

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

Anderson Pertuzzatti

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DENSIFICADA DE
EUCALIPTO SUBMETIDA AO TRATAMENTO EM ÓLEO VEGETAL**

Santa Maria, RS
2018

Anderson Pertuzzatti

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DENSIFICADA DE
EUCALIPTO SUBMETIDA AO TRATAMENTO EM ÓLEO VEGETAL**

Tese 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 **Doutor em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

Santa Maria, RS, Brasil
2018

Pertuzzatti, Anderson

Propriedades tecnológicas da madeira densificada de eucalipto submetida ao tratamento em óleo vegetal /

Anderson Pertuzzatti.- 2018.

89 p.; 30 cm

Orientador: Darci Alberto Gatto

Coorientadores: Clóvis Roberto Haselein, Gianluca Tondi

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa

Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós

Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2018

1. Densificação da madeira 2. Termorretificação OHT® 3. Resistência mecânica da madeira 4. Propriedades físicas da madeira 5. Superfície da madeira I. Gatto, Darci Alberto II. Haselein, Clóvis Roberto III. Tondi, Gianluca IV. Título.

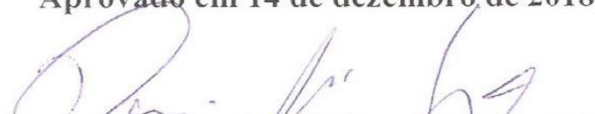
Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Anderson Pertuzzatti

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DENSIFICADA DE
EUCALIPTO SUBMETIDA AO TRATAMENTO EM ÓLEO VEGETAL**

Tese 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 **Doutor em Engenharia Florestal**.

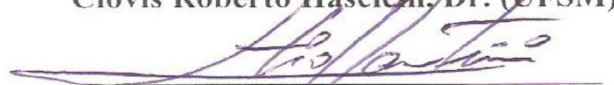
Aprovado em 14 de dezembro de 2018:



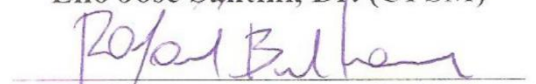
Darci Alberto Gatto, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

LNH

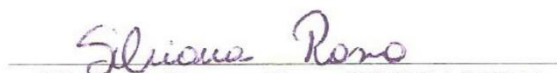
Clóvis Roberto Haselein, Dr. (UFSM)



Elio José Santini, Dr. (UFSM)



Rafael Beltrame, Dr. (UFPel)



Silvana Rosso, Dra. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2018

A minha esposa CLÁUDIA

Aos meus pais, AVELINO e INES

E minhas irmãs, ANDRÉIA e JAQUELINE

EU DEDICO

AGRADECIMENTOS

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

À minha esposa Cláudia (que aguarda pacientemente o término dessa etapa) pela companhia em momentos difíceis, pela força, carinho e amor.

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.

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 quatro anos de orientação, apoio, incentivo, confiança e principalmente pela amizade.

Aos professores Dr. Clovis Roberto Haselein, Dr. Gianluca Tondi, Dr. Elio José Santini, Dr. Luciano Denardi, Dra. Cristiane Pedrazzi, Dr. Rafael Beltrame, Dra. Silvana Rosso e Dra. Patrícia Soares Bilhalva dos Santos pelos incentivos e ensinamentos durante a pesquisa e por terem aceitado participar na minha banca.

Aos meus colegas e amigos que sempre estiveram prontos a me ajudar, especialmente, Henrique Weber Dalla Costa, Felipe Turchetto, André Luiz Missio Camila Berger, Rodrigo Coldebella, Rossana Cortelini e Bruna Mohr Giesbrecht.

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

À Fepagro Florestas e ao Centro de Instrução de Santa Maria pela disponibilização do material para a presente pesquisa.

À Capes, pela concessão da bolsa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) pela redução da carga horária de trabalho para a realização da tese.

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

Muito Obrigado!

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

RESUMO

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DENSIFICADA DE EUCALIPTO SUBMETIDA AO TRATAMENTO EM ÓLEO VEGETAL

AUTOR: Anderson Pertuzzatti
ORIENTADOR: Darci Alberto Gatto

A densificação apresenta relevante importância na indústria madeireira. Uma vez que possibilita ampliar a utilização de madeiras menos valorizadas pelo mercado. Entretanto, a madeira densificada apresenta elevada instabilidade dimensional. Visando minimizar esse problema foi realizado um pós-tratamento, utilizando a termorretificação em óleo pelo processo OHT[®] (*Oil heat treatment*). Diante do exposto, a presente pesquisa tem por objetivo avaliar as propriedades tecnológicas da madeira densificada de eucalipto submetida ao tratamento em óleo vegetal. A metodologia consistiu na utilização da madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis* que foram submetidas ao processo de densificação e pós-tratamento em óleo vegetal. Foram realizados 24 tratamentos, compondo-se de diferentes espécies, temperaturas de densificação e pós-tratamento. Para a caracterização do material gerado, foram realizados ensaios físicos, mecânicos, químicos e superficiais na madeira. Para a análise estatística foi utilizado o arranjo fatorial qualitativo 4 x 6, com quatro espécies e seis tratamentos, comparados pelo teste de Tukey. Os principais resultados demonstraram que a densificação apresentou acréscimos distintos na densidade aparente (ρ_{ap}) entre as espécies avaliadas, o que demonstra que o aumento da ρ_{ap} por meio da densificação está condicionado ao seu valor inicial. No caso da estabilidade dimensional da madeira foi observado que a densificação provocou redução nessa propriedade em relação ao controle. Entretanto, nos tratamentos em que foi aplicado o pós-tratamento em óleo houve decréscimo de mais de 30% na instabilidade dimensional, ocasionado pelo relaxamento das tensões armazenadas durante a compressão, por meio da hidrólise parcial das hemiceluloses. Já para a higroscopicidade da madeira foi observado que a densificação utilizando a temperatura de 140 °C apresentou aumento na absorção de água após 24 horas de imersão, provocado pela reabertura dos vasos achatados. No entanto, quando a madeira foi submetida ao pós-tratamento houve redução da higroscopicidade ocasionada pela degradação térmica e presença de óleo nos lumens celulares. Na molhabilidade foi identificado que a madeira somente densificada apresentou caráter hidrofílico. Entretanto, quando submetida ao pós-tratamento tornou-se hidrofóbica. A resistência mecânica apresentou os resultados mais satisfatórios na madeira densificada a 140 °C sem aplicação de pós-tratamento, obtendo acréscimos em todas as propriedades e espécies avaliadas. No entanto, com a aplicação de pós-tratamento houve decréscimo médio de 20% na resistência mecânica da madeira tratada. Na análise de Espectrometria no Infravermelho foi verificado que houve maior alteração química após a aplicação do pós-tratamento, obtendo degradação de hemiceluloses e celulose amorfa, o que proporcionou acréscimo proporcional de celulose cristalina e lignina. Para os parâmetros colorimétricos, foi identificado que o pós-tratamento apresentou as maiores alterações na cor da madeira, fazendo com que a madeira das quatro espécies ganhassem um tom tropical (marrom escuro), viável para aplicação de fins estéticos.

Palavras-chave: Resistência mecânica, *springback*, plastificação, pós-tratamento, superfície da madeira.

ABSTRACT

TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF DENSIFIED WOOD OF THE EUCALIPTO SUBMITTED TO THE TREATMENT IN VEGETABLE OIL

AUTHOR: Anderson Pertuzzatti

ADVISOR: Darci Alberto Gatto

Densification is relevant in the timber industry. Since it makes it possible to increase the use of wood less valued by the market. However, densified wood shows high dimensional instability. In order to minimize this problem, a post-treatment using the oil heat treatment (OHT[®]) was performed. In view of the above, the present research aims to evaluate the technological properties of densified wood of the eucalipto submitted to treatment in vegetable oil. The methodology consisted in the use of wood of *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* and *E. tereticornis* that were submitted to the process of densification and post-treatment in vegetable oil. Twenty-four treatments were performed, consisting of different species, densification temperatures and post-treatment. For the characterization of the produced wood based material, physical, mechanical, chemical and superficial tests were carried out. For the statistical analysis, the 4 x 6 qualitative factorial arrangement was used, with four species and six treatments, compared by the Tukey test. The main results showed that densification increases distinctly in the basic density (ρ_b) among the evaluated species, which shows that the increase of ρ_b by densification is conditioned to its initial value. In the case of wood dimensional stability it was observed that the densification caused a reduction in this property in relation to the control. However, in the treatments in which the post-treatment in oil was applied, there was a decrease of more than 30% in the dimensional instability, caused by the relaxation of the stresses stored during the compression, through the partial hydrolysis of the hemicelluloses. As for the hygroscopicity of the wood, it was observed that the densification using the temperature of 140 °C showed an increase in the water absorption after 24 hours of immersion, caused by the reopening of the flattened vessels. However, when the wood was submitted to the post-treatment, there was a reduction of the hygroscopicity caused by the thermal degradation and the presence of oil in the cell lumens. In wettability it was identified that the only densified wood presented a hydrophilic character. However, when submitted to post-treatment it has become hydrophobic. Mechanical strength showed the most satisfactory results in densified wood at 140 °C without post-treatment, obtaining increases in all properties and species evaluated. However, with the post-treatment application there was an average decrease of 20% in the mechanical strength of the treated wood. In the analysis of Infrared Spectrometry it was verified that there was a greater chemical alteration after the application of the post-treatment, obtaining degradation of hemicelluloses and amorphous cellulose, which provided proportional increase of crystalline cellulose and lignin. For the colorimetric parameters, it was identified that the post-treatment presented the greatest changes in the color of the wood, causing the wood of the four species to gain a tropical tone (dark brown), which is feasible for the application of aesthetic purposes.

Keywords: Mechanical resistance, *springback*, plastification, post-treatment, wood surface.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 GERAL	13
2.2 ESPECÍFICOS	13
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 MADEIRA	14
3.2 ESTABILIDADE DIMENSIONAL	16
3.3 PLASTICIZAÇÃO DA MADEIRA	17
3.4 DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA	18
3.5 TERMORRETIFICAÇÃO EM ÓLEO (OHT®)	21
3.6 MODIFICAÇÕES NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DENSIFICADA TRATADA EM ÓLEO	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 SELEÇÃO DA MATÉRIA PRIMA	25
4.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	27
4.3 TRATAMENTOS TERMOHIGROMECÂNICOS	27
4.4 TERMORRETIFICAÇÃO EM ÓLEO (OHT®)	29
4.5 ENSAIOS FÍSICOS	30
4.5.1 Grau de compressão (GC)	30
4.5.2 Teor de umidade de equilíbrio (TU_{eq})	30
4.5.3 Variação percentual de massa (VPM)	31
4.5.4 Densidade aparente a 12% (ρ_{ap})	31
4.5.5 Estabilidade dimensional e Higroscopicidade	32
4.6 MOLHABILIDADE	33
4.7 ENSAIOS MECÂNICOS	34
4.7.1 Flexão estática	35
4.7.2 Flexão dinâmica	35
4.7.3 Dureza Janka	36
4.7.4 Compressão paralela às fibras	36
4.8 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (ATR – IR)	36
4.9 ENSAIOS COLORIMÉTRICOS	37
4.10 ANÁLISE DOS DADOS	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

5.1 ENSAIOS FÍSICOS.....	39
5.1.1 Grau de compressão (GC)	39
5.1.2 Teor de umidade de equilíbrio (TU_{eq})	40
5.1.3 Variação percentual de massa (VPM)	41
5.1.4 Densidade aparente (ρ_{ap})	43
5.1.5 Inchamento em espessura	44
5.1.6 Absorção de água	46
5.1.7 Taxa de não retorno em espessura (TNRE)	48
5.1.8 Taxa de retração (TR)	49
5.2 MOLHABILIDADE	50
5.3 ENSAIOS MECÂNICOS	52
5.3.1 Módulo de elasticidade (MOE)	52
5.3.2 Módulo de ruptura (MOR)	54
5.3.3 Resistência máxima ao impacto (F_{máx})	55
5.3.4 Dureza Janka (H_{rd})	56
5.3.5 Resistência máxima em ensaio de compressão paralela ($\sigma_{máx}$)	58
5.4 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (ATR – IR).....	60
5.5 COLORIMETRIA	65
6. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS TRATADAS	86
APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA A HIGROSCOPICIDADE E INCHAMENTO EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS TRATADAS	87
APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS TRATADAS	88
APÊNDICE D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA A COLORIMETRIA EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS TRATADAS	89

1. INTRODUÇÃO

No passado, o setor madeireiro apresentava abundância de madeiras com alta qualidade proveniente de florestas nativas. Mas com a colheita maciça de árvores tropicais no século passado, esse estoque disponível foi drasticamente reduzido, ocasionando aumento no valor da madeira com excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade. Além disso, essa necessidade de madeira favoreceu as plantações de árvores de rápido crescimento, tornando as espécies do gênero *Eucalyptus* as mais utilizadas nos povoamentos brasileiros, cobrindo uma área de aproximadamente 5,7 milhões de hectares, o que representa 72% da área total de árvores plantadas no país (IBA, 2017).

Esta madeira é utilizada principalmente para fins de produção de celulose e papel, mas apresenta restrições quando é utilizada para pavimentos e revestimentos, ou qualquer outra aplicação que requer resistência mecânica e durabilidade. Além disso, muitas espécies de eucalipto são frequentemente colhidas em conjunto e seguem a mesma linha de processamento, mesmo que suas propriedades possam ser sensivelmente diferentes.

Neste contexto, é necessário um processo de modificação da madeira que permita melhorar as propriedades mecânicas, de superfície e a homogeneização dos diferentes materiais. Nesse aspecto, o processo de densificação supre tais necessidades, visto que é um tratamento que comprovadamente aumenta as propriedades mecânicas e de superfície da madeira (WELZBACHER et al., 2008; BELT et al., 2013; BEKHTA et al., 2015; ZHAN e AVRAMIDIS, 2015).

A densificação da madeira já tem sido relatada há mais de um século (SEARS, 1900; OLESHEIMER, 1929; BROSSMAN, 1931), demonstrando a importância da técnica, que é empregada até os dias atuais. Podendo ser realizada por meio da compressão da madeira para reduzir o volume, por impregnação dos espaços vazios, com uma substância fluida, ou através da utilização de uma combinação de compressão e impregnação. No entanto, ao contrário da compressão física ou mecânica, a impregnação química afeta o caráter natural e sustentável da madeira e geralmente são caros (NAVI e HEGER, 2004).

Os tratamentos termohigromecânicos (THM) se enquadram no processo de densificação da madeira, que consistem em processos de múltiplos estágios em ciclos úmidos / úmidos em várias temperaturas e pressões (NAVI e PIZZI, 2015). Nesse processo, durante o aquecimento da madeira, a lignina, celulose e hemiceluloses exibem um amolecimento distinto, conforme a temperatura de transição vítrea de cada polímero (UHMEIER et al., 1998; ÅKERHOLM et al., 2004). Entretanto, a madeira comprimida por esse método, apresenta problemas com

inchamento irreversível, conhecido como *springback*, quando exposta à alta umidade relativa ou em contato com água.

O efeito *springback*, é provocado pelo armazenamento da energia de deformação elástica durante a compressão das microfibrilas de hemiceluloses (SEBORG et al., 1956; MORSING, 2000; HEGER et al., 2004; BLOMBERG, 2006). Diante disso, vários tratamentos têm sido investigados para minimizar esse efeito. Dentre os quais, podemos citar a impregnação de resinas na madeira densificada (GABRIELLI e KAMKE, 2010), pós-tratamento com alta temperatura (tratamento térmico) (GONG et al., 2010) ou tratamento térmico em óleo (FANG et al., 2012). Este último tratamento apresenta algumas vantagens em relação aos demais, com destaque para o acréscimo da estabilidade dimensional e resistência biológica (DUBEY et al., 2012; PELIT et al., 2015). Isso ocorre em decorrência das moléculas de óleo serem hidrofóbicas, e formarem uma película estável no exterior da madeira (DUBEY et al., 2012).

Diversos pesquisadores (NAVI e PIZZI, 2015; PELIT et al., 2015; PERTUZZATTI et al., 2018) verificaram que a densificação em altas temperaturas (>180 °C) provoca redução na resistência mecânica. Em contradição a isso, a densificação da madeira em baixas temperaturas apresentam *springback*. Diante disso, optou-se por realizar a densificação com baixas temperaturas e foi aplicado pós-tratamento em óleo aproveitando a sua hidrofobicidade para a melhoria das propriedades físicas da madeira.

Diante do exposto, cabe acrescentar que a densificação apresenta relevante importância na indústria madeireira. Uma vez que possibilita a utilização de madeiras menos valorizadas pelo mercado, em virtude de algumas características da própria madeira para aplicações mais nobres, como pisos e revestimentos. Em contraponto, há uma crescente demanda por madeira de alta qualidade na silvicultura.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar as propriedades tecnológicas da madeira densificada de eucalipto submetida ao tratamento de estabilização dimensional em óleo vegetal.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito da densificação nas propriedades físicas e mecânicas em madeiras de eucalipto;
- Quantificar a variação de resistência das propriedades mecânicas após o tratamento em óleo;
- Avaliar o efeito do pós-tratamento em óleo na estabilização dimensional da madeira densificada;
- Caracterizar qualitativamente a degradação da estrutura química da madeira após a densificação e pós-tratamento em óleo;
- Caracterizar a superfície da madeira;
- Identificar e qualificar as possíveis aplicações da madeira pós-tratamento.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MADEIRA

A madeira é uma das mais antigas estruturas compostas que o homem fez uso, sendo formada por uma estrutura primária de traqueídeos ou fibras. Apresenta várias características vantajosas quando comparada com outros materiais (plásticos e metais). Sendo visualmente atraente, com boa cor e textura, pode ser facilmente colada, pintada ou revestida. No entanto, por ser um material de origem biológica, sofre a influência de fatores ambientais como água, luz, fogo e microrganismos. (HAVIMO et al., 2007).

A madeira, conhecida como xilema secundário, é uma estrutura porosa tridimensional, higroscópica, viscoelástica e anisotrópica. Pode ser classificada em madeira de coníferas (gimnospermas) e folhosas (angiospermas), diferindo na estrutura do xilema e tipos de células (ROWELL, 2005). As coníferas têm uma anatomia mais simples do que as folhosas e são geralmente compostas por traqueídeos (90-95%) e células radiais (5-10%) (EK et al., 2009). O papel dos traqueídeos é o apoio mecânico e transporte de água (condução) ao topo da árvore, para realização da fotossíntese. Enquanto, que a função das células dos raios, é permitir o transporte de líquido no sentido radial. Por outro lado, madeira de folhosas apresentam uma estrutura mais avançada e complexa que contém vasos, fibras (fibras libriformes e traqueídeos) e parênquima (axial e radial). Os vasos (conhecidos como "poros") são responsáveis pela condução da água, as fibras pelo suporte mecânico e o parênquima reservas de hidratos de carbono (PETRIC et al., 2015).

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 inchamento e plasticizante. Com a elevação da temperatura na condição de alta umidade, ocorre o amolecimento dos principais componentes da madeira (hemiceluloses e lignina), alterando assim o seu estado vítreo (MORSING, 2000).

Quimicamente a madeira é constituída por compostos macromoleculares (Celulose, hemiceluloses e lignina) que estão localizados na parede das células e por componentes de baixo peso molecular (extrativos) (ROWELL, 2005). A parede da célula pode ser considerada como

um compósito reforçado, em que, as microfibrilas de celulose atuam como reforços, embebidos numa matriz de lignina e hemiceluloses. De madeira geral as espécies contêm cerca de 40-50% de celulose, 20-30% de hemiceluloses, 20-35% de lignina e até 10% extrativos (PEREIRA et al., 2013). As coníferas normalmente contêm mais celulose e lignina do que as folhosas (ROWELL, 2005).

A madeira pode ser considerada como um biopolímero tridimensional composto, primordialmente, de celulose (um polímero linear constituído por unidades de anidro-D-glucopiranosose ligadas por B (1-4) glicosídicas, com grau de polimerização de 2000-4000 na camada primária da parede celular e 10.000 na camada secundária), hemiceluloses (são compostas por diferentes polissacarídeos, principalmente por glicose, manose, galactose, xilose e arabinose, com grau de polimerização de 150-200, normalmente apresenta cadeia ramificada e amorfa) 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; PEREIRA et al., 2013).

Esses polímeros que formam a parede celular da madeira são os responsáveis pela maioria das suas propriedades físico-químicas (MORSING, 2000). A celulose e as hemiceluloses contêm elevada quantidade de grupos hidroxila (OH), que são responsáveis pelas ligações de hidrogênio com a água, proporcionando o inchamento das paredes celulares. Isto é a principal razão para a natureza higroscópica da madeira. Já a lignina apresenta diversas funções na estrutura da madeira, incluindo a fixação de celulose e hemiceluloses e melhoria na rigidez da parede celular (EK et al., 2009). Além disso, fornece um certo grau de proteção contra degradação microbológica, tornando a parede celular mais hidrofóbica (SJÖSTRÖM, 1993).

Na madeira, além dos compostos macromoleculares (celulose, hemiceluloses e lignina), há os componentes de baixo peso molecular (extrativos). Esses últimos são os compostos não estruturais que normalmente estão presentes em baixas concentrações (SJÖSTRÖM, 1993). Por outro lado, eles são uma importante fonte de variedade na composição química da madeira. Além disso, podem alterar a superfície da madeira (KÄLLBOM, 2015), devido à sua mobilidade natural e migração para as regiões de superfície, por exemplo devido a secagem em estufa ou tratamentos na madeira (MANTANIS et al., 1995).

Além disso, a madeira pode ser separada em alborno e cerne. O primeiro, que normalmente considerado mais leve, contém células vivas e mortas. O cerne, que se refere às camadas internas da madeira apresenta geralmente cor mais escura, inteiramente contém células

mortas. A principal função do alburno é o transporte de líquidos e nutrientes e do cerne é proporcionar suporte mecânico (PETRIC et al., 2015). O cerne é geralmente menos permeável e mais durável, uma vez que os extrativos são depositados nas células durante a formação da madeira (EK et al., 2009). Geralmente o cerne contém maior quantidade de extrativos do que alburno. Além disso, os tipos de extrativos podem diferir entre alburno e cerne. Por exemplo no *Pinus sylvestris*, o cerne contém mais ácidos de resina e ácidos graxos, enquanto que o alburno contém quantidades mais elevadas de triglicerídeos. Estas diferenças no nível de extrativos explicam a menor capacidade de absorção de água do cerne em comparação com alburno (NUOPPONEN et al., 2004).

3.2 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

A estabilidade dimensional da madeira é um atributo que descreve a sua capacidade para resistir às mudanças em suas dimensões sob determinadas condições. A madeira é um material fibroso natural e de natureza higroscópica, isto é, que atrai umidade do seu ambiente e absorve sob a forma de água ou vapor (DUBEY, 2010). Já de acordo com Hoadley (2000) a madeira é altamente anisotrópica em relação à estabilidade dimensional em resposta às alterações do conteúdo de umidade.

A contração ou inchamento é diretamente proporcional à quantidade de água sendo adsorvida ou desorvida da madeira (ROWELL, 2005). Assim, quanto maior a densidade da madeira maior será a taxa de transporte de água e, portanto, maior potencial de instabilidade dimensional. Outro fator que contribui para a instabilidade das dimensões é a liberação das tensões que se acumularam na madeira durante o crescimento das árvores, conhecidas como “tensões de crescimento” ou que se desenvolvem durante o armazenamento ou secagem. Isto resulta numa quebra da ligação adesiva e reticulação interna que deixa a madeira num estado completamente intumescido (HSU et al., 1988).

A variação dimensional da madeira não é uniforme nas diferentes direções, para a mesma alteração do teor de umidade. Assim, a madeira é anisotrópica por natureza no que diz respeito a alterações na suas dimensões (KAMKE e SIZEMORE, 2008). Estas alterações dimensionais são menores na direção longitudinal (ao longo do tronco de árvore) e muito maior na direção transversal. Conforme Bowyer et al. (2003), isso é provocado pelo ângulo das microfibrilas na camada S2 da parede celular que provoca a maior instabilidade dimensional na direção transversal (radial e tangencial).

A instabilidade dimensional é um dos principais problemas da madeira em comparação com os materiais sintéticos provenientes de recursos não renováveis, sendo um fator importante que afeta a qualidade da madeira e é crucial para o mercado estrutural (WALKER, 1998). Seu conhecimento é de primordial importância no uso de produtos à base de madeira, em particular, para aplicações que exigem dimensões exatas e estáveis (ALMA et al., 1996; BAYSAL et al., 2004).

