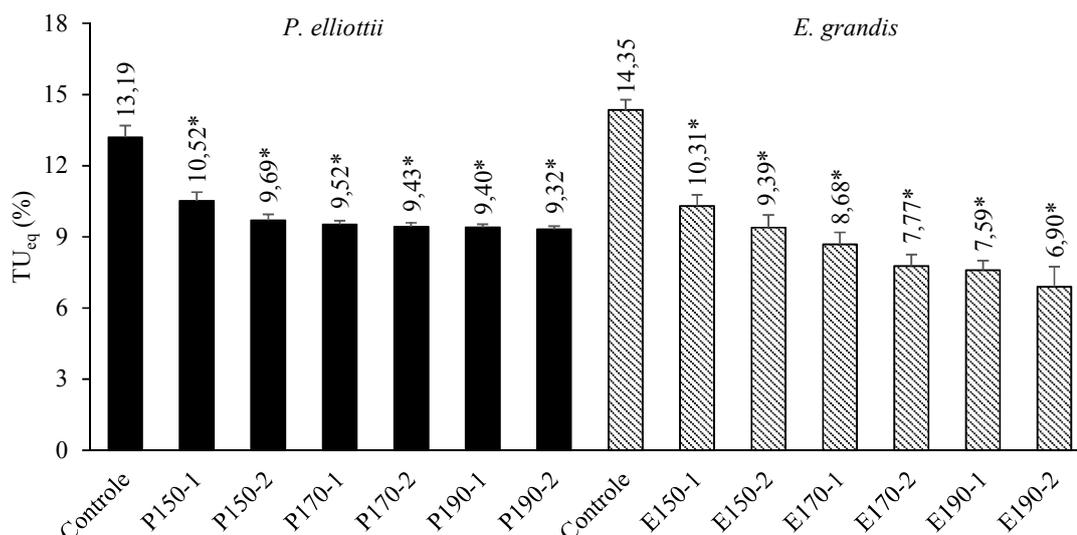


Figura 3 – Teor de umidade de equilíbrio (TU<sub>eq</sub>) para a madeira de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram semelhantes aos encontrados por Santos et al. (2012), que obtiveram TU<sub>eq</sub> de 9,9% para a madeira de *P. caribaea* tratada termomecânicamente a 170°C. Ainda conforme os mesmos autores a redução do TU<sub>eq</sub> deve-se à degradação de polímeros da madeira e a migração da resina (*Pinus*) contida na madeira para a superfície dos corpos de prova, o que dificultou a entrada de água durante o condicionamento. Já Arruda e Del Menezzi (2013) obtiveram TU<sub>eq</sub> de 7,8% tratando lâminas de *Amescla (Trattinnickia burseraefolia)* utilizando a temperatura de 180°C por 2 min.

#### 5.1.4 Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) e básica ( $\rho_b$ )

Por meio da ANOVA fatorial (Apêndice B) foi verificado que na  $\rho_{ap}$ , as interações e os fatores não foram significativos em ambas as espécies. Indicando que os fatores temperatura e tempo não foram capazes de alterar a  $\rho_{ap}$  da madeira densificada, ressaltando que não foi considerado o tratamento controle. Já para a  $\rho_b$ , somente na madeira de *E. grandis* o fator temperatura foi significativo.

O fato de não ocorrer diferenças entre os tratamentos para a  $\rho_{ap}$ , indica que a PM ocorrida nas temperaturas mais severas, foi compensada pelo maior Gc obtido nessas condições. Já se tratando de  $\rho_b$  foi observado que na madeira de *E. grandis* as temperaturas de 170 e 190°C apresentaram os maiores valores para essa propriedade (Tabela 5).

Tabela 5 - Desmembramento fatorial da densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) e básica ( $\rho_b$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Média	Máximo	Mínimo
<i>P. elliottii</i>	$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,97 <sup>±0,09</sup>	1,16	0,80
	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,62 <sup>±0,06</sup>	0,76	0,46
<i>E. grandis</i>	$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,96 <sup>±0,08</sup>	1,12	0,76
		Temperatura		
	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	150	170	190
		0,61 <sup>±0,06</sup> b	0,66 <sup>±0,06</sup> a	0,69 <sup>±0,08</sup> a

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $\rho_{ap}$ : densidade aparente;  $\rho_b$ : densidade básica. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Por meio da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para a  $\rho_{ap}$  em ambas as espécies (Apêndice H). Todos os tratamentos termomecânicos diferiram do controle (teste de Dunnett), tanto para o *P. elliottii* como o *E. grandis*, apresentando acréscimo na  $\rho_{ap}$  (Figura 4). Na madeira de *P. elliottii* todos os tratamentos apresentaram acréscimos de ~85% na  $\rho_{ap}$ . Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Ulker et al. (2012) e İmirzi et al. (2014), que encontraram acréscimos de 93% e 86%, respectivamente, para a madeira densificada de *Pinus sylvestris*.

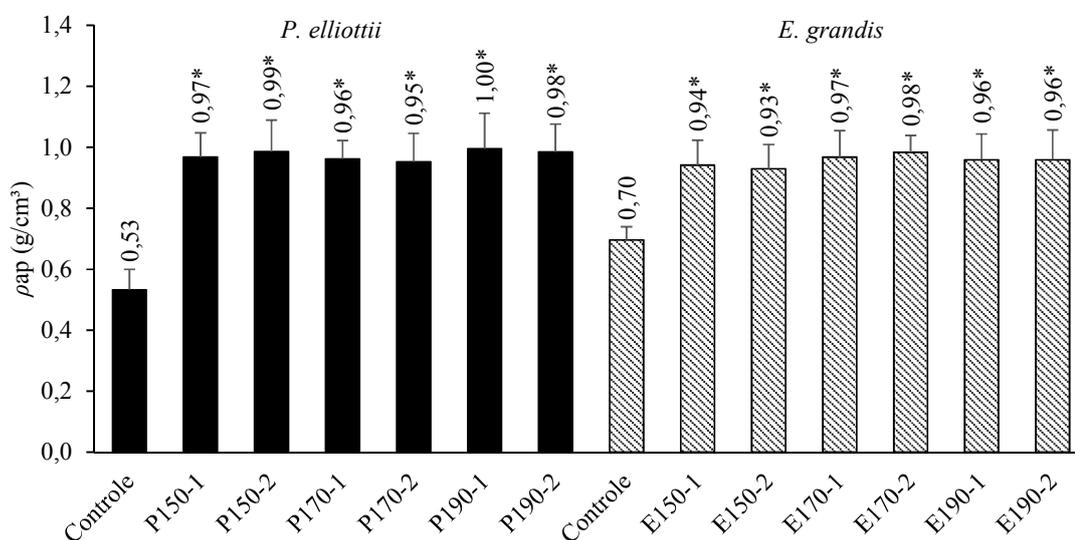


Figura 4 – Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Na madeira densificada de *E. grandis* todos os tratamentos apresentaram acréscimos de ~37% na  $\rho_{ap}$ , em relação ao controle. Esse aumento é explicado pela redução na espessura das peças de madeira, ocasionado pela redução dos espaços vazios e achatamento das células.

Para a  $\rho_b$  foi observado a partir da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice H). Na madeira de *P. elliotii* todos os tratamentos diferiram do controle (teste de Dunnett), aumentando ~40% a  $\rho_b$  (Figura 5). Já para o *E. grandis* não houve diferenças nos tratamentos E150-1 e E150-2, ocasionado principalmente pelo efeito da recuperação da espessura que ocorreu em maior intensidade. Além disso, foi verificado que os demais tratamentos apresentaram acréscimos de ~20% na  $\rho_b$  em relação ao controle.

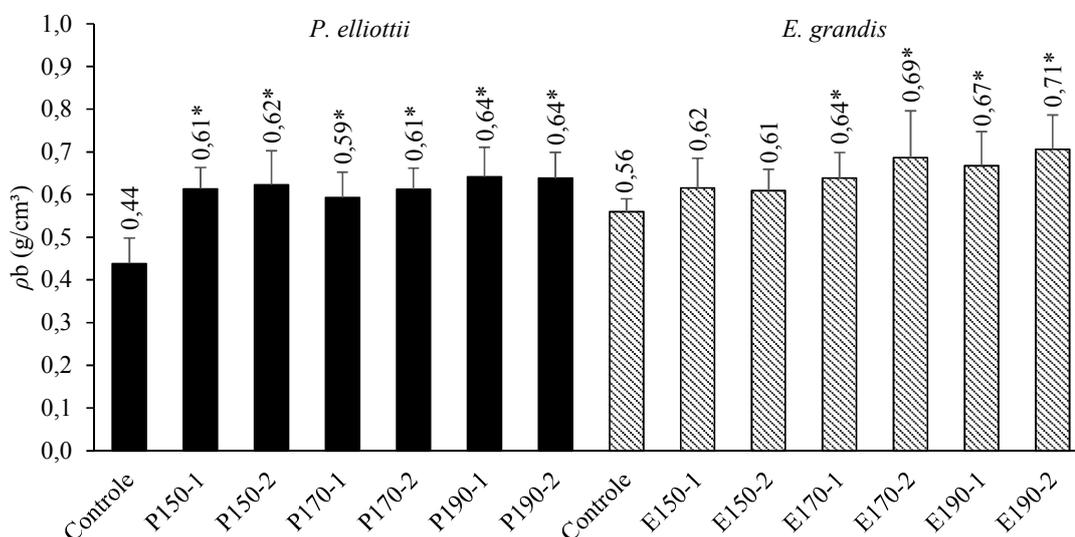


Figura 5 – Densidade básica ( $\rho_b$ ) para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

A partir dos resultados obtidos para a densidade foi constatado que a compressão da madeira apresentou maior eficiência na  $\rho_{ap}$ , tendo em vista que houve aumento em todos os tratamentos. Já para a  $\rho_b$ , em que os corpos de prova foram imersos em água, foi observado que recuperação de espessura inicial (*springback*) limitou o aumento dessa propriedade.

### 5.1.5 Estabilidade dimensional

#### 5.1.5.1 Inchamento radial ( $\alpha_r$ )

Por meio da ANOVA fatorial (Apêndice C) verificou-se que as interações entre os fatores foram significativas somente para o *E. grandis*. Já os fatores temperatura e tempo foram significativos para o  $\alpha_r$ , em ambas as espécies.

Analisando a influência dos fatores temperatura e tempo de compressão para a madeira densificada de *P. elliotii* (Tabela 6), foi observado que houve decréscimo de 7% e 3% no  $\alpha_r$ , conforme aumentou-se a temperatura (150-190°C) e o tempo (30-60 min), respectivamente. Para a madeira de *E. grandis* foi observado o mesmo comportamento de decréscimo, em que, constatou-se diminuição mais acentuada quando foi utilizada a temperatura de 190°C. Esses resultados reforçam a afirmação de Morsing (2000) que destacou o efeito positivo do acréscimo na temperatura e do tempo de compressão na redução do *springback* da madeira densificada.

Tabela 6 - Desmembramento fatorial do inchamento radial ( $\alpha_r$ ), em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Temperatura			
		150	170	190	
<i>P. elliotii</i>	$\alpha_r$ (%)	30,51 <sup>±1,35</sup> a	29,37 <sup>±1,52</sup> b	28,24 <sup>±1,06</sup> c	
		Tempo			
		30	60		
		29,81 <sup>±1,32</sup> a	28,94 <sup>±1,76</sup> b		
<i>E. grandis</i>	$\alpha_r$ (%)	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
		30	27,78 <sup>±0,86</sup> aA	26,50 <sup>±1,02</sup> bA	24,48 <sup>±1,55</sup> cA
60	27,54 <sup>±0,92</sup> aA	25,56 <sup>±1,13</sup> bB	20,88 <sup>±1,26</sup> cB		

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $\alpha_r$ : inchamento radial. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Por meio da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para o  $\alpha_r$  em ambas as espécies (Apêndice H). Todos os tratamentos termomecânicos diferiram do controle (teste de Dunnett), tanto para o *P. elliotii* como o *E. grandis*, apresentando acréscimo de, aproximadamente, 7 e 6 vezes, respectivamente (Figura 6). Conforme Morsing (2000) a degradação térmica contribui no processo de fixação da madeira comprimida. No entanto, as temperaturas utilizadas no presente trabalho não foram suficientes para contornar o problema do *springback*.

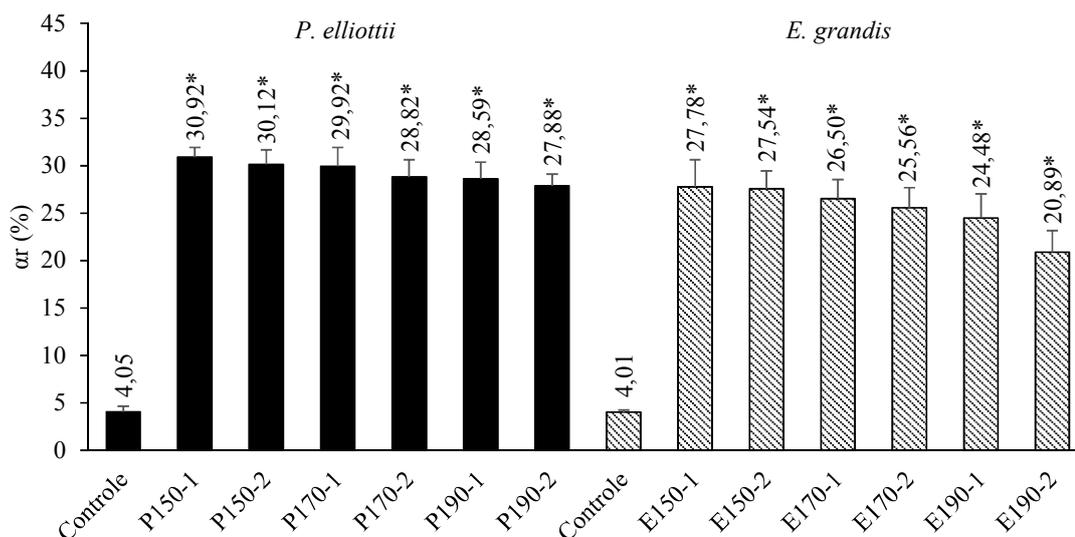


Figura 6 – Inchamento radial ( $\alpha_r$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

O acréscimo no  $\alpha_r$  foi ocasionado pelas tensões de compressão que são acumuladas durante o tratamento termomecânico. Nesse aspecto, quando o material é colocado em água, ocorre a liberação dessas tensões, além do inchamento próprio da madeira. Conforme Blomberg (2006) a madeira densificada na direção radial tende a recuperar a forma das células quando imersa em água. Já de acordo com Navi e Heger (2004) a recuperação da compressão está relacionada com a energia de deformação elástica armazenada nas microfibrilas semicristalinas e lignina da madeira.

Conforme Diouf et al. (2011) a recuperação diminuiu drasticamente quando a temperatura de densificação ultrapassar 180°C. Assim, conforme os mesmos autores quase nenhuma recuperação foi encontrado em madeira densificada a 220°C. De acordo com Hakkou et al. (2005) esse fato é atribuído à degradação de compostos higroscópicos (hemicelulose e celulose amorfa). Além disso, o aumento no teor proporcional de lignina (JENNINGS et al., 2006), devido à degradação de compostos higroscópicos combinados com a plasticização da lignina, resultam em uma reorganização dos componentes poliméricos lignocelulósicos da madeira (HAKKOU et al., 2005).

Comparando os valores do  $\alpha_r$  com o grau de compressão, pode-se observar que a madeira densificada apresentou retorno médio de aproximadamente 60% de sua espessura original, em ambas as espécies. Esses resultados são inferiores aos obtidos por Cloutier et al. (2008) e Arruda (2012) em que obtiveram retorno de até 80 e 90%, respectivamente.

5.1.5.2 Inchamento tangencial ( $\alpha_t$ ) e longitudinal ( $\alpha_i$ )

Através da ANOVA fatorial (Apêndice C) foi verificado que somente o fator temperatura foi significativo para o  $\alpha_t$ , em ambas as espécies. Avaliando o  $\alpha_i$  identificou-se que na madeira de *P. elliotii* as interações e os fatores não foram significativos. Já para o *E. grandis* somente os fatores temperatura e tempo foram significativos para essa propriedade.

Por meio da Tabela 7, foi verificado que o  $\alpha_t$  apresentou decréscimo de 12% e 17% com o aumento da temperatura (150-190°C) para as madeiras de *P. elliotii* e *E. grandis*, respectivamente. Já para o  $\alpha_i$  da madeira de *E. grandis* foi verificado que houve decréscimo de 36 e 16% com o aumento da temperatura e do tempo de compressão, respectivamente.

Tabela 7 - Desmembramento fatorial do inchamento tangencial ( $\alpha_t$ ) e longitudinal ( $\alpha_i$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Temperatura (°C)		
		150	170	190
<i>P. elliotii</i>	$\alpha_t$ (%)	5,73 <sup>±0,88</sup> a	5,38 <sup>±0,68</sup> ab	5,02 <sup>±0,50</sup> b
	$\alpha_i$ (%)	Média	Máximo	Mínimo
		0,40 <sup>±0,13</sup>	0,70	0,15
<i>E. grandis</i>	$\alpha_t$ (%)	Temperatura (°C)		
		150	170	190
		6,45 <sup>±0,65</sup> a	5,67 <sup>±0,49</sup> b	5,33 <sup>±0,50</sup> b
	$\alpha_i$ (%)	Tempo (min)		
		30	60	
	0,37 <sup>±0,11</sup> a	0,31 <sup>±0,14</sup> b		

Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $\alpha_t$ : inchamento tangencial;  $\alpha_i$ : inchamento longitudinal. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Para o  $\alpha_t$  foi observado a partir da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice H). Na madeira de *P. elliotii* todos os tratamentos diferiram do controle (teste de Dunnett), reduzindo 35% o  $\alpha_t$  no tratamento P190-2 (Figura 7). Já para a madeira de *E. grandis* foi observado que o  $\alpha_t$  apresentou decréscimo de 26% no tratamento E190-2 em relação ao controle. Esses resultados foram inferiores aos obtidos por Santos et al. (2012), que tratando termomecanicamente a madeira de *P. caribaea* a 170°C, encontraram valores variando de 6,7 e 7,6%.

