

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

Henrique Weber Dalla Costa

**INTEMPERISMO ACELERADO EM MADEIRA
TERMORRETIFICADA EM ÓLEO**

Santa Maria, RS
2017

Henrique Weber Dalla Costa

**INTEMPERISMO ACELERADO EM MADEIRA TERMORRETIFICADA EM
ÓLEO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

Santa Maria, RS
2017

Dalla Costa, Henrique Weber
INTEMPERISMO ACELERADO EM MADEIRA TERMORRETIFICADA EM
ÓLEO / Henrique Weber Dalla Costa.- 2017.
79 p.; 30 cm

Orientador: Darci Alberto Gatto
Coorientadores: Clóvis Roberto Haselein, Cristiane
Pedrazzi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2017

1. Fotodegradação 2. Envelhecimento artificial 3.
CIELab 4. Degradação térmica I. Alberto Gatto, Darci II.
Roberto Haselein, Clóvis III. Pedrazzi, Cristiane IV.
Título.

Henrique Weber Dalla Costa

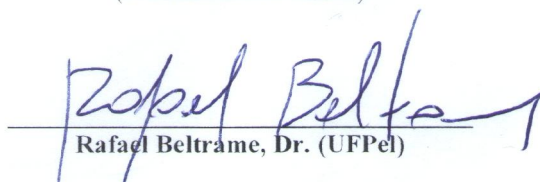
**INTEMEPERISMO ACELERADO EM MADEIRA TERMORRETIFICADA EM
ÓLEO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

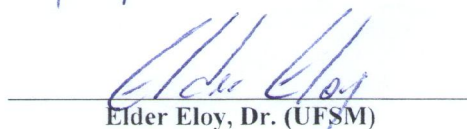
Aprovado em 23 de fevereiro de 2017:



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



Rafael Beltrame, Dr. (UFPEl)



Elder Eloy, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

*Aos meus amados pais, Genésio e Loraine,
e meu irmão, Lucas,*

Eu dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, proteção e bênçãos recebidas.

Aos meus pais, Genésio e Loraine, pelo amor incondicional, apoio, compreensão e exemplos de vida.

Ao meu irmão, Lucas, por todo apoio, horas de conversa e auxílio no inglês.

A toda minha família, em especial aos meus tios Andréa e Gonzalo, pelos aconselhamentos e suporte em toda essa caminhada.

Aos professores Darci Alberto Gatto, Clóvis R. Haselein e Cristiane Pedrazzi, pela oportunidade, ensinamentos e orientação.

Aos professores Luciano Denardi e Rômulo Trevisan pela amizade, confiança, ensinamentos e incentivo desde a graduação.

Aos professores Rafael Beltrame e Elder Eloy pelo aceite e contribuições na banca.

Aos membros do LPF 88, Anderson, André, Bruna, Camila, Fernanda A., Fernanda M., Fernando, Marina, Ronan, pela amizade, companheirismo, troca de conhecimentos e suporte.

Aos membros do grupo Ciência da Madeira (UFPel – Pelotas/RS) e membros do LTPF (UFSM – Frederico Westphalen/RS) pela receptividade, amizade, intercâmbio de ideias e auxílio.

Aos técnicos de laboratório Fabiane, Nelson, Ripol e Tarso pela contribuição no preparo das amostras e manuseio de equipamentos.

Aos meus queridos amigos Albeneir, Aline, Aline K., Ana Maria, Ana Paula, Carla, Carla P., Daniel, Daniela, Dienifer, Ezequiel, Fernanda, Fernanda A., Guilherme, Igor, Inara, Jéssica, Júlia, Júlio, Laíse, Larissa, Marcos, Patrícia, Patrícia B., Paula, Pedro, Régis, Samara, Samuel, Tiago F., Vinícius, Willian, vocês foram uma família nesse período.

E a todos professores, técnicos, familiares e amigos que de alguma forma me acompanharam e ajudaram nessa jornada.

Muito obrigado!