Isso indica a grande importância da estabilidade na madeira para a indústria madeireira, pois o inchamento da madeira pode resultar em dificuldade na abertura ou fechamento de portas, janelas ou gavetas. Por outro lado, as lacunas em pisos e enfraquecimento das articulações móveis e afrouxamento de cabos de ferramentas pode ocorrer devido a uma redução das dimensões por secagem após a instalação (ECKELMAN, 2008).

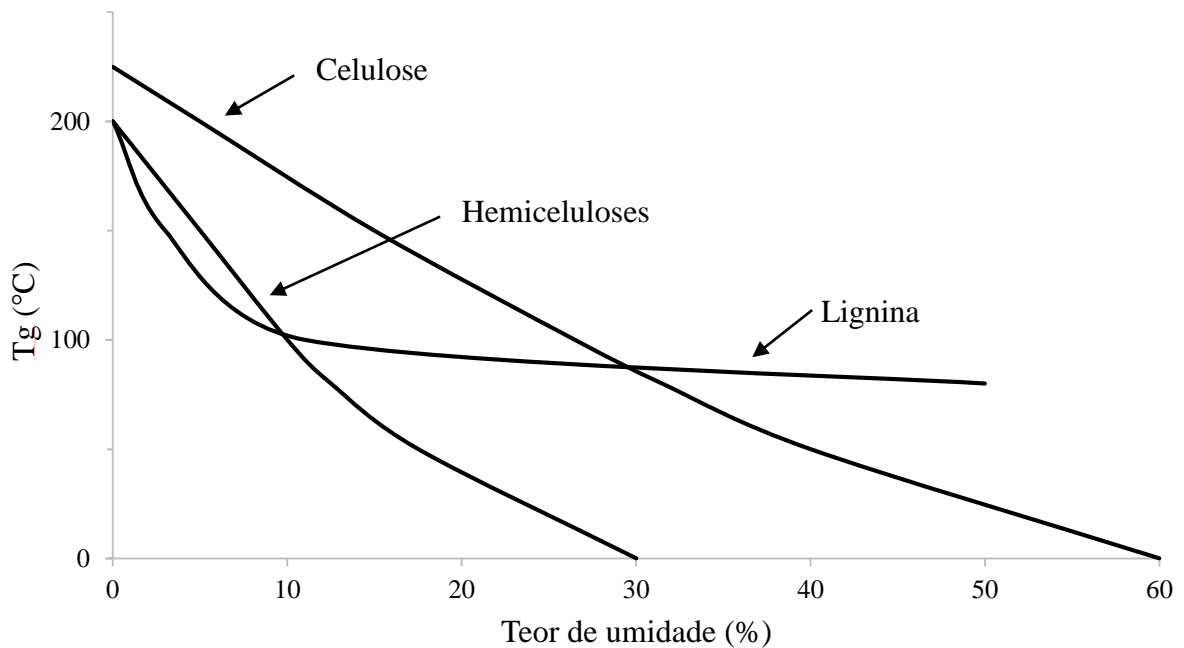
3.3 PLASTICIZAÇÃO DA MADEIRA

O comportamento viscoelástico da madeira tem sido caracterizado por muitos estudos (PANSIN e DE ZEEUW, 1970; MORSING, 2000; KUTNAR e SERNEK, 2007; RAUTKARI et al., 2010). Os polímeros amorfos (lignina e hemiceluloses) da madeira apresentam estrutura molecular desordenada e comportamento vítreo quando estão em estado natural. Entretanto, quando são aquecidos na presença de alta umidade tornam-se maleáveis e sujeitos a deformações. A temperatura em que ocorre essa alteração, é caracterizada como temperatura de transição vítrea (T_g) (MORSING, 2000).

Segundo Rautkari et al. (2010), a transição vítrea é a passagem de um estado desordenado rígido (vítreo) do polímero para uma condição que as cadeias poliméricas possuem uma maior mobilidade. Essa mobilidade, no caso de alguns polímeros naturais como as hemiceluloses e a lignina, originam um comportamento menos rígido.

A temperatura de transição vítrea da madeira é diferente dos polímeros isolados. Por exemplo, a T_g das hemiceluloses é 165-175°C, da lignina é 200 °C e da celulose é 200-230 °C, na condição seca (LABORIE, 2008). Isso indica que a interação entre polímeros de madeira desempenha um papel importante no amolecimento térmico da madeira. A madeira seca em estufa começa a amolecer a 180 °C e atinge o máximo de amolecimento a 380 °C (CHOW, 1971; HON e SHIRAIISHI, 2000) (Figura 1). A temperatura de amolecimento da madeira diminui com o aumento do teor de umidade, em que, é considerada como 160 °C em 13-14% de umidade (CHOW, 1971) e 60-90 °C para condição saturada (NAKAJIMA et al., 2008).

Figura 1 – Temperatura de transição vítrea (T_g) de componentes isolados em função do teor de umidade.



Fonte: Adaptado de Salmén (1982).

Conforme Morsing (2000), a umidade atua como um agente plasticizante dos polímeros da madeira, por meio da formação de ligações secundárias com os grupos polares. As moléculas dos polímeros afastam-se e a umidade reduz a ligação secundária entre as cadeias poliméricas, oferecendo mais espaço para a sua movimentação, o que facilita a deformação da madeira.

Durante a densificação da madeira, as regiões amorfas dos polímeros alteram o seu estado físico, tornando-se mais maleáveis, o que facilita a compressão da madeira. Em contrapartida, as microfibrilas permanecem em um estado vítreo e são menos afetadas pelas temperaturas utilizadas durante a densificação (INOUE et al., 1993; DWIANTO et al., 1998).

3.4 DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA

A densificação da madeira pode ser entendida como uma extensão da modificação térmica, em que a madeira é comprimida sob condições plastificantes sem qualquer quebra estrutural, sendo que a umidade e o calor atuam como agentes plastificantes (SEBORG e STAMM, 1941). Já conforme Navi e Heger (2004), a densificação refere-se a um tratamento que visa aumentar a densidade da madeira, por meio da compressão da madeira para reduzir o

volume de vazios, por impregnação dos espaços vazios, com uma substância fluida, ou usando uma combinação de compressão e de impregnação. Esse processo tem a finalidade de melhorar as propriedades tecnológicas, principalmente a resistência mecânica do material.

A densificação é um meio atraente de modificar a madeira com baixa densidade e torná-la comparável com a madeira de espécies com alta densidade ou mesmo com outros materiais (KUTNAR e KAMKE, 2012). O tratamento termohigromecânico é um desses processos que envolve a compressão mecânica da madeira em direções transversais (especialmente na direção radial), utilizando calor, vapor e água para produzir um produto com maior densidade e melhores propriedades mecânicas (LAMASON e GONG, 2007). De acordo com Wolcott et al. (1994) a compressão da madeira somente é possível pelo fato que a madeira apresenta comportamento viscoelástico, em que, as principais variáveis influenciáveis são a pressão, temperatura e o teor de umidade.

As vantagens da madeira densificada já são conhecidas há mais de 100 anos e extensa investigação tem sido realizada. O conceito de compressão da madeira para melhorar as propriedades começou no final do século XIX, sendo que as primeiras patentes foram registradas nos Estados Unidos (SEARS, 1900; WALSH e WATTS, 1923; ESSELEN, 1934; OLSON, 1934). Essas patentes se baseavam essencialmente na compressão mecânica e não consideraram adequadamente a plasticização ou a estabilidade dos produtos. A densificação de madeira foi introduzida comercialmente antes que esses fenômenos fossem realmente compreendidos, conseqüentemente, nenhuma das patentes foram colocadas em uso contínuo.

Pesquisas posteriores sobre plasticização de madeira e redução do inchamento irreversível (*springback*) levaram ao desenvolvimento de novos produtos, utilizando-se tratamentos térmicos e químicos para alterar as propriedades da madeira. Os principais produtos desenvolvidos foram *Lignostone*, *Lignofol*, *Kunsthartzschichtholz*, *Compreg*, *Impreg* e *Staypak* (KOLLMANN et al., 1975; MORSING, 2000).

A principal desvantagem da maioria dos tipos de madeira densificada (exceto aqueles com alto teor de resina) refere-se a falta de estabilidade dimensional. Quando imersos em água ou expostos a alta umidade relativa, os produtos compactados tendem a apresentar inchamento irreversível (*springback*). Isto pode ser um problema grave quando a madeira densificada é utilizado em ambientes de umidade elevada ou em contato com o solo (RAUTKARI et al., 2010).

Conforme Heger et al. (2004), o *springback* é provocado pelo armazenamento de energia de deformação elástica durante a compressão das microfibrilas de hemiceluloses. Já Morsing (2000) complementa que o *springback* ocorre porque as tensões internas introduzidas

durante compressão são aliviadas quando a madeira fica exposta a umidade. Segundo Wolcott e Shutler (2003), o *springback* pode ser atribuído a combinação da estrutura celular e as propriedades dos polímeros da parede celular. A influência da temperatura e umidade podem ser atribuídas principalmente para as mudanças que ocorrem na natureza viscoelástica dos polímeros da parede celular uma vez que estas variáveis apresentam pouca influência sobre a estrutura da célula. Já Inoue et al. (1993), afirmam que o inchamento da madeira “sem tratamento” é causado pelo aumento de volume da parede celular, enquanto que para madeira densificada o inchamento também é devido à recuperação da forma das células.

Segundo Sandberg et al. (2013) os mecanismos básicos para a redução do fenômeno *springback* se resumem em: impedir que a madeira absorva líquidos, alterando a higroscopicidade da parede celular, tornando-a inacessível à água; formar reticulações covalentes entre os componentes da madeira no estado deformado e relaxar as tensões armazenadas nas microfibrilas e polímeros durante a compressão.

Para minimizar o problema do *springback* na madeira densificada, vários pesquisadores analisaram a estabilização da madeira por meio do aquecimento (HILLIS e ROZSA, 1985; HSU et al., 1988; INOUE et al., 1993; DWIANTO et al., 1996; INOUE et al., 1996; MORSING, 2000; WELZBACHER et al., 2008; RAUTKARI et al., 2010). Conforme Hsu et al. (1988), o pré-tratamento com vapor produz madeira estável dimensionalmente. Isso ocorre por meio da hidrólise parcial de hemiceluloses, tanto para folhosas e coníferas, o que aumenta a fixação da compressão da madeira. Já Inoue et al. (1993) observaram que a fixação quase completa pode ser conseguida por meio da vaporização da madeira comprimida durante 1 minuto a 200 °C ou 8 min a 180 °C. De acordo com Dwianto et al. (1996), a fixação da compressão é obtida por tratamento de vapor, que provoca a hidrólise rápida de hemiceluloses, modificação parcial da lignina, hidrólise parcial da celulose amorfa e reorientação na região cristalina. Além disso, descobriram que o grau de recuperação diminui quando o tempo de compressão e a temperatura são aumentados. Já conforme Inoue et al. (1996), o pré-cozimento a vapor aumenta a compressibilidade da madeira e reduz a quantidade de tensão armazenado devido ao fluxo viscoso de substâncias de madeira.

Na Alemanha, um sistema de pós-tratamento para madeira densificada foi desenvolvido por meio do aquecimento à óleo (OHT[®]) (RAPP e SAILER, 2000). Já Welzbacher et al. (2008) investigaram a adequação de OHT[®] para a densificação industrial em grande escala, concentrando-se na eliminação do *springback* e descobriu que a recuperação da compressão da madeira de *Abies alba* foi completamente eliminada. No Canadá, Fang et al. (2012) investigaram os efeitos do processo OHT[®] em madeira densificada, e observaram que ocorreu

springback em madeira tratadas em baixas temperaturas, e que esse fenômeno reduziu drasticamente quando a temperatura do óleo foi superior a 180 °C.

3.5 TERMORRETIFICAÇÃO EM ÓLEO (OHT[®])

A termorretificação é um método que modifica as propriedades da madeira, incluindo a durabilidade biológica, estabilidade dimensional, higroscopicidade e cor. A produção industrial da madeira que tem sido tratado termicamente com óleo quente e ar quente aumenta dia a dia, porque estes tratamentos são os métodos mais ambientalmente corretos do que outros processos utilizados no passado (GÜNDOZ e AYDEMİR, 2009; KORKUT e BUDAKÇI, 2009; GARCIA et al., 2012; CADEMARTORI et al., 2013; MISSIO, 2014).

A termorretificação da madeira caracteriza-se pela aplicação de calor na madeira, normalmente entre 180 a 260 °C, para provocar alterações benígnas em algumas propriedades da madeira. Em que, temperaturas abaixo de 140 °C resultam em insignificantes modificações nas propriedades do material e quando muito elevadas causam degradações inaceitáveis (HILL, 2006). Para Cademartori et al. (2013), temperaturas de termorretificação acima de 200 °C causam sérios danos a madeira, em que a faixa ideal de tratamentos estaria entre 180 a 200 °C.

Além da temperatura utilizada durante o processo de termorretificação, outros parâmetros do processo devem ser levados em consideração. De acordo com Militz (2002) e Hill (2006) as variáveis influentes que podem causar significativas modificações no material são o teor de umidade e densidade da madeira, tempo e atmosfera de tratamento (oxigênio, nitrogênio, vácuo e óleo), espécies florestais (BAL e BEKTAS, 2012), sistemas secos e úmidos e dimensões das amostras (BAYSAL et al., 2014). Com a variação dessas variáveis foram desenvolvidos os principais processos de modificação térmica da madeira: Thermo wood[®], Platô[®], Retification[®], Perdure[®], Vap Holzsysteme[®] e o OHT[®] (Oil heat treatment) (BAL, 2015).

O desenvolvimento do processo OHT[®] somente foi possível, porque o ponto de ebulição de muitos óleos naturais é maior que a temperatura necessária para o tratamento térmico da madeira. Esse processo é muito diferente dos outros porque utiliza óleo quente como atmosfera de transferência de calor, devido a elevada condutibilidade térmica do óleo, permitindo um controle preciso da temperatura quando comparado com outros tratamentos térmicos e principalmente apresenta menos efeito sobre as propriedades mecânicas do que o tratamento com ar quente (SAILER et al., 2000; MENZ, 2014).

O processo OHT[®] foi desenvolvido pelo professor Dr. Andreas O. Rapp em parceria com o Centro Federal de Pesquisa Florestal de Hamburgo na Alemanha (RAPP e SAILER,

2000). Este tipo de tratamento é realizado em um recipiente fechado com o óleo vegetal quente circulando em torno da madeira. O óleo quente é utilizado para transferir calor de forma rápida e homogênea para a madeira na ausência de oxigênio. Além disso, parte do óleo penetra na madeira, reduzindo a absorção de água (FANG et al., 2011; FANG et al., 2012).

Muitos pesquisadores estudaram as propriedades de diferentes madeiras tratadas em diferentes tipos de óleo. Por exemplo, Wang e Cooper (2005) usou o óleo de palma, óleo de soja e parafina bruta com madeira branca abeto vermelho, e os resultados mostraram que parafina bruta apresentou-se melhor do que os óleos para melhorar a umidade de equilíbrio. Bazzyar (2012) testou as propriedades físicas da madeira de Aspen tratada termicamente utilizando o óleo de linhaça e relataram diminuição da instabilidade dimensional, umidade de equilíbrio, absorção de água e acréscimo na resistência à deterioração. Já Dubey et al. (2012) estudaram os efeitos do tempo de aquecimento sobre as propriedades físicas da madeira de *Pinus radiata* tratada em óleo, e descobriram que a viscosidade do óleo e a capacidade da madeira de repelir água foram aumentadas com o acréscimo na duração do tratamento térmico.

3.6 MODIFICAÇÕES NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DENSIFICADA TRATADA EM ÓLEO

Por meio da compressão, aproximadamente metade do volume vazio entre as células e o lúmen é removido, ocasionado pelo efeito do 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 e PERSSON, 2004; KUTNAR et al., 2008). Conforme Fang et al. (2012), a madeira de *Populus nigra* apresentou acréscimo na densidade após a densificação de 0,39g/cm³ para 0,81g/cm³. Já a dureza apresentou acréscimo de 120% utilizando o grau de compressão de 24%, temperatura de 145 °C e tempo de compressão de 7 min (GONG e LAMASON, 2007).

Segundo Fang et al. (2012), a dureza Brinell da madeira densificada foi cerca de três vezes superior ao controle, e a resistência a flexão também aumentou. No entanto, essas propriedades mecânicas diminuíram com o aumento da temperatura de densificação. Conforme Gong e Lamason (2007), apesar desta redução, as propriedades mecânicas da madeira densificada ainda foram superior à madeira não tratada.

Conforme Arruda e Del Menezzi (2013), para a madeira densificada de *Trattinnickia burseraefolia* houve redução do teor de umidade de equilíbrio, resultando em revestimentos

densos e reduzindo consideravelmente a higroscopicidade. No entanto, a estabilidade dimensional foi prejudicada devido à liberação das tensões de compressão, recomendando-se um pós-tratamento que libere lentamente as tensões de compressão, sem prejudicar a estabilidade dimensional.

Foi verificado que o tratamento térmico pelo processo OHT[®] foi útil para melhorar algumas propriedades (estabilização dimensional) da madeira (PELIT et al., 2014). Conforme Ahajji et al. (2009) e Militz (2002) a termorretificação em óleo ocasiona aumento da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica. Isto ocorre porque as hemiceluloses são o constituinte químico mais hidrofílico presente na madeira e também o mais instável termicamente (HILL, 2006). Conforme Ates et al. (2009), a degradação das hemiceluloses, provoca redução na quantidade de grupos OH livres, diminuindo a acessibilidade da água na madeira. Deste modo, quanto menor a quantidade de grupos OH livres maior será a estabilidade térmica da madeira.

De acordo com Gong et al. (2010) o inchamento em espessura (direção radial) da madeira densificada após o tratamento térmico pode ser reduzido de 32% para 9%. Conforme Bal (2015) a estabilidade dimensional, umidade de equilíbrio e o ponto de saturação das fibras apresentaram redução após o tratamento em óleo quente, principalmente na temperatura de 220 °C. Geralmente, pode-se dizer que o meio de tratamento térmico utilizado tem um efeito significativo sobre o resultado final. Em que, para as mesmas temperaturas de óleo e ar, os autores observaram que o óleo aquecido foi mais eficaz no transporte de calor e na melhoria das propriedades físicas da madeira.

Entre as alterações na superfície da madeira destaca-se a molhabilidade, colorimetria e rugosidade. De acordo com Bekhta (2016), a análise de molhabilidade da madeira densificada demonstrou que houve diminuição do ângulo de contato, e conseqüentemente o aumento da hidrofobicidade da madeira. Segundo os mesmos autores, a temperatura apresentou maior efeito do que a pressão. Conforme Candan et al. (2010) e Bekhta et al. (2012) o tratamento termohigromecânico torna a superfície da madeira mais regular, diminuindo a rugosidade. Isto é ocasionado principalmente pelo efeito da temperatura e da pressão de compressão. Além disso, conforme Cademartori et al. (2014) a termorretificação provoca escurecimento homogêneo da superfície da madeira ocasionada pelas modificações na estrutura química da madeira, principalmente relacionada a diminuição no conteúdo de hemiceluloses, condensação/migração de extrativos para a superfície da madeira.

De acordo com Diouf et al. (2011), a densificação resulta em importantes mudanças químicas na superfície da madeira, principalmente em temperaturas acima de 160 °C, causando

redução da higroscopicidade e da rugosidade de superfície. Segundo Bekhta e Marutzky (2007) para a madeira de faia densificada com teor de umidade de 7,2%, pressões de 5, 10, e 15 Mpa e temperatura de 200 °C, a rugosidade da superfície foi reduzida com o acréscimo dos valores de pressão.

A partir das considerações das pesquisas anteriores, e devido às suas elevadas propriedades mecânicas e baixa higroscopicidade, a madeira densificada apresentam um bom potencial para pisos, passos de escadarias e tampos de mesa (FANG et al., 2012).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 SELEÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

O material utilizado foi proveniente de povoamentos homogêneos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus dunnii* Maiden, *Eucalyptus cloeziana* F. Muell e *Eucalyptus tereticornis* Sm (Figura 2a). Tais povoamentos estavam localizados no município de Santa Maria- RS, que segundo a classificação de Köppen, apresenta clima subtropical úmido Cfa, isto é, subtropical úmido sem estação seca definida e com verões quentes. A precipitação anual varia de 1600 a 1900 mm (ALVARES et al., 2013). O solo em que se encontrava os plantios é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (EMBRAPA, 2018).

Figura 2 – Fluxograma das etapas de densificação e pós-tratamento na madeira.



Em que: a) seleção dos povoamentos florestais; b) desdobro das toras; c) secagem das pranchas; d) confecção das peças de madeira; e) pré-aquecimento das peças de madeira; f) prensagem das peças de madeira; g) confecção dos corpos de prova; h) pós-tratamento em óleo; i) climatização dos corpos de prova.

Fonte: Autor.

Para a seleção das árvores foi adotado a amostragem com base na área basal média do povoamento. Para tal, foram instaladas aleatoriamente parcelas temporárias de 20 x 30m, visando inventariar a área, evitando-se parcelas na borda do povoamento. Foi mensurado o

diâmetro a altura do peito (1,3m do solo) e altura total visando quantificar a área basal e volume individual das árvores amostradas.

Após a seleção das árvores, foram derrubadas quatro representantes de cada espécie, mensuradas as variáveis dendrométricas (Tabela 1) e seccionado a primeira tora (próxima a base) com 3 metros de comprimento para a confecção dos corpos de prova. Posteriormente as toras foram encaminhadas ao Laboratório de Produtos Florestais do Departamento de Ciências Florestais da UFSM, onde foram desdobradas com o auxílio de serra fita vertical e retiradas pranchas centrais e laterais com orientação tangencial e 5 cm de espessura. Na sequência foram gradeadas ao ar livre para a secagem (Figura 2c).

Tabela 1 – Características dendrométricas das árvores selecionadas de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.

Espécie	Idade (anos)	DAP (cm)	Área Basal (m ²)	Altura total (m)	Volume (m ³)
<i>E. grandis</i> ¹	21	51,3	0,2067	36,4	3,2353
		48,2	0,1824	34,3	2,6902
		47,8	0,1795	33,5	2,5857
		46,5	0,1698	34,3	2,5044
<i>E. dunnii</i> ²	18	42,8	0,1439	32,8	1,9352
		41,4	0,1346	30,2	1,6666
		40,2	0,1269	29,3	1,5244
		38,4	0,1158	28,5	1,3531
<i>E. cloeziana</i> ³	20	40,4	0,1282	33,4	1,9696
		38,5	0,1164	32,1	1,7188
		37,5	0,1104	29,4	1,3308
		36,7	0,1058	27,5	1,3384
<i>E. tereticornis</i> ⁴	22	37,2	0,1086	31,3	1,6316
		36,4	0,1041	30,1	1,5040
		35,2	0,0973	28,9	1,3497
		34,3	0,0924	27,2	1,2064

Em que: DAP = Diâmetro a altura do peito (1,3m do solo). ¹ fator de forma de 0,43; ² fator de forma 0,41; ³ fator de forma de 0,46; ⁴ fator de forma 0,48.

Fonte: autor.

4.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após as pranchas secarem até atingir a umidade de equilíbrio com o ambiente, a espessura das pranchas foi reduzida utilizando-se de uma plaina desgrossadeira e confeccionado as peças de madeira com o auxílio de uma serra circular e destopadeira. Foram confeccionadas 60 peças de madeira, com as dimensões de 2,8 x 15 x 40 cm (espessura, largura e comprimento) nas espécies de *E. cloeziana* e *E. tereticornis*. Na espécie *E. dunnii* foi utilizada a dimensão de 3,0 x 15 x 40 cm, e na madeira de *E. grandis* foi utilizada a dimensão de 3,7 x 15 x 40 cm, devido a sua menor densidade em comparação as demais. Salientando que a espessura final desejada foi de 2,0 cm, de modo a facilitar a padronização durante realização dos ensaios das propriedades tecnológicas da madeira.

As peças de madeira foram levadas para climatização (20 °C e 65% de UR), onde permaneceram até atingir o equilíbrio higroscópico. Em seguida, as amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,01g e mensuradas as faces (radial, tangencial e longitudinal) com o uso de paquímetro digital com precisão de 0,01mm (Figura 2d).

4.3 TRATAMENTOS TERMOHIGROMECÂNICOS

O processo teve início com o aquecimento em água a 100 °C das peças de madeira climatizadas, por um período de 20 minutos (Figura 2e). Em seguida, foram transportadas para uma prensa hidráulica da marca Omeco®, equipada com dois pratos aquecidos por resistência elétrica e controle de temperatura, tempo e pressão (Figura 2f).