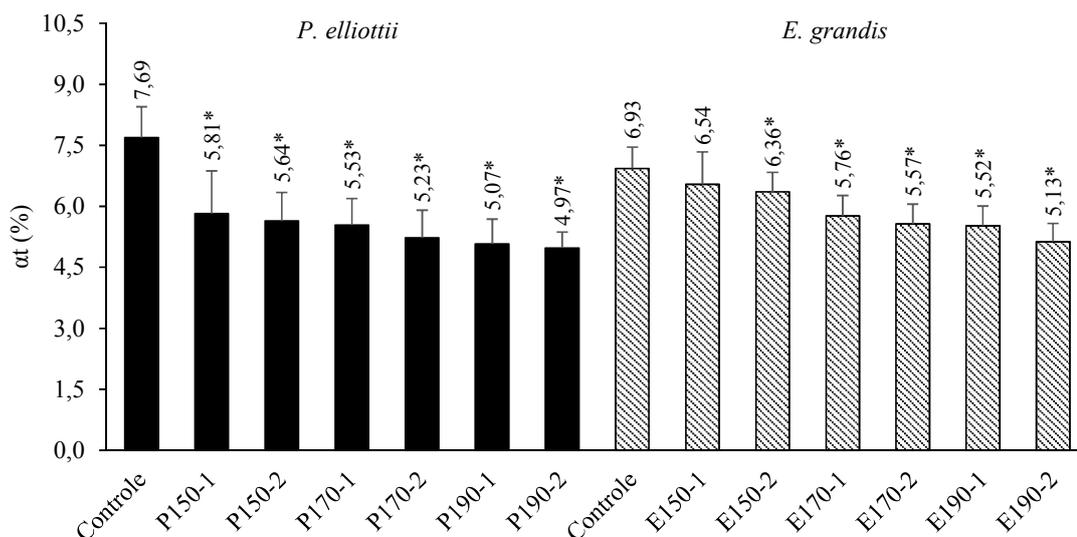


Figura 7 – Inchamento tangencial ( $\alpha_t$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Para o  $\alpha_l$  foi observado por meio da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice H). Na madeira de *P. elliottii* somente o  $\alpha_l$  dos tratamentos P150-2 e P190-2 diferiram do controle (teste de Dunnett), reduzindo ~35% (Figura 8).

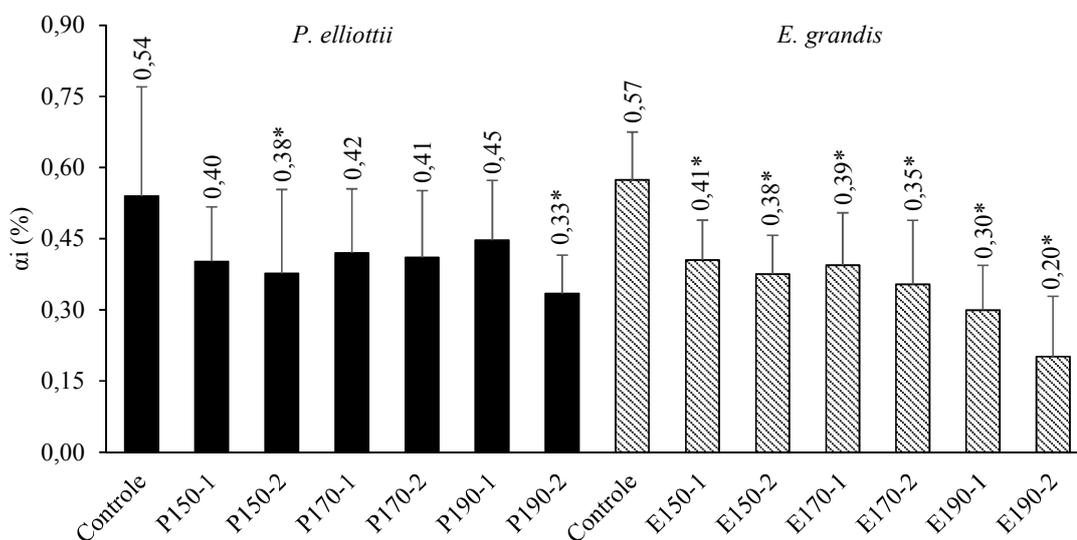


Figura 8 – Inchamento longitudinal ( $\alpha_l$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Para a madeira de *E. grandis* foi verificado que o  $\alpha_i$  de todos os tratamentos diferiu do controle pelo teste de Dunnett (Figura 8), em que, o tratamento E190-2 apresentou redução de 65% no  $\alpha_i$ , quando comparado com o controle. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos et al. (2012), que encontraram  $\alpha_i$  entre 0,35 a 0,46%.

### 5.1.5.3 Variação volumétrica ( $\Delta V$ )

Através da ANOVA fatorial (Apêndice C) foi verificado que as interações entre os fatores não foram significativas para a  $\Delta V$ , na madeira de *P. elliottii*. Já os fatores temperatura e tempo foram significativos, em ambas as espécies.

Avaliando a influência dos fatores temperatura e tempo de compressão na madeira de ambas as espécies (Tabela 8), foi verificado que houve decréscimo na  $\Delta V$  de aproximadamente 10% e 5%, conforme aumentou-se a temperatura (150-190°C) e o tempo (30-60 min). Além disso, foi observado que houve diminuição mais acentuada quando utilizou-se a temperatura de 190°C.

Tabela 8 - Desmembramento fatorial da variação volumétrica ( $\Delta V$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Temperatura			
		150	170	190	
<i>P. elliottii</i>	$\Delta V$ (%)	36,64 $\pm$ 1,48 a	35,17 $\pm$ 1,63 b	33,65 $\pm$ 1,28 c	
		Tempo			
		30	60		
		35,71 $\pm$ 1,60 a	34,59 $\pm$ 2,03 b		
<i>E. grandis</i>	$\Delta V$ (%)	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
		30	34,73 $\pm$ 1,12 aA	32,66 $\pm$ 1,28 bA	30,30 $\pm$ 1,77 cA
60	34,27 $\pm$ 0,98 aA	31,48 $\pm$ 1,21 bB	26,22 $\pm$ 1,13 cB		

Em que: Média $\pm$ desvio padrão;  $\Delta V$ : variação volumétrica. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

A diminuição da  $\Delta V$  observada após a aplicação de temperaturas mais altas durante a densificação está relacionada com a despolimerização e/ou remoção das hemiceluloses, que é constituinte químico mais instável termicamente (HILL, 2006). Esse fato ocasionou a redução na quantidade de grupos OH livres, diminuindo a acessibilidade da água na madeira e consequentemente a  $\Delta V$  (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; DEL MENEZZI; TOMASELLI, 2006).

Por meio da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para a  $\Delta V$  em ambas as espécies (Apêndice H). Todos os tratamentos termomecânicos diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 9), em que, a madeira densificada de ambas as espécies apresentaram aumento médio na  $\Delta V$  de  $\sim 3$  vezes em comparação com o controle. Esse aumento, deve-se especialmente ao elevado  $\alpha_r$  (direção em que foi realizada a compressão), ocasionado principalmente pelas tensões de compressão da madeira densificada.

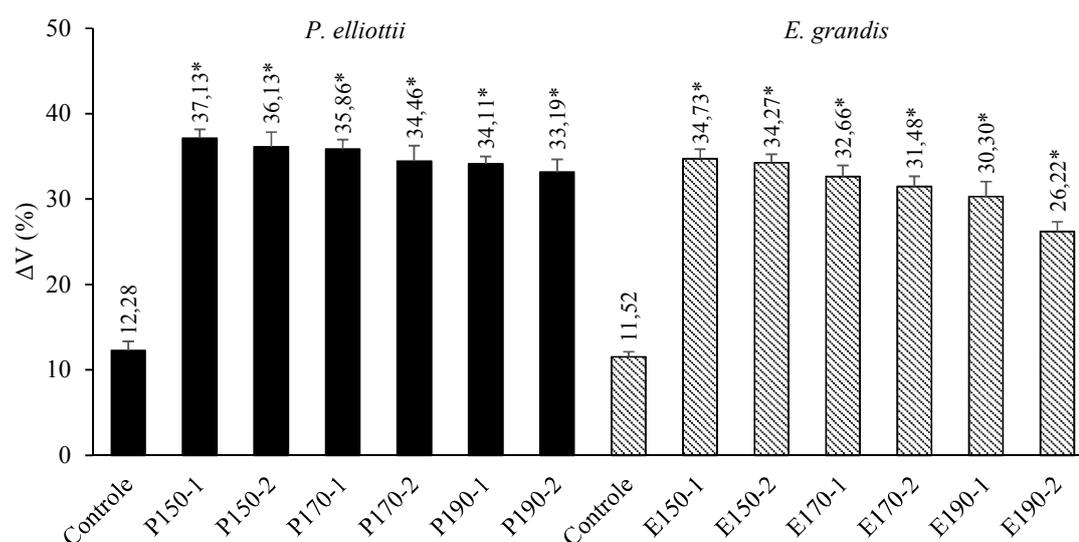


Figura 9 – Variação volumétrica ( $\Delta V$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Outros autores (MORSING, 2000; BLOMBERG, 2006) encontraram valores inferiores de  $\Delta V$ , principalmente para o inchamento na direção da compressão (radial). No entanto, analisando o  $\alpha_t$  e  $\alpha_i$  foi observado que o processo de densificação proporcionou redução do inchamento em ambas seções, ocasionado principalmente pela degradação térmica (HILL, 2006).

#### 5.1.6 Taxa de absorção em água ( $T_{AA}$ )

Para todos os tratamentos termomecânicos a taxa de absorção de água ( $T_{AA}$ ) foi superior ao controle, em ambas as espécies (Figura 10A). Esse fato está relacionado principalmente com a recuperação da forma das células, que provocou acréscimo no volume da madeira, e consequentemente, maior superfície para absorver água. Na madeira de *P. elliottii* foi verificado

que nas primeiras 24 horas de imersão o P150-1 foi ~5% superior aos demais tratamentos, no entanto, com o decorrer do processo os valores de  $T_{AA}$  se igualaram, tendendo a estabilização após 216 horas de imersão.

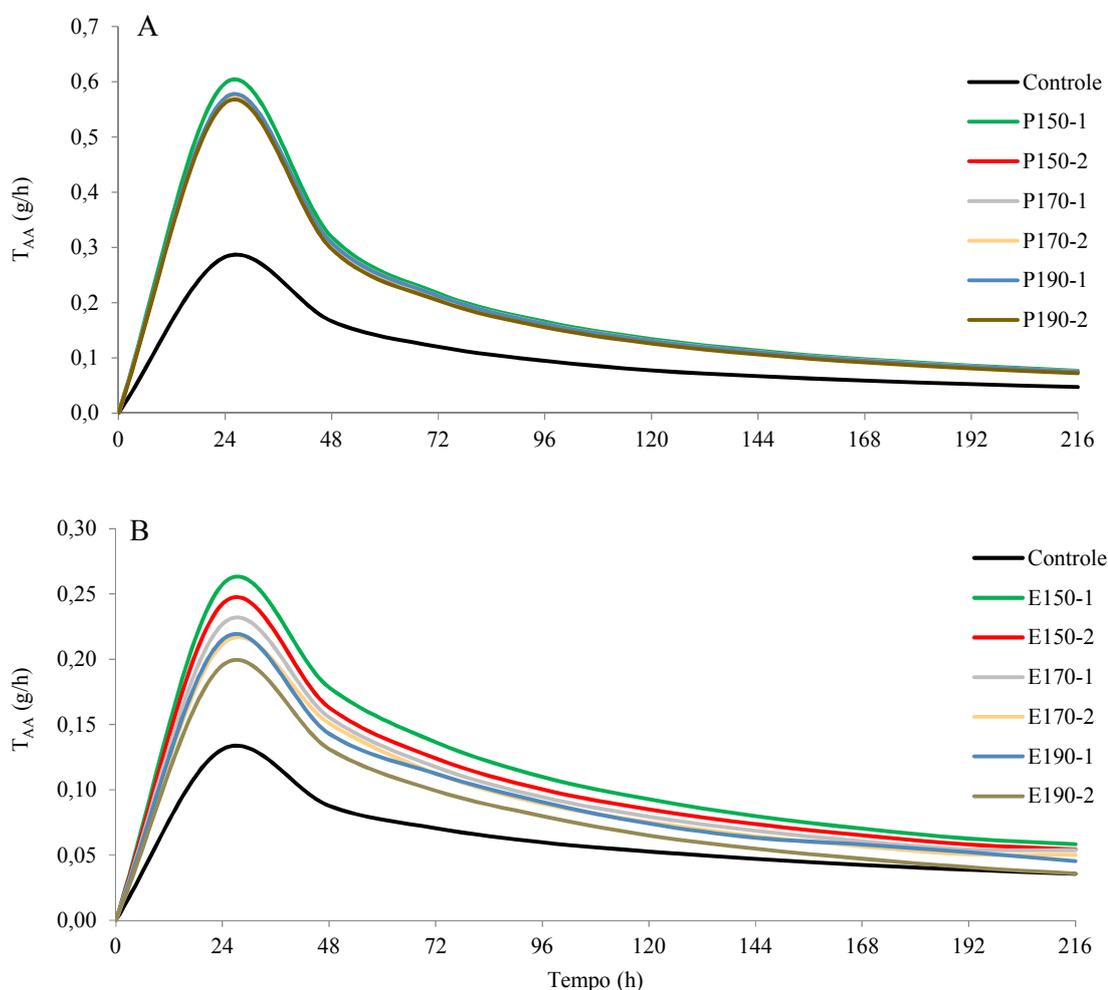


Figura 10 – Taxa de absorção de água ( $T_{AA}$ ) para as madeiras de: A) *Pinus elliottii*; B) *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos.

Para a madeira de *E. grandis* foi verificado que a  $T_{AA}$  no tratamento E150-1 foi ~80% superior ao controle em todo o período avaliado (Figura 10B). Isso pode ser explicado pela reabertura dos vasos achatados, que ocorreu durante a imersão em água da madeira densificada, provocando maior sucção de água para o interior da madeira (ARRUDA, 2012).

Avaliando a  $T_{AA}$  entre os tratamentos termomecânicos, foi identificado que o aumento na temperatura de densificação proporcionou redução nessa propriedade, em que, o tratamento E190-2 apresentou decréscimo de ~30% em comparação com o E150-1. Isso foi ocasionado

pela hidrolização dos polissacarídeos, especialmente as hemiceluloses, que foram degradadas pela aplicação de altas temperaturas (NAVI; HEGER, 2004). Além disso, a diminuição da  $T_{AA}$  deve-se a migração de compostos hidrofóbicos, reatividade dos compostos, oxidação de superfície, reorientação molecular dos compostos e fechamento dos microporos da madeira (CHRISTIANSEN, 1990; NAVI; HEGER, 2004).

## 5.2 Propriedades mecânicas

### 5.2.1 Flexão estática

A partir da ANOVA fatorial (Apêndice D) foi observado que as interações e o fator tempo foram significativos para o módulo de elasticidade (MOE) somente para a madeira de *P. elliotii*. Já o fator temperatura apresentou significância, em ambas as espécies. Para o módulo de ruptura (MOR), verificou-se que as interações e o fator tempo foram significativos somente na madeira de *E. grandis*. Já o fator temperatura foi significativo em ambas as espécies.

Analisando a influência da temperatura na alteração do MOE para a madeira densificada de *P. elliotii* (Tabela 9), foi verificado que houve diferença na temperatura somente em conjunto com o tempo de compressão de 60 min, em que, foi encontrado decréscimo de 19% nesta propriedade com o aumento da temperatura (150-190°C). Já para o tempo de compressão encontrou-se diferença somente na temperatura de 150°C, em que proporcionou acréscimo de 17% no MOE. Para a madeira de *E. grandis* foi verificado que somente a temperatura de 190°C diferiu das demais, apresentando decréscimo de 13% no MOE.

Tabela 9 - Desmembramento fatorial do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
<i>P. elliotii</i>	MOE (GPa)	30	12,68 <sup>±1,58</sup> aB	12,69 <sup>±1,26</sup> aA	12,32 <sup>±1,68</sup> aA
		60	14,80 <sup>±0,90</sup> aA	12,58 <sup>±1,03</sup> bA	12,02 <sup>±0,82</sup> bA
	MOR (MPa)	-	142,17 <sup>±11,70</sup> a	126,97 <sup>±11,17</sup> b	117,17 <sup>±12,20</sup> c
<i>E. grandis</i>	MOE (GPa)	-	16,61 <sup>±1,69</sup> a	17,44 <sup>±2,81</sup> a	14,75 <sup>±2,10</sup> b
		30	119,20 <sup>±11,39</sup> aA	83,15 <sup>±13,84</sup> bA	81,00 <sup>±12,88</sup> bA
	MOR (MPa)	60	85,94 <sup>±12,37</sup> aB	69,35 <sup>±11,01</sup> bB	64,60 <sup>±9,84</sup> bB

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>; MOE: módulo de elasticidade; MOR: módulo de ruptura. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Para o MOR foi verificado decréscimos de, aproximadamente, 18 e 30% com o aumento da temperatura (150-190°C) para a madeira densificada de *P. elliotii* e *E. grandis*, respectivamente. Para o tempo de compressão na madeira de *E. grandis* observou-se decréscimo de ~20% com o aumento do tempo (30-60 min). Diante disso, foi identificado que a densificação da madeira utilizando temperaturas severas provoca aumento da fragilidade e menor resistência a carga.

A partir da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para o MOE em ambas as espécies (Apêndice I). Na madeira de *P. elliotii* todos os tratamentos diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 11), em que, o tratamento P150-2 foi 86% superior ao controle, demonstrando a eficiência da densificação para a melhoria da rigidez da madeira. Esse resultado vai de encontro com a afirmação de Fang et al. (2012), que o principal objetivo de densificação é melhorar as propriedades mecânicas, através do aumento na densidade.