*“É melhor conseguir sabedoria do que ouro;
é melhor ter conhecimento do que prata.”*

Provérbios 16:16

RESUMO

INTEMPERISMO ACELERADO EM MADEIRA TERMORRETIFICADA EM ÓLEO

AUTOR: Henrique Weber Dalla Costa

ORIENTADOR: Darci Alberto Gatto

O uso de tratamento de termorretificação em óleo visam incrementar as propriedades tecnológicas da madeira com indicação de uso em ambientes externos. Portanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o intemperismo acelerado na madeira de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* termorretificada em óleo. Para tal, foram confeccionados corpos de prova, a partir de cinco árvores de cada espécie. A termorretificação foi realizada em banho de óleo laboratorial a 150°C, 180°C e 210°C por 4 horas e o intemperismo foi conduzido câmara de intemperismo acelerado por 20, 40 e 60 ciclos de 12 horas, as amostras controle foram acondicionadas em câmara climatizada (20°C e 65% UR). Foram realizados ensaios mecânico (flexão estática), físicos (massa específica básica, teor de umidade de equilíbrio, inchamento e variação volumétrica) e de superfície (colorimetria). A análise estatística foi realizada em arranjo fatorial 4x4, com quatro níveis em cada fator (temperatura e tempo), em caso de interação foi realizada análise de regressão. Os principais resultados mostram que o intemperismo acelerado não afetou as propriedades mecânicas, entretanto a termorretificação causou reduções da resistência em *Eucalyptus grandis* conforme o aumento da temperatura. As propriedades físicas foram incrementadas com a termorretificação e de maneira geral tiveram pouca influência do tempo de exposição. A massa específica aumentou em função da absorção de óleo pela madeira. O teor de umidade de equilíbrio decresceu com o aumento da temperatura e apresentou maiores variações nos ciclos iniciais de intemperismo, com tendência de estabilização. O inchamento e a variação volumétrica foram aprimorados pela termorretificação e apresentaram pouca influência do intemperismo acelerado. A coloração da madeira foi alterada tanto pela termorretificação quanto pelo intemperismo acelerado. O aumento da temperatura tornou a madeira mais escura, evidenciado pela redução do parâmetro L* e o maior tempo de exposição tornou a madeira mais opaca e acinzentada – aumento do L* e redução do a* e/ou b*. Portanto, a termorretificação em óleo alterou de forma mais pronunciada as propriedades tecnológicas das madeiras estudadas e foi eficiente na sua manutenção frente a ação do intemperismo. Dessa forma, recomenda-se o uso de madeira termorretificada em óleo (preferencialmente com temperatura de 180°C) em ambientes externos e internos.

Palavras-chave: Fotodegradação. Envelhecimento artificial. CIELab. Degradação térmica. Propriedades mecânicas. Propriedades físicas.

ABSTRACT

ACCELERATED WEATHERING ON OIL HEAT TREATED WOOD

AUTHOR: Henrique Weber Dalla Costa

ADVISOR: Darci Alberto Gatto

The use of oil heat treatment aims at incrementing the technological properties of wood with use indication for external environments. Therefore, the current study had, as its objective, the evaluation of accelerated weathering on the oil heat treated woods of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis*. To that end, specimens were manufactured from five trees of each species. The heat treatment was conducted in a laboratory oil bath at 150°, 180° and 210° for four hours and the weathering was conducted in an accelerated weathering chamber for 20, 40 and 60 cycles of twelve hours, the control samples were stored in an air-conditioned chamber (20° and 65% RH). Were conducted: mechanical test (static bending), physical tests (basic specific mass, equilibrium moisture content, swelling and volumetric variation) and surface test (colorimetric testing). The statistical analysis was carried in a factorial arrangement 4x4, with four levels on each factor (temperature and time), in case of interaction a regression analysis was conducted. The main results demonstrate that the accelerated weathering did not affect the mechanical properties, however the heat treatment caused a reduction of resistance on *Eucalyptus grandis* in accordance with the temperature increase. The physical properties were enhanced with heat treatment, and broadly had little influence of the exposition time. The specific mass increased according to the oil absorption by the wood. The equilibrium moisture content decreased with the temperature rise and presented larger variations on the initial cycles of accelerated weathering, tending to stabilise. Swelling and volumetric variation were improved by the heat treatment and presented little influence of the accelerated weathering. Wood colouration was altered by heat treatment and also by accelerated weathering. The rise in temperature made the woods darker, demonstrated by the reduction parameter L* and the longer exposition time made the wood opaquer and greyish – increased L* and reduced a* and or b*. Thus, the oil heat treatment altered, in a pronounced way, the technological properties of the studied woods and was efficient in its conservation against the action of weathering. Therefore, the use of oil heat treated wood (preferably with a temperature of 180°C) is recommended for external and internal environments.