A temperatura dos pratos está especificada na Tabela 2, sendo que foram realizados testes preliminares variando a temperatura de 140 à 200 °C, para a definição dos tratamentos. A pressão aplicada foi de 60 kgf/cm² e o tempo de compressão foi de 40 minutos. Tais condições foram determinadas a partir de pesquisas anteriores (ARRUDA et al., 2013; PELIT et al., 2017; PERTUZZATTI et al., 2018).

Tabela 2 – Parâmetros dos tratamentos termohigromecânicos para a madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus tereticornis*.

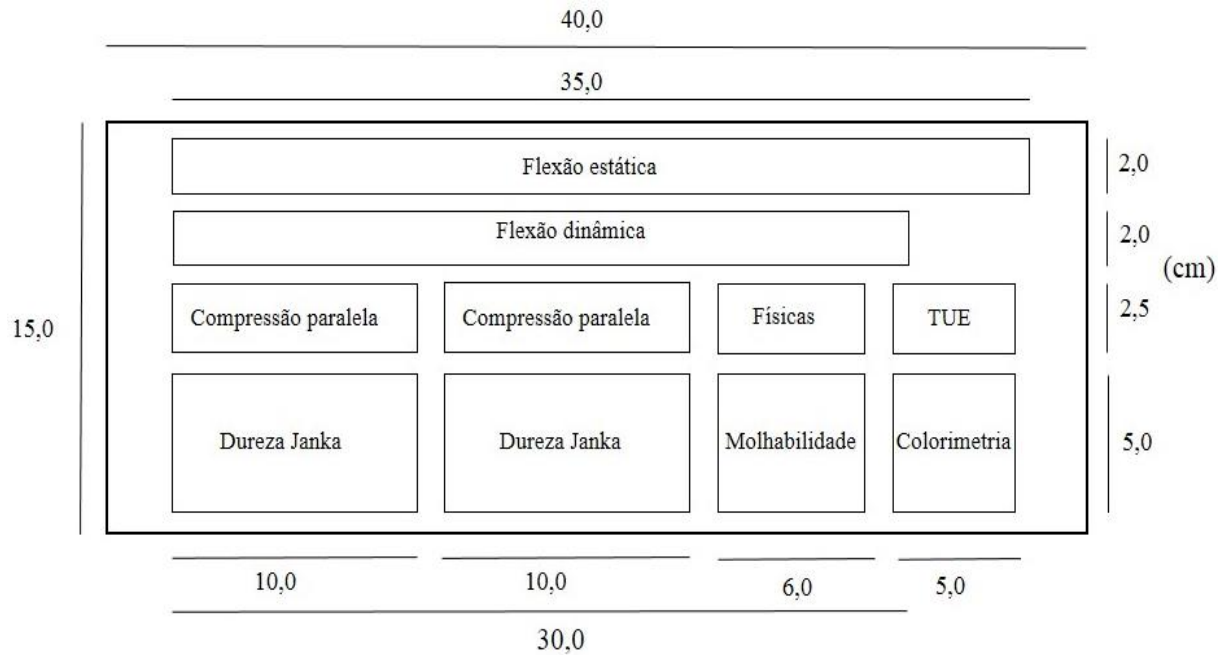
Espécie	Tratamento	Temp. na prensa	Temp. do óleo
<i>E. grandis</i>	EC	–	–
	EC-T	–	180 °C
	E140	140 °C	–
	E140-T	140 °C	180 °C
	E160	160 °C	–
	E160-T	160 °C	180 °C
<i>E. dunnii</i>	EC	–	–
	EC-T	–	180 °C
	E140	140 °C	–
	E140-T	140 °C	180 °C
	E160	160 °C	–
	E160-T	160 °C	180 °C
<i>E. cloeziana</i>	EC	–	–
	EC-T	–	180 °C
	E140	140 °C	–
	E140-T	140 °C	180 °C
	E160	160 °C	–
	E160-T	160 °C	180 °C
<i>E. tereticornis</i>	EC	–	–
	EC-T	–	180 °C
	E140	140 °C	–
	E140-T	140 °C	180 °C
	E160	160 °C	–
	E160-T	160 °C	180 °C

Em que: Temp = temperatura; EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T: *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo.

As peças de madeira foram prensadas no sentido radial e após atingir o tempo de prensagem a pressão foi retirada e as peças permaneceram em contato com os pratos aquecidos

até a temperatura atingir 100 °C. Na sequência, foram confeccionados os corpos de prova para realização do tratamento de estabilização dimensional em óleo vegetal e determinação das propriedades tecnológicas (Figura 3).

Figura 3 – Representação da retirada dos corpos de prova das peças de madeira.



Fonte: Autor.

4.4 TERMORRETIFICAÇÃO EM ÓLEO (OHT®)

O processo de termorreificação em óleo foi executado com auxílio de um banho de óleo laboratorial Quimis® modelo Q213-22, com capacidade de 16 litros. Inicialmente os corpos de prova foram colocados dentro do equipamento e adicionado 12,6 litros de óleo de soja em temperatura ambiente (Figura 2g). Em seguida, o óleo foi aquecido até a temperatura de 180 °C e a partir disso, contabilizado o período de 60 minutos (Figura 2h). Na sequência, os corpos de prova foram retirados do banho de óleo e transferidos para uma estufa laboratorial com circulação forçada de ar por um período e temperatura padrão de 1h e 103 °C, respectivamente, com objetivo de “curar” o óleo presente nos corpos de prova e determinar a massa seca das amostras.

Em seguida, os corpos de prova foram dispostos em câmara climatizada (20° C e 65% umidade relativa) até atingirem o equilíbrio higroscópico (Figura 2i). Posteriormente foram

realizados os ensaios físicos, mecânicos, químicos e superficiais da madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*. Ressalta-se que os corpos de prova controle (sem tratamento) permaneceram na câmara climatizada desde o momento da confecção dos mesmos até a realização dos ensaios de caracterização.

4.5 ENSAIOS FÍSICOS

Inicialmente foi determinado a absorção de água e o grau de compressão diretamente nas peças de madeira. Para os demais ensaios físicos foram utilizados 12 corpos de prova com dimensões de 2 x 2 x 6 cm (radial, tangencial e longitudinal), retirados das peças das madeiras tratadas. As propriedades físicas analisadas foram a variação de massa, teor de umidade de equilíbrio, densidade aparente, estabilidade dimensional e higroscopicidade.

4.5.1 Grau de compressão (GC)

O grau de compressão foi calculado a partir da relação entre espessura final e inicial das peças de madeira (Equação 1), medidas com paquímetro digital (0,01mm) imediatamente após o tratamento termohigromecânico.

$$GC = \frac{E_i - E_f}{E_i} \cdot 100 \quad (1)$$

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

4.5.2 Teor de umidade de equilíbrio (TU_{eq})

O TU_{eq} foi calculado (Equação 2) de acordo com a norma *American Society for Testing and Materials* – ASTM D143-94 (ASTM, 2000). Para tanto, os corpos de prova foram pesados com auxílio de balança digital (0,01g) e transportados para secagem em estufa laboratorial a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante.

$$TU_{eq} = \frac{M_{clim} - M_{seca}}{M_{seca}} \cdot 100 \quad (2)$$

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 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g).

4.5.3 Variação percentual de massa (VPM)

A VPM foi realizada utilizando a relação entre a massa das peças antes e após a densificação. Para a madeira tratada em óleo foi utilizado a relação entre os corpos de prova antes e após o tratamento. Como foi realizada a padronização na condição climatizada para o início dos tratamentos, foi necessário utilizar a Equação 3 para encontrar a massa seca dos corpos de prova.

$$M_{BH} = \frac{M_{Clim}}{1 + TU_{eq}/100} \quad (3)$$

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 (%).

Após a determinação da M_{BH} , foi determinado a VPM através da Equação 4.

$$VPM = \frac{M_{AH} - M_{BH}}{M_{BH}} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que: VPM = variação percentual de massa (%); M_{BH} = massa seca dos corpos de prova antes da densificação ou antes do tratamento em óleo; M_{AH} = massa seca dos corpos de prova depois da densificação ou após o tratamento em óleo.

4.5.4 Densidade aparente a 12% (ρ_{ap})

Para a determinação da ρ_{ap} (Equação 5) foram utilizadas as mesmas amostras que foi determinado o TU_{eq} . Em que, foram pesadas e medidas antes da retirada da câmara climatizada (20°C e 65% de UR).

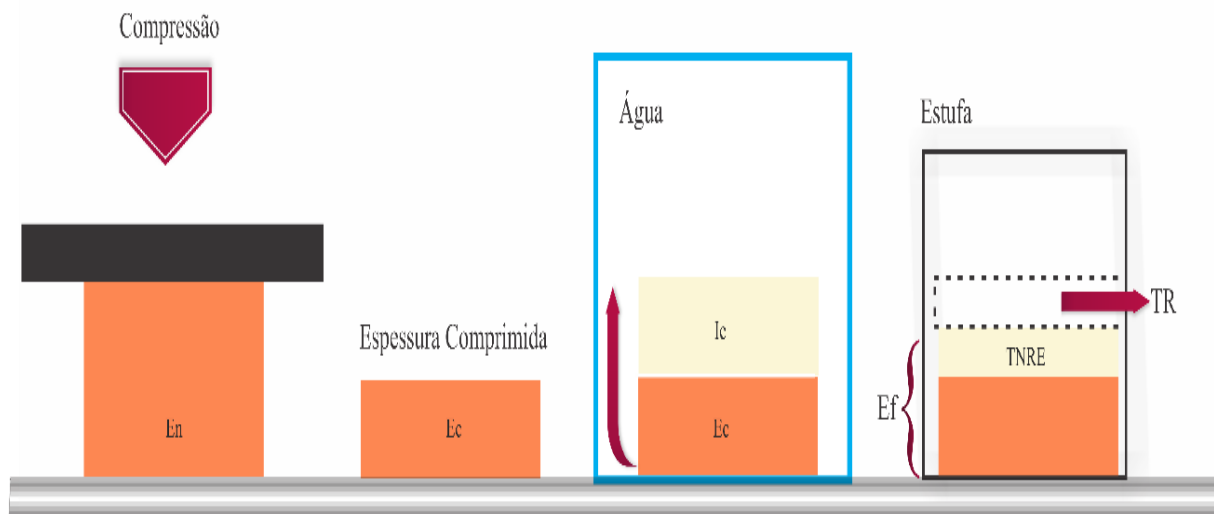
$$\rho_{ap} = \frac{M_{clim}}{V_{clim}} \quad (5)$$

Em que: ρ_{ap} = densidade aparente dos corpos de prova (g/cm^3); M_{clim} = massa climatizada dos corpos de prova (g); V_{clim} = volume climatizado dos corpos de prova (cm^3).

4.5.5 Estabilidade dimensional e Higroscopicidade

Para determinar tais propriedades seguiu-se a metodologia proposta por Arruda (2012), em que, os corpos de prova foram secos a $103\text{ }^\circ\text{C}$ até atingirem peso constante. Na sequência, foram imersos em água para determinação do inchamento em espessura e absorção de água após 2h e 24h (IE2H e IE24H). E após saturada, a madeira foi submetida a secagem em estufa para a obtenção da taxa de retração e taxa de não retorno em espessura (Figura 4).

Figura 4 - Esquema do teste de inchamento em espessura.



Em que: E_n = espessura natural da amostra; E_c = espessura comprimida; E_f = espessura final; IE = inchamento em espessura; $TNRE$ = taxa de não retorno em espessura e TR = taxa de retração.

Fonte: Autor.

Para a caracterização dessas variáveis foi calculado o inchamento em espessura e absorção de água após duas horas de imersão em água (IE2H, AB2H) (Equações 6 e 7 respectivamente), inchamento em espessura e absorção de água após vinte e quatro horas de

imersão (IE24H, AB24H) (Equações 8 e 9, respectivamente), taxa de não retorno em espessura (TNRE) (Equação 10) e taxa de retração (TR) (Equação 11).

$$IE2H = \frac{(E2H - E_i)}{E_i} \times 100 \quad (7)$$

$$AB2H = \frac{(M2H - M_i)}{M_i} \times 100 \quad (8)$$

$$IE24H = \frac{(E24H - E_i)}{E_i} \times 100 \quad (9)$$

$$AB24H = \frac{(M24H - M_i)}{M_i} \times 100 \quad (10)$$

$$TNRE = \frac{(E_e - E_i)}{E_i} \times 100 \quad (11)$$

$$TR = \frac{(E24H - E_e)}{E24H} \times 100 \quad (12)$$

Em que: IE2H = inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água (%); E2H = espessura após 2 horas de imersão em água (cm); E_i = espessura inicial do corpo de prova (cm); AB2H = absorção de água após 2 horas de imersão (%); M2H = massa após 2 horas de imersão em água (g); M_i = massa inicial do corpo de prova (g); IE24H = inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água (%); E24H = espessura após 24 horas de imersão em água (cm); AB24H = absorção de água após 24 horas de imersão (%); M24H = massa após 24 horas de imersão em água (g); TNRE = taxa de não retorno em espessura (%); E_e = espessura após secagem na estufa (cm); TR = Taxa de retração (%); E24H = espessura após 24 horas de imersão em água (cm).

4.6 MOLHABILIDADE

A molhabilidade foi realizada para avaliar a modificação da natureza hidrofílica na superfície da madeira, para tal foi medido o ângulo de contato (θ) de água à temperatura

ambiente (cerca de 20 °C), utilizando um goniômetro da marca Krüss DSA25B (*Drop Shape Analyser*), por meio do método de gota séssil (Figura 5).

Figura 5 – Representação do goniômetro.



Fonte: Autor.

Antes dos ensaios de molhabilidade os corpos de prova foram dispostos em câmara climatizada (20 ± 1 °C e $65\pm 5\%$ de UR) até equilíbrio higroscópico. Posteriormente, os corpos de prova foram retirados e permaneceram dentro de um dessecador até o momento do ensaio, a fim de evitar modificações no teor de umidade do material e contaminações na superfície.

As medições foram realizadas sobre a superfície dos corpos de prova utilizando-se duas gotículas de água deionizada de $5\mu\text{l}$ na seção radial. Os valores foram medidos em seis tempos distintos (10, 30, 50, 70 e 90 segundos), após o contato da gotícula com a superfície.

4.7 ENSAIOS MECÂNICOS

Antecedendo a realização dos ensaios mecânicos todos os corpos de prova foram climatizados a 20 °C e 65% de umidade relativa do ar, até atingir a umidade de equilíbrio,

conforme a norma da *American Society for Testing and Materials* - ASTM D143-94 (ASTM, 2000).

4.7.1 Flexão estática

Os ensaios de flexão estática foram realizados a partir de adaptações na norma da *American Society for Testing and Materials* - ASTM D143-94 (ASTM, 2000). Em que, foram utilizados corpos de prova com seção transversal de 2 x 2 x 35 cm, e fixou-se o vão de 14 vezes a altura e a velocidade de ensaio para 1,04 mm/min.

Os corpos de prova foram ensaiados na máquina universal de ensaios (EMIC®, DL2000/1000, Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda, São José dos Pinhais, Brasil) com capacidade de 30kN, utilizando uma célula de carga de 20000N. Dessa forma, foi obtido o módulo de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR), isto é, a rigidez e a resistência do material analisado, respectivamente.

4.7.2 Flexão dinâmica

O teste de flexão dinâmica (resistência ao impacto) foi realizado conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Para tal, foi utilizado o equipamento denominado Pêndulo de Charpy (PW 15/10, Wolpert®, Ludwigshafen am Rhein, Alemanha). O procedimento consistiu na queda de um pêndulo, de uma altura de 1 m, diretamente no corpo de prova no sentido radial, disposto em um vão de 24 cm. Dessa forma, foi obtido o trabalho absorvido (W) para cada corpo de prova e calculado a resistência máxima ao impacto ($F_{m\acute{a}x}$) pela Equação 12.

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad (12)$$

Em que: $F_{m\acute{a}x}$ = resistência máxima ao impacto, (kJ/m²); W = trabalho absorvido, (J); b e h = dimensões transversais dos corpos de prova, (mm).

4.7.3 Dureza Janka

O ensaio de dureza Janka foi realizado na Máquina Universal de Ensaio (EMIC[®], DL2000/1000, Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda, São José dos Pinhais, Brasil), conforme a norma da *American Society for Testing and Materials* - ASTM D143-94 (ASTM, 2000). Foram realizadas três penetrações no sentido radial dos corpos de prova com as dimensões de 10 x 5 x 2 cm (longitudinal, radial e tangencial). A esfera utilizada no ensaio possui 11,3 mm de diâmetro, em que foi avaliada a carga máxima necessária para penetração de metade de seu diâmetro nos corpos de prova. De maneira contínua, a carga foi aplicada ao longo do ensaio a uma velocidade de movimento da cruzeta móvel de 6 mm/min.

4.7.4 Compressão paralela às fibras

Para o ensaio de resistência à compressão paralela às fibras foi utilizada a máquina universal de ensaios (EMIC[®], DL2000/1000, Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda, São José dos Pinhais, Brasil). O ensaio foi realizado segundo a norma da ASTM D-143 (ASTM, 2000), com corpos de prova de 2,5 x 2,5 x 10 cm e velocidade de 0,3 mm/min. As curvas carga-compressão foram tomadas ao longo de uma bitola central de 50 mm e as leituras serão realizadas até o término do limite proporcional.

4.8 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (ATR – IR)

Com a finalidade de visualizar a influência da densificação e do tratamento em óleo 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 de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), modelo Shimadzu IRPrestige-21, pertencente ao Departamento de Engenharia Química (UFMS). Para esse procedimento foram utilizadas quatro amostras de flexão estática (após o ensaio – climatizadas a 20 °C e 65% de UR), no qual foram moídas em um moinho tipo Willye modelo – TE 680. Posteriormente, a serragem foi disposta em uma peneira de 60 mesh, em que foi coletado o material que passou pela mesma. O equipamento foi configurado para a realização de 32 varreduras em transmitância, resolução de 4 cm⁻¹ e leituras entre 4000 e 700 cm⁻¹.

Para realização das razões entre picos foi utilizado o pico 1030 cm⁻¹ como padrão, visto que corresponde a deformação no plano das estruturas C-H e estiramento simétrico C-O da

celulose (CHEN et al., 2012), estruturas estáveis quando submetidas a tratamentos térmicos e químicos (MISSIO et al., 2015).

4.9 ENSAIOS COLORIMÉTRICOS

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 8mm e ângulo de 2°. Este 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 (densificada), visando identificar a influência da prensagem e do tratamento em óleo na alteração colorimétrica. Foram utilizados seis corpos de prova por tratamento, sendo que para cada corpo de prova foi realizado três medições colorimétricas. Este ensaio foi realizado anteriormente a dureza Janka, aproveitando-se os mesmos corpos de prova, que apresentaram as dimensões de 10,0 x 5,0 x 2,0 cm (L, R, T).

Os parâmetros colorimétricos avaliados foram: claridade L* (preto, 0 – branco, 100), coordenada cromática a* (+ vermelho, - verde) e coordenada cromática b* (+ amarelo, - azul). Além disso, foi determinada a variação de cor (ΔE), por meio da Equação 13.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (13)$$

Em que: ΔE = variação de cor; ΔL = variação dos parâmetros de claridade; Δa = variação da coordenada cromática vermelho – verde; Δb = variação da coordenada cromática amarelo – azul. Variação dos parâmetros entre corpos de prova densificados com relação as amostras controle.

4.10 ANÁLISE DOS DADOS

A análises estatísticas dos dados foram realizadas através 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 algoritmos White e Shapiro-Wilk.

Na ANOVA foi considerado arranjo fatorial 4 x 6, com quatro espécies (*E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*) e seis tratamentos (EC, EC-T, E140, E140-T, E160 e

E160-T). Em caso de rejeição da hipótese nula ($p < 0,05$) foi realizado desmembramento dos dados, e as médias serão comparadas pelo teste de Tukey em 5% de significância, por meio do programa SISVAR (FERREIRA 2011).

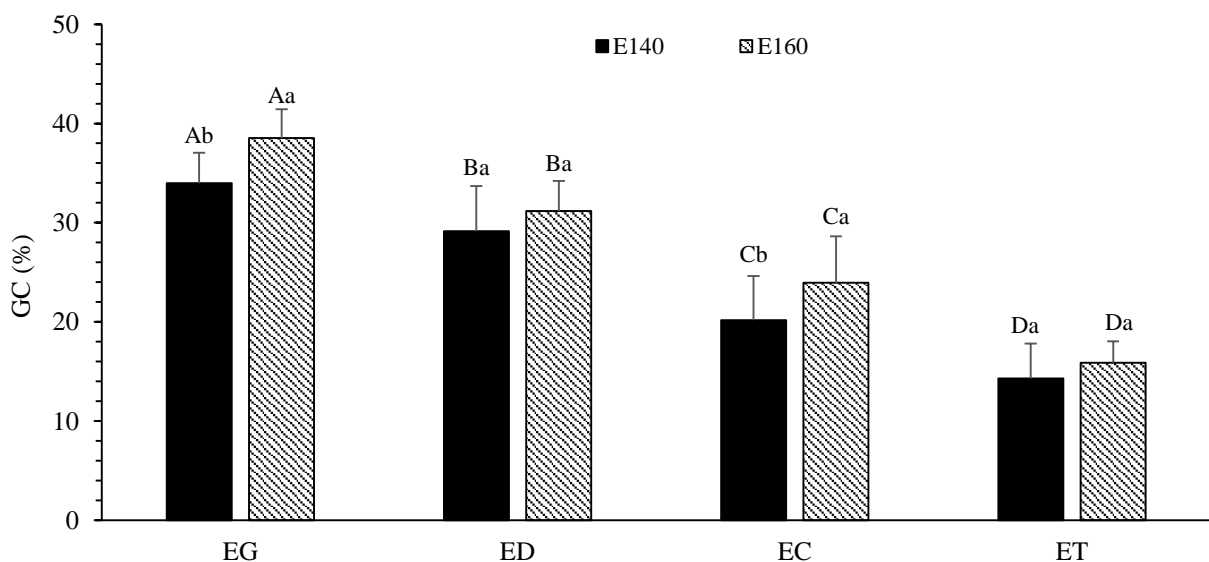
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIOS FÍSICOS

5.1.1 Grau de compressão (GC)

Para o GC foi observado que a madeira de *E. grandis* apresentou maior facilidade de compressão em ambas as temperaturas (140 e 160 °C) em relação às demais espécies. Em contrapartida, a madeira de *E. tereticornis* apresentou o menor GC, em que tal valor foi ~60% inferior que o *E. grandis*. Este resultado mostra que a densidade inicial apresenta grande impacto no grau de compressão: quanto menor a densidade original, maior é o grau de compressão. Este fenômeno é em razão de sua anatomia, em que uma madeira mais leve, apresenta mais espaços vazios e paredes celulares mais finas, o que facilita a compressão (UNSAI et al., 2011). Já entre as temperaturas de prensagem, foi observado que quando a madeira foi aquecida na maior temperatura (160 °C) houve acréscimo no GC para a maioria das espécies avaliadas. Isto pode ser explicado pelo amolecimento da madeira, ocasionado pelo efeito aquecimento da madeira sob alta umidade.

Figura 6 – Grau de compressão (GC) para a madeira de *E. grandis* (EG), *E. dunnii* (ED), *E. cloeziana* (EC) e *E. tereticornis* (ET).