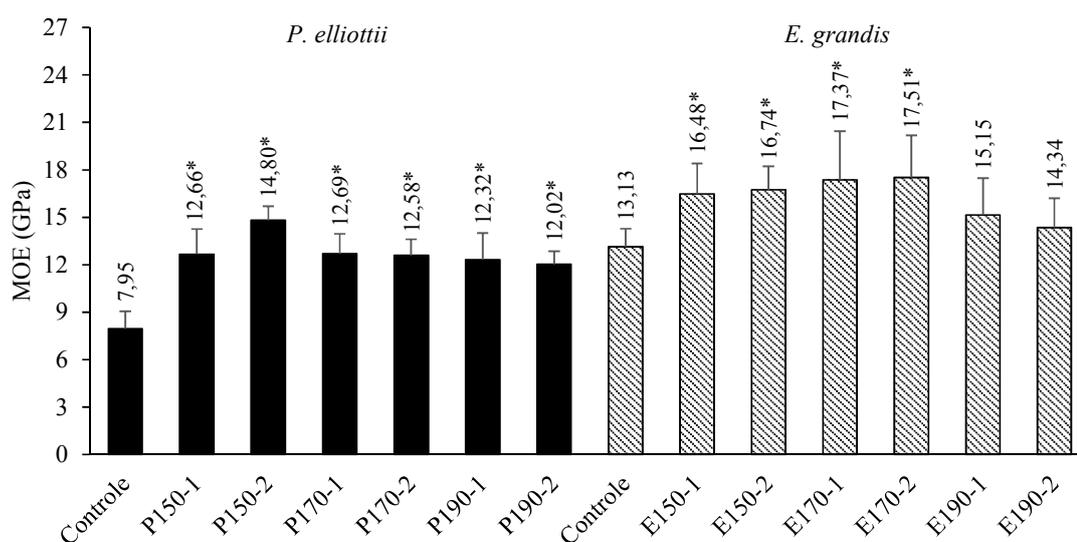


Figura 11 – Módulo de elasticidade (MOE) para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Avaliando o MOE na madeira de *E. grandis* foi observado que não houve diferença do controle (teste de Dunnett) para os tratamentos E190-1 e E190-2, pois o acréscimo na rigidez obtido pela compressão provavelmente foi anulado pelo decréscimo ocasionado pela degradação dos constituintes químicos da madeira (ESTEVEZ; PEREIRA, 2009). Além disso, foi

identificado que o MOE no tratamento E170-2 foi 33% superior do controle. Esses resultados foram similares aos obtidos por Ulker et al. (2012), os quais afirmaram que o processo de compressão aumenta o MOE, contudo o acréscimo da temperatura de densificação provoca uma diminuição nessa propriedade.

Para o MOR foi observado por meio da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice I). Na madeira de *P. elliotii* todos os tratamentos diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 12), em que, o MOR do tratamento P150-2 foi ~3 vezes superior ao tratamento controle.

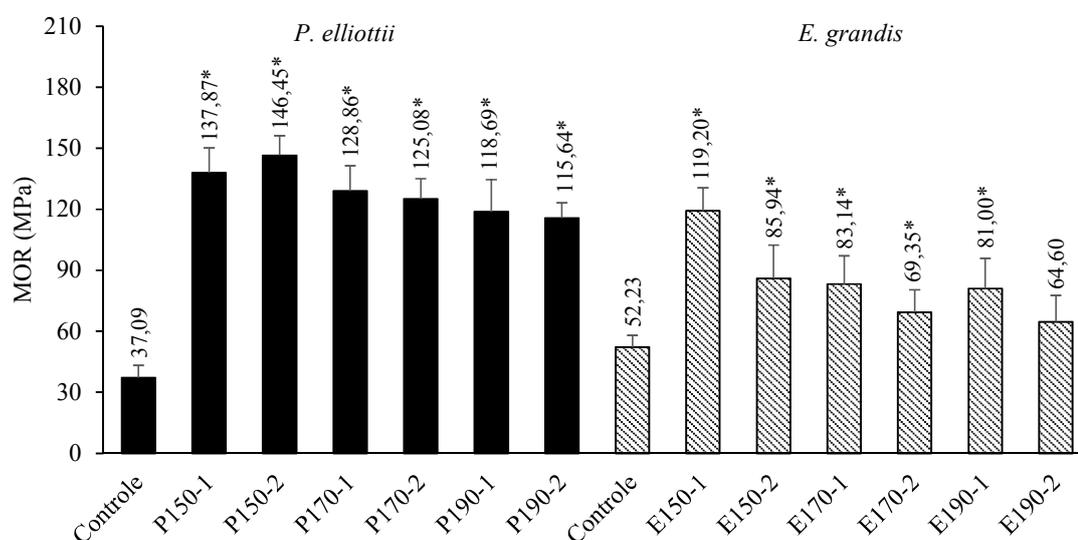


Figura 12 – Módulo de ruptura (MOR) para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Na madeira de *E. grandis* foi observado que somente o E190-2 não diferiu do controle (teste de Dunnett). Em que o MOR do tratamento E150-1 foi 2,3 vezes superior ao tratamento controle. Diante dos resultados obtidos para o MOR foi observado que a densificação da madeira proporcionou acréscimos na resistência da madeira, contudo quando foram utilizadas temperaturas mais altas houve redução dessa propriedade, ocasionado principalmente pela degradação dos polímeros (hemiceluloses e celulose amorfa) da madeira, conforme verificado na análise de espectrometria no infravermelho. Esses resultados foram similares aos obtidos por Dwianto et al. (1998), que identificaram o efeito da perda de massa na redução do MOR.

### 5.2.2 Flexão dinâmica

A partir da ANOVA fatorial (Apêndice D) foi observado que as interações entre os fatores (temperatura e tempo) não foram significativas para a resistência máxima ao impacto ( $F_{\text{máx}}$ ), em ambas as espécies. Já os fatores temperatura e tempo apresentaram significância somente na madeira densificada de *E. grandis*.

Analisando a influência da temperatura para a madeira densificada de *E. grandis* (Tabela 10), foi verificado que houve decréscimo de 32% na  $F_{\text{máx}}$ , conforme foi aumentado a temperatura de 150 para 190°C. Já para o aumento do tempo de compressão (30-60 min) foi observado decréscimo de 11% na  $F_{\text{máx}}$ .

Tabela 10 - Desmembramento fatorial da resistência máxima ao impacto ( $F_{\text{máx}}$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Média	Máximo	Mínimo
<i>P. elliottii</i>	$F_{\text{máx}}$ (KJ/m <sup>2</sup> )	57,42 <sup>±10,92</sup>	75,18	39,02
		Temperatura (°C)		
		50	170	190
<i>E. grandis</i>	$F_{\text{máx}}$ (KJ/m <sup>2</sup> )	46,37 <sup>±5,59</sup> a	39,68 <sup>±5,18</sup> b	31,67 <sup>±4,12</sup> c
		Tempo (min)		
		30	60	
		41,50 <sup>±7,89</sup> a		36,98 <sup>±7,13</sup> b

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $F_{\text{máx}}$ : resistência máxima ao impacto. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 1% de significância.

Por meio da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para a  $F_{\text{máx}}$  em ambas as espécies (Apêndice I). Na madeira de *P. elliottii* somente os tratamentos P150-1 e P190-2 não diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 13). Em que, no tratamento P190-2 houve degradação dos polímeros da madeira, principalmente as hemiceluloses, o que impediu o aumento da  $F_{\text{máx}}$ . Além disso, foi observado que a  $F_{\text{máx}}$  no tratamento P150-2 apresentou valores 46% superiores do tratamento controle, o que demonstra que a densificação utilizando esses parâmetros é eficiente na melhoria da  $F_{\text{máx}}$  para a espécie *P. elliottii*.

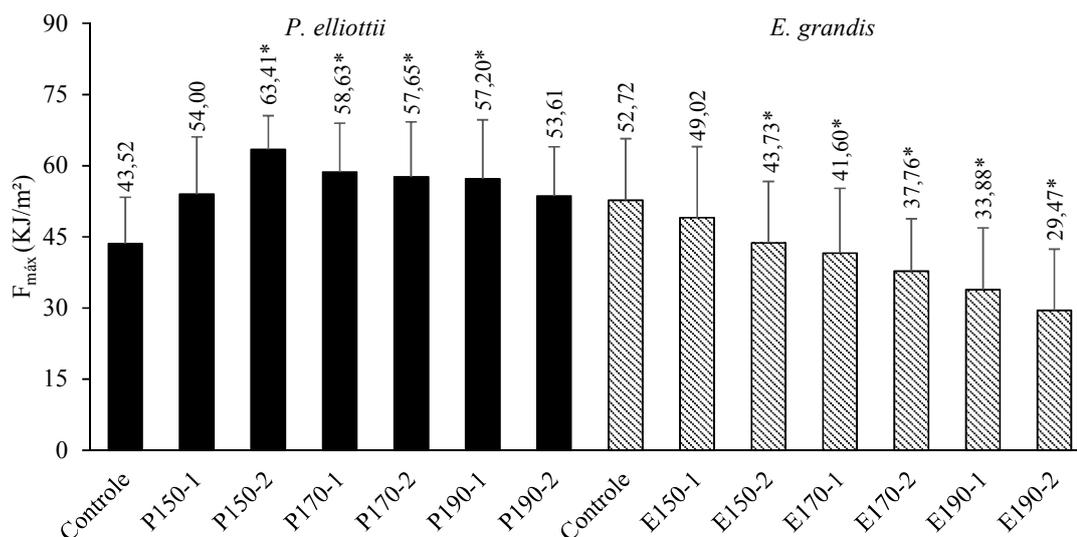


Figura 13 – Resistência máxima ao impacto ( $F_{máx}$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Na madeira de *E. grandis* foi verificado que somente o E150-1 não diferiu do controle (teste de Dunnett). Para os demais tratamentos houve redução na  $F_{máx}$ , em que, o tratamento E190-2 apresentou decréscimo de 44% em comparação ao controle. Nesse aspecto, nota-se que o aumento na densidade da madeira não foi suficiente para contornar o efeito da degradação térmica. Resultados semelhantes foram encontrados por Ulker et al. (2012), que obtiveram decréscimo de 6% nessa propriedade utilizando a temperatura de 160°C.

A partir dos resultados obtidos para a  $F_{máx}$  foi observado que tal propriedade foi a que sofreu maior a influência da aplicação de altas temperaturas. De acordo com Boonstra et al. (2007), isto ocorreu devido a clivagem das ligações covalentes (despolimerização) que unem a celulose com a hemicelulose, o que gerou um aumento proporcional da celulose cristalina.

### 5.2.3 Dureza Janka

#### 5.2.3.1 Dureza radial ( $H_{rd}$ )

Na ANOVA fatorial (Apêndice E) foi observado que as interações entre os fatores (temperatura e tempo) foram significativas para a dureza Janka no sentido radial ( $H_{rd}$ ) somente para a madeira densificada de *P. elliottii*. Já os fatores temperatura e tempo foram significativos, em ambas as espécies.

Analisando a influência da temperatura na  $H_{rd}$  para a madeira densificada de *P. elliotii* (Tabela 11), foi verificado que somente quando em conjunto com o tempo de compressão de 60 min houve diferença, em que ocorreu decréscimo de 8% na  $H_{rd}$  com o aumento da temperatura (150-190°C). Para o tempo de compressão foi verificado que somente houve diferença na temperatura de 150°C, o que proporcionou acréscimo de 16% na  $H_{rd}$  com o aumento do tempo de compressão (30-60 min). Já para a madeira densificada de *E. grandis* foi verificado que houve decréscimo de 36 e 9% na  $H_{rd}$ , conforme foi aumentada a temperatura e o tempo de compressão, respectivamente. Resultados semelhantes referentes a redução na dureza com o aumento da temperatura foram encontrados por Ulker et al. (2012), comprimindo a madeira de *P. sylvestris*, que verificaram decréscimos de 32% na dureza, quando a temperatura foi aumentada de 140°C para 160°C.

Tabela 11 - Desmembramento fatorial da dureza Janka no sentido radial ( $H_{rd}$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
<i>P. elliotii</i>	$H_{rd}$ (MPa)	30	113,61 <sup>±9,6</sup> aB	123,16 <sup>±12,7</sup> aA	121,21 <sup>±10,9</sup> aA
		60	131,38 <sup>±10,9</sup> aA	122,1 <sup>±6,4</sup> abA	119,76 <sup>±7,8</sup> bA
		-	78,74 <sup>±8,1</sup> a	60,80 <sup>±6,8</sup> b	50,26 <sup>±7,8</sup> c
<i>E. grandis</i>	$H_{rd}$ (MPa)	Tempo (min)			
		30	60		
		66,23 <sup>±13,1</sup> a	60,30 <sup>±14,5</sup> b		

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $H_{rd}$ : dureza Janka no sentido radial. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 5% de significância.

Por meio da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para a  $H_{rd}$  em ambas as espécies (Apêndice I). Na madeira de *P. elliotii* foi observado que a  $H_{rd}$  de todos os tratamentos diferiu do controle pelo teste de Dunnett (Figura 14), em que, o tratamento P150-2 foi 3,7 vezes superior ao controle, o que demonstra a eficiência da densificação na melhoria da  $H_{rd}$ , ou seja, no sentido em que foi realizada a compressão termomecânica.

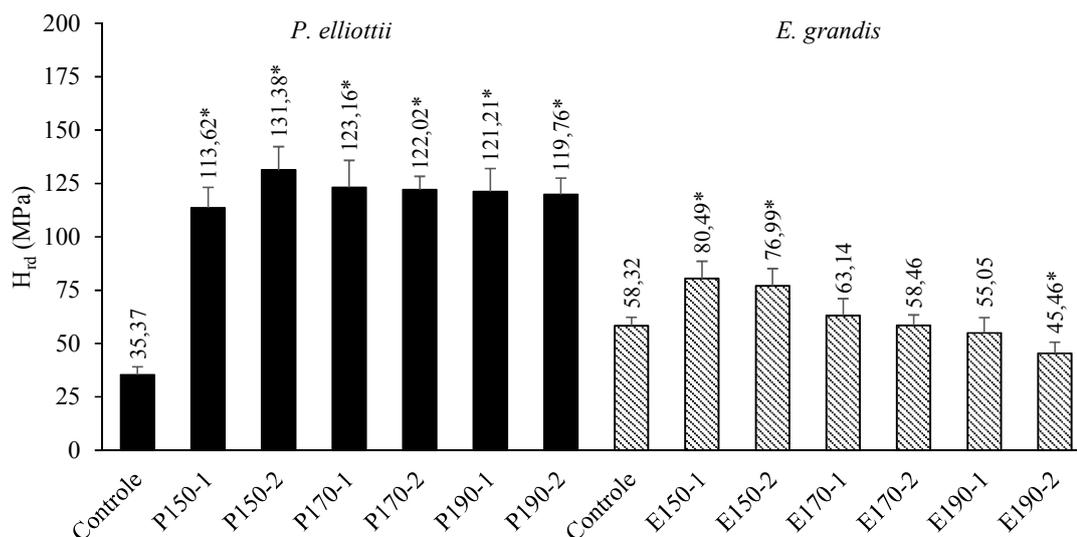


Figura 14 – Dureza Janka no sentido radial ( $H_{rd}$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Na madeira de *E. grandis* foi observado que a  $H_{rd}$  dos tratamentos E150-1 e E150-2 diferiram do controle (teste de Dunnett), apresentando valores 38 e 32% superiores, respectivamente. No entanto, quando foi utilizado o tratamento E190-2 também houve diferença, apresentando decréscimo de 22% em comparação ao controle.

O aumento na dureza para a madeira densificada é resultante da diminuição na quantidade de cavidades, proporcionada pelo processo de compressão, o que também resulta num aumento dos elementos de parede celular, que têm propriedades de suporte de carga por unidade de volume. Conforme Fang et al. (2012) o aumento na dureza deve-se ao fechamento dos vasos, lumens e achatamento das fibras. Já de acordo com Morsing (2000) isso é explicado pelo aumento do teor de lignina e a reorganização da matriz.

O aumento da dureza no sentido da compressão já foi verificado por Gong e Lamason (2007) que, pesquisando a densificação de seis espécies, obtiveram aumento de aproximadamente 120% na dureza utilizando o grau de compressão de 24%, temperatura de 145°C e tempo de compressão de 7 min. Além disso, os mesmos autores verificaram que a dureza apresentou relação positiva com a taxa de compressão. O que foi verificado no presente estudo somente para a madeira de *P. elliottii*.

### 5.2.3.2 Dureza tangencial ( $H_{tg}$ ) e longitudinal ( $H_{lg}$ )

A partir da ANOVA fatorial (Apêndice E) foi observado que as interações e os fatores (temperatura e tempo) foram significativos para a  $H_{tg}$  e  $H_{lg}$ , em ambas as espécies.

Analisando a influência da temperatura na  $H_{tg}$  para a madeira densificada de *P. elliotii* (Tabela 12), foi verificado que somente quando em conjunto com o tempo de compressão de 60 min houve diferença, em que ocorreu decréscimo de 11% na  $H_{tg}$  com o aumento da temperatura (150-190°C). Para o tempo de compressão foi observado que somente na temperatura de 150°C houve diferença, em que ocorreu acréscimo de 12% com o aumento do tempo (30-60 min). Já para a madeira densificada de *E. grandis* houve decréscimo de ~40 e ~30% na  $H_{tg}$ , conforme foi aumentada a temperatura e o tempo de compressão, respectivamente.

Tabela 12 - Desmembramento fatorial da dureza Janka no sentido tangencial ( $H_{tg}$ ) e longitudinal ( $H_{lg}$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo, para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*.

Espécie	Propriedade	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
			150	170	190
<i>P. elliotii</i>	$H_{tg}$ (MPa)	30	95,04 <sup>±5,85</sup> aB	99,28 <sup>±4,74</sup> aA	96,82 <sup>±5,48</sup> aA
		60	106,69 <sup>±5,67</sup> aA	97,86 <sup>±6,32</sup> bA	94,70 <sup>±6,76</sup> bA
	$H_{lg}$ (MPa)	30	98,13 <sup>±7,85</sup> aB	97,75 <sup>±8,63</sup> aA	95,43 <sup>±7,42</sup> aA
		60	103,47 <sup>±9,47</sup> aA	96,53 <sup>±7,41</sup> bA	94,10 <sup>±8,45</sup> bA
<i>E. grandis</i>	$H_{tg}$ (MPa)	30	60,53 <sup>±5,75</sup> aA	53,41 <sup>±6,44</sup> bB	38,95 <sup>±5,12</sup> cB
		60	58,88 <sup>±6,74</sup> aA	40,52 <sup>±4,55</sup> bA	30,81 <sup>±4,10</sup> cA
	$H_{lg}$ (MPa)	30	62,72 <sup>±5,37</sup> aA	53,13 <sup>±6,18</sup> bA	44,22 <sup>±5,23</sup> cA
		60	65,77 <sup>±8,13</sup> aA	46,93 <sup>±4,99</sup> bB	37,85 <sup>±5,92</sup> cB

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $H_{tg}$ : dureza Janka no sentido tangencial;  $H_{lg}$ : dureza Janka no sentido longitudinal. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 5% de significância.