Keywords: Photo-degradation. Artificial weathering. CIELab. Thermal degradation. Mechanical properties. Physical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Formação da cadeia de celulose por unidades de glicose.	18
Figura 2 – Estrutura da hemicelulose (galactoglucomanana)	19
Figura 3 – Estrutura da lignina.	19
Figura 4 – Grupos cromóforos da lignina	24
Figura 5 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o módulo de ruptura (MOR) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	34
Figura 6 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o módulo de elasticidade (MOE) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	35
Figura 7 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para a massa específica básica (ρ_b) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	38
Figura 8 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o teor de umidade de equilíbrio da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	40
Figura 9 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o teor de umidade de equilíbrio da madeira de <i>Pinus elliottii</i>	40
Figura 10 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o inchamento tangencial (α_T) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	43
Figura 11 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o inchamento radial (α_R) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	44
Figura 12 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o inchamento longitudinal (α_L) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	45
Figura 13 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o inchamento longitudinal (α_L) da madeira de <i>Pinus elliottii</i>	46
Figura 14 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para a variação volumétrica (ΔV) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	47
Figura 15 – Aspecto da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> termorretificada em óleo e exposta ao intemperismo acelerado.	50
Figura 16 – Aspecto da madeira de <i>Pinus elliottii</i> termorretificada em óleo e exposta ao intemperismo acelerado.	50
Figura 17 – Variação da luminosidade para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	51
Figura 18 – Variação da luminosidade para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Pinus elliottii</i>	52
Figura 19 – Variação da coordenada cromática verde-vermelho para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	53
Figura 20 – Variação da coordenada cromática verde-vermelho para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Pinus elliottii</i>	54
Figura 21 – Variação da coordenada cromática azul-amarelo para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	55
Figura 22 - Variação da coordenada cromática azul-amarelo para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Pinus elliottii</i>	56