Em que: As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre as diferentes temperaturas de prensagem, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

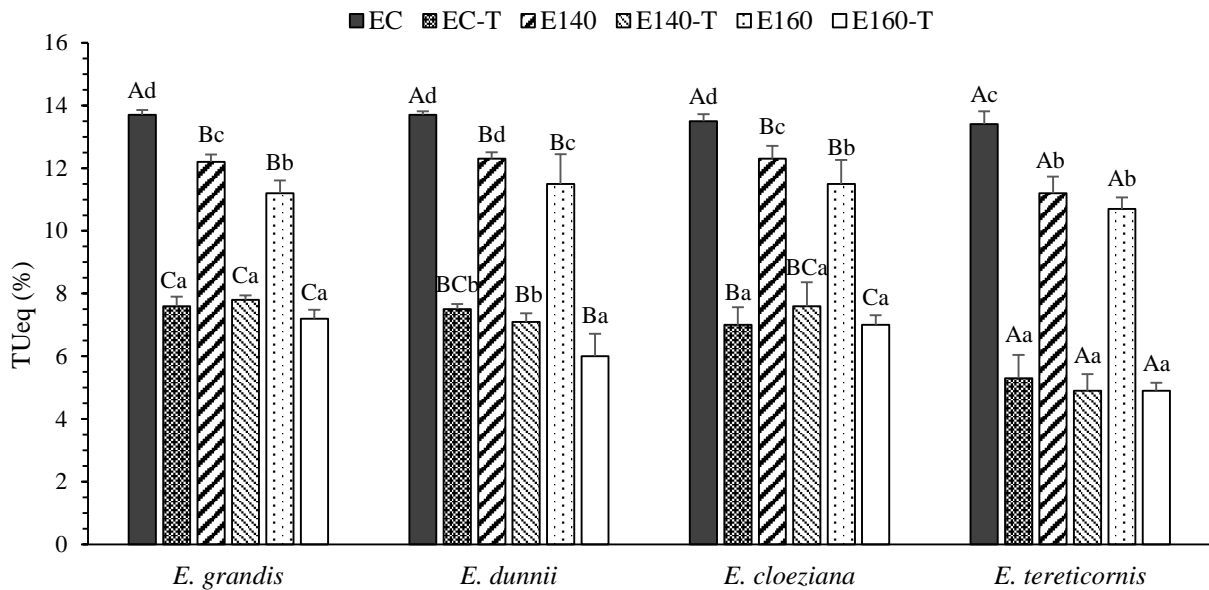
Conforme Bekhta et al. (2012), há uma clara dependência nos resultados do GC com os parâmetros da densificação (pressão, temperatura, tempo e teor de umidade), mas os resultados dos pesquisadores citados, revelaram que a temperatura é o principal fator que afeta o GC. Isto pode ser explicado pelo comportamento viscoelástico da lignina, que tende a amolecer quando atinge a temperatura de transição vítrea (WOLCOTT et al., 1990), favorecendo a compressão da madeira a valores mais elevados (WELZBACHER et al., 2008).

Segundo Laine et al. (2013) quando a compressão inicia com a temperatura de 100 °C, ocorre deformação em toda a espessura, enquanto que a 200 °C a deformação foi concentrada mais na superfície aquecida. Isto ocorre porque a 100 °C, o calor não é transferido de forma eficaz dentro da amostra e abaixo desta temperatura os constituintes da madeira não estão em um estado amolecido. De acordo com Keckes et al. (2003) a deformação permanente na madeira devido ao fluxo viscoso dos constituintes da matriz ou por reorganização da pontes de hidrogênio entre os componentes da parede celular (NAVI et al., 2002; ADLER e BUEHLER, 2013).

5.1.2 Teor de umidade de equilíbrio (TU_{eq})

Para o TU_{eq} foi verificado que após a densificação houve decréscimo quando comparado ao controle, para ambas as espécies (Figura 7). Ao analisar a temperatura de densificação foi verificado que na temperatura de 140 °C e 160 °C (sem pós-tratamento), houve redução de ~10% e ~15%, respectivamente. Isso pode ser explicado pela redução dos espaços vazios durante a compressão e pelo efeito da temperatura na redução da higroscopicidade da madeira. Analisando o efeito do pós-tratamento em óleo no TU_{eq} , foi verificado que diferiu dos demais tratamentos em todas as espécies analisadas. Em que, apresentou redução no TU_{eq} de aproximadamente 40% em ambas as espécies.

Figura 7 – Teor de umidade de equilíbrio (TU_{eq}) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

A diminuição do TU_{eq} após a densificação e pós-tratamento em óleo já foi constatada por diversos autores (WELZBACHER et al., 2008; DUBEY, 2010; PELIT et al., 2014; BAL, 2015; BEKHTA et al., 2016). O decréscimo do TU_{eq} está associado a degradação térmica das hemicelulosas, redução dos grupos OH e/ou clivagem das cadeias glicosídicas (AKGÜL et al., 2008; AKYILDIZ e ATES, 2008). Conforme Santos et al. (2012), a redução do TU_{eq} em madeiras densificadas é muito vantajosa e indica que as madeiras são mais estáveis a variações de umidade, pois estão menos susceptíveis à adsorção de água.

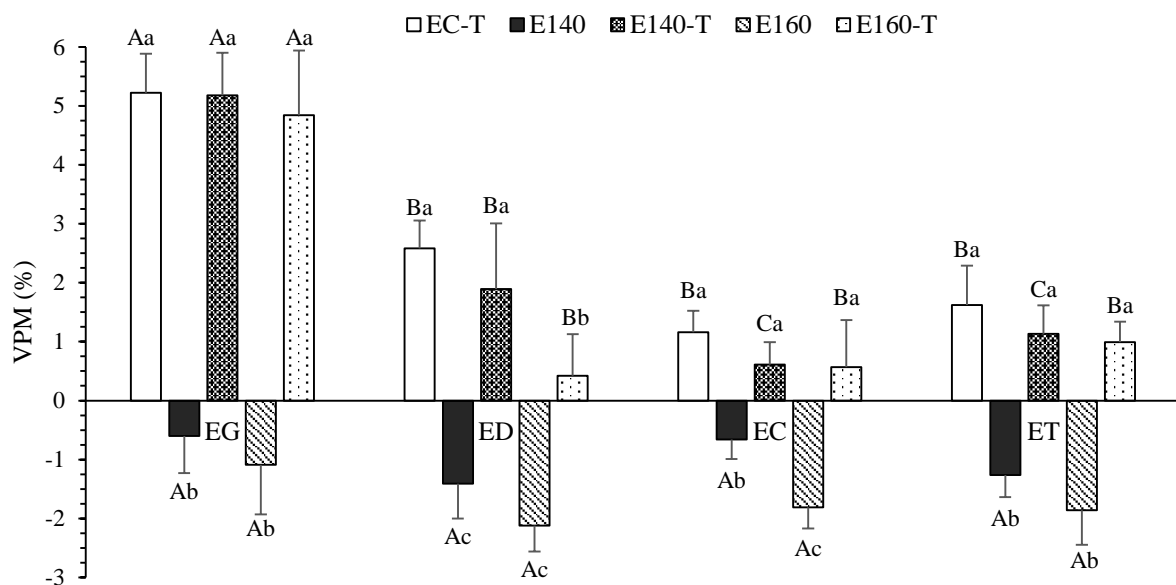
5.1.3 Variação percentual de massa (VPM)

Conforme alguns pesquisadores (HILL, 2006; GÜNDÜZ et al., 2008; DUBEY, 2010; CADEMARTORI et al., 2013; CONTE et al., 2014), quando a madeira é submetida à altas temperaturas (> 140 °C) ocorre a perda de massa, no entanto, com a utilização do pós-

tratamento em óleo vegetal, como atmosfera de transferência de calor, ocorre a variação percentual da massa (VPM) devido a absorção de óleo pela madeira.

Para a VPM verificou-se que na madeira densificada ocorreu perda de massa em ambas as temperaturas avaliadas, sendo maior quando se utilizou a temperatura de 160 °C (Figura 8). No entanto, quando se realizou o pós-tratamento em óleo houve ganho de massa em função da presença de óleo nos lumens celulares da madeira. Tal fato pode ser comprovado ao analisarmos a VPM da madeira não densificada (EC-T), em que apresentou maior ganho de massa em virtude da menor densidade, e conseqüentemente maior quantidade de lumens celulares, tendo em vista que durante a densificação os espaços vazios da madeira são reduzidos.

Figura 8 – Variação percentual de massa (VPM) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

Conforme Pertuzzatti et al. (2018), a perda de massa ocorreu devido a evaporação de substâncias voláteis e as pequenas porções obtidas pela degradação térmica das hemiceluloses e, por outro lado, porque a água evapora e o equilíbrio posterior é menor devido à superfície da madeira ser mais hidrofóbica. Consistentemente, maiores perdas de massa foram observadas

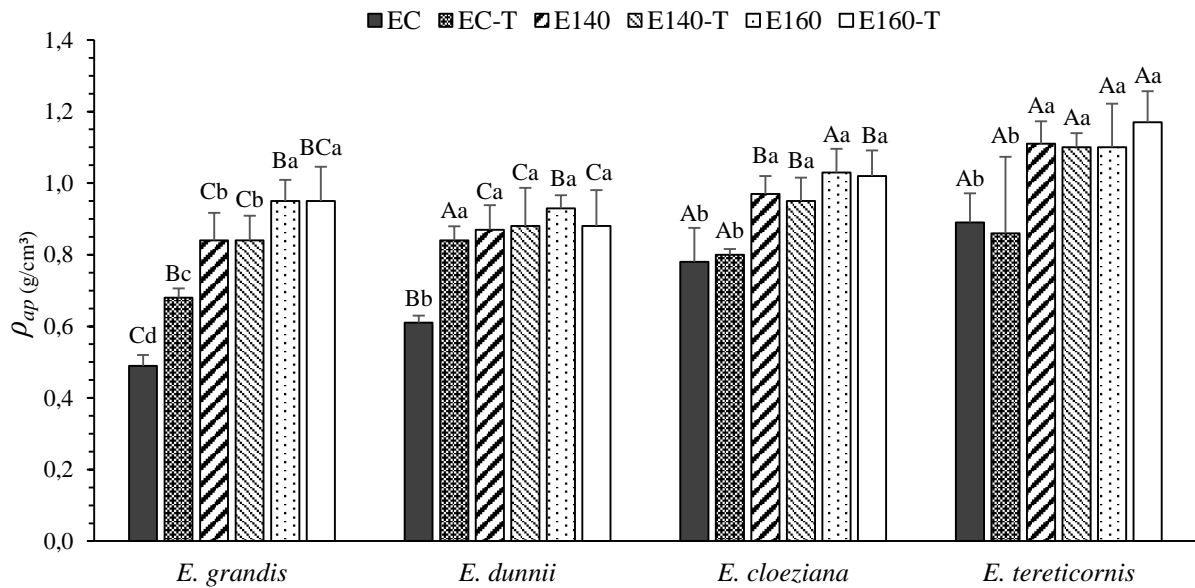
quando as maiores temperaturas de densificação foram aplicadas. Segundo Baysal et al. (2004), a perda de massa é mais afetada pela temperatura de densificação do que pela pressão, independentemente da espécie de madeira investigada.

Quando as amostras foram submetidas ao pós-tratamento em óleo, a variação de massa foi positiva devido penetração do óleo, nestes casos foi observada menor absorção de água e maior degradação química para as amostras mais comprimidas. Conforme Bazyar (2012), o ganho de massa se deve à alterações na estrutura dos elementos anatômicos da madeira após a aplicação de altas temperaturas.

5.1.4 Densidade aparente (ρ_{ap})

Para a ρ_{ap} foi verificado que a densificação proporcionou acréscimos máximos de 94, 52, 32 e 31% nas madeiras de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*, respectivamente (Figura 9). Para o pós-tratamento em óleo foi observado que não houve uma tendência definitiva, em que a madeira densificada apresentou tanto acréscimo quanto decréscimo após a aplicação do pós-tratamento. Tal fato está relacionado as diferenças da umidade de equilíbrio e da quantidade de óleo absorvido pela madeira.

Figura 9 – Densidade aparente (ρ_{ap}) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

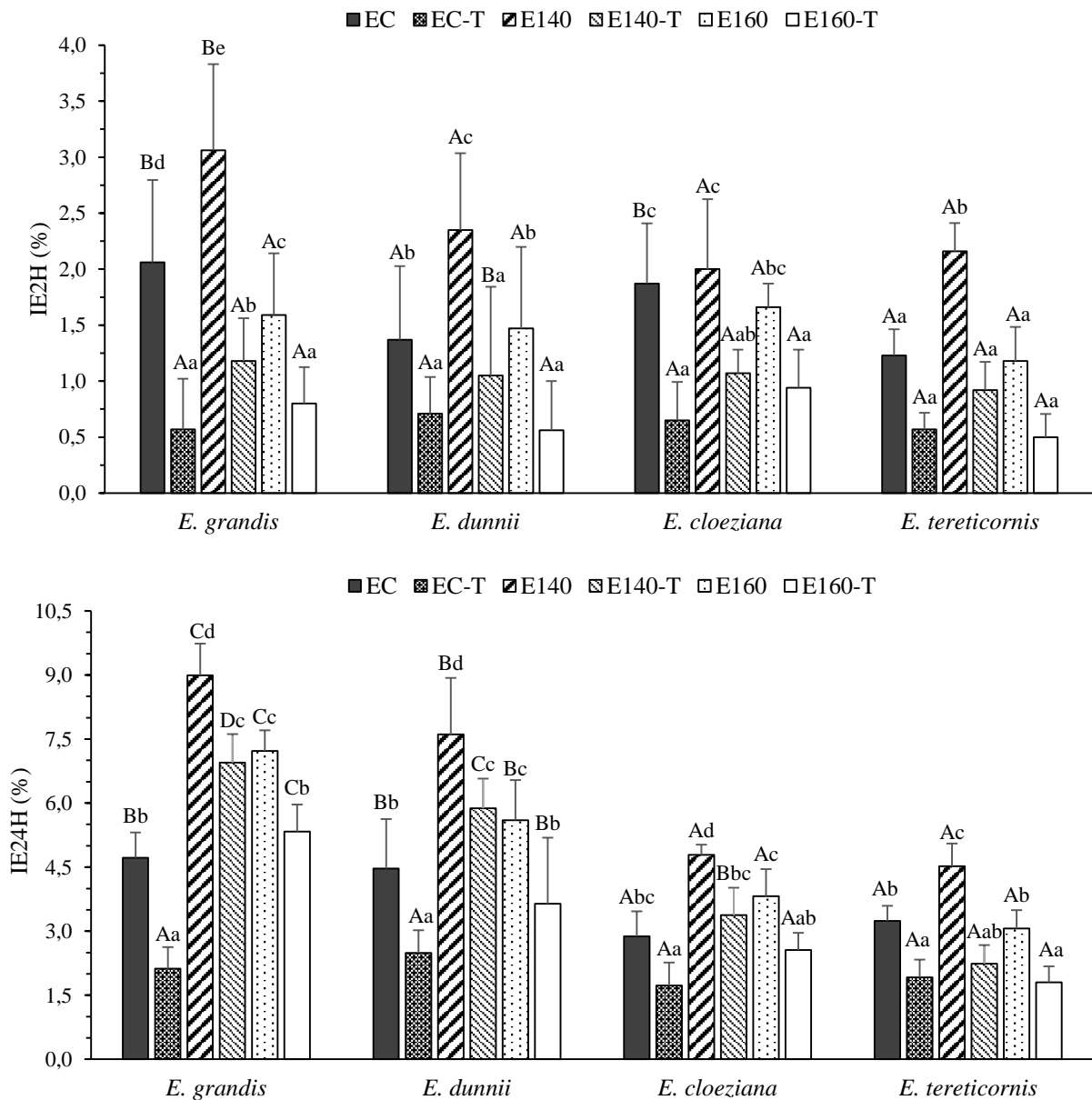
De modo geral podemos inferir que na densidade aparente (ρ_{ap}), o aumento dessa propriedade por meio da densificação está condicionado ao seu valor original e pela temperatura de densificação. Conforme Ulker et al. (2012) e İmirzi et al. (2014), esse aumento é um efeito lógico, porque com a aplicação de altas temperaturas, a lignina termoplástica fica mais macia, facilitando que toda a estrutura da madeira seja comprimida, o que proporciona redução dos espaços vazios e achatamento das células.

5.1.5 Inchamento em espessura

Para o inchamento em espessura da madeira após a imersão em água por um período de 24 horas (IE24H), foi observado que a madeira de *E. tereticornis* e *E. cloeziana* apresentaram as menores taxas na maioria dos tratamentos avaliados (Figura 10). Diante disso, é possível inferir que tais espécies apresentaram menor *springback*, principalmente em função do menor GC. Com isso, a tendência de retornar à espessura original é menor. Conforme Lamason e Gong (2007), GC maiores conduzem a acréscimo no *springback*, devido a maior quantidade de

tensões internas armazenadas durante a compressão. O efeito do *springback* ficou evidente ao analisarmos a diferença de IE2H e IE24H entre a madeira densificada e o controle, em que o tratamento E140 apresentou acréscimo de 50 e 70%, respectivamente.

Figura 10 – O inchamento em espessura da madeira após a imersão em água por um período de 2 horas (IE2H) e 24 horas (IE24H) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

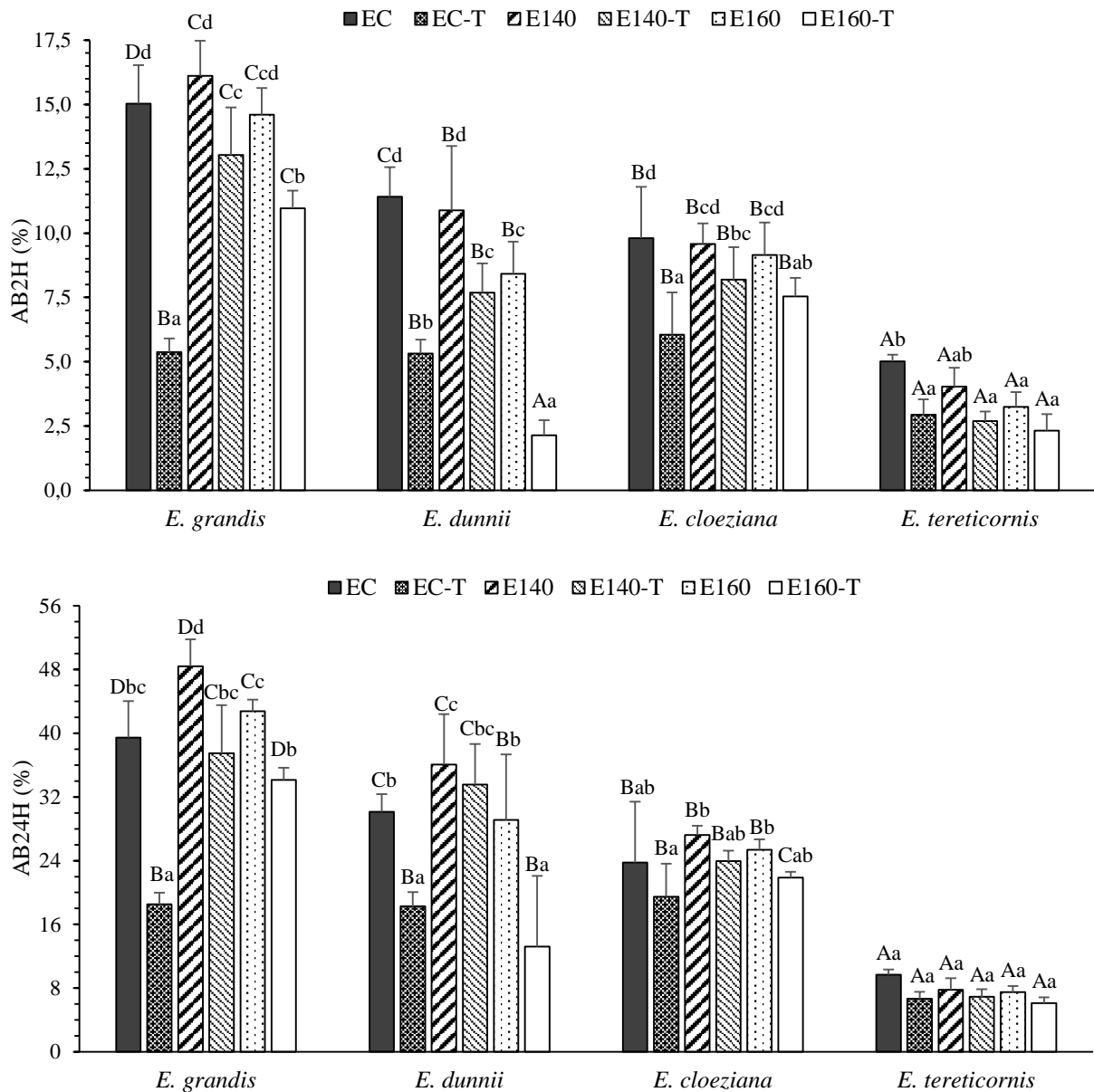
Fonte: Autor.

Avaliando o efeito das temperaturas de compressão, foi possível verificar que os menores valores de IE2H e IE24H foram encontrados nos tratamentos EC160 e EC160-T. Esse fato está relacionado com a redução na quantidade de grupos OH livres, que diminuem a acessibilidade da água na madeira e, conseqüentemente o inchamento em espessura. Conforme Hajihassani et al. (2018), a madeira densificada apresenta maior repelência à água, devido especialmente ao efeito da temperatura de densificação. Se tratando de pós-tratamento foi verificado que houve redução de aproximadamente 50% no IE2H, e de 30% no IE24H em todas as espécies avaliadas.

5.1.6 Absorção de água

Em relação à absorção de água após a imersão por um período de 2 horas (AB2H) e 24 horas (AB24H), foi identificado que a madeira de *E. tereticornis* apresentou os menores valores, em virtude da elevada densidade, o que dificultou a absorção de água (Figura 11). Avaliando o efeito das temperaturas de compressão, foi possível identificar que os menores valores de AB2H e AB24H foram encontrados na temperatura de 160 °C (EC160 e EC160-T). Esse fato está relacionado com a hidrolização dos polissacarídeos, especialmente as hemiceluloses, que apresentaram maior afinidade com a água, devido ao menor grau de polimerização, configuração não-linear e falta de cristalinidade (BORREGA e KÄRENLAMPI, 2008). No entanto, foi observado que na madeira densificada com a temperatura de 140 °C, houve acréscimo principalmente na AB24H em relação ao controle, ocasionado pela reabertura dos vasos achatados, que ocorreu devido ao *springback* durante a imersão em água, provocando maior sucção de água para o interior da madeira (ARRUDA, 2012).

Figura 11 – Absorção de água após a imersão por um período de 2 horas (AB2H) e 24 horas (AB24H) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

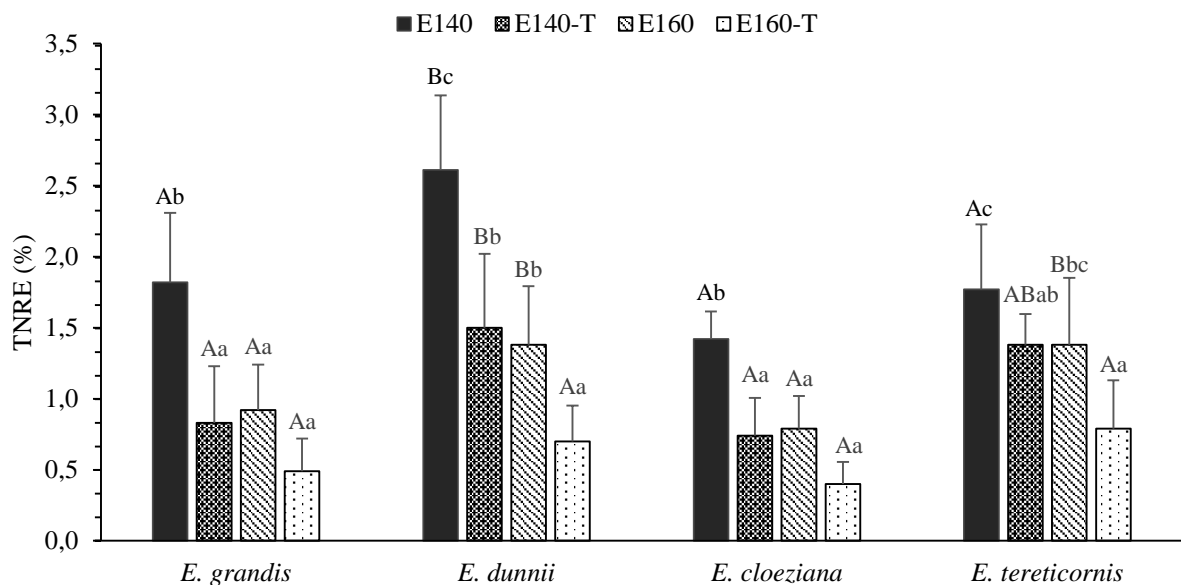
No caso do pós-tratamento na madeira, foi identificado que houve redução na AB2H e AB24H em todos os tratamentos, ocasionado pela degradação térmica, conforme citado

anteriormente, e pela presença de óleo nos lumens celulares. Segundo Dubey et al. (2012) o óleo caracteriza-se ser uma substância insolúvel em água (hidrofóbica), o que contribui para a repelência da água, ou seja, aumenta a estabilidade dimensional do material tratado. Entretanto, não é possível determinar o quanto o óleo alterou a higroscopicidade da madeira, visto que a temperatura está envolvida no pós-tratamento e contribui para o decréscimo da higroscopicidade.

5.1.7 Taxa de não retorno em espessura (TNRE)

A TNRE representa o quanto realmente ocorreu de *springback* após a secagem da madeira imersa em água (Figura 12). Diante disso, foi possível observar que a madeira de *E. cloeziana* apresentou a menor TNRE entre as espécies avaliadas. Entre os tratamentos avaliados, foi possível identificar que o E160-T obteve os melhores resultados em todas as espécies avaliadas, ocasionado pelo efeito da degradação térmica e a presença de óleo, que dificultou a absorção de água e o inchamento em espessura.