A partir dos resultados da  $H_{lg}$  (Tabela 12), foi verificado que ambas as espécies apresentaram comportamento semelhante, sendo que o aumento da temperatura proporcionou redução desta propriedade. Para o aumento do tempo de compressão houve acréscimo na  $H_{lg}$  para a temperatura de 150°C e redução nas temperaturas de 170 e 190°C.

A partir da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para a  $H_{tg}$ , em ambas as espécies (Apêndice I). Na madeira de *P. elliotii* todos os tratamentos diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 15), em que, a  $H_{tg}$  do tratamento

P150-2 foi 2,8 vezes superior do controle, ocasionado principalmente pelo aumento da densidade da madeira tratada. Resultados semelhantes foram obtidos por Ulker et al. (2012) que, encontraram acréscimos de 148% na  $H_{tg}$  em comparação com o controle, tratando a madeira de *Pinus sylvestris* a 160°C.

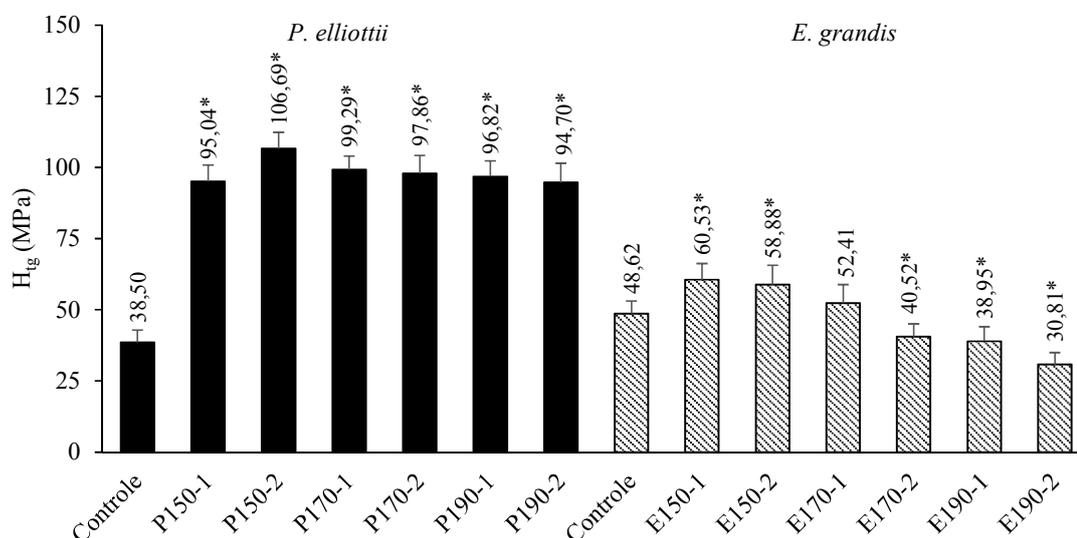


Figura 15 – Dureza Janka no sentido tangencial ( $H_{tg}$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Na madeira de *E. grandis* foi observado que a  $H_{tg}$  do tratamento E150-1 foi 24% superior ao controle (Figura 15). Enquanto que os tratamentos mais severos apresentaram redução nessa propriedade, em que, no E190-2 houve decréscimo de 37% em relação ao controle, desse modo, o aumento da densidade não foi suficiente para compensar a degradação térmica provocada pelas altas temperaturas.

Para a  $H_{tg}$  foi observado através da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice I). Na madeira de *P. elliottii* todos os tratamentos diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 16), em que, a  $H_{tg}$  do tratamento P150-2 foi 98% superior do controle.

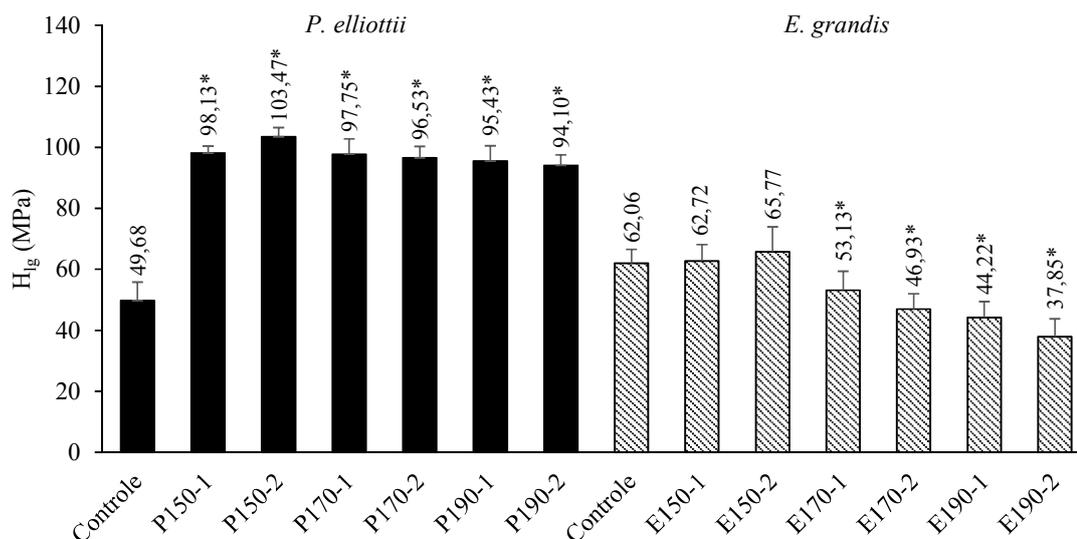


Figura 16 – Dureza Janka no sentido longitudinal ( $H_{lg}$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Avaliando a  $H_{lg}$  na madeira de *E. grandis* foi observado que os tratamentos E150-1 e E150-2 não diferiram do controle (teste de Dunnett). Já para os demais tratamentos foi identificado que houve decréscimo na  $H_{lg}$ , em que, o E190-2 apresentou decréscimo de 39% em relação ao controle.

De acordo com Bowyer et al. (2003) a maior intensidade de aumento da dureza em relação ao MOR e MOE, está ligado ao fato que essa propriedade relaciona-se a uma função exponencial da densidade. Desse modo, a dureza é mais afetada pela densificação do que a flexão estática.

### 5.3 Espectrometria no infravermelho (ATR – IR)

As principais alterações químicas que ocorreram após a aplicação dos tratamentos termomecânicos nas madeiras de *P. elliottii* e *E. grandis* (Figura 17), foram identificadas por meio das intensidades de pico:  $1732\text{ cm}^{-1}$  (C=O alongamento em grupos carboxilos das hemiceluloses, lignina e extrativos e/ou alongamento em grupos éster em lignina e extrativos),  $1507\text{ cm}^{-1}$  (C=C vibração de ligações do esqueleto aromático),  $1374\text{ cm}^{-1}$  (deformação C-H, em hidratos de carbono),  $1339\text{ cm}^{-1}$  (OH no plano de flexão em celulose),  $1318\text{ cm}^{-1}$  (CH<sub>2</sub> das estruturas dos carboidratos),  $1165\text{ cm}^{-1}$  (ponte assimétrica de C-O-C e alongamento simétrico C-C em hidratos de carbono). As caracterizações dos picos foram baseadas em pesquisas anteriores (COLOM et al., 2003; HAKKOU et al., 2005; DIOUF et al., 2011).

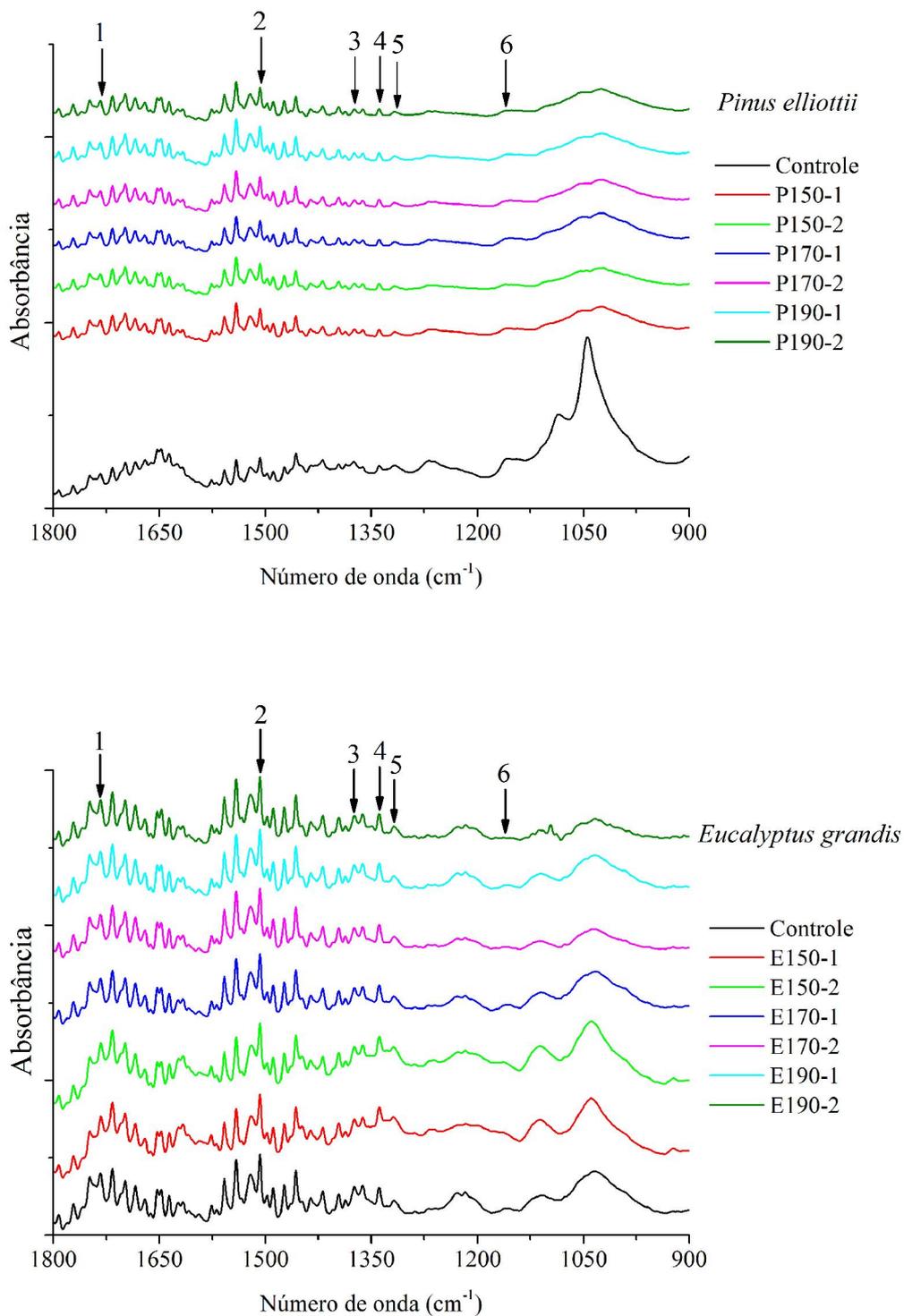


Figura 17 - Espectros ATR-IR das madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* submetida a tratamentos termomecânicos. Em que: 1= 1732 cm<sup>-1</sup>; 2= 1507 cm<sup>-1</sup>; 3= 1374 cm<sup>-1</sup>; 4= 1339 cm<sup>-1</sup>; 5= 1318 cm<sup>-1</sup>; 6= 1160 cm<sup>-1</sup>.

Por meio da Tabela 13 é possível identificar a razão dos picos correspondentes aos principais grupos funcionais alterados. Dessa maneira, nota-se que os acréscimos em  $I_{1732/1030}$  após a densificação para ambas as espécies, foram ocasionados principalmente devido a degradações de grupos carboxílicos (grupos acetil) (WINDEISEN; WEGENER, 2008), resultando em aumento proporcional da lignina.

Tabela 13 - Relação de picos correspondentes as principais variações das madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis* tratada termomecanicamente.

Espécie	Tratamento	$I_{1732/1030}$	$I_{1507/1030}$	$I_{1374/1030}$	$I_{1339/1030}$	$I_{1318/1030}$	$I_{1160/1030}$
<i>P. elliotii</i>	Controle	0,260	0,397	0,325	0,326	0,330	0,380
	P150-1	0,650	0,953	0,407	0,413	0,351	0,410
	P150-2	0,796	1,185	0,454	0,461	0,368	0,422
	P170-1	0,526	0,829	0,357	0,465	0,373	0,391
	P170-2	0,674	1,093	0,410	0,470	0,379	0,428
	P190-1	0,728	1,220	0,449	0,465	0,375	0,438
	P190-2	0,654	1,054	0,404	0,480	0,384	0,447
<i>E. grandis</i>	Controle	0,759	1,298	0,732	0,723	0,498	0,356
	E150-1	0,788	1,314	0,751	0,902	0,780	0,569
	E150-2	0,762	1,335	0,789	0,835	0,767	0,568
	E170-1	0,863	1,352	0,769	0,740	0,784	0,532
	E170-2	1,618	2,695	1,059	1,182	0,797	0,550
	E190-1	1,091	1,576	0,790	0,822	0,847	0,639
	E190-2	1,775	2,731	1,139	1,207	0,895	0,618

O incremento de  $I_{1507/1030}$  em ambas as espécies foi causado pela divisão da cadeia alifática lateral da lignina e/ou reações de condensação, conforme já relatado por Windeisen e Wegener (2008). Já o acréscimo de  $I_{1374/1030}$  pode ser atribuído a mudanças conformacionais dos componentes glicosídicos de madeira (COLOM et al., 2003; HAKKOU et al., 2005), indicando que houve clivagem das hemiceluloses, celulose amorfa e formação de novos constituintes.

Os picos 1339 e 1318  $\text{cm}^{-1}$  identificados na Figura 17, são característicos da celulose cristalina, conforme já relatado por Colom et al. (2003). Nesse aspecto, os aumentos de  $I_{1339/1030}$  e  $I_{1318/1030}$  (Tabela 13) indicaram que a densificação com altas temperaturas proporcionou degradação mais intensa da celulose amorfa, provocando acréscimos proporcionais na celulose cristalina. Esses resultados são similares aos obtidos por Lesar et al. (2013), que destacam que a densificação afeta a cristalinidade da celulose.

O incremento de  $I_{1160/1030}$  foi maior nos tratamentos mais severos (P190-2 e E190-2), corroborando com os resultados obtidos por Lesar et al. (2013) que encontraram aumento nas bandas de absorção quando realizou a densificação com as temperaturas mais altas (200 e

220°C). De acordo com Colom et al. (2003) esse acréscimo deve-se a formação de novas ligações de éter, resultantes da reação entre as hemiceluloses e subprodutos da lignina.

Segundo Diouf et al. (2011) a densificação com a temperatura de 160°C proporciona a clivagem das hemiceluloses e quando são utilizadas temperaturas mais elevadas ocorre a formação de um novo complexo de lignina. Já conforme Kutnar et al. (2008b) as medições dos espectros de FTIR não mostraram mudanças em relação ao controle para a madeira densificada de *Populus deltoides*, tratadas a temperatura de 175°C por 15 minutos.

## 5.4 Ensaios de superfície

### 5.4.1 Colorimetria

A partir da Figura 18, pode-se observar o escurecimento das madeiras de *P. elliotii* e *E. grandis* após a realização dos tratamentos termomecânicos. Além disso, foi verificado que quanto maior foi a temperatura e o tempo de compressão empregado no processo (principalmente a 190°C), maior foi o escurecimento superficial do material. Cabe destacar que a alteração na cor provocada pelo acréscimo do tempo de compressão foi inferior que o efeito da temperatura.



Figura 18 – Avaliação visual dos corpos de prova controle e os tratados termomecânicamente na seção tangencial das madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*. Tratamentos: 1 = Controle; 2 = P150-1; 3 = P150-2; 4 = P170-1; 5 = P170-2; 6 = P190-1; 7 = P190-2; 8 = Controle; 9 = E150-1; 10 = E150-2; 11 = E170-1; 12 = E170-2; 13 = E190-1; 14 = E190-2.

Por meio das variações dos parâmetros CIE- $L^*a^*b^*$ , entre os tratamentos realizados, foi observado que somente o fator temperatura foi significativo para o índice de claridade ( $L^*$ ) e a coordenada cromática  $b^*$  em ambas as espécies (Apêndice F). Para a coordenada cromática  $a^*$  foi observado que os fatores temperatura e tempo foram significativos somente para a espécie *P. elliotii* (Apêndice F).

A partir da análise de claridade  $L^*$  (Tabela 14), foi verificado que houve redução de ~4% com o acréscimo da temperatura (150-190°C), em ambas as espécies. Para a coordenada cromática  $a^*$  foi constatado que o aumento da temperatura proporcionou acréscimo de 16% para a madeira densificada de *P. elliotii*. Já o aumento da temperatura para a coordenada cromática  $b^*$  proporcionou acréscimo de 3% nas madeiras de *P. elliotii* e decréscimo de 10% no *E. grandis*.

Tabela 14 - Desmembramento fatorial para os índices de claridade ( $L^*$ ), coordenada cromática vermelho-verde ( $a^*$ ) e coordenada cromática azul-amarelo ( $b^*$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis* na face tangencial.