Figura 23 – Variação da cromaticidade para cada temperatura de termorreificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	57
Figura 24 - Variação da cromaticidade para cada temperatura de termorreificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Pinus elliottii</i>	58
Figura 25 – Variação do ângulo de tinta para cada temperatura de termorreificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	59
Figura 26 – Variação do ângulo de tinta para cada temperatura de termorreificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Pinus elliottii</i>	59
Figura 27 – Variação total de cor para cada temperatura de termorreificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	60
Figura 28 – Variação total de cor para cada temperatura de termorreificação em função do tempo de exposição para madeira de <i>Pinus elliottii</i>	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química média de madeiras de coníferas e folhosas.....	17
Tabela 2 – Parâmetros dos tratamentos de termorretificação.....	27
Tabela 3 – Adaptações da norma ASTM D 143-94 para ensaio de flexão estática	28
Tabela 4 – Desmembramento fatorial do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) em razão do fator temperatura para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i> . 33	
Tabela 5 – Desmembramento fatorial da massa específica básica (ρ_b) em razão do fator temperatura para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	37
Tabela 6 – Desmembramento fatorial do inchamento tangencial (α_T) em razão do fator temperatura para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	42
Tabela 7 – Desmembramento fatorial do inchamento radial (α_R) em razão do fator temperatura para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	44
Tabela 8 – Desmembramento fatorial da variação volumétrica (ΔV) em razão do fator temperatura para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i>	47
Tabela 9 – Cor da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> conforme proposto por Camargos e Gonçalves (2001) em função da temperatura de termorretificação e tempo de exposição ao intemperismo acelerado.	62
Tabela 10 – Cor da madeira de <i>Pinus elliottii</i> conforme proposto por Camargos e Gonçalves (2001) em função da temperatura de termorretificação e tempo de exposição ao intemperismo acelerado.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA	17
3.2 TERMORRETIFICAÇÃO	20
3.3 INTEMPERISMO.....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 COLETA E PREPARO DO MATERIAL	26
4.2 TRATAMENTO DE TERMORRETIFICAÇÃO	26
4.3 INTEMPERISMO ACELERADO	27
4.4 ANÁLISE MECÂNICA.....	28
4.4.1 Flexão estática	28
4.5 ANÁLISES FÍSICAS.....	29
4.5.1 Massa específica básica	29
4.5.2 Teor de umidade de equilíbrio.....	29
4.5.3 Inchamento	29
4.6 ANÁLISE DE SUPERFÍCIE	30
4.6.1 Colorimetria CIEL*a*b*	30
4.7 ANÁLISE DOS DADOS	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 ANÁLISE MECÂNICA.....	32
5.1.1 Flexão estática	32
5.2 ANÁLISES FÍSICAS.....	36
5.2.1 Massa específica básica	36
5.2.2 Teor de umidade de equilíbrio.....	39
5.2.3 Inchamento	42
5.3 ANÁLISE DE SUPERFÍCIE	49
5.3.1 Colorimetria CIEL*a*b*	49
6. CONCLUSÕES.....	63
7. RECOMENDAÇÕES	64
REFERÊNCIAS.....	65
APÊNDICES	75

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro, em 2015, detinha 7,8 milhões de hectares de florestas plantadas, correspondendo à 91% da produção de madeira para fins industriais. A área de plantios florestais com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* correspondeu a 7,2 milhões de hectares, predominando reflorestamentos de eucaliptos (77,8%) (IBÁ, 2016).

A madeira proveniente desses maciços florestais são destinadas para a produção de celulose e papel, painéis de madeira, carvão vegetal, madeira serrada, produtos oriundos da preservação da madeira, entre outros.

A preservação da madeira visa o aumento de sua vida útil e pode ser feito por meio de processos físico-químicos. O método de impregnação de preservativo químico (biocida) na madeira, apesar dos riscos socioambientais, é o mais utilizado e difundido no Brasil.

Contudo, foram desenvolvidos os métodos de modificação da madeira que oferecem menos riscos para o ambiente. Nesse aspecto se destaca o processo de termorretificação (ou modificação térmica) que consiste em submeter a madeira à altas temperaturas (140 à 220°C), modificando sua composição química estrutural, a fim de aumentar o potencial tecnológico do material (CONTE et al., 2014).

De modo geral, os métodos de modificação térmica da madeira diferem entre si, no quesito atmosfera de transferência de calor (oxigênio, nitrogênio, óleo), na temperatura utilizada e no teor de umidade da madeira.

Dentre os métodos, destaca-se a termorretificação com óleo vegetal, visto que esse meio permite maior controle da temperatura no processo, quando comparada ao vapor d'água, pois apresenta maior densidade e condutividade térmica (MENZ, 2013), e degrada as hemiceluloses e os extrativos, alterando a constituição química da madeira (CADEMARTORI, 2012).

Além do incremento nas propriedades físicas e resistência a deterioração, a termorretificação altera a cor da madeira, tornando-a mais escura e parecida com madeiras tropicais, agregando valor comercial. A cor, para Gonzalez et al. (2006), é tida como um indicador de qualidade da madeira e tão importante quanto as características físico-mecânicas, e muitas vezes determinante no preço final do produto ofertado no mercado madeireiro.

A madeira termorretificada em óleo tem uso prioritário para ambientes externos, logo, está exposta às intempéries, em especial a degradação provocada pela luz solar, que altera a cor da madeira, tornando-a opaca e acinzentada, além disso, modifica as características físico-químicas da superfície (GONÇALEZ et al., 2010).