Figura 12 – Taxa de não retorno em espessura (TNRE) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

Segundo Welzbacher et al. (2008) a redução do *springback* está relacionada com o aumento da fixação transversal e relaxamento das tensões armazenadas durante a compressão, por meio da hidrólise parcial das hemiceluloses. Conforme Tang et al. (2004) a redução do *springback* abaixo de 5% só foi obtida submetendo a madeira densificada a temperaturas superiores a 200 °C por mais de 5 horas. No entanto, a utilização de tais parâmetros na densificação não é adequado para as demais propriedades tecnológicas.

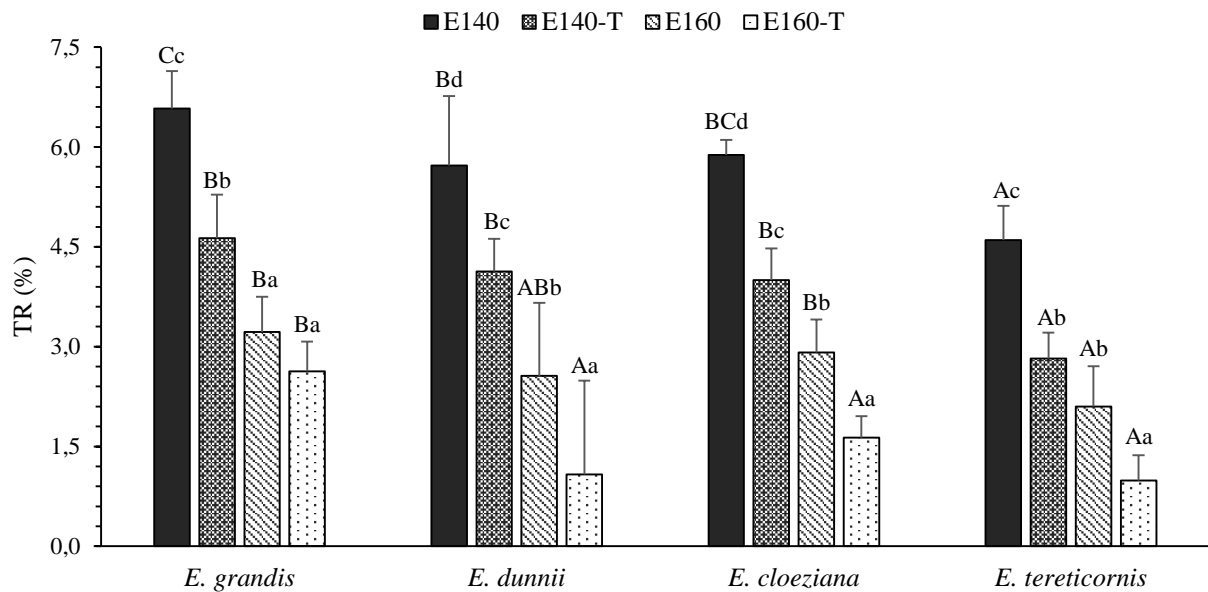
Conforme Cai et al. (2012) o tratamento térmico aplicado durante e após a densificação reduz consideravelmente o *springback* e a higroscopicidade da madeira, em que a maior temperatura proporcionou os melhores resultados para a estabilidade dimensional. Além disso, foi verificado que a aplicação de altas temperaturas na madeira provoca a degradação dos componentes sensíveis ao calor (hemiceluloses), proporcionando o relaxamento das tensões internas e a redução do *springback* (DWIANTO et al., 1996; DUBEY, 2010; LAINE et al., 2013; SADATNEZHAD et al., 2017).

De acordo com Navi e Pizzi (2015), a hidrólise das hemiceluloses durante a densificação desempenha um papel ativo na dissipação das tensões armazenados nas microfibrilas de lignina. Durante a hidrólise das hemiceluloses são formadas novas superfícies mais porosas que auxiliam para dissipar a energia de deformação. Conforme os mesmos autores, para conseguir uma eliminação total do *springback* é necessário que a lignina esteja como um polímero viscoso (perdendo sua rigidez), o que facilita a liberação das tensões de compressão.

5.1.8 Taxa de retração (TR)

Para a TR, que indica o quanto que a madeira reduziu em espessura após a secagem em estufa, foi verificado que a madeira de *E. tereticornis* apresentou os menores valores de TR (Figura 13). Já entre os tratamentos é possível identificar que o E160-T apresentou redução em relação aos demais. Tais resultados se devem à baixa absorção de água e inchamento em espessura que a madeira apresentou após ser submetida aos tratamentos.

Figura 13 – Taxa de retração (TR) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo.

As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

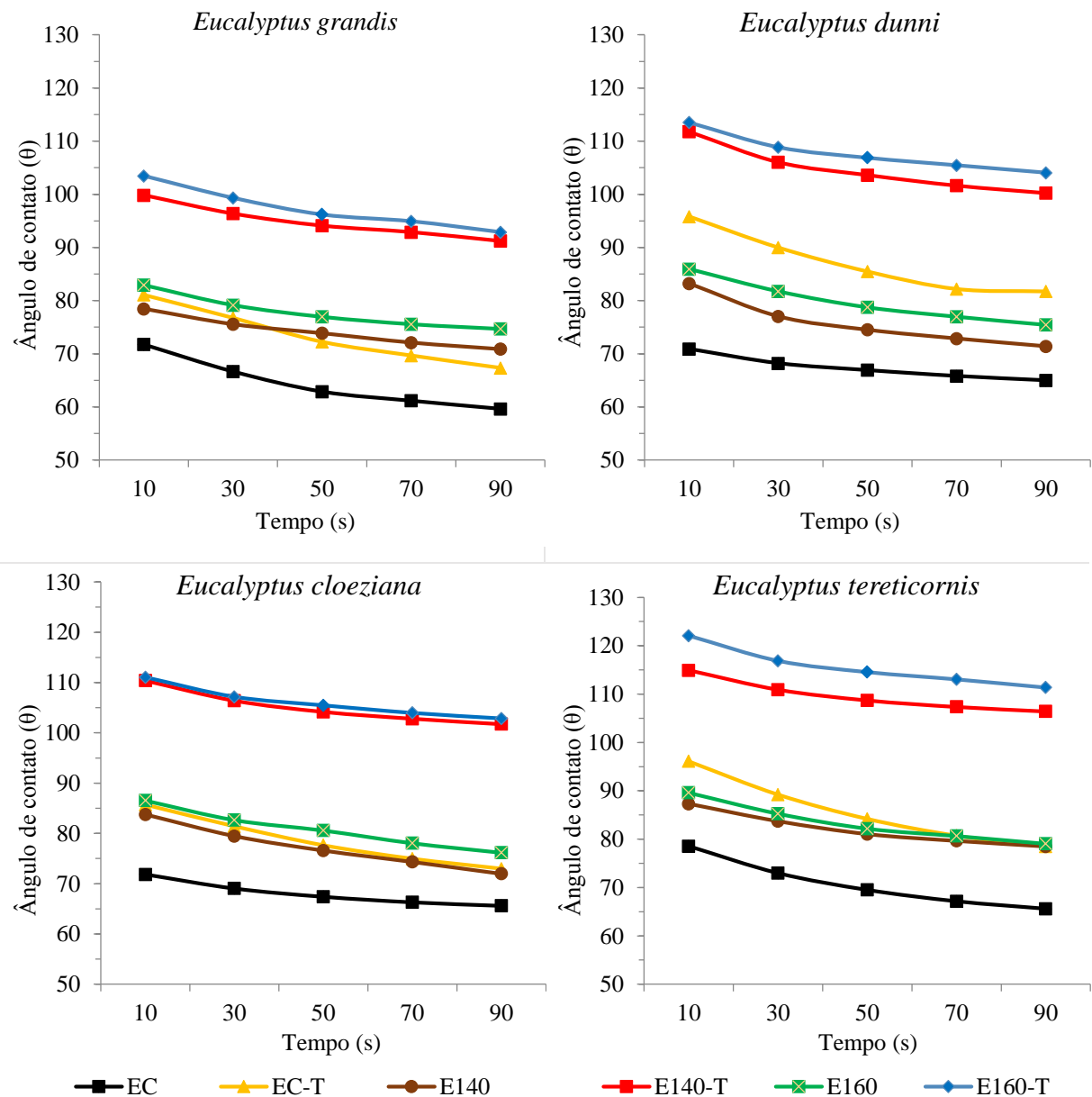
A partir dos ensaios físicos, foi possível identificar que a densificação proporcionou elevados ganhos na densidade da madeira e o pós-tratamento tornou a madeira menos hidrofílica e mais estável dimensionalmente, reduzindo drasticamente o *springback*. A partir desses resultados, é consenso entre muitos pesquisadores que a suficiente estabilização dimensional só pode ser alcançada por meio da aplicação de pós-tratamento numa etapa subsequente ao processo de densificação (INOUE et al., 1993; MORSING, 2000), assim como foi realizado no presente trabalho.

5.2 MOLHABILIDADE

Os maiores ângulos de contato (θ) foram encontrados na madeira de *E. tereticornis* em todos os tratamentos avaliados, desde a madeira original até a densificada e tratada em óleo (Figura 14). Conforme Amorim et al. (2013), o ângulo de contato apresenta relação com a densidade, em que até cerca de $0,85 \text{ g.cm}^{-3}$ o ângulo de contato apresenta acréscimo, a partir disso, os valores tendem a estabilizar. Isso ocorre principalmente devido a permeabilidade, que

varia conforme a densidade e a quantidade de extrativos na madeira. Conforme Costa et al. (2017), de modo geral, quanto maior o teor de extrativos presentes na madeira menor será a sua permeabilidade, sendo que os extrativos atuam como um barreira natural à passagem de fluídos (PEREIRA et al., 2013).

Figura 14 – Desempenho do ângulo de contato na madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*, submetidas a densificação e pós-tratamento em óleo.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo.

Avaliando o efeito dos tratamentos na molhabilidade da madeira, foi identificado que o θ apresentou acréscimo após a densificação e a aplicação de pós-tratamento. Em que, o tratamento E160-T proporcionou os maiores acréscimos. Essa alteração se deve ao fechamento de microporos, reorientação molecular, remoção de grupos hidroxilo na superfície, termoplasticização da lignina, oxidação da superfície e migração de produtos extraíveis para a superfície (CHRISTIANSEN, 1991; HAKKOU et al., 2005a; UNSAL et al., 2011).

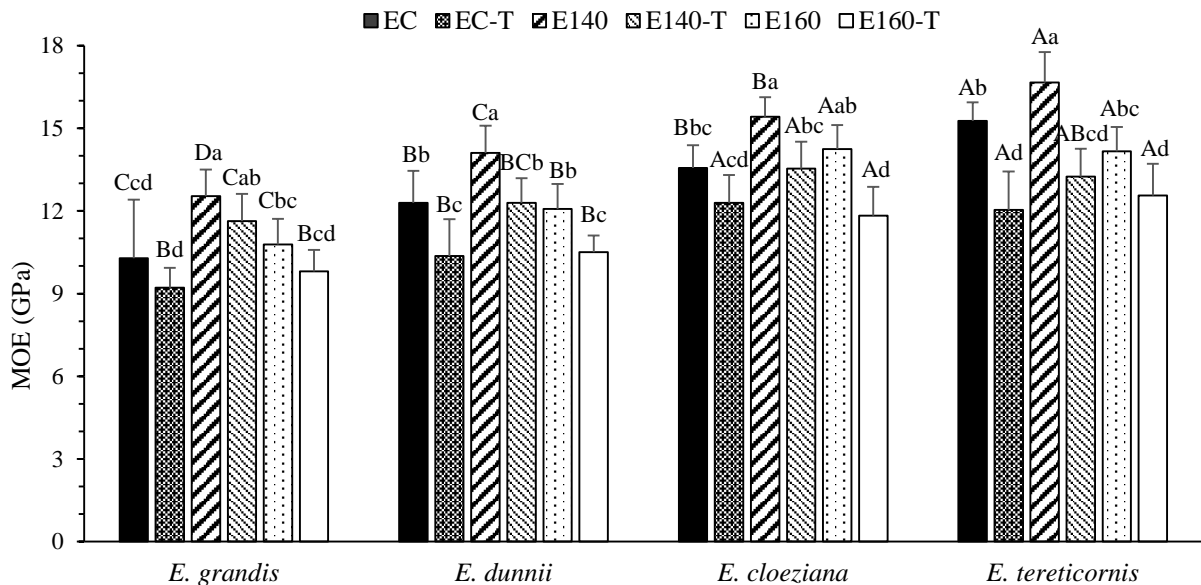
Conforme Wålinder e Gardnerb (1999), quando um líquido é depositado em um material poroso e $\theta < 90^\circ$, verifica-se uma rápida penetração, o que caracteriza um material hidrofílico. Utilizando essas afirmações na presente pesquisa, pode-se observar que os tratamentos E140-T e E160-T apresentaram $\theta > 90^\circ$ em todas as espécies avaliadas, o que demonstra o efeito do pós-tratamento no acréscimo do caráter hidrofóbico da madeira, ocasionando maior repelência superficial a água. Entretanto, para a madeira que foi somente densificada apresentou $\theta < 90^\circ$ (caráter hidrofílico), o que demonstra a necessidade de se utilizar pós-tratamento em madeira quando se deseja obter uma superfície mais estável higroscopicamente. Conforme Wålinder e Johansson (2001), a molhabilidade é influenciada por muitos fatores, dentre eles a porosidade, rugosidade da superfície, polaridade de superfície, pH, direção de fibras e extrativos.

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

5.3.1 Módulo de elasticidade (MOE)

Para o MOE foi observado que a madeira de *E. tereticornis* apresentou os maiores valores nessa propriedade em todos os tratamentos aplicados (Figura 15), ocasionado principalmente pela maior densidade inicial, o que necessitou menor intensidade de compressão em relação as demais madeiras para atingir os maiores valores de MOE.

Figura 15 – Módulo de elasticidade (MOE) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

Com relação ao efeito da densificação no MOE foi observado que o tratamento E140 apresentou os maiores acréscimos em relação ao controle em todas as espécies avaliadas, atingindo o pico de acréscimo na madeira de *E. grandis* que correspondeu a 15%. Já quando analisamos o efeito do pós-tratamento em óleo, foi observado que em todos os tratamentos independente da espécie o desempenho do MOE apresentou decréscimo na madeira tratada em óleo.

Já foi verificado por diversos pesquisadores que a maioria das propriedades mecânicas apresentam acréscimos proporcionais com a densidade da madeira (TABARSA e CHUI, 1997; MORSING, 2000; BUSTOS et al., 2011; SANDBERG et al., 2013; MIFTIEVA et al., 2016). Isso é ocasionado pelo fechamento dos vasos, lumens e achatamento das fibras, o que resulta num aumento dos elementos de parede celular, que têm propriedades de suporte de carga por unidade de volume (PERTUZZATTI; et al., 2018). Pelit et al. (2017) corroboram com as afirmações anteriores, os quais descrevem que os valores do MOE da madeira densificada

aumentam proporcionalmente ao acréscimo do grau de compressão, em que os maiores valores foram encontrados quando a compressão atingiu 50%.

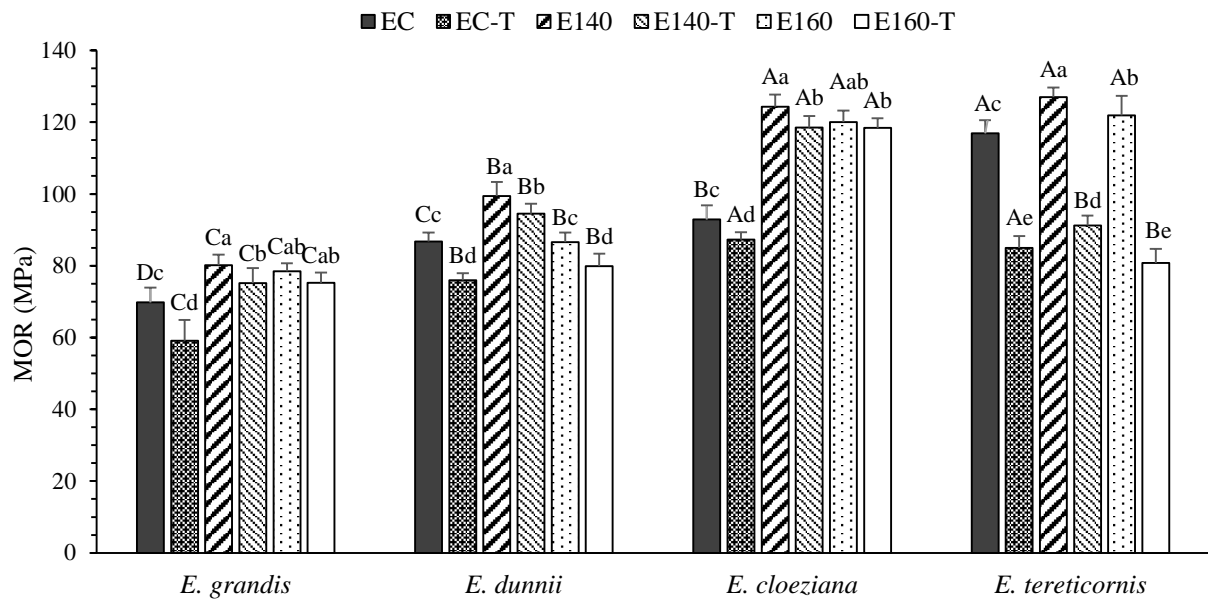
Segundo Navi e Pizzi (2015) o pré-aquecimento da madeira favorece o decréscimo do MOE, pois quando as hemiceluloses entram em contato com a água aquecida ocorre a lixiviação (lavagem) das mesmas, aumentando a quantidade de microporos na madeira. Conforme Heger et al. (2004), quando são utilizadas temperaturas altas durante a densificação (< 150 °C) o MOE começa a reduzir ocasionado pelo aumento do número de poros na parede celular e da quantidade de celulose cristalina.

O decréscimo do MOE após a aplicação de altas temperaturas durante a densificação ou o pós-tratamento foi encontrado por outros pesquisadores. Em que, Gong et al. (2010) obtiveram decréscimos de 32% no MOE para a madeira de *Populus tremuloides* densificada após ser submetida ao tratamento térmico utilizando a temperatura de 200 °C. Já Pelit et al. (2017) observaram que o MOE da madeira densificada de *Abies bornmulleriana*, *Tilia grandifolia*, *Populus nigra*, apresentou decréscimo de 22, 17 e 11%, respectivamente, após o tratamento térmico a 212°C.

5.3.2 Módulo de ruptura (MOR)

Para o MOR foi observado que os maiores valores foram encontrados nas madeiras de *E. cloeziana* e *E. tereticornis* (Figura 16), por apresentarem maiores densidades em tais espécies. Com relação ao efeito da densificação na madeira, foi observado que o tratamento E140 se destacou em relação aos demais, em que os maiores acréscimos foram obtidos na madeira de *E. cloeziana*, atingindo acréscimos superiores a 30%, isso demonstra que tal espécie apresentou menor quantidade de fraturas na parede celular durante a densificação. Já quando avaliamos o efeito do pós-tratamento em óleo, verificamos que houve decréscimo no MOR na maioria dos tratamentos avaliados. Sendo que foi mais efetivo na madeira de *E. tereticornis*, em que atingiu decréscimos de ~40% no MOR.

Figura 16 – Módulo de ruptura (MOR) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

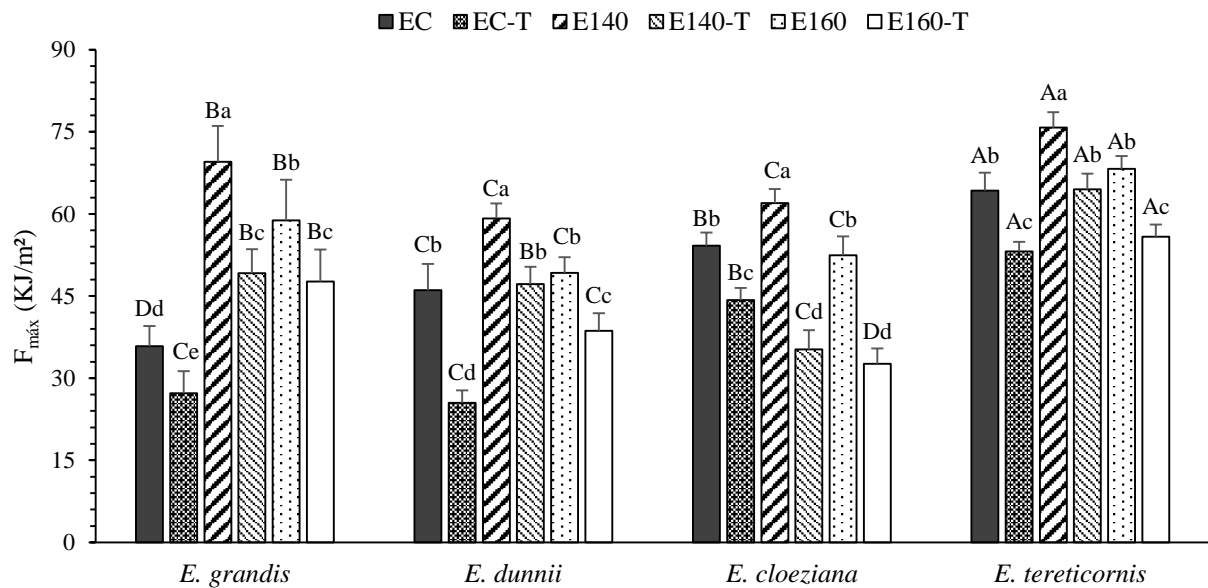
Conforme Ulker et al. (2012) a densificação da madeira aumenta o MOR, porém o acréscimo na temperatura provoca uma diminuição nessa propriedade. Os mesmos autores observaram que o aumento da temperatura de densificação de 120 °C para 140 °C não afetou o MOR, entretanto, com a elevação da temperatura para 160 °C houve decréscimo de 10% no MOR. Já Pelit et al. (2017) identificou decréscimo do MOR de 48%, 56% e 39% após a aplicação de tratamento utilizando a temperatura de 212 °C, para as madeiras de *Abies bornmulleriana*, *Tilia grandifolia* e *Populus nigra*, respectivamente.

5.3.3 Resistência máxima ao impacto ($F_{m\acute{a}x}$)

Para a $F_{m\acute{a}x}$ foi observado que a madeira de *E. tereticornis* apresentou os maiores valores em relação as demais espécies avaliadas (Figura 17). Com relação ao efeito da densificação foi observado que o tratamento E140 se sobressaiu em relação aos demais, apresentando um pico de acréscimo (94%) na madeira de *E. grandis*. Já quando avaliamos o efeito do pós-tratamento,

foi verificado que houve redução na $F_{\text{máx}}$ em todos os tratamentos. Em que, no tratamento E140 da madeira de *E. cloeziana* houve decréscimo na $F_{\text{máx}}$ de 43% em decorrência do pós-tratamento.

Figura 17 – Resistência máxima ao impacto ($F_{\text{máx}}$) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

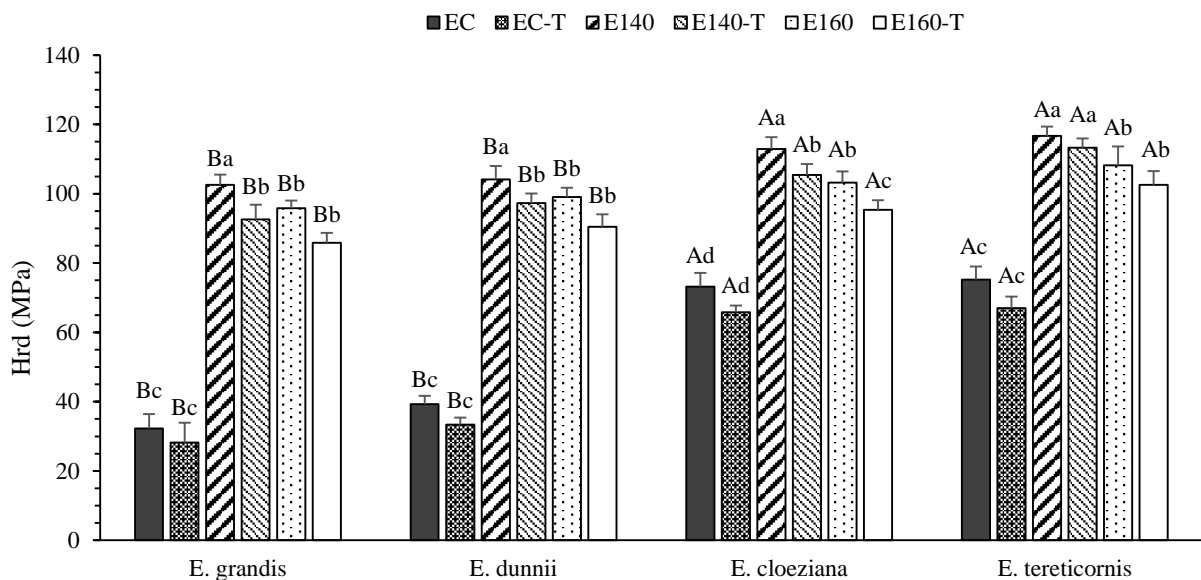
Já é conhecido que a $F_{\text{máx}}$ é uma das propriedades importantes para a carga dinâmica. Em que, se refere à expressão numérica da quantidade de trabalho absorvido para a quebra da madeira sob determinadas condições (BAL, 2016). Conforme Bal e Bektas (2012), a densificação provoca aumento das propriedades mecânicas da madeira, pois são diretamente relacionadas com o aumento da densidade.