Espécie	Propriedade	Temperatura (°C)		
		150	170	190
<i>P. elliotii</i>	$L^*$	71,96 <sup>±0,57</sup> a	71,26 <sup>±1,05</sup> a	70,00 <sup>±1,13</sup> b
		6,48 <sup>±0,61</sup> b	6,98 <sup>±0,63</sup> ab	7,52 <sup>±0,63</sup> a
	$a^*$	Tempo (min)		
		30	60	
		6,76 <sup>±0,65</sup> b	7,21 <sup>±0,78</sup> a	
	$b^*$	Temperatura (°C)		
150		170	190	
28,55 <sup>±0,84</sup> b		28,97 <sup>±0,74</sup> ab	29,44 <sup>±0,72</sup> a	
<i>E. grandis</i>	$L^*$	61,51 <sup>±1,87</sup> a	60,77 <sup>±1,61</sup> a	58,32 <sup>±1,91</sup> b
	$a^*$	Média	Máximo	Mínimo
		13,75 <sup>±0,72</sup>	15,09	12,37
	$b^*$	Temperatura (°C)		
		150	170	190
		20,25 <sup>±1,01</sup> a	19,87 <sup>±0,58</sup> a	18,21 <sup>±0,93</sup> b

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $L^*$ : índices de claridade;  $a^*$ : coordenada cromática vermelho-verde;  $b^*$ : coordenada cromática azul-amarelo. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 5% de significância.

Para o índice de claridade ( $L^*$ ) foi verificado que o aumento da temperatura e do tempo de compressão proporcionaram decréscimo de aproximadamente 5% no  $L^*$ . Del Menezzi (2004) também encontrou resultados semelhantes para a  $L^*$ , obtendo decréscimos de 7,69 e 2,63% com o aumento da temperatura (190-220°C) e do tempo (12-20min), respectivamente.

Por meio da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para o  $L^*$  em ambas as espécies (Apêndice J). Todos os tratamentos termomecânicos diferiram do controle (teste de Dunnett), tanto para o *P. elliotii* como o *E. grandis* (Figura 19), em que, os índices de claridade dos tratamentos P190-2 e E190-2 apresentaram decréscimos de 12 e 18%, respectivamente. Isso demonstra que a madeira tornou-se mais escura após a

compressão, conforme já relatado por Atik et al. (2013). De acordo com Cademartori et al. (2013b) o decréscimo no  $L^*$  está relacionado com a degradação das hemiceluloses e com a variação do conteúdo de extrativos na madeira.

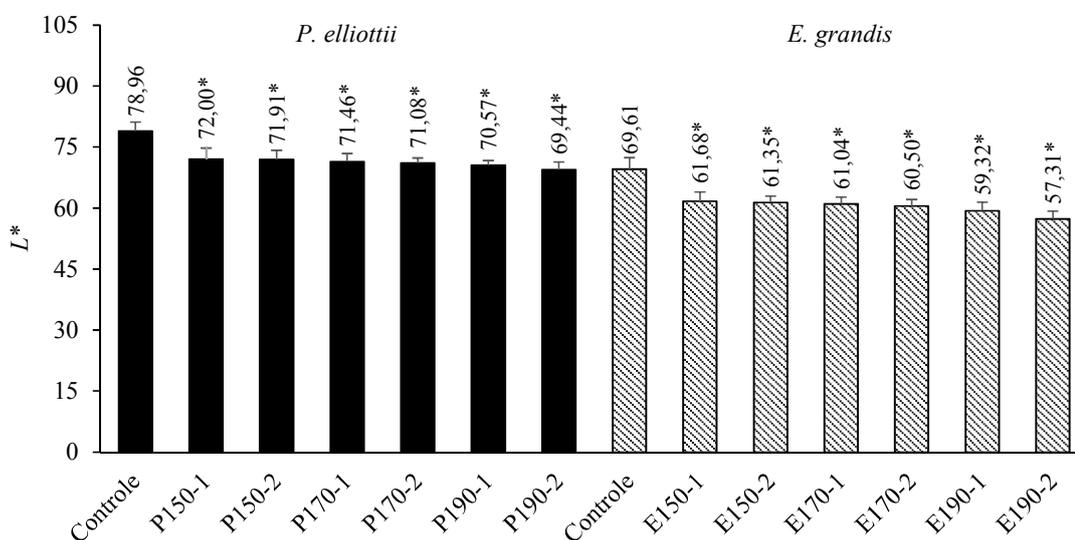


Figura 19 – Índices de claridade ( $L^*$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Para a coordenada cromática  $a^*$  foi observado através da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle somente no *P. elliottii* (Apêndice J). Além disso, foi observado para tal espécie que todos os tratamentos diferiram do controle (teste de Dunnett), em que a coordenada  $a^*$  do tratamento P190-2 foi 45% superior do controle (Figura 20).

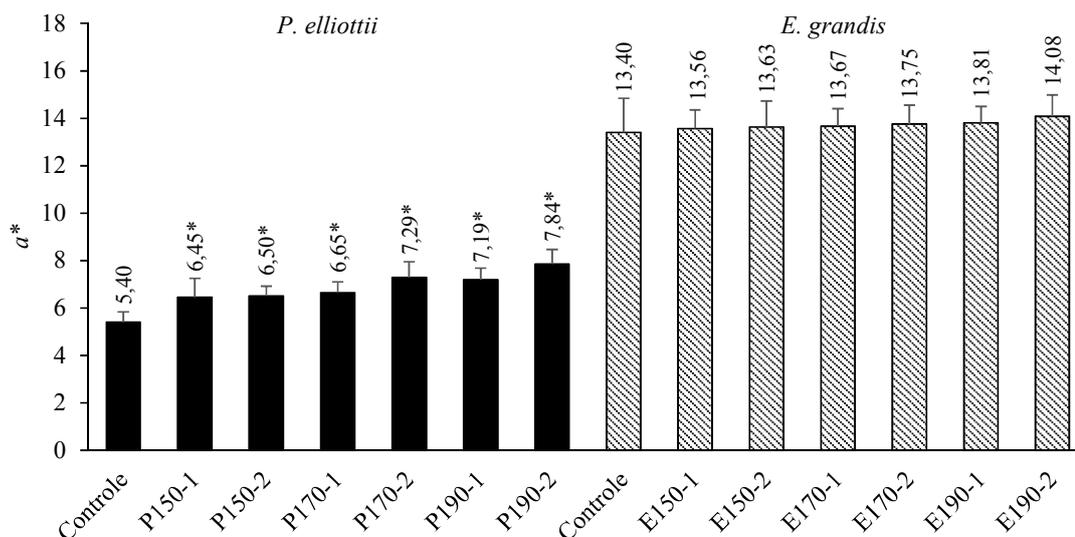


Figura 20 – Coordenada cromática vermelho-verde ( $a^*$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Conforme Chen et al. (2012) o acréscimo da coordenada cromática  $a^*$  está relacionado com a condensação, degradação e/ou oxidação de produtos durante os tratamentos térmicos da madeira. Os mesmos autores afirmaram que as proantocianidinas, lignina e outros extrativos são condensados formando subprodutos. O que contribui para aumento da intensidade do tom vermelho na amostra, conforme foi verificado na madeira de *P. elliottii*.

Para a coordenada cromática  $b^*$  foi observado através da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice J). Na madeira de *P. elliottii* todos os tratamentos diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 21), em que para a coordenada  $b^*$  o tratamento P190-2 foi 35% superior do controle. Para o *E. grandis* foi verificado que somente os tratamentos E190-1 e E190-2 diferiram do controle, apresentando decréscimo de 10%, ocasionado principalmente pelas concentrações de ligninas solúveis e polifenóis (MORI et al., 2004).

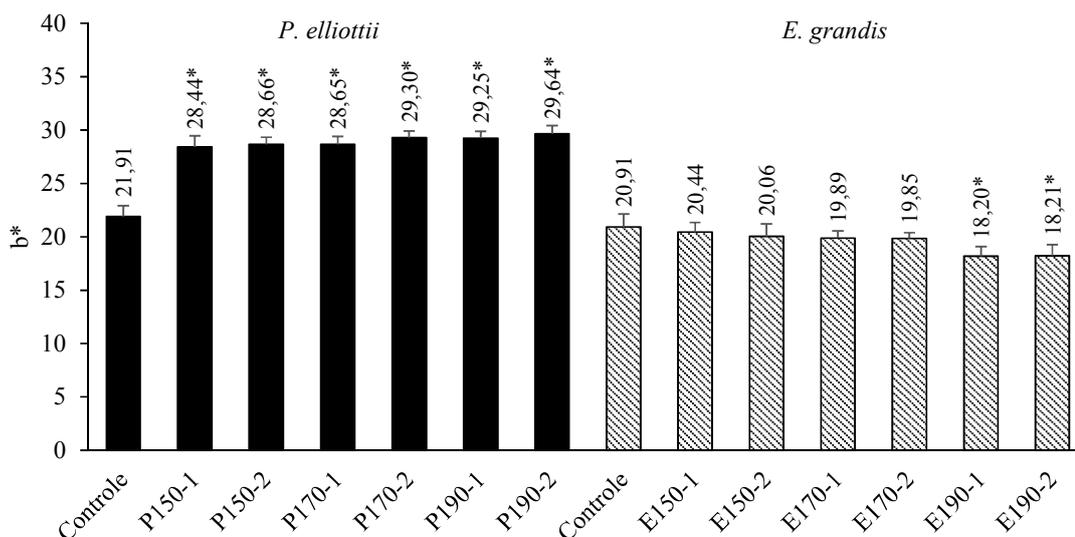


Figura 21 – Coordenada cromática azul-amarelo ( $b^*$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

A explicação para o acréscimo na coordenada  $b^*$  na madeira densificada de *P. elliottii* está relacionada com a quantidade proporcional de lignina e modificações em sua estrutura (PINCELLI et al., 2012). Por outro lado, de acordo com Cademartori et al. (2013a), a redução da coordenada cromáticas  $b^*$  na madeira de *E. grandis* confirma o aspecto de perda da tonalidade amarela e aumento da tonalidade azul, que são características de madeiras que foram submetidas a altas temperaturas.

Por meio da ANOVA fatorial (Apêndice F) da saturação de cor ( $*C$ ) e ângulo de tinta ( $h^\circ$ ) foi observado que as interações entre os fatores não foram significativas em ambas as espécies. Já o fator temperatura foi significativo em ambas as espécies e o tempo de compressão foi significativo somente na madeira de *P. elliottii*. Para o ângulo de tinta ( $h^\circ$ ) foi observado que os fatores temperatura e tempo somente foram significativos somente para o *E. grandis*.

Para a influência da temperatura na saturação de cor ( $*C$ ) foi observado que na madeira de *P. elliottii* o aumento da temperatura e do tempo de compressão provocaram acréscimos nos valores desse índice (Tabela 15). Já para o *E. grandis* ocorreu o inverso, houve diminuição na  $C^*$  de 9% com o aumento da temperatura. Para o ângulo de tinta ( $h^\circ$ ) foi observado que na madeira de *E. grandis* ocorreu decréscimo com o aumento da temperatura e do tempo de compressão.

Tabela 15 - Desmembramento fatorial para a saturação de cor ( $C^*$ ) e ângulo de tinta ( $h^\circ$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* na face tangencial.

Espécie	Propriedade	Temperatura (°C)			
		150	170	190	
<i>P. elliottii</i>	$C^*$	29,32 <sup>±0,66</sup> b	29,71 <sup>±0,84</sup> ab	30,06 <sup>±0,81</sup> a	
		Tempo (min)			
		30		60	
		29,27 <sup>±0,65</sup> b		30,12 <sup>±0,74</sup> a	
	$h^\circ$	Média		Máximo	Mínimo
		77,09 <sup>±0,59</sup>		78,21	75,58
<i>E. grandis</i>	$C^*$	23,98 <sup>±1,06</sup> a	23,50 <sup>±0,71</sup> a	21,89 <sup>±0,67</sup> b	
		56,78 <sup>±0,92</sup> a	55,73 <sup>±0,70</sup> b	55,05 <sup>±1,17</sup> b	
		Tempo (min)			
	30		60		
		56,19 <sup>±1,17</sup> a		55,52 <sup>±1,11</sup> b	

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>;  $C^*$ : saturação de cor;  $h^\circ$ : ângulo de tinta. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 5% de significância.

Para a saturação de cor ( $C^*$ ) foi observado através da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice J). Na madeira de *P. elliottii* todos os tratamentos diferiram do controle pelo teste de Dunnett (Figura 22), em que para a  $C^*$  o tratamento P190-2 foi 38% superior do controle. Para o *E. grandis* foi observado que a  $C^*$  do tratamento E190-2 apresentou decréscimo de 13% em relação ao controle. De acordo com Cademartori et al. (2013b) os decréscimos na saturação estão relacionados com a maior influência de tons cinza escuro após a aplicação de altas temperaturas.

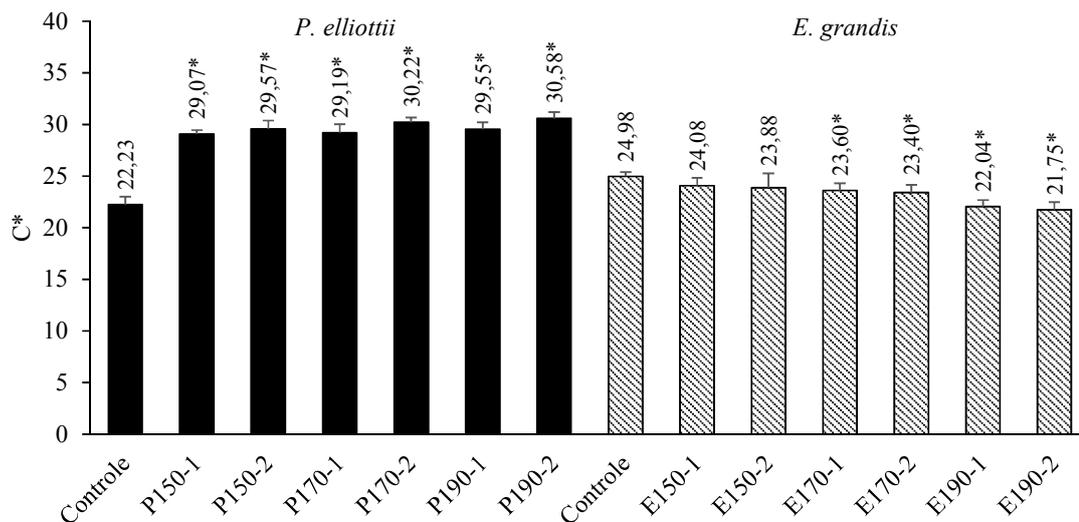


Figura 22 – Saturação de cor ( $C^*$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Para o ângulo de tinta ( $h^\circ$ ) foi observado por meio da ANOVA que houve diferença entre a madeira densificada e o controle em ambas as espécies (Apêndice J). Na madeira de *P. elliottii* todos os tratamentos diferiram do controle (teste de Dunnett), aumentando 3% o  $h^\circ$  (Figura 23). Já para a madeira de *E. grandis* foi observado que os tratamentos E150-1 e E150-2 não diferiram do controle, em que os demais tratamentos apresentaram redução de aproximadamente 4% no  $h^\circ$ .

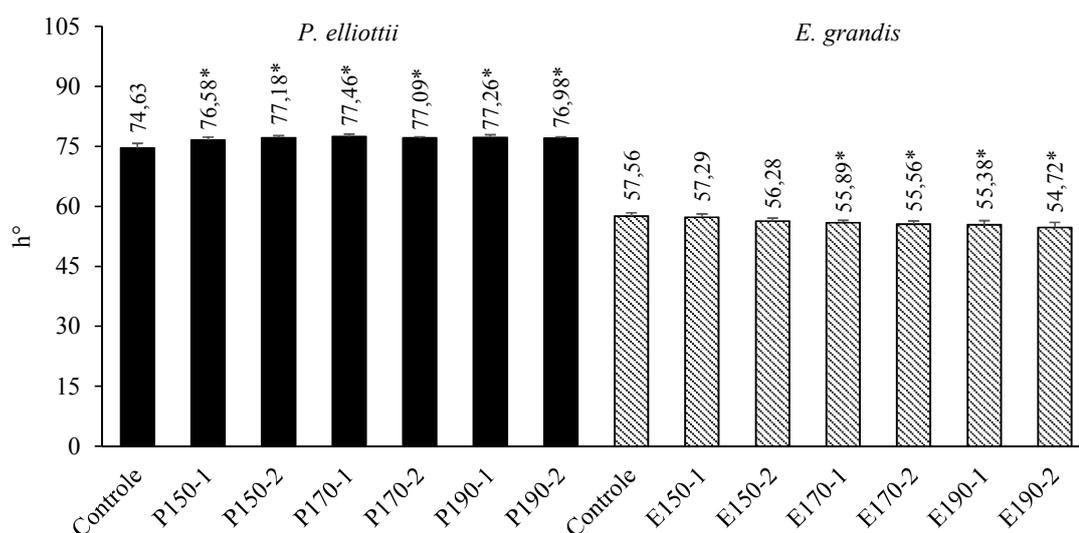


Figura 23 – Ângulo de tinta ( $h^\circ$ ) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

As alterações no  $h^\circ$  devido à aplicação de altas temperaturas e a compressão apresentaram comportamentos distintos entre as espécies, em que na madeira densificada de *P. elliotii* a cor predominante é amarelo. Já para o *E. grandis* a densificação proporcionou uma substituição de tons de amarelo para vermelho. Conforme Tolvaj e Németh (2008) o  $h^\circ$  varia entre 0 e 90°, sendo que 0° está relacionada com a cor vermelha e 90° com a cor amarela.

Para a variação total de cor ( $\Delta E$ ) foi observado que o aumento da temperatura e do tempo de compressão proporcionaram acréscimos na  $\Delta E$ , em ambas as espécies (Figura 24). Na madeira de *P. elliotii* a  $\Delta E$  do tratamento P190-2 foi 30% superior ao P150-1 e para o *E. grandis* o acréscimo foi de 59%, quando comparados os tratamentos E150-1 com o E190-2.