A luz incidente na madeira degrada seus componentes principais da parede celular, inicialmente com a variação da cor, porém períodos maiores de exposição podem comprometer as propriedades mecânicas e colapsar o material (OWEN et al., 1993).

Entre as alternativas para evitar e/ou retardar a ação degradante das intempéries estão as madeiras com modificações químicas (termorretificadas, acetiladas, furfúricas, etc.), bem como, a aplicação de tintas e/ou revestimentos (SILVA e PASTORE, 2004).

A manutenção das propriedades tecnológicas da madeira, em condição de serviço, são dependentes da sua relação com o ambiente, podendo ser alteradas em diferentes níveis pela ação das intempéries.

Portanto, faz-se necessário o estudo do intemperismo em madeiras termorretificadas em óleo, a fim de avaliar o seu potencial de uso em ambientes externos, como madeira estrutural e de acabamento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as alterações decorrentes do intemperismo acelerado nas propriedades da madeira de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* termorretificada em óleo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as alterações nas propriedades físicas da madeira;
- Verificar as modificações na superfície da madeira;
- Determinar as alterações nas propriedades mecânicas da madeira;
- Avaliar a qualidade do produto ao final do intemperismo acelerado.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

Os polímeros (*poli*, muitos e *meros*, unidades de repetição) são materiais formados por várias unidades repetidas, portanto, são macromoléculas, podem ter origem natural ou sintética (ASKELAND e PHULÉ, 2008).

A madeira é um material lignocelulósico complexo, heterogêneo e poroso, composto basicamente por quatro elementos químicos, o carbono (C), o hidrogênio (H) e o oxigênio (O), e pequenas quantidades de (N). Além de compostos inorgânicos, tais como cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), manganês (Mn) e silício (Si), encontrados nas cinzas da madeira (SHMULSKY e JONES, 2011).

Os elementos que constituem a madeira se organizam na forma de polímeros orgânicos, a celulose, formada a partir de um monômero básico, a glicose (C₆H₁₂O₆), a hemicelulose e a lignina (KLOCK et al., 2005; BATISTA, 2012). Além dos polímeros de alto peso molecular, são encontrados inúmeros compostos de baixo peso molecular, denominados, genericamente, extrativos.

A parede celular da madeira é composta por multicamadas complexas de microfibrilas (filamentos de moléculas de celulose) emaranhadas numa rede lignina e hemicelulose que conferem as suas propriedades físico-mecânicas (DWSANTO et al., 1998; MORSING, 2000)

A proporção desses polímeros e compostos é diferente entre madeiras de coníferas e de folhosas, e são expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química média de madeiras de coníferas e folhosas.

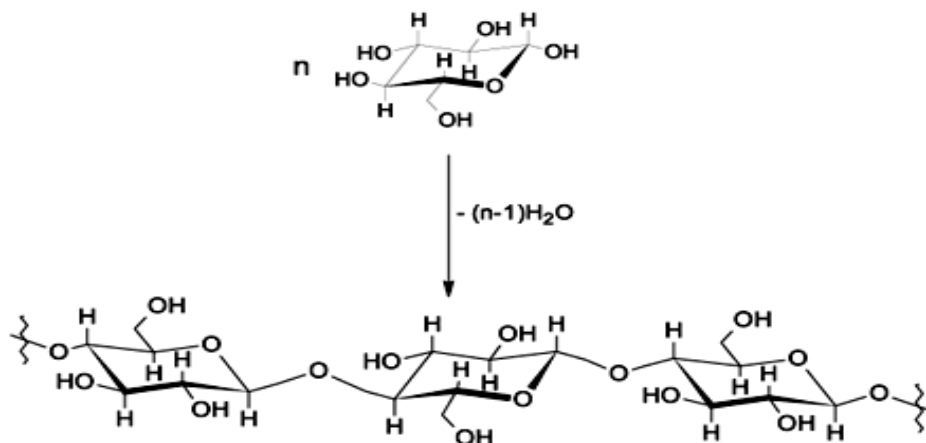
Constituinte	Madeira	
	Coníferas	Folhosas
Celulose	42 ± 2%	45 ± 2%
Hemicelulose	27 ± 2%	30 ± 5%
Lignina	28 ± 3%	20 ± 4%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

Fonte: Adaptado de Sjöström (1993) e Klock et al., 2005.