5.3.4 Dureza Janka (H_{rd})

Na H_{rd} foi verificado que as madeiras de *E. cloeziana* e *E. tereticornis* apresentaram os maiores valores em todos os tratamentos avaliados (Figura 18), ocasionado principalmente pela

maior densidade de ambas as espécies. Quando analisamos o efeito da densificação, foi observado que houve acréscimo em relação ao controle para todos os tratamentos. Cabe destacar, que na madeira de *E. grandis* o tratamento E140 apresentou o maior acréscimo (218%) em relação ao controle, ocasionado principalmente pelo maior grau de compressão alcançado por tal espécie, proporcionando maior incremento na densidade que é diretamente proporcional a H_{rd} . Já quando avaliamos o efeito do pós-tratamento em óleo, foi observado que houve decréscimo dessa propriedade em alguns tratamentos, principalmente na madeira de *E. cloeziana*, em que atingiu valores médios de 8%.

Figura 18 – Dureza Janka no sentido radial (H_{rd}) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

Conforme Laine et al. (2016) o aumento na dureza durante da densificação é provocado pela redução na porosidade da madeira, pois quando a deformação é recuperada a porosidade aumenta e a dureza é reduzida. Fang et al. (2012) complementam que isso ocorre devido ao fechamento dos vasos, lúmens e achatamento das fibras durante a compressão da madeira.

Segundo Gašparík et al. (2016) isso é explicado pela variabilidade na densidade entre os anéis de crescimento. Já Morsing (2000) descreve que isso é ocasionado pelo aumento do teor de lignina e a reorganização da matriz.

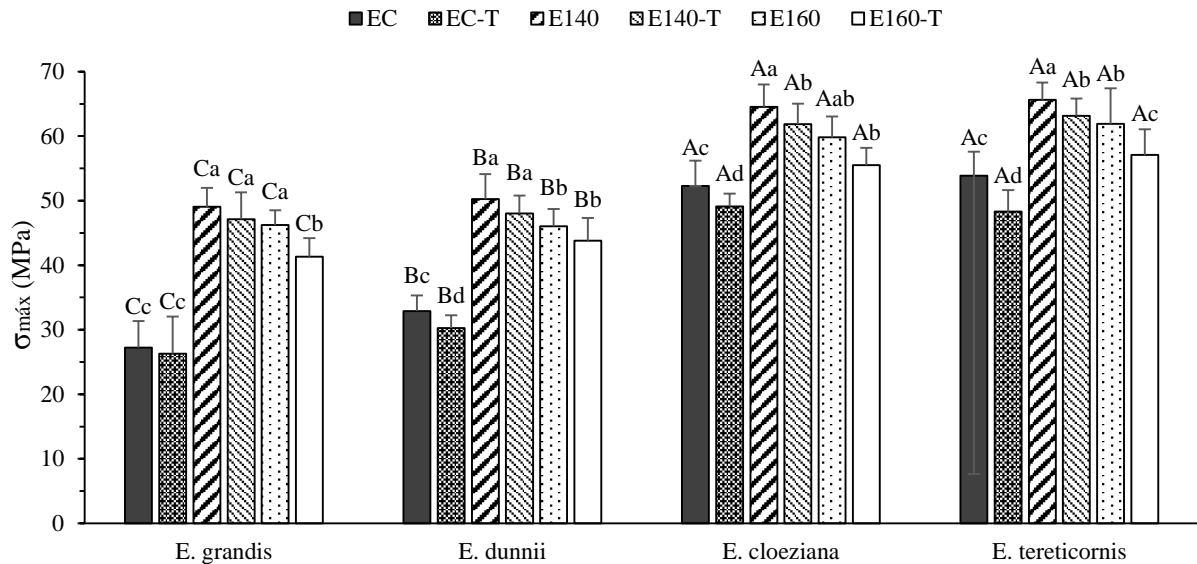
Vários pesquisadores já encontraram acréscimos na dureza após a densificação, como é o caso de Fang et al. (2012) que obtiveram acréscimos na dureza na faixa de 200 a 300% para a madeira densificada de *Populus tremuloides*. Já Rautkari et al. (2010) e Laskowska (2017) comentam que a dureza da madeira densificada apresenta relação quase linear com o grau de compressão, em que obteve acréscimos maiores que 100% na madeira densificada em comparação a madeira sem tratamento.

O decréscimo na dureza após a aplicação de temperaturas mais altas durante a densificação ou após utilização de pós-tratamento já foi obtido por outros pesquisadores. Em que, segundo Fang et al. (2012) e Fu et al. (2016), isso pode ser provocado pela degradação mais efetiva das hemiceluloses e lignina. Segundo Assor et al. (2009) a presença de acético, derivado da degradação das hemiceluloses é o principal fator para a degradação da β -O-4 na estrutura da lignina, e conseqüentemente, a razão para o decréscimo na dureza da madeira. Conforme Pelit et al. (2015) e Budakçi et al. (2016), a diminuição na dureza da madeira pode ser atribuída à perda de massa e conseqüentemente da densidade, como um resultado da decomposição térmica. Já Navi e Pizzi (2015) descrevem que as perdas na dureza durante o pós-tratamento são ocasionadas pelo acréscimo na quantidade de microfissuras e fraturas presentes na madeira.

5.3.5 Resistência máxima em ensaio de compressão paralela ($\sigma_{\text{máx}}$)

Para a $\sigma_{\text{máx}}$ foi observado que as madeiras de *E. cloeziana* e *E. tereticornis* apresentaram os maiores valores (Figura 19). Quando avaliamos o efeito da densificação, foi observado que os maiores valores foram obtidos no tratamento E140, em que houve acréscimo de 80% na $\sigma_{\text{máx}}$ para madeira de *E. grandis*. Já quanto ao efeito do pós-tratamento nessa propriedade, foi verificado que proporcionou decréscimos médios de 5% nessa propriedade.

Figura 19 – Resistência máxima em ensaio de compressão paralela ($\sigma_{\text{máx}}$) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

Conforme Guo et al. (2015) as alterações na $\sigma_{\text{máx}}$ são provavelmente devido às variações de interações entre polímeros de madeira após os tratamentos. Em que, a densificação reduz a quantidade de poros na parede celular, criando apoio para os agregados cristalinos e uma densidade mais elevada destes agregados. Já quando foi utilizado o pós-tratamento em óleo as diferenças na $\sigma_{\text{máx}}$ provavelmente estão relacionados com diferenças na densidade da parede celular e a cristalinidade da celulose nas fibras.

Avaliando o efeito da temperatura de densificação e do pós-tratamento nas propriedades mecânicas foi observado que o acréscimo da temperatura e a aplicação do pós-tratamento provocou redução na resistência mecânica da madeira. Isso foi ocasionado pela modificação química e por conseguinte deterioração da parede celular causada pelo tratamento térmico, que provoca degradação dos constituintes químicos da madeira (hemiceluloses e celulose amorfa).

Cabe salientar que o teor de umidade de equilíbrio madeira densificada foi menor do que a madeira não tratada, conforme apresentado anteriormente. Nesse aspecto, os resultados

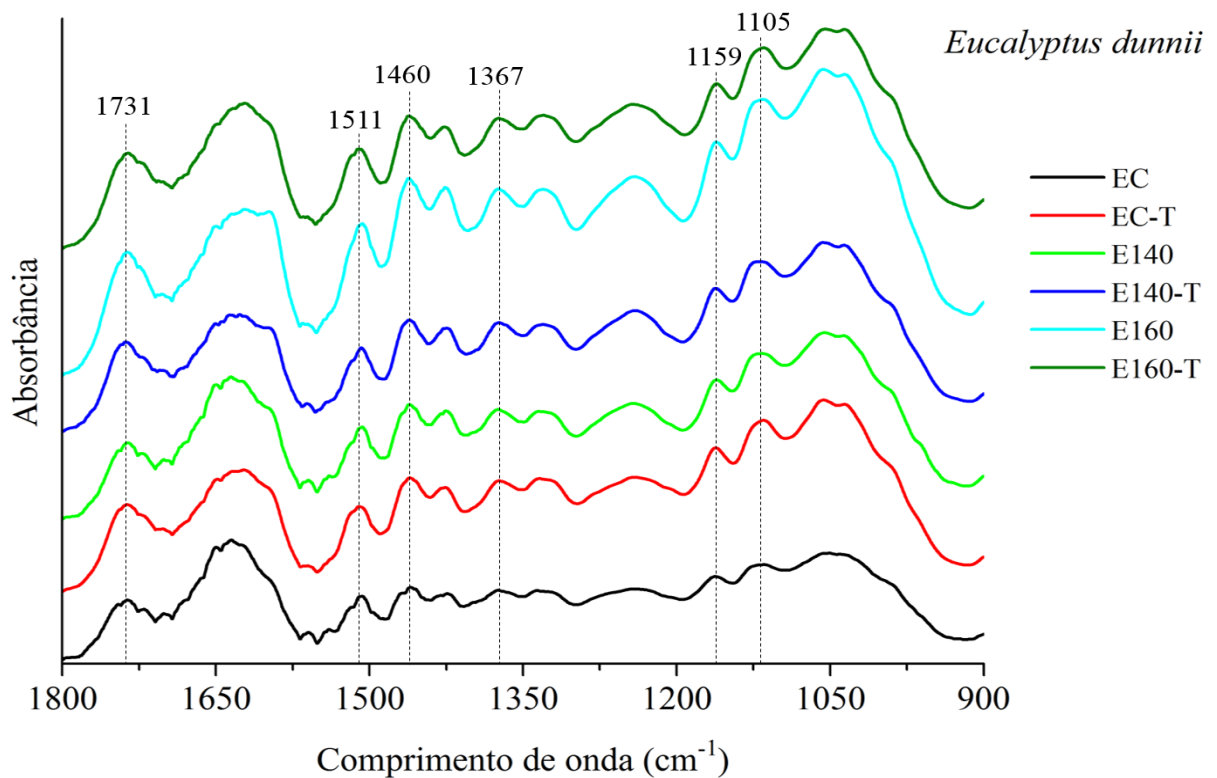
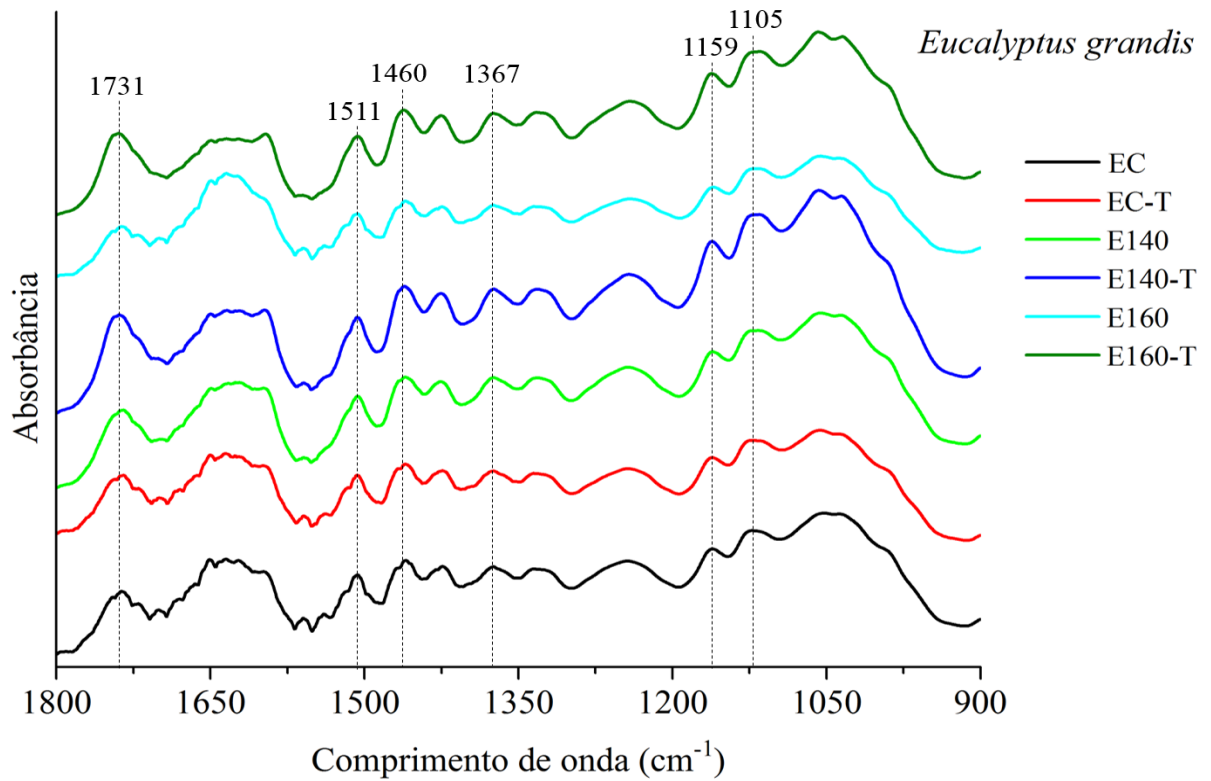
da maioria das propriedades mecânicas foram afetados positivamente (RAUTKARI et al., 2013).

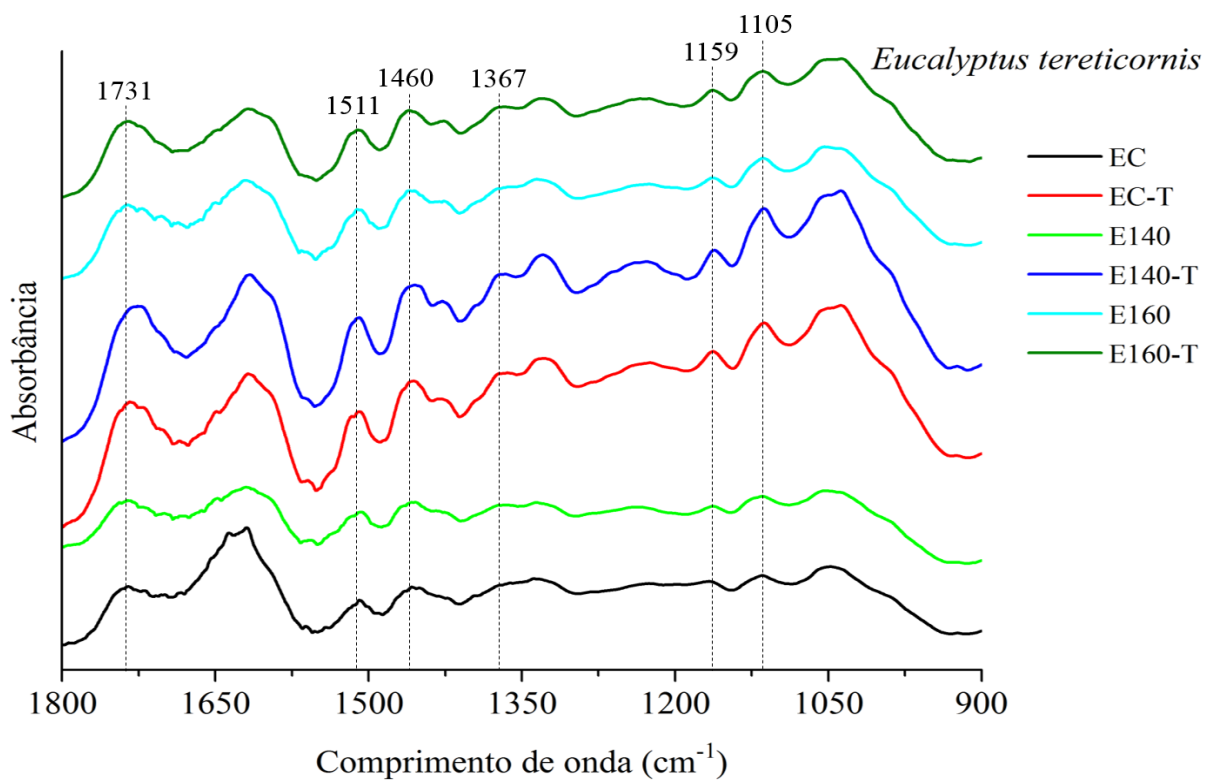
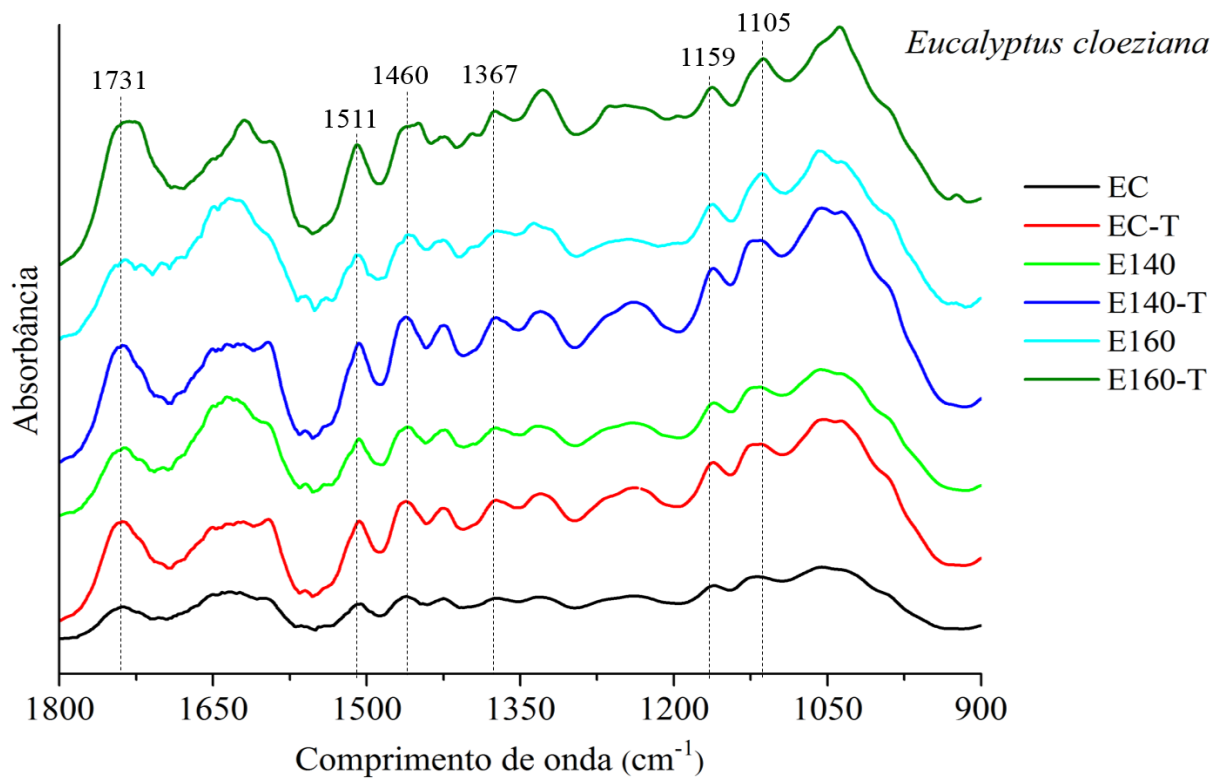
A partir da melhoria das propriedades mecânicas na madeira densificada é possível inferir que a densificação possibilita que peças de madeira com a mesma área de corte pode suportar uma carga mais pesada ou a mesma carga com uma seção mais fina (ULKER et al., 2012). Conforme Ucuncu et al. (2017) a densificação possibilita o aproveitamento de madeiras de árvores com rápido crescimento e baixa densidade em utilizações onde são requeridas altas propriedades mecânicas, aumentando assim a sustentabilidade de produção industrial. Já Esteves et al. (2017) afirmam que uma das maiores vantagens da madeira densificada é o aumento da dureza, pois é a propriedades mais importantes para pisos e revestimentos.

5.4 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (ATR – IR)

Através da análise espectral da madeira de *E. grandis*, *E. dunni*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis* foi identificado os principais picos referentes as modificações químicas ocorridas após a densificação e o pós-tratamento em óleo (Figura 20). Os espectros avaliados compreendem a faixa de 1800 a 800 cm^{-1} , região a qual corresponde a identidade da madeira, devido à localização de vários grupos funcionais (RANA et al., 2009; SRINIVAS e PANDEY, 2012). As madeiras das quatro espécies apresentaram comportamento semelhante quanto à modificação dos picos referentes aos componentes químicos em função dos tratamentos realizados. De maneira geral, foi observado que a madeira submetida ao pós-tratamento apresentou maior modificação na estrutura química quando comparado aos corpos de prova densificados e sem tratamento.

Figura 20 – Análise espectral (ATR-IR) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.





Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo.

Fonte: Autor.

As principais alterações químicas foram identificadas por meio das intensidades de pico: 1731 cm^{-1} (C=O alongamento em grupos carboxilos das hemiceluloses, lignina e extrativos e/ou alongamento em grupos éster em lignina e extrativos), 1511 cm^{-1} (C=C vibração de ligações do esqueleto aromático e alongamento de anéis de benzeno na lignina), 1460 cm^{-1} (C-H deformação na lignina e os carboidratos), 1367 cm^{-1} (Ligações O-H e C-O em hidratos de carbono), 1159 cm^{-1} (ponte assimétrica de C-O-C e alongamento simétrico C-C em hidratos de carbono), 1105 (associação OH na celulose e hemiceluloses). As caracterizações dos picos foram baseadas em pesquisas anteriores (COLOM et al., 2003; PANDEY e PITMAN, 2003; HAKKOU et al., 2005b; DIOUF et al., 2011).

Através da Tabela 3 é possível identificar a razão dos picos correspondentes aos principais grupos funcionais alterados. Dessa maneira, nota-se que os decréscimos em $I_{1741/1030}$ após a densificação e pós-tratamento em óleo, estão relacionados com a presença dos grupos acetil, atribuída aos estiramentos da ligação C=O de ésteres presente principalmente nas hemiceluloses (PIRES et al., 2012). Com a alteração dos grupos acetil, principalmente das xilanas O-acetil-(4-O-metilglicurono), pode-se inferir que houve diminuição da função estrutural das hemiceluloses na madeira (WINDEISEN e WEGENER, 2008).

Tabela 3 - Relação de picos correspondentes as principais variações das madeiras de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis* densificadas e submetidas ao pós-tratamento.

Espécie	Tratamento	I _{1731/1030}	I _{1511/1030}	I _{1460/1030}	I _{1367/1030}	I _{1159/1030}	I _{1105/1030}
<i>E. grandis</i>	EC	0,559	0,665	0,432	0,765	0,593	0,853
	EC-T	0,538	0,883	0,584	0,754	0,732	1,118
	E140	0,552	0,876	0,502	0,778	0,840	1,047
	E140-T	0,513	0,945	0,612	0,687	0,953	1,258
	E160	0,574	1,113	0,702	0,665	0,935	1,458
	E160-T	0,498	1,238	0,804	0,625	0,983	1,630
<i>E. dunnii</i>	EC	0,653	0,698	0,435	0,752	0,394	0,739
	EC-T	0,684	0,884	0,568	0,748	0,426	0,995
	E140	0,673	0,743	0,496	0,646	0,403	0,883
	E140-T	0,593	0,902	0,603	0,740	0,549	1,302
	E160	0,642	0,849	0,554	0,698	0,526	1,084
	E160-T	0,612	0,911	0,764	0,632	0,572	1,507
<i>E. cloeziana</i>	EC	0,452	0,782	0,540	0,749	0,473	0,884
	EC-T	0,464	0,943	0,678	0,608	0,592	0,974
	E140	0,433	0,865	0,567	0,597	0,485	0,984
	E140-T	0,454	1,034	0,699	0,639	0,549	1,241
	E160	0,493	0,967	0,645	0,603	0,637	1,116
	E160-T	0,444	1,230	0,746	0,684	0,847	1,492
<i>E. tereticornis</i>	EC	0,773	0,634	0,324	0,756	0,392	0,695
	EC-T	0,795	0,745	0,542	0,674	0,583	0,993
	E140	0,764	0,756	0,546	0,695	0,639	0,842
	E140-T	0,812	0,854	0,694	0,625	0,593	1,293
	E160	0,796	0,809	0,672	0,749	0,746	1,042
	E160-T	0,749	0,945	0,874	0,638	0,975	1,420

Em que: I: Incremento do pico especificado; EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo.