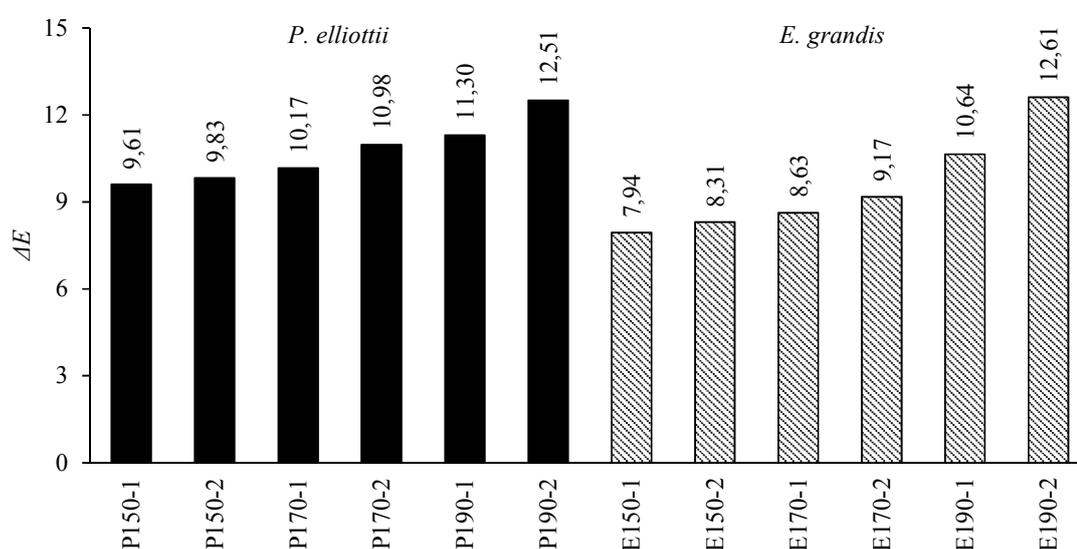


Figura 24 – Variação total de cor ( $\Delta E^*$ ) para as madeiras de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett).

De acordo com Mayer e Koch (2007) e Sundqvist et al. (2006) a madeira escurece proporcionalmente ao acréscimo na temperatura de densificação. Esse fato é atribuível a reações de polimerização da lignina durante o tratamento. Segundo Sundqvist e Morén (2002) a mudança de cor provém de mudanças complexas e degradação de hemicelulose, lignina e certos compostos extrativos. Já Conforme Kutnar et al. (2009) a clivagem de ligações arilglicerol- $\beta$ -aril éter da lignina produz compostos intermediários de degradação de lignina tais como quinona meteto e quinona, que são fortemente coloridos tornando a madeira tratada mais escura.

De acordo com o agrupamento de Cluster (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001), que utiliza as variáveis cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e  $h$ , para designar a cor da madeira, foi verificado que a madeira natural de *P. elliotii* classifica-se como branca e a densificada amarelo claro. Já a madeira natural de *E. grandis* foi classificada como rosa e a densificada marron-claro. Cabe destacar que os diferentes parâmetros utilizados durante a densificação não foram suficientes para alterar a classificação colorimétrica entre os tratamentos da madeira.

#### 5.4.2 Rugosidade de superfície

Por meio da ANOVA fatorial (Apêndice G) dos parâmetros de rugosidade foi observado que as interações entre os fatores não foram significativas em ambas as espécies. Além disso, foi verificado que na rugosidade média ( $R_a$ ) somente o fator temperatura foi significativo na madeira de *P. elliotii*. Na rugosidade quadrática ( $R_q$ ) somente o fator temperatura foi significativo para a madeira densificada de *E. grandis*. Para a rugosidade profundidade média ( $R_z$ ) foi observado que na madeira de *P. elliotii* os fatores temperatura e tempo foram significativos, enquanto que no *E. grandis* somente o fator temperatura foi significativo. Já para a rugosidade total ( $R_t$ ), os fatores temperatura e tempo foram significativos para ambas as espécies.

Avaliando a influência da temperatura na  $R_a$  (Tabela 16), foi observado que para a madeira de *P. elliotii* o aumento da temperatura (150-190°C) provocou decréscimo de 17%. Na  $R_q$  para o *E. grandis* foi identificado que houve decréscimo de 13% com o aumento da temperatura. Para a  $R_z$  notou-se que o aumento da temperatura proporcionou decréscimo de 13 e 6% para a madeira de *P. elliotii* e *E. grandis*, respectivamente. Já para a  $R_t$  foi verificado que houve decréscimo de 15 e 11% com aumento da temperatura, na madeira de *P. elliotii* e *E. grandis*, respectivamente. Diante de tais resultados, foi observado que a densificação da madeira produz uma superfície mais lisa, conforme já foi relatado por Candan et al. (2010), Bekhta et al. (2012).

Tabela 16 – Desmembramento fatorial para rugosidade média (Ra), quadrática (Rq), profundidade média (Rz) e total (Rt) em razão dos fatores temperatura e tempo para madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* na face tangencial.

Espécie	Propriedade	Temperatura (°C)			
		150	170	190	
<i>P. elliottii</i>	Ra	5,02 <sup>±0,85</sup> a	4,54 <sup>±0,79</sup> b	4,16 <sup>±0,40</sup> c	
	Rq	Média		Máximo	Mínimo
		4,63 <sup>±0,75</sup>	6,15	3,43	
	Rz	Temperatura (°C)			
		150	170	190	
		13,47 <sup>±1,34</sup> a	12,38 <sup>±1,17</sup> ab	11,65 <sup>±1,00</sup> b	
		Tempo (min)			
		30	60		
		12,93 <sup>±1,47</sup> a	12,07 <sup>±1,14</sup> b		
	Rt	Temperatura (°C)			
		150	170	190	
		14,48 <sup>±0,79</sup> a	13,76 <sup>±1,13</sup> a	12,27 <sup>±1,33</sup> b	
Tempo (min)					
30		60			
13,97 <sup>±1,05</sup> a		13,03 <sup>±1,62</sup> b			
<i>E. grandis</i>	Ra	Média	Máximo	Mínimo	
	4,10 <sup>±0,43</sup>	5,38	3,24		
	Rq	Temperatura (°C)			
		150	170	190	
	4,78 <sup>±0,44</sup> a	4,42 <sup>±0,50</sup> ab	4,14 <sup>±0,40</sup> b		
	Rz	11,10 <sup>±0,65</sup> a	10,85 <sup>±0,45</sup> ab	10,39 <sup>±0,58</sup> b	
		12,14 <sup>±0,70</sup> a	11,50 <sup>±0,49</sup> b	10,86 <sup>±0,65</sup> c	
	Rt	Tempo (min)			
		30	60		
	11,73 <sup>±0,79</sup> a	11,27 <sup>±0,75</sup> b			

Em que: Média<sup>±desvio padrão</sup>; Ra: rugosidade média; Rq: rugosidade quadrática; Rz: rugosidade profundidade média; Rt: rugosidade total. Médias com letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não possuem diferença estatística, segundo o teste de médias (Tukey) em 5% de significância.

Por meio da ANOVA foi observado que houve diferença entre a madeira densificada e o controle para a Ra, Rq, Rz e Rt em ambas as espécies (Apêndice K). Todos os tratamentos termomecânicos diferiram do controle (teste de Dunnett), tanto para o *P. elliottii* como o *E. grandis* (Figura 25), em que, houve redução em todos os parâmetros de ~35 e ~60% na madeira de *P. elliottii* e *E. grandis*, respectivamente.

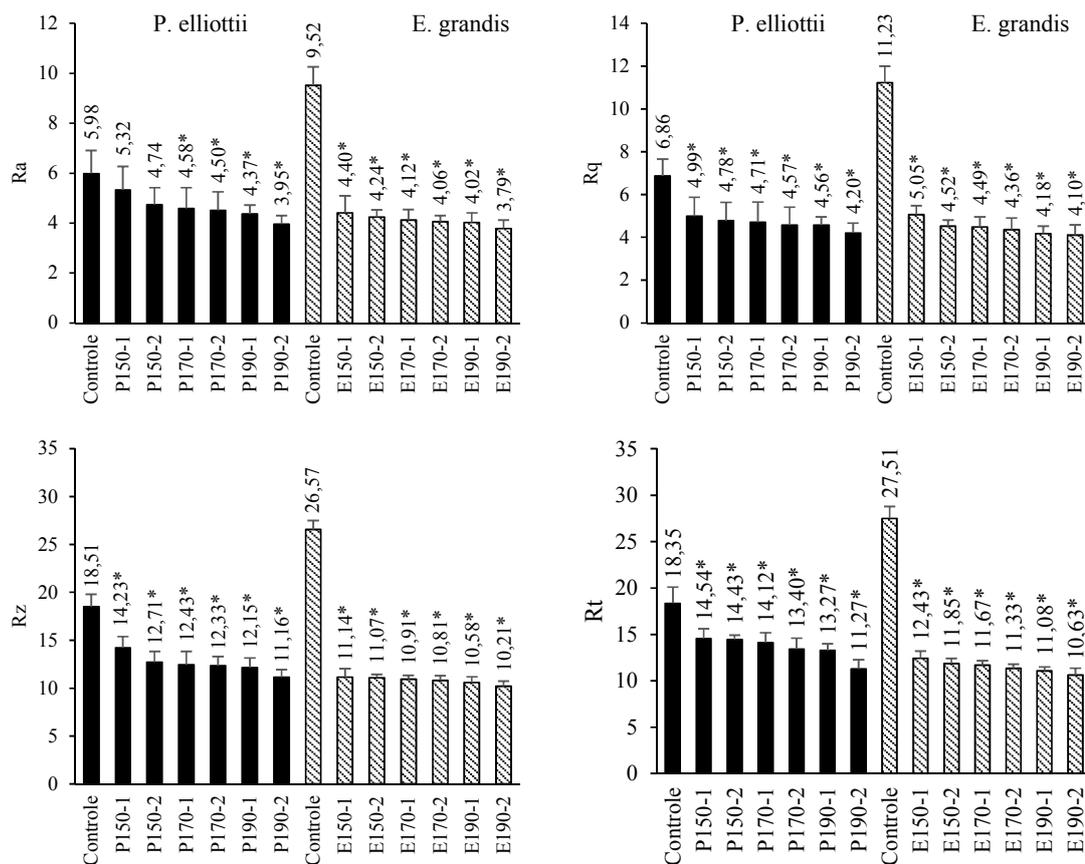


Figura 25 – Rugosidade média (Ra), quadrática (Rq), profundidade média (Rz) e total (Rt) para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* após realização de diferentes tratamentos termomecânicos. Em que: \* diferença significativa em 5% de significância (teste de Dunnett). As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

A redução dos parâmetros de rugosidade foi causada pela combinação de compressão e calor. A densificação provocou a compressão das estruturas da madeira como os raios, vasos e fibras, reduzindo as irregularidades (ARRUDA, 2012). Além disso, o calor ocasionou a termoplásticação da lignina, tornando-a mais viscosa enquanto quente e solidificando quando esfria (UNSAI et al., 2011). Já conforme Christiansen (1990) e Bekhta et al. (2012) a diminuição da rugosidade deve-se a exsudação de extrativos para a superfície, a reorganização de suas moléculas, redução de poros e microfissuras na parede celular.

Cabe destacar que o tratamento controle da madeira de *P. elliottii* apresentou menor rugosidade superficial quando comparada com a madeira de *E. grandis*. Todavia foi verificado que após a densificação a madeira de *E. grandis* tornou-se mais regular, demonstrando que a densificação apresenta efeito mais pronunciado na diminuição da rugosidade em folhosas.

De acordo com Korkut e Guller (2008) a diminuição na rugosidade (superfície mais suaves) proporciona melhoria na qualidade da madeira, pois aumenta suas aplicações, além de reduzir a perda de material em máquinas de acabamento.

## 6 CONCLUSÕES

Os tratamentos termomecânicos proporcionaram alterações na maioria das propriedades tecnológicas da madeira, dentre elas destacaram-se:

- O grau de compressão, perda de massa e a densidade da madeira densificada aumentaram com o acréscimo da temperatura;
- O teor de umidade de equilíbrio apresentou maior decréscimo nos tratamentos mais severos, ocasionado pela degradação dos constituintes e também pela migração da resina para a superfície da madeira de *P. elliotii*;
- A estabilidade dimensional foi reduzida, principalmente no sentido da compressão (radial), ocasionado pelo efeito *springback*;
- A higroscopicidade foi aumentada em ambas as espécies, ocasionada pela maior densidade e inchamento volumétrico;
- As propriedades mecânicas apresentaram acréscimos com a densificação, com exceção da dureza Janka e flexão dinâmica na madeira de *E. grandis* tratada com altas temperaturas;
- Na análise de Espectrometria no Infravermelho foi verificado por meio da razão de pico que houve degradação de hemiceluloses e celulose amorfa, proporcionando aumento proporcional de celulose cristalina e lignina;
- A cor da madeira apresentou perda de claridade, tornando-se mais escura. Em que a madeira densificada de *P. elliotii* e *E. grandis* foram classificadas como amarelo claro e marrom-claro, respectivamente;
- A rugosidade de superfície foi reduzida pelo efeito do calor e pressão, tornando a superfície da madeira mais regular.

## **7 RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS**

Diante das alterações ocorridas nas propriedades tecnológicas indica-se utilizar tratamento termomecânico com a temperatura de 150°C e o tempo de compressão de 60 minutos. No entanto, notou-se a necessidade da realização de pós-tratamento, para obter melhorias na estabilidade dimensional e higroscopicidade da madeira densificada.

Com base nas conclusões anteriores, a densificação possibilita que a madeira com a resistência mecânica aumentada possa ser utilizada como assoalhos e revestimentos, mesmo para as madeiras macias (coníferas).

## REFERÊNCIAS

ABNT. **Projeto de estruturas de madeira - NBR 7190**: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): 107 p. 1997.

ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012/ABRAF**. Brasília: 148 p. 2013.

AKGÜL, M.; GÜMÜŞKAYA, E.; KORKUT, S. Crystalline structure of heat-treated Scots pine [*Pinus sylvestris* L.] and Uludağ fir [*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmuelleriana* (Mattf.)] wood. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 281-289, 2008.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDO, K.; ONDA, H. Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure I: Effect of anatomy on the initial deformation process during radial compression. **Journal of Wood Science**, v. 45, n. 2, p. 120-126, 1999.

ARRUDA, L. M. **Modificação termomecânica da madeira de Amescla (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): efeito sobre as propriedades de lâminas e compensados**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)- Universidade de Brasília, Brasília. 2012.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S. Effect of thermomechanical treatment on physical properties of wood veneers. **International Wood Products Journal**, v. 4, n. 4, p. 217-224, 2013.

ASSOR, C.; PLACET, V.; CHABBERT, B.; HABRANT, A.; LAPIERRE, C.; POLLET, B.; PERRÉ, P. Concomitant Changes in Viscoelastic Properties and Amorphous Polymers during the Hydrothermal Treatment of Hardwood and Softwood. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 15, p. 6830-6837, 2009.

ASTM. Standards methods of testing small clear specimens of timber: D143-94. In: (Ed.). **Annual Book of ASTM Standard**. West Conshohocken, 2000.

ATIK, C.; CANDAN, Z.; UNSAL, O. Colour characteristics of pine wood affected by thermal compressing. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 475-479, 2013.

BAJIC, D.; LELA, B.; ZIVKOVIC, D. Modeling of Machined Surface Roughness and optimization of Cutting Parameters in Face Milling. **Metalurgija**, v. 47, n. 4, p. 331-334, 2008.

BAL, B. C.; BEKTAS, I. The effects of heat treatment on the physical properties of juvenile wood and mature wood of *Eucalyptus grandis*. **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5117-5127, 2012.

BEKHTA, P.; MARUTZKY, R. Reduction of glue consumption in the plywood production by using previously compressed veneer. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 65, n. 1, p. 87-88, 2007.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. **Holzforschung**, v. 57, n. 5, p. 539-546, 2003.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P.; SEDLIACIK, J. Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 1-3, p. 99-106, 2012.

BEKHTA, P.; PROSZYK, S.; KRYSIOFIK, T. Colour in short-term thermo-mechanically densified veneer of various wood species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 6, p. 785-797, 2014.

BELT, T.; RAUTKARI, L.; LAINE, K.; HILL, C. S. Cupping behaviour of surface densified Scots pine wood: the effect of process parameters and correlation with density profile characteristics. **Journal of Materials Science**, v. 48, n. 18, p. 6426-6430, 2013.

BERGANDER, A.; SALMÉN, L. Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. **Journal of Materials Science**, v. 37, n. 1, p. 151-156, 2002.

BLOMBERG, J. **Mechanical and physical properties of semi-isostatically densified wood**. 2006. 62 f. Thesis (Skellefteå Campus / Wood Science and Technology)- Lulea University of Technology, 2006.

BLOMBERG, J.; PERSSON, B. Plastic deformation in small clear pieces of Scots pine (*Pinus sylvestris*) during densification with the Calignum process. **Journal of Wood Science**, v. 50, n. 4, p. 307-314, 2004.

BLOMBERG, J.; PERSSON, B.; BLOMBERG, A. Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. **Wood Science and Technology**, v. 39, n. 5, p. 339-350, 2005.

BODIG, J. The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship in transverse compression. . **Journal Forest Products**, v. 14, p. 197–202, 1965.

BOONSTRA, M.; ACKER, J.; TJEERDSMA, B.; KEGEL, E. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 64, n. 3, p. 204-211, 2006.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest Products and Wood Science- An Introduction**. Wiley-Blackwell 2003. 576 p.

BROSSMANNES, J. **Laminated Wood Product**, US Patent n° 1.834.895, 1931.

BUCUR, V.; GARROS, S.; BARLOW CLAIRE, Y. The Effect of Hydrostatic Pressure on Physical Properties and Microstructure of Spruce and Cherry. **Holzforschung**, v. 54, n. 1, p. 83, 2000.

CADEMARTORI, P. H. G.; MATTOS, B. D.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A. Colour responses of two fast-growing hardwoods to two-step steam-heat treatments. **Materials Research**, v. 17, n. 2, p. 487-493, 2014.

CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A. Physical and mechanical properties and colour changes of fast-growing gympie messmate wood subjected to two-step steam-heat treatments. **Wood Material Science & Engineering**, v. 9, n. 1, p. 40-48, 2013a.

CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R. Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: variation of colorimetric parameters. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v. 15, n. 1, p. 57-64, 2013b.