A formação do polímero celulose (Figura 1), ocorre através da união de unidades de glicose, onde ocorre a perda de uma molécula de água para cada ligação (ligação glicosídica)

e rotação da molécula em 180°, tornando-a com caráter linear (HILL, 2006; SHMULSKY e JONES, 2011).

Figura 1 – Formação da cadeia de celulose por unidades de glicose.



Fonte: Adaptado de Morais et al. (2005).

A celulose, segundo Klock et al. (2005), é um polímero de cadeia linear, insolúvel, à temperatura ambiente, em água, solventes orgânicos, ácidos e álcalis dissolvidos, e possui estrutura organizada e parcialmente cristalina.

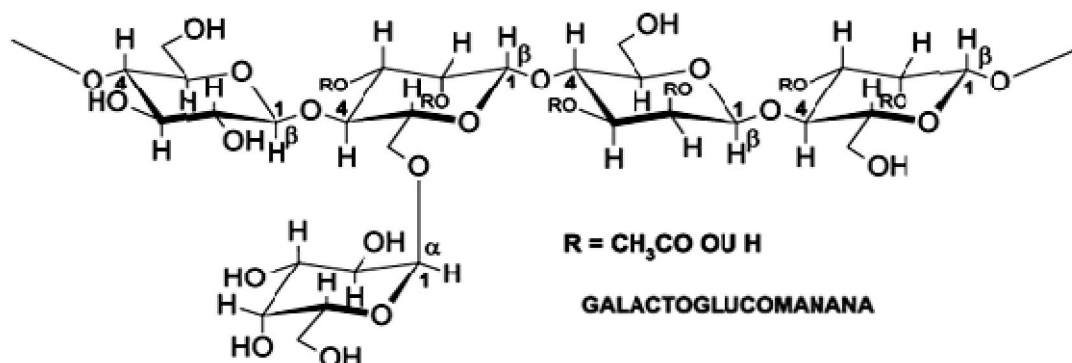
A cadeia de celulose pode ser expressa, empiricamente, pela fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, e o seu grau de polimerização (GP) indicado por “n”, ou seja, o número de repetições do monômero β -D-glicose (SHMULSKY e JONES, 2011). Para Hill (2006) o GP da madeira está em torno de 10^4 , porém ressalta que o valor pode ser subestimado, uma vez que ocorre degradação no isolamento.

Contrastando com as cadeias retas da celulose, as hemiceluloses possuem cadeias ramificadas e estrutura menos organizada (Figura 2), portanto, são mais facilmente atingidas por produtos químicos (KLOCK et al., 2005).

As hemiceluloses, conhecidas como polioses, são parecidas com a celulose, porém são formadas por unidades de açúcares diferentes, com grau de polimerização menor que da celulose, na da ordem de 200-300 (HILL, 2006).

Essas são consideradas polissacarídeos de baixa massa molecular que apresentam em sua composição distintos açúcares, em diferentes proporções, estão presentes nos tecidos das plantas intimamente unidos à celulose (FENGEL e WEGENER, 1989). Compõem junto com a celulose e a lignina, a parede celular, determinando as suas características estruturais e atuam na regulação do crescimento das plantas (FERREIRA et al., 2009)

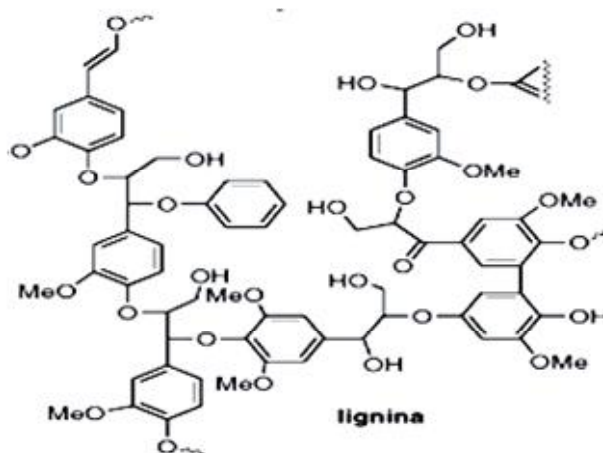
Figura 2 – Estrutura da hemicelulose (galactoglucomanana)



Fonte: Adaptado de Sjöström (1993).