Fonte: Autor.

O incremento dos picos relacionados aos grupos funcionais presentes na lignina (I_{1511/1030} e I_{1459/1030}) verificados em todas as espécies avaliadas decorrem da degradação das holoceluloses, divisão da cadeia alifática lateral da lignina e/ou reações de condensação. O que proporcionou o aumento na proporção de lignina na estrutura da madeira. Conforme Pandey e Pitman (2003) as elevações das intensidades dos picos da lignina estão relacionadas à degradação dos carboidratos. Segundo DUBEY (2010), a aplicação de altas temperaturas na madeira provoca o aumento acentuado no teor de radicais livres na madeira o que conduz reações de acoplamento entre os anéis aromáticos. Tal modificação pode resultar em ligações

cruzadas dentre o arranjo da lignina, bem como, constituir uma estrutura condensada (Tjeerdsma; Militz, 2005).

O decréscimo de $I_{1367/1030}$ pode ser atribuído a mudanças conformacionais dos componentes glicosídicos de madeira (COLOM et al., 2003; HAKKOU et al., 2005a), indicando que houve clivagem das hemiceluloses e formação de novos constituintes. Conforme Yildiz e Gümüşkaya (2007), dentre os novos constituintes se destacam a estrutura cristalina da celulose.

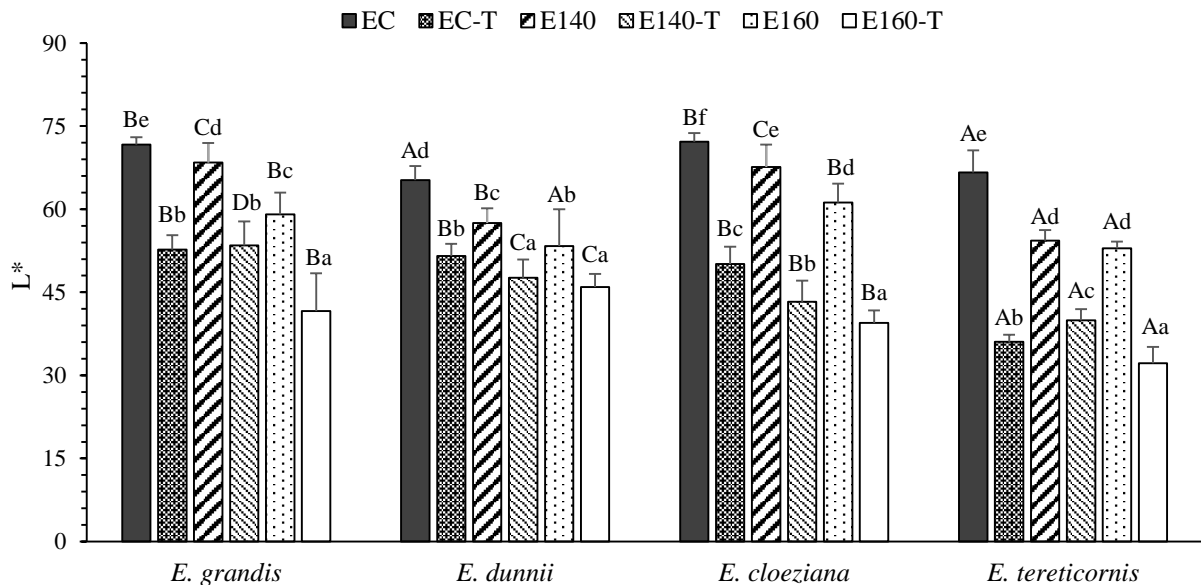
O incremento de $I_{1159/1030}$ foi maior nos tratamentos em que foi realizado pós-tratamento. Isso evidencia as afirmações de Lesar et al. (2013), citando que esse pico apresenta comportamento diretamente proporcional a elevação da temperatura, sendo potencializado pela degradação das hemiceluloses. 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.

Para o $I_{1105/1030}$ foi identificado incremento em todas as espécies avaliadas após a aplicação dos tratamentos na madeira em relação ao controle. Segundo Ding, Gu e Liu (2011) esse acréscimo está associado a elevação da cristalinidade da celulose devido a clivagem e desidratação dos carboidratos amorfos e cristalização da região quasicristalina da celulose.

5.5 COLORIMETRIA

Analisando a alteração na cor da madeira densificada por meio dos parâmetros colorimétricos é possível observar que a madeira de *E. tereticornis* apresentou os menores valores para o índice de claridade L^* , ou seja, a madeira apresenta tonalidade mais escura (Figura 21). Avaliando as temperaturas de densificação foi verificado que os menores valores de L^* foram obtidos na temperatura de 160 °C, ocasionado principalmente pela maior degradação dos constituintes químicos da madeira em tal temperatura. Já quando analisamos o efeito do pós-tratamento, foi observado que houve redução do L^* , apresentando decréscimos superiores a 20% na maioria dos tratamentos avaliados.

Figura 21 – Índice de claridade L^* para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



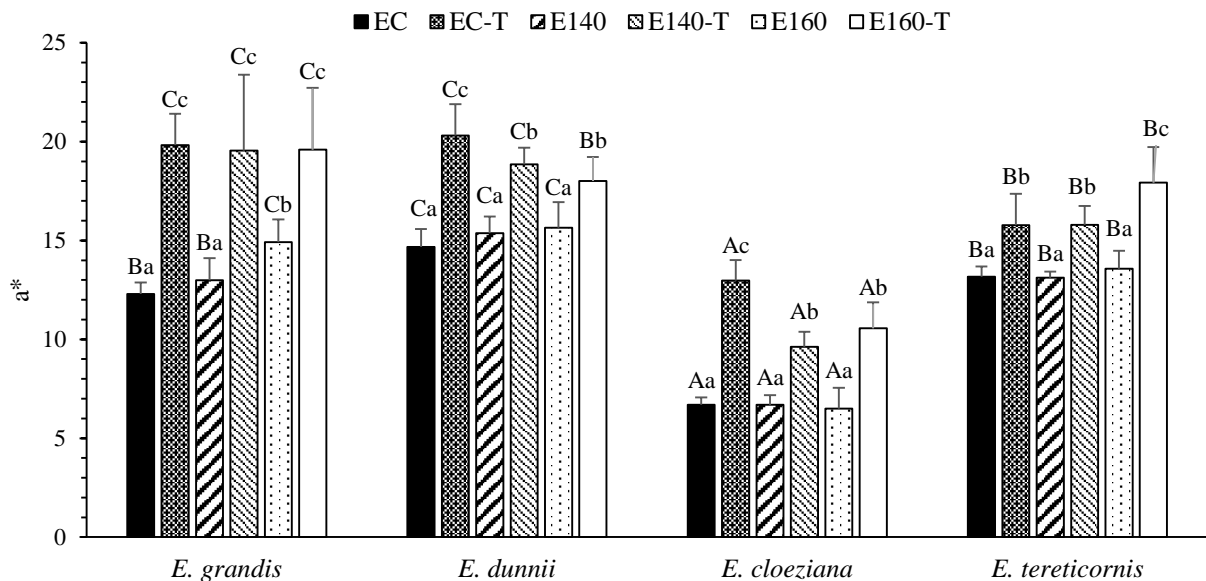
Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

Segundo Sundqvist e Morén (2002) a mudança na claridade da madeira está relacionada com a degradação dos extrativos e formação de novos compostos, tais como açúcares e aminoácidos de baixo peso molecular, que tendem a migrar para a superfície da peça durante o processo térmico. Para Pincelli et al. (2012) a diminuição da L^* está associado a degradação das hemiceluloses (especialmente as pentosanas), bem como na alteração dos extrativos após o processo térmico.

Para a coordenada cromática a^* (+ vermelho, - verde) foi observado que entre as diferentes espécies avaliadas a madeira de *E. cloeziana* apresentou os menores valores (Figura 22). Avaliando o efeito das densificação na coordenada a^* , foi possível verificar que houve pouca variação, apresentando acréscimo somente na madeira de *E. grandis* (E160). No entanto, quando analisamos a madeira densificada submetida ao pós-tratamento, observamos que ocorreu acréscimo na coordenada a^* de todos os tratamentos avaliados.

Figura 22 – Coordenada cromática a^* (+ vermelho, - verde) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

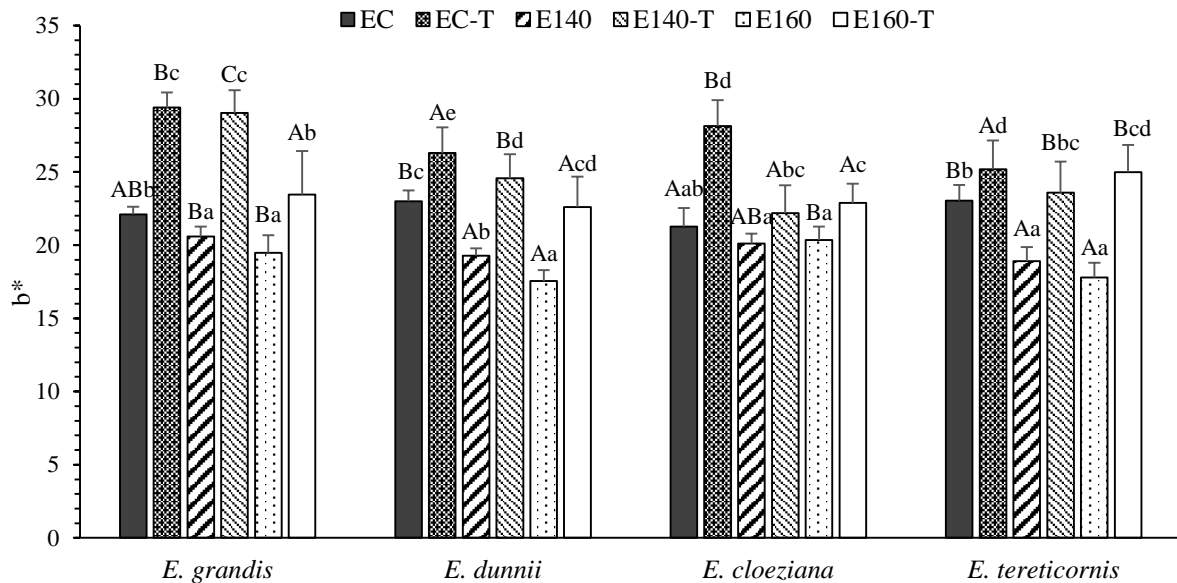
Fonte: Autor.

Conforme Chen et al. (2012) o acréscimo da coordenada cromática a^* está relacionado com a condensação, degradação e/ou oxidação de produtos durante o aquecimento da madeira. Segundo Mori et al. (2004), o teor de polifenóis da madeira apresenta correlação positiva com a sua coloração. De modo que ocorre elevação do teor de polifenóis, aumentando os tons de vermelho na madeira. Já Chen et al. (2012) corroboram afirmando que as proantocianidinas, lignina e outros extrativos são condensados formando subprodutos, contribuindo para o acréscimo do tom avermelhado na madeira submetida ao pós-tratamento.

Com relação a coordenada cromática b^* (+ amarelo, - azul) foi observado que a densificação proporcionou decréscimo dessa propriedade em relação ao controle, principalmente quando se utilizou a temperatura de 160 °C (E160) (Figura 23). Entretanto, quando foi realizado o pós-tratamento houve acréscimo da coordenada b^* , ocasionado pela desintegração das hemiceluloses e aumento de açúcares de baixo peso molecular produzidos durante a degradação térmica (GUNDUZ et al., 2010). Segundo Mori et al. (2004) esse acréscimo foi provocado pela alteração no teor de lignina solúvel e polifenóis. Conforme

Tjeerdsma et al. (1998), a formação de produtos de oxidação, tais como quinonas, apresentam contribuição para a mudança de cor na madeira. Para Johansson e Morén (2006), as mudanças na cromática b^* são causadas pela natureza química da reação.

Figura 23 – Coordenada cromática b^* (+ amarelo, - azul) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.

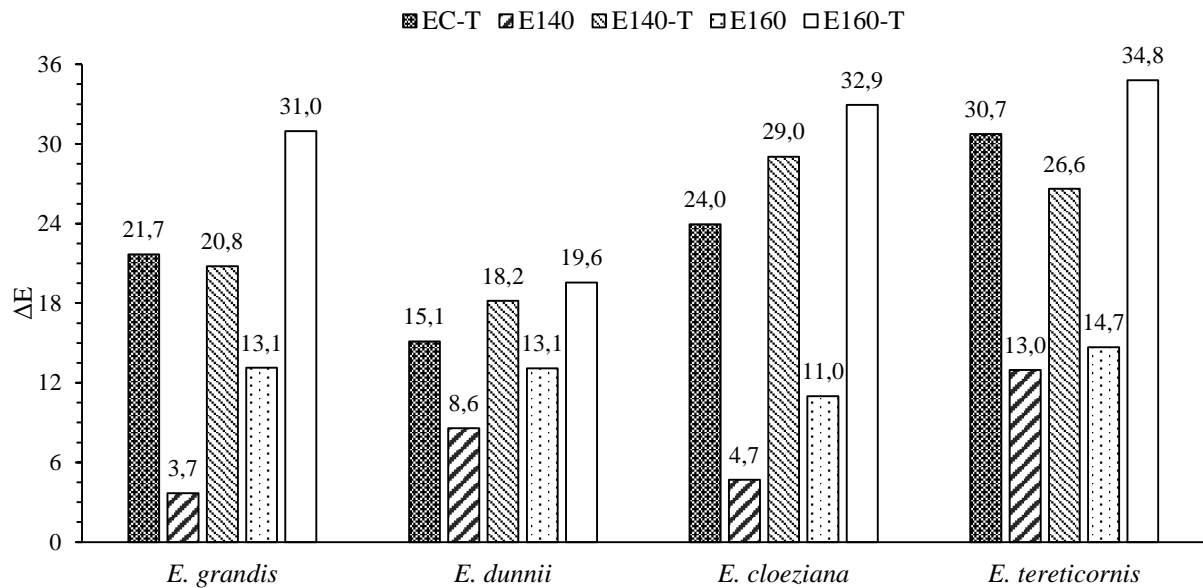


Em que: EC = *Eucalyptus* controle; EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. Médias com letras iguais, maiúsculas representam a comparação entre as espécies e minúsculas a comparação entre os tratamentos, indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Fonte: Autor.

Para a variação total de cor (ΔE) foi observado que o tratamento E140 apresentou os menores valores, em virtude da baixa temperatura utilizada durante a densificação e ausência de pós-tratamento, o que possivelmente reduziu a degradação dos constituintes químicos da madeira (Figura 24). Em contrapartida, quando foi aplicado o tratamento E160-T ocorreu os maiores acréscimos de ΔE . Diante disso, pode-se inferir que no tratamento mais severo houve maior degradação das hemiceluloses, lignina e certos compostos extrativos (SUNDQVIST e MORÉN, 2002).

Figura 24 – Variação total de cor (ΔE) para a madeira de *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. cloeziana* e *E. tereticornis*.



Em que: EC = EC-T = *Eucalyptus* controle tratado em óleo; E140 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C; E140-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 140 °C e tratado em óleo; E160 = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C; E160-T = *Eucalyptus* densificado na temperatura de 160 °C e tratado em óleo.

Fonte: Autor.

Conforme Sundqvist et al. (2006) a madeira escurece proporcionalmente ao acréscimo na temperatura de densificação, ocasionado pelas reações de polimerização da lignina durante o tratamento. Segundo Sundqvist e Morén (2002) e Hill (2006), a alteração na cor é proveniente de mudanças complexas, degradação de hemiceluloses, lignina, certos compostos extrativos e formação de carbonato de carbono que escurece a superfície da madeira. Já Kutnar et al. (2009) afirmam que a clivagem de ligações arilglicerol- β -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.

A partir das análises colorimétricas, foi observado uma heterogeneidade na coloração da madeira de eucalipto entre o cerne e alburno, o que pode ser considerada uma propriedade negativa para os produtos oriundos dessa madeira (MONTES et al., 2008; GRIEBELER, et al., 2018). Diante disso, o escurecimento e homogeneização da cor da madeira após a densificação e o pós-tratamento em óleo favorece o aproveitamento do material em suas diversas aplicações, agregando valor esteticamente devido a semelhança com as madeiras tropicais (TUONG; LI, 2010; BEKHTA et al., 2018).

6. CONCLUSÕES

De maneira geral, a densificação e o pós-tratamento em óleo empregados na madeira das quatro espécies de *Eucalyptus* apresentaram potencial significativo quanto o incremento das seguintes propriedades:

- O grau de compressão foi influenciado pela densidade da madeira e temperatura de densificação. Sendo mais efetivo nas densidades inferiores e temperaturas mais altas;
- No teor de umidade de equilíbrio foi identificado uma redução drástica após a aplicação do pós-tratamento em óleo;
- A variação percentual de massa apresentou decréscimo após a densificação e acréscimo com o pós-tratamento, em virtude da presença de óleo nos lumens celulares;
- A densidade aparente apresentou acréscimos em todos os tratamentos avaliados, sendo mais efetivo na madeira de *E. grandis*;
- O inchamento em espessura e a absorção de água foi influenciada principalmente pela densidade e o pós-tratamento, apresentando-se inversamente proporcional a densidade e diminuindo após a aplicação do pós-tratamento, em virtude da degradação dos constituintes químicos e repelência das moléculas de óleo;
- O *springback* foi reduzido drasticamente após a aplicação do pós-tratamento, justificando a realização de tal procedimento durante a densificação da madeira;
- Para a molhabilidade foi observado que a madeira somente densificada apresentou caráter hidrofílico. No entanto, quando foi submetida ao pós-tratamento tornou-se hidrofóbica, demonstrando a necessidade de tal procedimento para se obter uma superfície mais estável higroscopicamente;
- A resistência mecânica apresentou os resultados mais satisfatórios na madeira densificada a 140 °C sem aplicação de pós-tratamento, em virtude das menores alterações nos constituintes químicos da madeira. No entanto, com a aplicação de pós-tratamento houve decréscimo na resistência mecânica ocasionada pela utilização de altas temperaturas durante esse procedimento;
- A análise de Espectrometria no Infravermelho (ATR-IR) foi verificado por meio da razão de pico, que o pós-tratamento foi mais efetivo que a densificação, na degradação de hemiceluloses e celulose amorfa, proporcionando aumento proporcional de celulose cristalina e lignina;
- Dentre as espécies avaliadas, é possível inferir que a madeira de *Eucalyptus cloeziana* apresentou as melhores propriedades tecnológicas;
- A aplicação do pós-tratamento proporcionou consideráveis alterações colorimétricas, fazendo com que a madeira das quatro espécies ganhassem um tom tropical (marrom escuro), viável para aplicação de fins estéticos;

Diante das conclusões anteriores foi possível verificar que a combinação da densificação com o pós-tratamento leva a um produto muito interessante, que pode ser utilizado tanto em ambientes externos quanto internos, e ser aplicado em pisos, revestimentos, móveis e decks.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Projeto de estruturas de madeira - NBR/7190**: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): 107 p. 1997.
- ADLER, D. C.; BUEHLER, M. J. Mesoscale mechanics of wood cell walls under axial strain. **Soft Matter**, Cambridge, v. 9, n. 29, p. 7138-7144, 2013.
- AHAJJI, A.; DIOUF, P.; ALOUI, F.; ELBAKALI, I.; PERRIN, D.; MERLIN, A.; GEORGE, B. Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 43, p. 69-83, 2009.
- ÅKERHOLM, M.; HINTERSTOISSER, B.; SALMÉN, L. Characterization of the crystalline structure of cellulose using static and dynamic FT-IR spectroscopy. **Carbohydrate Research**, Norwich, v. 339, n. 3, p. 569-578, 2004.
- 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**, Joensuu, v. 41, n. 3, p. 281-289, 2008.
- AKYILDIZ, M. H.; ATES, S. Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in turkey. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, Washington, v. 4, n. 6, p. 660-665, 2008.
- ALMA, M. H.; HAFIZOGLU, H.; MALDAS, D. Dimensional stability of several wood species treated with vinyl monomers and polyethylene glycol-1000. **International Journal of Polymeric Materials**, Richmond, v. 32, n. 1, p. 93-99, 1996.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMORIM, M. R. S.; RIBEIRO, P. G.; MARTINS, S. A.; MENEZZI, C. H. S. D.; SOUZA, M. R. D. Surface Wettability and Roughness of 11 Amazonian Tropical Hardwoods. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 1, p. 99-109, 2013.
- ARRUDA, L. M. **Modificação termomecânica da madeira de Amescla (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): Efeito sobre as propriedades de lâminas e compensados**. 2012. 103 p. 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**, Bangor, 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**, Washington, 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.

ATES, S.; AKYILDIZ, M. H.; OZDEMIR, H. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. **BioResources**, Nova York, v. 4, n. 3, p. 1032-1043, 2009.

BAL, B. C. Physical properties of beech wood thermally modified in hot oil and in hot air at various temperatures. **Maderas Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 17, n. 4, p. 789-798, 2015.

BAL, B. C. The effect of span-to-depth ratio on the impact bending strength of poplar LVL. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 112, n. Supplement C, p. 355-359, 2016.

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

BAYSAL, E.; KART, S.; TOKER, H.; DEGIRMENTEPE, S. Some physical characteristics of thermally modified oriental-beech wood. **Maderas Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 16, n. 3, p. 291-298, 2014.

BAYSAL, E.; OZAKI, S. K.; YALINKILIC, M. K. Dimensional stabilization of wood treated with furfuryl alcohol catalysed by borates. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 38, n. 6, p. 405-415, 2004.

BAZYAR, B. Decay resistance and physical properties of oil heat treated aspen wood. **Bioresources**, Nova York, v. 7, n. 1, p. 696-705, 2012.

BEKHTA, P.; KRYSZTOFIK, T.; PROSZYK S.; LIS, B. Surface gloss of lacquered medium density fibreboard panels veneered with thermally compressed birch wood. **Progress in Organic Coatings**, Lausanne, v. 117, p. 10-19, 2018.

BEKHTA, P.; MAMOŇOVÁ, M.; SEDLIČIK, J.; NOVÁK, I. Anatomical study of short-term thermo-mechanically densified alder wood veneer with low moisture content. **European Journal of Wood and Wood Products**, Stuttgart, v. 74, n. 5, p. 643-652, 2016.

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

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

BEKHTA, P.; PROSZYK, S.; KRYSZTOFIK, T.; LIS, B. Surface wettability of short-term thermo-mechanically densified wood veneers. **European Journal of Wood and Wood Products**, Stuttgart, v. 73, n. 3, p. 415-417, 2015.

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**, Mansfield, v. 48, n. 18, p. 6426-6430, 2013.

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

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**, Tóquio, v. 50, n. 4, p. 307-314, 2004.

BORREGA, M.; KÄRENLAMPI, P. Effect of relative humidity on thermal degradation of Norway spruce (*Picea abies*) wood. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 54, n. 4, p. 323-328, 2008.

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

BROSSMAN, J. R. **Laminated Wood Product**. US Patent 1,834,895. 1931.

BUDAKÇI, M.; PELIT, H.; SÖNMEZ, H.; KORKMAZ, M. The effects of densification and heat post-treatment on hardness and morphological properties of wood materials. **BioResources**, Nova York, v. 11, n. 3, p. 7822-7838, 2016.

BUSTOS, C. A.; ESCOBAR, W. G.; CLOUTIER, A.; FANG, C. H.; CARRASCO, P. V. Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. part II: cell wall mechanical properties determined by nanoindentation. **BioResources**, Nova York, v. 7, n. 2, p. 1525-1532, 2011.

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**, São Carlos, v. 17, n. 2, p. 487-493, 2014.

CADEMARTORI, P. H. G.; SANTOS, P. S. B.; SERRANO, L.; LABIDI, J.; GATTO, D. A. Effect of thermal treatment on physicochemical properties of *Gympie messmate* wood. **Industrial Crops and Products**, Wageningen, v. 45, n. 0, p. 360-366, 2013.

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**, Concepción, v. 15, n. 1, p. 57-64, 2013.