CADEMARTORI, P. H. G. D.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; SCHNEID, E.; HAMM, L. G. Qualidade da madeira serrada de *Pinus elliottii* Engelm. procedentes de florestas resinadas. **Cerne**, v. 18, n. 4, p. 577-583, 2012.

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

CANDAN, Z.; HIZIROGLU, S.; MCDONALD, A. G. Surface quality of thermally compressed Douglas fir veneer. **Materials & Design**, v. 31, n. 7, p. 3574-3577, 2010.

CHANG, T.-C.; CHANG, H.-T.; WU, C.-L.; LIN, H.-Y.; CHANG, S.-T. Stabilizing effect of extractives on the photo-oxidation of *Acacia confusa* wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 9, p. 1518-1522, 2010.

CHEN, Y.; FAN, Y.; GAO, J.; STARK, N. M. The effect of heat treatment on the chemical and color change of black locust (*Robinia pseudocacia*) wood flour. **BioResources**, v. 7, n. 1, p. 1157-1170, 2012.

CHRISTIANSEN, A. W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: a critical review of the literature. Part I. physical responses. **Wood and Fiber Science**, v. 22, p.441-459, 1990.

CLOUTIER, A.; FANG, C.; MARIOTTI, N. Densification of Wood Veneers Under the Effect of Heat, Steam and Pressure. **International Convention of Society of Wood Science and Technology**. Concepcion, Chile: 1-9 p. 2008.

COLOM, X.; CARRILLO, F.; NOGUÉS, F.; GARRIGA, P. Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy. **Polymer Degradation and Stability**, v. 80, n. 3, p. 543-549, 2003.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Utilização de um método combinado de desdobro e secagem para a produção de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell.** 1999. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras)- Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

\_\_\_\_\_. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB).** 2004. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I. Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: A preliminary study. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 64, n. 3, p. 212-217, 2006.

DEL QUIQUI, E. M.; MARTINS, S. S.; SHIMIZU, J. Y. Avaliação de espécies e procedências de *Eucalyptus* spp. Para o Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 5, p. 1173-1177, 2001.

DIOUF, P. N.; STEVANOVIC, T.; CLOUTIER, A.; FANG, C.-H.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A.; MARIOTTI, N. Effects of thermo-hygro-mechanical densification on the surface characteristics of trembling aspen and hybrid poplar wood veneers. **Applied Surface Science**, v. 257, n. 8, p. 3558-3564, 2011.

DRESCHER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; QUEIROZ, F. L. C. Fator de forma artificial de *Pinus elliottii* Engelm para a região da Serra do sudeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 31, n. 1, p. 37-42, 2001.

DWIANTO, W.; INOUE, M.; TANAKA, F.; NORIMOTO, M. The permanent fixation of compressive deformation in wood by heat treatment. **Proceedings from the Third Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium**. Kyoto, Japan: 231-239 p. 1996.

DWIANTO, W.; NORIMOTO, M.; MOROOKA, T.; TANAKA, F.; INOUE, M.; LIU, Y. Radial compression of sugi wood (*Cryptomeria japonica* D. Don). **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 56, p. 403-411, 1998.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. Distrito Federal - DF: Embrapa, 2013.

ESSELEN, G. **Wood Treatment and product**, Patent n° 1.952.664, 1934.

ESTEVES, B.; MARQUES, A.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 193-207, 2007.

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

FANG, C.-H.; MARIOTTI, N.; CLOUTIER, A.; KOUBAA, A.; BLANCHET, P. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 1-3, p. 155-163, 2012.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids: Structure and Properties**. Cambridge University Press, 1999.

GONÇALEZ, J. C.; BREDA, L. D. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F. D.; VALE, A. T. D. 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**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

GONG, M.; LAMASON, C. Improvement of Surface Properties of Low Density Wood: Mechanical Modification with Heat Treatment. **University of New Brunswick**: 97 p. 2007.

GONZÁLEZ-PEÑA, M., M; HALE, M., D. C. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 1: Colour evolution and colour changes. **Holzforschung**, v. 63, n. 4, p. 385, 2009.

GREKIN, M. Color and Color Uniformity Variation of Scots Pine Wood in the Air-Dry Condition. **Wood and Fiber Science**, v. 39, n. 2, p. 279-290, 2007.

GROOM, L.; MOTT, L.; SHALER, S. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part I. Determination and variability of stress-strain curves with respect to tree height and juvenility. **Wood and Fiber Science**, v. 34, p. 14-27, 2002.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 89, n. 1, p. 1-5, 2005.

HIGA, R. C. V; WREGE, M. S. **Cultivo de pinus**. v. 5, n. 2, Embrapa Florestas, 2011.

HILL, C. A. S. **Wood Modification: Chemical, thermal and other processes**. 1st. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

HILLIS, W. E.; ROZSA, A. N. The Softening Temperatures of Woods. **Holzforschung**, v. 32, n. 2, p. 68-72, 1978.

İMIRZI, H. Ö.; ÜLKER, O.; BURDURLU, E. Effect of densification temperature and some surfacing techniques on the surface roughness of densified Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) **BioResources**, v. 9, n. 1, p. 191-209, 2014.

INOUE, M.; NORIMOTO, M.; TANAHASHI, M.; R.M., R. Steam or heat fixation of compressed wood. **Wood & Fiber Science**, v. 25, n. 3, p. 224-235, 1993.

INOUE, M.; SEKINO, N.; MOROOKA, T.; NORIMOTO, M. Dimensional stabilization of wood composites by steaming I. Fixation of compressed wood by pre-steaming. **Proceedings from the Third Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium**. Kyoto, Japão: 240-248 p. 1996.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2 ed. São Paulo, 2003. 99 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION -ISO 4287, **Geometrical product specifications (GPS) – surface texture: profile method terms, definitions and surface texture parameters**. In: (Ed.). International Organization for Standardization, 1997.

JENNINGS, J. D.; ZINK-SHARP, A.; FRAZIER, C. E.; KAMKE, F. A. Properties of compressiondensified wood: Part II: Surface energy. *Journal of Adhesion. Science and Technology*, v. 20, n. 4, p. 335-344, 2006.

JOHANSSON, D.; MORÉN, T. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 64, n. 2, p. 104-110, 2006.

KAMKE, F. A.; SIZEMORE, H. **Viscoelastic thermal compression of wood**. Patent nº 7404422, 2008.

KARAGOZ, U.; AKYILDIZ, M. H.; ISLEYEN, O. Effect of heat treatment on surface roughness of thermal wood machined by CNC. *Pro Ligno*, v. 7, n. 4, p. 50-58, 2011.

KENNEDY, R. W. Wood in transverse compression. *Forest Products Journal*, v. 18, p. 36-40, 1968.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; DORÉ, G.; YOUNSI, R. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 66, n. 5, p. 355-361, 2008.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. Principles of wood science and technology. **Springer**, v. 1, p. 302–309, 1984.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood science and technology - **II Wood based materials**. In: (Ed.). Berlin, 1975. p.703.

KOPONEN, S.; TORATTI, T.; KANERVA, P. Modelling elastic and shrinkage properties of wood based on cell structure. *Wood Science and Technology*, v. 25, n. 1, p. 25-32, 1991.

KORKUT, D. S.; GULLER, B. The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 2846-2851, 2008.

KUTNAR, A.; KAMKE, F. Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150°C, 160°C, and 170°C. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1-3, p. 73-88, 2012.

KUTNAR, A.; KAMKE, F.; SERNEK, M. The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 66, n. 6, p. 439-446, 2008a.

KUTNAR, A.; KAMKE, F. A.; PETRIČ, M.; SERNEK, M. The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 329, n. 1-2, p. 82-86, 2008b.

KUTNAR, A.; KAMKE, F. A.; SERNEK, M. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. **Wood Science and Technology**, v. 43, n. 1-2, p. 57-68, 2009.

KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of Wood. **Zbornik gozdarstva in lesarstva**, v. 82, p. 53-62, 2007.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190, Madison. 2010. 508 p.

LAINE, K.; BELT, T.; RAUTKARI, L.; RAMSAY, J.; HILL, C. S.; HUGHES, M. Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. **Journal of Materials Science**, v. 48, n. 24, p. 8530-8538, 2013.

LENTH, C.; KAMKE, F. Equilibrium Moisture Content of Wood in High-Temperature Pressurized Environments. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 1, p. 104-118, 2001.

LESAR, B.; HUMAR, M.; KAMKE, F.; KUTNAR, A. Influence of the thermo-hydro-mechanical treatments of wood on the performance against wood-degrading fungi. **Wood Science and Technology**, v. 47, n. 5, p. 977-992, 2013.

LIPPKE, B.; EDMONDS, L. Environmental performance improvement in residential construction: The impact of products, biofuels, and processes. **Forest Products Journal**, v. 56, n. 10, p. 58-63, 2006.

MAYER, I.; KOCH, G. Element content and pH value in American black cherry (*Prunus serotina*) with regard to colour changes during heartwood formation and hot water treatment. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 6, p. 537-547, 2007.

MCKENZIE, H. M.; TURNER, J. C. P.; SHELBOURNE, C. J. A. Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid-wood products. 1: Individual-tree variation in quality and recovery of appearance-grade lumber and veneer. **Journal of Forestry Science**, v. 33, n. 1, p. 62-78, 2003.

MORI, C. L. S. D. O.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, A. C. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 123-132, 2004.

MORSING, N. **Densification of Wood The Influence of Hygrothermal Treatment on Compression of Beech Perpendicular to the Grain**. Technical University of Denmark, 2000. 145 p.

NAKANO, T. Analysis of the temperature dependence of water sorption for wood on the basis of dual mode theory. **Journal of Wood Science**, v. 52, n. 6, p. 490-495, 2006.

NAVI, P.; HEGER, F. Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. **MRS Bulletin**, v. 29, n. 05, p. 332-336, 2004.

OLESHEIMER, L. **Compressed laminated fibrous product and process of making the same**. Patent n° 1.707.135, 1929.

OLSON, A. **Process of shrinking wood**. Patent n° 1.981.567, 1934.

PERSZE, L.; TOLVAJ, L. Photodegradation of wood at elevated temperature: Colour change. *Journal of Photochemistry and Photobiology*. **Biology**, v. 108, n. 0, p. 44-47, 2012.

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**, v. 14, n. 2, p. 239 - 249, 2012.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. L. Retificação térmica de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, p. 60-66, 2002.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 411-418, 2011.

RAUTKARI, L.; KUTNAR, A.; HUGHES, M.; KAMKE, F. A. Wood Surface Densification Using Different Methods. **Wood Conference on Timber Engineering**, 2010.

ROWELL, R. M. One way to keep wood from going this way and that. **American Recorder**, v. 36, n. 5, p. 12-16, 1995.

ROWELL, R. M.; KONKOL, P. **Treatments that enhance physical properties of wood**. FPL, General Technical Report FPL-GTR-55, 1987. 12 p.

SANDBERG, D.; NAVI, P. **Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) Wood Processing**. Report n° 30. School of Technology and Design. Växjö University. Sweden. 2007. 167 p.

SANTOS, C. M. T.; MENEZZI, C. H. D.; SOUZA, M. R. D. Properties of thermo-mechanically treated wood from *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **BioResources**, v. 7, n. 2, p. 1850-1865, 2012.

SCHARFETTER, H. Thickness stability of particleboard. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 1, n. 2, p. 93-95, 1980.

SEARS, C. **Preparing Wood Matrices**. Patent n° 646.547, 1900.

SEBORG, R. M.; MILLETT, M. A.; STAMM, A. J. **Heat-stabilized compressed wood (STAYPAK)**. Forest Products Laboratory, Madison, , 1956. 21 p.

SEBORG, R. M.; STAMM, A. J. Compression of wood. **Mechanical Engineering**, v. 63, p. 211-213, 1941.

SIAU, J. F. **Transport Processes in Wood**. Springer Berlin Heidelberg, v. 2, 1984. 131 p.

SOUZA, C. R.; ROSSI, L. M. B.; AZEVEDO, C. P.; LIMA, R. B. Comportamento da *Acacia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 95-101, 2004.

STAMM, A.; BURR, H.; KLINE, A. Stayb-wood-A heat stabilized wood. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 38, n. 6, p. 630-634, 1946.

STAMM, A. J.; CHIDESTER. **Yearbook of Agriculture**. U.S. Department of Agriculture, 1943-1947, Part 5, 1947.

STAMM, A. J.; SEBORG, R. M.; MILLETT, M. A. **Heat-stabilized Compressed Wood (Staypak)**, Patent 2.453.679, 1948.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science. Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.

SUNDQVIST, B.; KARLSSON, O.; WESTERMARK, U. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 7, p. 549-561, 2006.

SUNDQVIST, B.; MORÉN, T. The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 60, n. 5, p. 375-376, 2002.

TABARSA, T.; CHUI, Y. Characterizing Microscopic Behavior of Wood Under Transverse Compression. Part II. Effect of Species and Loading Direction. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 2, p. 223-232, 2001.

TARKOW, H.; TURNER, H. D. The swelling pressure of wood. **Forest Products Journal**, v. 8, p. 193-197, 1958.

TOLVAJ, L.; NÉMETH, K. Correlation between hue-angle and colour lightness of steamed black locust wood. **Acta Silvatica & Lignaria Hungarica**, v. 4, p. 55-59, 2008.

TOMME, F.; GIRARDET, F.; FELLER, B. G.; NAVI, P. Densified wood: an innovative product with highly enhanced characters. **World Conference on Timber Engineering**. Switzerland, 1998.

UHMEIER, A.; MOROOKA, T.; NORIMOTO, M. Influence of Thermal Softening and Degradation on the Radial Compression Behavior of Wet Spruce. **Holzforschung**, v. 52, n. 1, p. 77-81, 1998.

ULKER, O.; IMIRZI, O.; BURDURLU, E. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* l.). **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5581-5592, 2012.

UNSAI, 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, 2011.

WALSH, F.; WATTS, R. **Composite Lumber**. Patent n° 1.465.383, 1923.

WELZBACHER, C. R.; HEGER, F.; GIRARDET, F.; NAVI, P.; RAPP, A. O. **Decay resistance of thermo-hydro-mechanically densified wood**. Workshop Cost Action E22, Environmental Optimisation of Wood Protection. Lisboa, p. 1-7, 2004.

WINDEISEN, E.; WEGENER, G. Behaviour of lignin during thermal treatments of wood. **Industrial Crops and Products**, v. 27, n. 2, p. 157-162, 2008.

WOLCOTT, M. P.; KAMKE, F. A.; DILLARD, D. A. Fundamental aspects of wood deformation pertaining to manufacture wood-based composites. **Wood Fiber**, v. 26, p. 496-511, 1994.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. **Wood variation: its causes and control**. Springer-Verlag, 1989. 363 p.

## **APÉNDICES**

Apêndice A - Análise de variância fatorial para o grau de compressão (Gc) e perda de massa (PM) em razão dos fatores temperatura e tempo para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
Gc (%)	Temperatura (A)	2	84,77	42,38	15,81**
	Tempo (B)	1	51,22	51,22	19,11**
	A x B	2	54,91	27,45	10,24**
	Resíduo	66	176,64	2,68	
PM (%)	Temperatura (A)	2	13,23	6,61	60,09**
	Tempo (B)	1	3,17	3,17	28,81**
	A x B	2	0,96	0,48	4,36*
	Resíduo	66	7,25	0,11	
<i>Eucalyptus grandis</i>					
Gc (%)	Temperatura (A)	2	379,28	189,64	92,96**
	Tempo (B)	1	28,42	28,42	13,93**
	A x B	2	11,70	5,85	2,87 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	134,87	2,04	
PM (%)	Temperatura (A)	2	109,23	54,61	546,10**
	Tempo (B)	1	9,58	9,58	95,80**
	A x B	2	1,62	0,81	8,10**
	Resíduo	66	6,32	0,10	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; Gc: grau de compressão; PM: perda de massa; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância; \* Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice B - Análise de variância fatorial para densidade básica ( $\rho_b$ ), aparente ( $\rho_{ap}$ ) e teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura (A)	2	0,02	8x10 <sup>-3</sup>	1,99 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	1x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>	0,25 <sup>ns</sup>
	A x B	2	1x10 <sup>-3</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	0,12 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	0,262	4x10 <sup>-3</sup>	
$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura (A)	2	0,01	7x10 <sup>-3</sup>	0,87 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	2 x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-3ns</sup>
	A x B	2	3x10 <sup>-3</sup>	2x10 <sup>-3</sup>	0,19 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	0,563	8x10 <sup>-3</sup>	
$TU_{eq}$ (%)	Temperatura (A)	2	7,71	3,86	77,20 <sup>**</sup>
	Tempo (B)	1	1,98	1,98	39,60 <sup>**</sup>
	A x B	2	2,22	1,11	22,20 <sup>**</sup>
	Resíduo	66	3,17	0,05	
<i>Eucalyptus grandis</i>					
$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura (A)	2	0,07	0,04	10,00 <sup>**</sup>
	Tempo (B)	1	0,01	0,01	2,50 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,01	5x10 <sup>-3</sup>	1,25 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	0,29	4x10 <sup>-3</sup>	
$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura (A)	2	0,02	0,01	1,42 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	3x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-5</sup>	4x10 <sup>-3ns</sup>
	A x B	2	2x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>	0,14 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	0,44	7x10 <sup>-3</sup>	
$TU_{eq}$ (%)	Temperatura (A)	2	83,12	41,56	134,06 <sup>**</sup>
	Tempo (B)	1	12,68	12,68	40,90 <sup>**</sup>
	A x B	2	3,74	0,10	0,32 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	20,68	0,31	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado;  $\rho_b$ : densidade básica;  $\rho_{ap}$ : densidade aparente;  $TU_{eq}$ : teor de umidade de equilíbrio; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; <sup>\*\*</sup>Significativo ao nível de 1% de significância.