A lignina, tem origem na palavra latina *lignum* (madeira), é um dos componentes majoritários da madeira, presente na parede celular e lamela média, portanto confere resistência mecânica, sua estrutura é amorfa e de natureza aromática e complexa, exemplificada na Figura 3 (FENGEL e WEGENER, 1989; SALIBA et al., 2001). Para Hill (2006), a lignina é um polímero fenólico amorfo, com peso molecular indefinido, que confere rigidez a parede celular.

Figura 3 – Estrutura da lignina.



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2009).

É um polímero tridimensional reticulado que tem por base unidades de fenilpropano, com ou sem grupos metoxil, interligadas por diversas ligações químicas e apresentam grande complexidade devido às modificações estruturais decorrentes da sua extração da parede celular (MORAIS, 1992; CHANG et al., 2010).

Devido à grande variedade de formas de isolamento da lignina, esta foi dividida por Lapiere (1993) em *core* e *não core*, conforme sua sensibilidade à hidrólise. Segundo o autor, a lignina *core* é desprendida da parede celular por hidrólise e compreende compostos fenólicos de baixo peso molecular e a lignina *não core* são unidades siringila (S), guaiacila (G) e p-hidróxifenila (H) condensados na parede celular e resistentes a degradação.

A proporção e os tipos de lignina são diferentes entre coníferas e folhosas, a primeira é composta por basicamente por unidades de guaiacila, denominada Tipo G e a segunda é formada pela combinação de unidade siringila e guaiacila, Tipo G-S (CHEN, 1991).

O último dos componentes principais da madeira, os extrativos, apresentam grande variação qualitativa e quantitativa na composição das madeiras, sendo afetados pela espécie, idade de corte e condições de crescimento (HILL, 2006).

A definição de extrativos varia conforme o autor, podendo ser bem generalista em que todos os constituintes da madeira, excetuando a celulose, polioses e lignina, são extrativos (HOLMBOM, 1999). Já para Klock et al. (2005) são substâncias de baixo peso molecular que definem a coloração e o cheiro da madeira.

Os extrativos não fazem parte da parede celular, portanto, não são constituintes estruturais, são predominantemente substâncias extracelulares com baixo peso molecular e normalmente não ultrapassam 10% da massa seca, exceto em condições extremas (SJÖSTRÖM, 1993).

3.2 TERMORRETIFICAÇÃO

O tratamento térmico da madeira é caracterizado pela utilização de temperaturas entre 180 e 260 °C, que abaixo de 140° C resulta em mudanças insignificantes no material e que quando muito elevadas causam degradações inaceitáveis, principalmente em relação as propriedades mecânicas da madeira (HILL, 2006).

Além da temperatura, outras variáveis do processo influenciam de forma significativa no resultado final da termorretificação como por exemplo o tempo de tratamento, a atmosfera de tratamento, que nesse caso pode ser oxigênio, óleos, nitrogênio e vácuo, a espécie florestal,

se o sistema for aberto ou fechado, sistemas secos ou úmidos, uso de catalizadores e a dimensão das amostras (HILL, 2006).

Os processos de modificação térmica mais utilizados comercialmente são: Thermo Wood®, Plato® Wood, Le Bois Perdure®, Retification®, VAP Holzsysteme® e Oil Heat Modification (OHT).