CAI, J.; DING, T.; YANG, L. Dimensional stability of poplar wood after densification combined with heat treatment. **Applied Mechanics and Materials**, Zúriche, v. 152, p. 112-116, 2012.

CANDAN, Z.; HIZIROGLU, S.; MCDONALD, A. G. Surface quality of thermally compressed Douglas fir veneers. **Materials & Design**, Oxford, 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**, Aubière, 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**, Nova York, v. 7, n. 1, p. 1157-1170, 2012.

CHOW, S. Z. Infrared spectral characteristics and surface inactivation of wood at high temperatures. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 5, n. 1, p. 27-39, 1971.

CHRISTIANSEN, A. W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives : a critical review of the literature. Part II, Chemical reactions. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 23, n. 1, p. 69-84, 1991.

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

CONTE, B.; MISSIO, A. L.; PERTUZZATTI, A.; CADEMARTORI, P. H. G.; GATTO, D. A. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretificada de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, 2014.

COSTA, M. A.; DEL MENEZZI, C. H. S. Effect of thermo-mechanical treatment on properties of parica plywoods (*Schizobolium amazonicum* Huber ex Ducke). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2017.

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**, Netherlands, v. 257, n. 8, p. 3558-3564, 2011.

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

DUBEY, M. K. **Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil**. 2010. 191f. Thesis (Doctor of philosophy in Forestry at the University of Canterbury). Universidade de Canterbury, Canterbury, 2010.

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**, Stuttgart, v. 56, p. 403-411, 1998.

- ECKELMAN, C. A. The shrinkage and swelling of wood and its effect on furniture. **Forestry and Natural Resources: Purdue University**: West Lafayette 2008.
- EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. **Wood Chemistry and Wood Biotechnology**. Berlin, Boston: De Gruyter.2009.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. rev. e ampl. Brasília - DF: Embrapa, 2018. 590 p.
- ESSELEN, G. **Wood Treatment and product**, Patent n° 1.952.664, 1934.
- ESTEVES, B.; RIBEIRO, F.; CRUZ-LOPES, L.; DOMINGOS, J. F. I. Densification and heat treatment of maritime Pine wood. **Wood Research**, Cibinong, v. 62, n. 3, p. 373-388, 2017.
- FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A. Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part 1: Dimensional stability. **BioResources**, Nova York, v. 6, n. 1, p. 373-385, 2011.
- FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A. Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part II: Hygroscopicity and mechanical properties. **BioResources**, Nova York, v. 7, n. 1, p. 925-935, 2012.
- 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**, Stuttgart, v. 70, n. 1-3, p. 155-163, 2012.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FU, Q.; CLOUTIER, A.; LAGHDIR, A. Optimization of the thermo-hygro-mechanical (THM) process for sugar maple wood densification. **BioResources**, Nova York, v. 11, n. 4, p. 8844-8859, 2016.
- GABRIELLI, C.; KAMKE, F. Phenol–formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 44, n. 1, p. 95-104, 2010.
- GARCIA, R.; DE CARVALHO, A.; DE FIGUEIREDO LATORRACA, J.; DE MATOS, J.; SANTOS, W.; DE MEDEIROS SILVA, R. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 46, n. 1, p. 41-52, 2012.
- GAŠPARÍK, M.; GAFF, M.; ŠAFAŘÍKOVÁ, L.; VALLEJO, C. R.; SVOBODA, T. Impact Bending Strength and Brinell Hardness of Densified Hardwoods. **BioResources**, Nova York, v. 11, n. 4, p. 8638-8652, 2016.
- GONG, M.; LAMASON, C. **Improvement of Surface Properties of Low Density Wood: Mechanical Modification with Heat Treatment**. University of New Brunswick, 2007. 97 p.

GONG, M.; LAMASON, C.; LI, L. Interactive effect of surface densification and post-heat-treatment on aspen wood. **Journal of Materials Processing Technology**, Evanston, v. 210, n. 2, p. 293-296, 2010.

GRIEBELER, C. G. O.; MATOS, J. L. M.; MUNIZ, G. I. B.; NISGOSKI, S.; BATISTA, D. C.; RODRÍGUEZ, C. I. Colour responses of *Eucalyptus grandis* wood to the brazilian process of thermal modification. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 20, n. 4, p. 661-670, 2018.

GÜNDOZ, G.; AYDEMİR, D. Some physical properties of heat-treated hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood. **Drying Technology**, Quebec, v. 27, n. 5, p. 714-720, 2009.

GÜNDOZ, G.; AYDEMİR, D.; KORKUT, S. The effect of heat treatment on some mechanical properties and color changes of uludag fir wood. **Drying Technology**, Quebec, v. 28, n. 2, p. 249-255, 2010.

GÜNDOZ, G.; KORKUT, S.; KORKUT, D. S. The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camıyanı Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. **Bioresource Technology**, Lucknow, v. 99, n. 7, p. 2275-2280, 2008.

GUO, J.; SONG, K.; SALMÉN, L.; YIN, Y. Changes of wood cell walls in response to hygro-mechanical steam treatment. **Carbohydrate Polymers**, Tenbury Wells, v. 115, n. Supplement C, p. 207-214, 2015.

HAJIHASSANI, R.; MOHEBBY, B.; NAJAFI, S. K.; NAVI, P. Influence of combined hygro-thermomechanical treatment on technical characteristics of poplar wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 20, n. 1, p. 117 - 128, 2018.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; EL BAKALI, I.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Wettability changes and mass loss during heat treatment of wood. **Holzforschung**, München, v. 59, n. 1, p. 35-37, 2005a.

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**, Aubière, v. 89, n. 1, p. 1-5, 2005b.

HAVIMO, M.; RIKALA, J.; SIRVIÖ, J.; SIPI M. Distributions of Tracheid Cross-Sectional Dimensions in Different Parts of Norway Spruce Stems. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 42, n. 1, p. 89-99.

HEGER, F.; GROUX, M.; GIRARDET, F.; WELZBACHER, C. R.; RAPP, A. O.; NAVI, P. Mechanical and Durability Performance of THM Densified Wood Workshop COST Action E22 , **Environmental Optimisation of Wood Protection**. Lisboa, Portugal: 1-10 p. 2004.

HILL, C. A. S. **Wood Modification: Chemical, thermal and other processes**. 1st. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. 260 p.

HILLIS, W. E.; ROZSA, A. N. High temperature and chemical effects on wood stability. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 19, n. 1, p. 57-66, 1985.

HOADLEY, R. B. **Understanding Wood; A Craftsman's Guide to Wood Technology**. 2. ed. Connecticut, 2000. 280 p.

HON, N.; SHIRAISHI, P. Formation of free radicals in photoirradiated cellulose. VIII. Mechanisms. **Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition**, Santa Barbara, v. 14, n. 10, p.2497-2512, 2000.

HSU, W. E.; SCHWALD, W.; SCHWALD, J.; SHIELDS, J. A. Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composites. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 22, n. 3, p. 281-289, 1988.

IBA. 2017. Brazilian Tree Industry. Report 2017. Brasilia, Brasil.

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**, Nova York, 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**, Monona, 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.

KÄLLBOM, S. **Surface characterisation of thermally modified spruce wood and influence of water vapour sorption**. 2015. 50f. Thesis (Doctor of Civil and Architectural Engineering Division of Building Materials), KTH Royal Institute of Technology Stockholm, 2015.

KAMKE, F. A.; SIZEMORE, H. **Viscoelastic thermal compression of wood**, Patent n° 7404422, 2008.

KECKES, J.; BURGERT, I.; FRUHMANN, K.; MULLER, M.; KOLLN, K.; HAMILTON, M.; BURGHAMMER, M.; ROTH, S. V.; STANZL-TSCHEGG, S.; FRATZL, P. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. **Nature Materials**, Londres, v. 2, n. 12, p. 810-813, 2003.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology - II Wood based materials**. In: (Ed.). Berlin, v.12, 1975. 703 p.

KORKUT, S.; BUDAKÇI, M. Effect of high-temperature treatment on the mechanical properties of rowan (*Sorbus aucuparia* L.) wood. **Drying Technology**, Quebec, v. 27, n. 11, p. 1240-1247, 2009.

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**, Joensuu, 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**, Stuttgart, v. 66, n. 6, p. 439-446, 2008.

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

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

LABORIE, M.-P. G. The Temperature Dependence of Wood Relaxations: A Molecular Probe of the Woody Cell Wall. In: (Ed.). *Characterization of the Cellulosic Cell Wall*: **Blackwell Publishing Professional**, Condado Story, p.87-94, 2008.

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**, Mansfield, v. 48, n. 24, p. 8530-8538, 2013.

LAINE, K.; SEGERHOLM, K.; WÄLINDER, M.; RAUTKARI, L.; HUGHES, M. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. **Wood Science and Technology**, Joensuu, p. 1-12, 2016.

LAMASON, C.; GONG, M. Optimization of pressing parameters for mechanically surface-densified aspen. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 57, n. 10, p. 64, 2007.

LASKOWSKA, A. The influence of process parameters on the density profile and hardness of surface-densified Birch wood (*Betula pendula* Roth). **BioResources**, Nova York, v. 12, n. 3, p. 6011-6023, 2017.

MANTANIS, G. I.; YOUNG, R. A.; ROWELL, R. M. Swelling of wood. Part III. Effect of temperature and extractives on rate and maximum swelling. **Holzforschung**, München, v. 49, n. 3, p. 239-248, 1995.

MENZ. **Menz OHT: The future of wood treatment**. 2014. 163p. Disponível em: http://www.menzholz.de/files/unternehmen/178_1_pdf__menz_outdoor_collection_2014__engels_.pdf. Acesso : 09/08/2018.

MILITZ, H. **Heat treatment technologies in europe**: Scientific background and technological state-of-art. Enhancing the durability of lumber and engineered wood products, 2002, Forest Products Society, 2002.

MISSIO, A. L. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* submetida a tratamentos de congelamento e termorreificação**. 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; DE CADEMARTORI, P. H. G.; PERTUZZATTI, A.; CONTE, B.; GATTO, D. A. Thermochemical and physical properties of two fast-growing eucalypt woods subjected to two-step freeze–heat treatments. **Thermochimica Acta**, Kidlington, v. 615, p. 15-22, 2015.

MIFTIEVA, E.; GAFF, M.; SVOBODA, T.; BABIAK, M.; GAŠPARÍK, M.; RUMAN, D.; SUCHOPÁR M. Effects of selected factors on bending characteristics of Beech wood. **BioResources**, Nova York, v. 11, n. 1, p. 599-611, 2016.

MONTES, C.S.; HERNANDEZ, R.E. ; BEAULIEU, J. ; WEBER, J.C. Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. **New Forests**, West Lafayette, v. 35, n. 1, p. 57-73, 2008.

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**, Santa Maria, 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**. 2000. 145f. Thesis (Doctor of Structural Engineering and Materials Technical University of Denmark), Technical University of Denmark, Denmark, 2000.

NAKAJIMA, M.; FURUTA, Y.; ISHIMARU, Y. Thermal-softening properties and cooling set of water-saturated bamboo within proportional limit. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 54, n. 4, p. 278-284, 2008.

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

NAVI, P.; PITTET, V.; PLUMMER, C. J. G. Transient moisture effects on wood creep. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 36, n. 6, p. 447-462, 2002.

NAVI, P.; PIZZI, A. Property changes in thermo-hydro-mechanical processing thermo-hydro-mechanical wood behavior and processing. **Holzforschung**, München, v. 69, n. 7, p. 863-873, 2015.

NUOPPONEN, M. S.; WILLFÖR, A. S.; JÄÄSKELÄINEN, T.; VUORINEN, A. UV resonance Raman (UVR) spectroscopic study on the extractable compounds in Scots pine (*Pinus sylvestris*) wood: Part II. Hydrophilic compounds.. 60, 2963-2968. **Spectrochimica Acta**, Kidlington, v. 13, n. 60, p. 2963-2968, 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..

PANDEY, K. K.; PITMAN, A. J. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Birmingham, v. 52, n. 3, p. 151-160, 2003.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1970. 772 p.

PELIT, H.; BUDAKÇ, M.; SÖNMEZ, A. Density and some mechanical properties of densified and heat post-treated Uludağ fir, linden and black poplar woods. **European Journal of Wood and Wood Products**, Stuttgart, v. 76, n: 1 p. 79-87, 2017.

PELIT, H.; SÖNMEZ, A.; BUDAKÇ, M. Effects of Thermomechanical Densification and Heat Treatment on Density and Brinell Hardness of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Eastern Beech (*Fagus orientalis* L.). **BioResources**, Nova York, v. 10, n. 2, p. 3097-3111, 2015.

PELIT, H.; SÖNMEZ, A.; BUDAKÇ, M. Effects of ThermoWood® Process Combined with Thermo-Mechanical Densification on some Physical Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, Nova York, v. 9, n. 3, p. 4552-4567, 2014.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, Nova York, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PERTUZZATTI, A.; MISSIO, A. L.; CADEMARTORI, P. H. G. D.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; BERGER, C.; GATTO, D. A.; TONDI, G. Effect of Process Parameters in the Thermomechanical Densification of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* Fast-growing Wood. **BioResources**, Nova York, v. 13, n. 1, p. 1576-1590, 2018.

PETRIC, M.; OVEN, P. Determination of Wettability of Wood and Its Significance in Wood Science and Technology: A Critical Review. **Reviews of Adhesion and Adhesives**, Dutchess County, v. 3, n. 2, p. 121-187, 2015.

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

PIRES, E. N.; MERLINI, C.; QURESHI, H. A.; SALMÓRIA, G. V.; BARRA, G. M. O. Efeito do tratamento alcalino de fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi. **Polímeros**, São Carlos, v. 22, n. 4, p. 339-344, 2012.

RANA, R.; LANGENFELD-HEYSER, R.; FINKELDEY, R.; POLLE, A. FTIR spectroscopy, chemical and histochemical characterisation of wood and lignin of five tropical timber wood species of the family of Dipterocarpaceae. **Wood Science and Technology**, Joensuu, v. 44, n. 2, p. 225-242, 2009.

RAPP, A. O.; SAILER, M. **Heat treatment of wood in Germany - state of the art**. Oslo: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, 2000. 82 p.

RAUTKARI, L.; KUTNAR, A.; HUGHES, M.; KAMKE, F. A. Wood Surface Densification Using Different Methods. **Wood Conference on Timber Engineering**, Riva del Garda, Italia, p. 647-648, 2010.

RAUTKARI, L.; LAINE, K.; KUTNAR, A.; MEDVED, S.; HUGHES, M. Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots Pine in relation to degree of densification. **Journal of Materials Science**, Mansfield, v. 48, n. 6, p. 2370-2375, 2013.

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Ed. CRC Press, 2005. 487 p.

SADATNEZHAD, S. H.; KHAZAEIAN, A.; SANDBERG, D.; TABARSA, T. Continuous surface densification of wood: A new concept for large-scale industrial processing. **BioResources**, Nova York, v. 12, n. 2, p. 3122-3132, 2017.

SAILER, M.; RAPP, A. O.; LEITHOFF, H. **Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment**. IRG/WP 00-40162, International Research Group on Wood Preservation. Kona, Hawaii. 2000.

SANDBERG, D.; HALLER, P.; NAVI, P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. **Wood Material Science and Engineering**, Zürich, v. 8, n. 1, p. 64-88, 2013.

SANTONI, I.; PIZZO, B. Effect of surface conditions related to machining and air exposure on wettability of different Mediterranean wood species. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 31, n. 7, p. 743-753, 2011.

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

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.

SJÖSTRÖM, E. **Lignin: wood chemistry, fundamentals and applications**. Academic Pres, 2. ed. p. 71-89, Finland. 1993. Cap. 4.

SRINIVAS, K.; PANDEY, K. K. Effect of Heat Treatment on Color Changes, Dimensional Stability, and Mechanical Properties of Wood. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, Nova York, v. 32, n. 4, p. 304-316, 2012.

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**, Joensuu, 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**, Stuttgart, v. 60, n. 5, p. 375-376, 2002.

TABARSA, T.; CHUI, Y. H. Effects of hot-pressing on properties of white spruce. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 47, n. 5, p. 71-76, 1997.

- TANG, X.; NAKAO, T.; ZHAO, G. Physical properties of compressed wood fixed via different heating pathways to obtain a constant recovery. **Mokuzai Gakkaishi**, Kyoto, v. 50, p. 333-340, 2004.
- TJEERDSMA, B. F.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; TEKELY, P.; MILITZ, H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Stuttgart, v. 56, p. 149-153, 1998.
- TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, Stuttgart, v. 63, n. 2, p. 102-111, 2005.
- TUONG, V. M.; LI, J. Changes caused by heat treatment in chemical composition and some physical properties of acacia hybrid sapwood. **Holzforschung**, München, v. 65, p.67-72, 2010.
- UCUNCU, T.; DURMAZ, E.; KAYMAKCI, A. Characteristics of hot-compressed poplar wood boards. **BioResources**, Nova York, v. 12, n. 4, p. 9038-9049, 2017.
- UHMEIER, A.; MOROOKA, T.; NORIMOTO, M. Influence of Thermal Softening and Degradation on the Radial Compression Behavior of Wet Spruce. **Holzforschung**, München, 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**, Nova York, v. 7, n. 4, p. 5581-5592, 2012.
- UNSAL, O.; CANDAN, Z.; KORKUT, S. Wettability and roughness characteristics of modified wood boards using a hot-press. **Industrial Crops and Products**, Wageningen, v. 34, n. 3, p. 1455-1457, 2011.
- WÅLINDER, M. E. P.; GARDNERB, D. J. Factors influencing contact angle measurements on wood particles by column wicking. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Abingdon, v. 13, n. 12, p. 1363-1374, 1999.
- WÅLINDER, M. E. P.; JOHANSSON, I. Measurement of Wood Wettability by the Wilhelmy Method. Part 1. Contamination of Probe Liquids by Extractives. **Holzforschung**, München, v. 55, n. 1, p. 21-32, 2001.
- WALKER, J. Corewood: docking the dog's tail. Part II: The need to particularise. **New Zealand Journal of Forestry**, Wellington, v. 43, n. 1, p. 4-6, 1998.
- WALSH, F.; WATTS, R. **Composite Lumber**. Patent n° 1.465.383, 1923..
- WANG, J. Y.; COOPER, P. A. Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Stuttgart, v. 63, n. 6, p. 417-422, 2005.

WELZBACHER, C. R.; WEHSENER, J.; RAPP, A. O.; HALLER, P. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale – Dimensional stability and durability aspects. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Stuttgart, v. 66, n. 1, p. 39-49, 2008.

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

WOLCOTT, M. P.; KAMKE, F. A.; DILLARD, D. A. Fundamentals of flakeboard manufacture: viscoelastic behavior of the wood component. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 22, n. 4, p. 345-361, 1990.

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

WOLCOTT, M. P.; SHUTLER, E. L. Temperature and moisture influence on compression-recovery behavior of wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 35, n. 4, p. 540-551, 2003.

ZHAN, J.-F.; AVRAMIDIS, S. Needle fir wood modified by surface densification and thermal post-treatment: hygroscopicity and swelling behavior. **European Journal of Wood and Wood Products**, Stuttgart, v. 74, n. 1, p. 1-8, 2015.

APÊNDICE

APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS TRATADAS.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
GC	Espécie (A)	3	11282,15	3760,72	273,23**
	Tratamento (B)	1	240,54	240,54	17,48**
	A x B	3	158,65	52,88	3,84**
	Resíduo	408	2284,85	13,76	
TU _{eq}	Espécie (A)	3	58,14	19,38	83,95**
	Tratamento (B)	5	1679,26	335,85	1454,77**
	A x B	15	48,67	3,24	14,05**
	Resíduo	191	44,09	0,23	
VPM (%)	Espécie (A)	3	196,17	65,39	82,47**
	Tratamento (B)	4	566,49	141,62	178,62**
	A x B	12	111,01	9,25	11,67 ^{ns}
	Resíduo	165	130,82	0,79	
ρ _{ap} (g.cm ⁻³)	Espécie (A)	3	3,87	1,29	202,09**
	Tratamento (B)	5	2,32	0,46	72,75**
	A x B	15	1,36	0,90	14,19**
	Resíduo	191	1,22	0,006	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; Gc: grau de compressão; TU_{eq}: teor de umidade de equilíbrio; VPM: variação percentual de massa de massa; ρ_{ap}: densidade aparente; **Significativo ao nível de 1% de significância.

**APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA A
HIGROSCOPICIDADE E INCHAMENTO EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E
TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS TRATADAS.**

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
IE2H (%)	Espécie (A)	3	5,03	1,68	6,50**
	Tratamento (B)	5	68,26	13,65	52,93**
	A x B	15	21,70	1,45	5,61**
	Resíduo	191	49,26	0,26	
IE24H (%)	Espécie (A)	3	354,99	118,33	225,78**
	Tratamento (B)	5	393,81	78,76	150,28**
	A x B	15	104,31	6,95	13,27**
	Resíduo	191	100,10	0,52	
AB2H (%)	Espécie (A)	3	2258,38	752,39	550,08**
	Tratamento (B)	5	848,04	169,61	123,94**
	A x B	15	501,70	33,45	24,44**
	Resíduo	191	261,39	1,37	
AB24H (%)	Espécie (A)	3	23461,52	7820,51	462,33**
	Tratamento (B)	5	4204,93	840,99	49,72**
	A x B	15	4544,74	302,98	17,91**
	Resíduo	191	3230,88	16,92	
TRNE (%)	Espécie (A)	3	11,65	3,88	25,98**
	Tratamento (B)	3	35,22	11,74	78,56**
	A x B	9	3,23	0,36	2,40**
	Resíduo	139	20,77	0,15	
TR (%)	Espécie (A)	3	343,29	114,43	245,48**
	Tratamento (B)	3	47,40	15,80	33,91**
	A x B	9	12,99	1,44	3,10**
	Resíduo	139	64,77	0,47	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; IE2H: inchamento em espessura da madeira após a imersão em água por um período de 2 horas; IE24H: inchamento em espessura da madeira após a imersão em água por um período de 24 horas; AB2H: absorção de água após a imersão por um período de 2 horas; AB24H: absorção de água após a imersão por um período de 24 horas; TNRE: taxa de não retorno em espessura; TR: taxa de retração; **Significativo ao nível de 1% de significância.

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS TRATADAS.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
MOE (GPa)	Espécie (A)	3	410,73	136,91	132,84**
	Tratamento (B)	5	394,03	78,81	76,46**
	A x B	15	44,28	2,95	2,86**
	Resíduo	232	239,11	1,03	
MOR (MPa)	Espécie (A)	3	56777,01	18925,67	1608,39**
	Tratamento (B)	5	22792,95	4558,59	387,41**
	A x B	15	18044,37	1202,96	102,23**
	Resíduo	232	2729,90	11,77	
F _{max} (KJ/m ²)	Espécie (A)	3	14493,05	4831,01	333,67**
	Tratamento (B)	5	22003,84	4400,76	303,95**
	A x B	15	6566,73	437,78	30,24**
	Resíduo	232	3358,93	14,48	
H _{rd} (MPa)	Espécie (A)	3	45684,72	15228,24	1657,04**
	Tratamento (B)	5	18539,34	3707,87	403,46**
	A x B	15	15647,62	1043,17	113,51**
	Resíduo	232	2132,45	9,19	
σ _{máx} (MPa)	Espécie (A)	3	18357,56	6119,18	765,86**
	Tratamento (B)	5	15643,78	3128,76	391,58**
	A x B	15	6543,79	436,25	54,60**
	Resíduo	232	1854,63	7,99	

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_{rd}: dureza Janka no sentido radial; σ_{máx}: resistência máxima em ensaio de compressão paralela; **Significativo ao nível de 1% de significância.

**APÊNDICE D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL PARA A COLORIMETRIA
EM RAZÃO DOS FATORES ESPÉCIE E TRATAMENTO PARA AS MADEIRAS
TRATADAS.**

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
L*	Espécie (A)	3	7066,47	2355,49	204,44**
	Tratamento (B)	5	42945,83	8589,17	745,48**
	A x B	15	4139,58	275,97	23,95**
	Resíduo	408	4700,82	11,52	
a*	Espécie (A)	3	4652,15	1550,71	738,24**
	Tratamento (B)	5	2210,37	442,07	210,46**
	A x B	15	338,91	22,59	10,76**
	Resíduo	408	857,02	2,10	
b*	Espécie (A)	3	221,37	73,79	34,07**
	Tratamento (B)	5	3645,69	729,14	336,65**
	A x B	15	651,65	43,44	20,06**
	Resíduo	408	883,6	2,16	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; L*: índice de claridade; a*: coordenada cromática vermelho-verde; b*: coordenada cromática azul-amarelo; **Significativo ao nível de 1% de significância.