Apêndice C - Análise de variância fatorial para o inchamento tangencial ( $\alpha_t$ ), radial ( $\alpha_r$ ) longitudinal ( $\alpha_i$ ) e variação volumétrica ( $\Delta V$ ), em razão dos fatores temperatura e tempo para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
$\alpha_t$ (%)	Temperatura (A)	2	5,93	2,96	5,80**
	Tempo (B)	1	0,68	0,68	1,33 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,13	0,067	0,13 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	33,38	0,51	
$\alpha_r$ (%)	Temperatura (A)	2	62,49	31,24	19,28**
	Tempo (B)	1	13,63	13,63	8,41**
	A x B	2	0,49	0,25	0,15 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	106,70	1,62	
$\alpha_i$ (%)	Temperatura (A)	2	0,02	0,01	0,50 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	0,05	0,05	2,50 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,03	0,01	0,50 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	1,11	0,02	
$\Delta V$ (%)	Temperatura (A)	2	106,84	53,42	27,82**
	Tempo (B)	1	22,51	22,51	11,72**
	A x B	2	0,90	0,45	0,23 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	127,08	1,92	
<i>Eucalyptus grandis</i>					
$\alpha_t$ (%)	Temperatura (A)	2	15,90	7,95	26,50**
	Tempo (B)	1	11,18	1,18	3,93 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,15	0,08	0,27 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	19,78	0,30	
$\alpha_r$ (%)	Temperatura (A)	2	308,88	154,44	117,89**
	Tempo (B)	1	45,79	45,79	34,95**
	A x B	2	37,60	18,80	14,35**
	Resíduo	66	86,59	1,31	
$\alpha_i$ (%)	Temperatura (A)	2	0,28	0,14	14,00**
	Tempo (B)	1	0,06	0,06	6,00*
	A x B	2	0,02	0,01	1,00 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	0,76	0,01	
$\Delta V$ (%)	Temperatura (A)	2	474,63	237,31	146,48**
	Tempo (B)	1	65,43	65,43	40,38**
	A x B	2	44,19	22,09	13,64**
	Resíduo	66	106,68	1,62	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado;  $\alpha_t$ : inchamento tangencial;  $\alpha_r$ : inchamento radial;  $\alpha_i$ : inchamento longitudinal;  $\Delta V$ : variação volumétrica; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1 % de significância; \*Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice D - Análise de variância fatorial para o módulo de elasticidade (MOE), ruptura (MOR) e resistência máxima ao impacto ( $F_{\max}$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
MOE (GPa)	Temperatura (A)	2	31,33	15,66	9,97**
	Tempo (B)	1	5,87	5,87	3,74 <sup>ns</sup>
	A x B	2	21,61	10,81	6,88**
	Resíduo	66	103,90	1,57	
MOR (MPa)	Temperatura (A)	2	7616,76	3808,38	28,37**
	Tempo (B)	1	6,07	6,07	0,04 <sup>ns</sup>
	A x B	2	575,05	287,52	2,14 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	8859,21	134,23	
$F_{\max}$ (KJ/cm <sup>2</sup> )	Temperatura (A)	2	149,11	74,55	0,64 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	47,17	47,17	0,40 <sup>ns</sup>
	A x B	2	567,95	283,97	2,43 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	7701,48	116,69	
<i>Eucalyptus grandis</i>					
MOE (GPa)	Temperatura (A)	2	91.32	45.66	7.46**
	Tempo (B)	1	0.34	0.34	0.06 <sup>ns</sup>
	A x B	2	4.09	2.04	0.33 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	404.06	6.12	
MOR (MPa)	Temperatura (A)	2	12727.08	6363.54	33.10**
	Tempo (B)	1	8055.76	8055.76	41.90**
	A x B	2	1339.01	669.51	3.48*
	Resíduo	66	12689,91	192,27	
$F_{\max}$ (KJ/cm <sup>2</sup> )	Temperatura (A)	2	2599,02	1299,51	63,46**
	Tempo (B)	1	367,28	367,28	17,94**
	A x B	2	6,43	3,21	0,16 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	1351,53	20,48	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; MOE: módulo de elasticidade; MOR: módulo de ruptura;  $F_{\max}$ : resistência máxima ao impacto; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância.

Apêndice E - Análise de variância fatorial para dureza Janka no sentido tangencial ( $H_{tg}$ ), radial ( $H_{rd}$ ) e longitudinal ( $H_{lg}$ ) em razão dos fatores temperatura e tempo para a madeira de *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliotii</i>					
$H_{tg}$ (MPa)	Temperatura (A)	2	313,91	156,95	4,60*
	Tempo (B)	1	151,58	151,58	4,34*
	A x B	2	722,41	361,21	10,59**
	Resíduo	66	2250,02	34,09	
$H_{rd}$ (MPa)	Temperatura (A)	2	307,79	153,90	1,56*
	Tempo (B)	1	460,08	460,08	4,68*
	A x B	2	1453,26	726,63	7,39**
	Resíduo	66	6488,97	98,32	
$H_{lg}$ (MPa)	Temperatura (A)	2	443,73	221,86	19,71**
	Tempo (B)	1	59,48	59,48	5,29*
	A x B	2	175,47	87,73	7,80**
	Resíduo	66	742,74	11,25	
<i>Eucalyptus grandis</i>					
$H_{tg}$ (MPa)	Temperatura (A)	2	7404,93	3702,47	121,01**
	Tempo (B)	1	939,94	939,94	30,72**
	A x B	2	321,35	160,68	5,25**
	Resíduo	66	2019,42	30,60	
$H_{rd}$ (MPa)	Temperatura (A)	2	9953,55	4976,79	101,14**
	Tempo (B)	1	631,19	631,19	12,83**
	A x B	2	125,21	62,60	1,27 <sup>ns</sup>
	Resíduo	66	3247,68	49,21	
$H_{lg}$ (MPa)	Temperatura (A)	2	6572,46	3286,23	89,44**
	Tempo (B)	1	180,92	180,92	4,92*
	A x B	2	349,06	174,53	4,75*
	Resíduo	66	2424,92	36,74	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado;  $H_{tg}$ : dureza Janka no sentido tangencial;  $H_{rd}$ : dureza Janka no sentido radial;  $H_{lg}$ : dureza Janka no sentido longitudinal; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância. \* Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice F - Análise de variância fatorial para os parâmetros colorimétricos (tangencial) em razão dos fatores temperatura e tempo nas madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
$L^*$	Temperatura (A)	2	23,52	11,76	14,00**
	Tempo (B)	1	2,55	2,55	3,04 <sup>ns</sup>
	A x B	2	1,72	0,86	1,02 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	25,36	0,84	
$a^*$	Temperatura (A)	2	6,52	3,26	9,31**
	Tempo (B)	1	1,81	1,81	5,17*
	A x B	2	0,71	0,36	1,03 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	10,39	0,35	
$b^*$	Temperatura (A)	2	4,81	2,41	4,08*
	Tempo (B)	1	1,60	1,60	2,71 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,28	0,14	0,24 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	17,66	0,59	
$C^*$	Temperatura (A)	2	3,32	1,66	3,95*
	Tempo (B)	1	6,57	6,57	15,64*
	A x B	2	0,55	0,27	0,64 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	12,57	0,42	
$h^\circ$	Temperatura (A)	2	0,93	0,47	1,52 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	$3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	0,01 <sup>ns</sup>
	A x B	2	1,73	0,86	2,77 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	9,44	0,31	
<i>Eucalyptus grandis</i>					
$L^*$	Temperatura (A)	2	67,22	33,61	10,77**
	Tempo (B)	1	8,32	8,32	2,67 <sup>ns</sup>
	A x B	2	5,04	2,52	0,81 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	93,73	3,12	
$a^*$	Temperatura (A)	2	0,77	0,38	0,67 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	0,18	0,18	0,31 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,07	0,04	0,07 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	17,25	0,57	
$b^*$	Temperatura (A)	2	28,43	14,21	17,76**
	Tempo (B)	1	0,16	0,16	0,20 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,27	0,13	0,16 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	24,01	0,80	
$C^*$	Temperatura (A)	2	28,68	14,34	19,12**
	Tempo (B)	1	0,48	0,48	0,64 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,02	$8 \times 10^{-3}$	0,02 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	22,56	0,75	
$h^\circ$	Temperatura (A)	2	18,27	9,14	10,88**
	Tempo (B)	1	4,01	4,01	4,77*
	A x B	2	0,70	0,35	0,42 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	25,20	0,84	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado;  $L^*$ : claridade;  $a^*$ : coordenada cromática vermelho-verde;  $b^*$ : coordenada cromática azul-amarelo;  $C^*$ : saturação de cor;  $h^\circ$ : ângulo de tinta; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância; \* Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice G - Análise de variância fatorial para rugosidade média (Ra), quadrática (Rq), profundidade média (Rz) e total (Rt), em razão dos fatores temperatura e tempo para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* na face tangencial.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
Ra	Temperatura (A)	2	4,58	2,29	4,77*
	Tempo (B)	1	1,14	1,14	2,37 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,40	0,20	0,42 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	14,52	0,48	
Rq	Temperatura (A)	2	1,52	0,76	1,31 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	0,51	0,51	0,88 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,08	0,04	0,07 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	17,39	0,58	
Rz	Temperatura (A)	2	20,09	10,05	8,44**
	Tempo (B)	1	6,75	6,75	5,67*
	A x B	2	3,06	1,53	1,29 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	35,84	1,19	
Rt	Temperatura (A)	2	30,50	15,25	16,94**
	Tempo (B)	1	8,01	8,01	8,90**
	A x B	2	5,61	2,81	3,12 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	27,01	0,90	
<i>Eucalyptus grandis</i>					
Ra	Temperatura (A)	2	1,06	0,53	2,94 <sup>ns</sup>
	Tempo (B)	1	0,21	0,21	1,17 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,05	0,02	0,11 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	5,29	0,18	
Rq	Temperatura (A)	2	2,54	1,27	6,68**
	Tempo (B)	1	0,54	0,54	2,84 <sup>ns</sup>
	A x B	2	0,37	0,18	0,95 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	5,72	0,19	
Rz	Temperatura (A)	2	3,12	1,56	4,59**
	Tempo (B)	1	0,29	0,29	0,85*
	A x B	2	0,16	0,08	0,23 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	10,21	0,34	
Rt	Temperatura (A)	2	9,87	4,94	14,53**
	Tempo (B)	1	1,88	1,88	5,53*
	A x B	2	0,08	0,04	0,12 <sup>ns</sup>
	Resíduo	30	10,23	0,34	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; Ra: rugosidade média; Rq: rugosidade quadrática; Rz: rugosidade profundidade média; Rt: rugosidade total; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância; \* Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice H – Análise de variância para densidade básica ( $\rho_b$ ) e aparente ( $\rho_{ap}$ ), teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ ), inchamento tangencial ( $\alpha_t$ ), radial ( $\alpha_r$ ) longitudinal ( $\alpha_i$ ) e variação volumétrica ( $\Delta V$ ) pelo teste de Dunnett nas madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	Tratamento	6	0,36	0,06	15,00**
	Resíduo	77	0,30	4x10 <sup>-3</sup>	-
$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Tratamento	6	2,03	0,34	34,00**
	Resíduo	77	0,61	0,01	-
TU <sub>eq</sub> (%)	Tratamento	6	141,41	23,57	294,62**
	Resíduo	77	5,92	0,08	-
$\alpha_t$ (%)	Tratamento	6	61,78	10,30	19,81**
	Resíduo	77	39,78	0,52	-
$\alpha_r$ (%)	Tratamento	6	6673,99	1112,33	772,45**
	Resíduo	77	110,95	1,44	-
$\alpha_i$ (%)	Tratamento	6	0,29	0,05	2,50*
	Resíduo	77	1,74	0,02	-
$\Delta V$ (%)	Tratamento	6	5508,79	918,13	510,07**
	Resíduo	77	138,56	1,80	-
<i>Eucalyptus grandis</i>					
$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	Tratamento	6	0,18	0,03	7,5**
	Resíduo	77	0,30	4x10 <sup>-3</sup>	-
$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Tratamento	6	0,72	0,12	12,00**
	Resíduo	77	0,46	0,01	-
TU <sub>eq</sub> (%)	Tratamento	6	455,01	75,83	261,48**
	Resíduo	77	22,69	0,29	-
$\alpha_t$ (%)	Tratamento	6	30,01	5,00	16,67**
	Resíduo	77	22,83	0,30	-
$\alpha_r$ (%)	Tratamento	6	5122,38	853,73	755,51**
	Resíduo	77	87,23	1,13	-
$\alpha_i$ (%)	Tratamento	6	0,93	0,15	15,00**
	Resíduo	77	0,87	0,01	-
$\Delta V$ (%)	Tratamento	6	4737,28	789,55	548,30**
	Resíduo	77	111,01	1,44	-

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado;  $\rho_b$ : densidade básica;  $\rho_{ap}$ : densidade aparente; TU<sub>eq</sub>: teor de umidade de equilíbrio;  $\alpha_t$ : inchamento tangencial;  $\alpha_r$ : inchamento radial;  $\alpha_i$ : inchamento longitudinal;  $\Delta V$ : variação volumétrica; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância; \*Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice I – Análise de variância para módulo de elasticidade (MOE), ruptura (MOR), resistência máxima ao impacto ( $F_{\max}$ ) dureza Janka no sentido tangencial ( $H_{tg}$ ), radial ( $H_{rd}$ ) e longitudinal ( $H_{lg}$ ) pelo teste de Dunnett nas madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
MOE (GPa)	Tratamento	6	304,61	50,77	33,40**
	Resíduo	77	117,26	1,52	-
MOR (MPa)	Tratamento	6	94653,28	15775,55	130,94**
	Resíduo	77	9276,71	120,48	-
$F_{\max}$ (KJ/cm <sup>2</sup> )	Tratamento	6	2752,21	458,70	4,03**
	Resíduo	77	8759,90	113,76	-
$H_{tg}$ (MPa)	Tratamento	6	38067,03	6344,50	198,71**
	Resíduo	77	2458,46	31,93	-
$H_{rd}$ (MPa)	Tratamento	6	78917,84	13152,97	152,47**
	Resíduo	77	6642,27	86,26	-
$H_{lg}$ (MPa)	Tratamento	6	21891,03	3648,51	199,47**
	Resíduo	77	1408,39	18,29	-
<i>Eucalyptus grandis</i>					
MOE (GPa)	Tratamento	6	196,83	32,80	6,03**
	Resíduo	77	418,62	5,44	-
MOR (MPa)	Tratamento	6	32413,23	5402,21	31,89**
	Resíduo	77	13043,91	169,40	-
$F_{\max}$ (KJ/cm <sup>2</sup> )	Tratamento	6	4841,14	806,86	42,93**
	Resíduo	77	1447,28	18,80	-
$H_{tg}$ (MPa)	Tratamento	6	8692,66	1448,78	49,74**
	Resíduo	77	2242,63	29,12	-
$H_{rd}$ (MPa)	Tratamento	6	10961,03	1826,84	41,05**
	Resíduo	77	3426,39	44,50	-
$H_{rd}$ (MPa)	Tratamento	6	8190,39	1365,06	39,75**
	Resíduo	77	2643,88	34,34	-

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; MOE: módulo de elasticidade; MOR: módulo de ruptura;  $F_{\max}$ : resistência máxima ao impacto;  $H_{tg}$ : dureza Janka no sentido tangencial;  $H_{rd}$ : dureza Janka no sentido radial;  $H_{lg}$ : dureza Janka no sentido longitudinal; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância.

Apêndice J - Análise de variância para os índices de claridade ( $L^*$ ), coordenada cromática vermelho-verde ( $a^*$ ), coordenada cromática azul-amarelo ( $b^*$ ) índices de saturação ( $C^*$ ) e ângulo de tinta ( $h^\circ$ ) nas madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* na face tangencial.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
$L^*$	Tratamento	6	347,81	57,97	62,33**
	Resíduo	35	32,67	0,93	-
$a^*$	Tratamento	6	22,02	3,67	11,84**
	Resíduo	35	10,94	0,31	-
$b^*$	Tratamento	6	264,79	44,13	67,89**
	Resíduo	35	22,70	0,65	-
$C^*$	Tratamento	6	297,01	49,50	112,50**
	Resíduo	35	15,57	0,44	-
$h^\circ$	Tratamento	6	33,82	5,64	12,82**
	Resíduo	35	15,43	0,44	-
<i>Eucalyptus grandis</i>					
$L^*$	Tratamento	6	535,68	89,28	32,23**
	Resíduo	35	96,88	2,77	-
$a^*$	Tratamento	6	1,64	0,27	0,52 <sup>ns</sup>
	Resíduo	35	18,24	0,52	-
$b^*$	Tratamento	6	39,97	6,66	9,65**
	Resíduo	35	24,28	0,69	-
$C^*$	Tratamento	6	46,95	7,82	11,67**
	Resíduo	35	23,38	0,67	-
$h^\circ$	Tratamento	6	37,96	6,33	7,81**
	Resíduo	35	28,48	0,81	-

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado;  $L^*$ : claridade;  $a^*$ : coordenada cromática vermelho-verde;  $b^*$ : coordenada cromática azul-amarelo;  $C^*$ : índices de saturação;  $h^\circ$ : ângulo de tinta; <sup>ns</sup>: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância.

Apêndice K - Análise de variância para rugosidade média (Ra), quadrática (Rq), profundidade média (Rz) e total (Rt) nas madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* na face tangencial.

Propriedade	Fonte	GL	SQ	QM	F
<i>Pinus elliottii</i>					
Ra	Tratamento	6	16,24	2,71	5,02**
	Resíduo	35	18,84	0,54	-
Rq	Tratamento	6	27,67	4,61	7,81**
	Resíduo	35	20,52	0,59	-
Rz	Tratamento	6	215,55	35,92	28,51**
	Resíduo	35	44,27	1,26	-
Rt	Tratamento	6	165,02	27,50	22,73**
	Resíduo	35	42,35	1,21	-
<i>Eucalyptus grandis</i>					
Ra	Tratamento	6	151,88	25,31	110,04**
	Resíduo	35	8,10	0,23	-
Rq	Tratamento	6	239,76	39,96	159,84**
	Resíduo	35	8,67	0,25	-
Rz	Tratamento	6	1285,18	214,20	522,44**
	Resíduo	35	14,48	0,41	-
Rt	Tratamento	6	1329,50	221,58	418,07**
	Resíduo	35	18,66	0,53	-

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; Ra: rugosidade média; Rq: rugosidade quadrática; Rz: rugosidade profundidade média; Rt: rugosidade total; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; \*\*Significativo ao nível de 1% de significância.