O processo Thermo Wood® foi desenvolvido na Finlândia e é dividido em três etapas. Na primeira etapa é feito o aquecimento e secagem do material, onde a temperatura da madeira é elevada com calor e vapor até 100°C, após isso a temperatura é elevada de maneira constante até 130°C em que a umidade deve ficar em torno de 0%. A segunda etapa é a realização do tratamento térmico, em que as temperaturas devem ficar entre 185 a 215°C por 2 a 3 horas, a temperatura e o tempo de tratamento dependem do destino final da madeira. A fase final do processo incide no condicionamento e resfriamento da madeira até 90 a 80°C com sistema de inserção de água, nesta fase o teor de umidade fica entre 4 a 7% (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

O processo Plato® Wood foi desenvolvido na Holanda pela companhia Plato Internacional BV. O processo atualmente é realizado em cinco etapas distintas (PLATO, 2009). A primeira fase é a de pré-secagem em forno industrial para manter o teor de umidade entre 14 e 18%. A segunda fase consiste no aquecimento da madeira a temperaturas entre 150 a 180°C em um reator de aço inoxidável em meio aquoso e com pressão maior que o meio por 4 a 5 horas. A terceira fase é a de secagem em forno industrial até a unidade atingir 8-9% essa fase pode durar até 5 dias. A quarta fase consiste na fase de cura, em que a madeira é aquecida em um forno de aço inoxidável a temperaturas de 150 a 180°C em condições secas, essa fase pode durar até 16 horas. A fase final é de condicionamento da madeira, onde esta recebe vapor de água saturado para manter a umidade entre 4 e 6 %, esta fase pode durar 2 a 3 dias (PLATO, 2009).

O processo Le Bois Perdure foi desenvolvido na França e consiste no aquecimento de madeira verde a mais de 200°C. Após o aquecimento o resfriamento da madeira é feito através de injeção de água no interior do forno, que dessa forma, transformasse em vapor e ocasiona um resfriamento gradual que evita a deterioração da madeira. Durante o processo ocorre a eliminação da água livre, a eliminação da água de impregnação e o processo de termoretificação propriamente dito (PERDURE, 2013).

O processo Retification® se caracteriza pela utilização de madeira com teor de umidade de 12% tratada em um forno com nitrogênio, sendo permitido um máximo de 2% de oxigênio, com temperaturas entre 200 e 240°C, seu resfriamento é feito por aspersão

(ESTEVEES e PEREIRA, 2009; SILVA, 2012). O processo foi desenvolvido na França pela École Nationale Supérieure des Mines de St. Etienne (RETIWOOD, 2013).

O processo VAP HolzSysteme® foi desenvolvido pela TWBrazil em 2006, e caracteriza-se pela modificação da madeira a elevadas temperaturas utilizando vapor saturado (3 a 10 bar), aliado a um sistema eficiente de eliminação de oxigênio, o processo possui cinco fases (BATISTA, 2012). Na primeira fase a carga de madeira é colocada no cilindro do equipamento e aquecida, na segunda fase a carga é mantida a temperatura de 110°C por 25 minutos. Na terceira fase é determinada uma taxa de aquecimento até atingir uma segunda temperatura pré-estabelecida. A quarta fase consiste no tratamento térmico, onde a madeira fica em temperatura constante por 45 minutos, sendo esta a temperatura máxima do processo. A fase final é a de condicionamento da madeira, que consiste no resfriamento desta dentro do equipamento.

O Oil Heat Treatment-OHT é o processo industrial em que se é possível utilizar as mais altas temperaturas, estas são possíveis por causa do ponto de ebulição do óleo, além disso o óleo proporciona uma transferência de calor rápida e homogênea para a madeira, permitindo, dessa forma, que todas as peças tratadas estejam na mesma condição (ANDREAS e SAILER, 2001). O processo OHT foi desenvolvido em parceria com o Centro Federal de Pesquisa de Florestas e Produtos Florestais em Hamburgo na Alemanha e consiste em realizar a modificação térmica com óleo não refinado, principalmente de sementes de colza, girassol e linhaça (MENZ, 2013)

3.3 INTEMPERISMO

Os ensaios de intemperismo natural utilizam a luz solar como fonte de radiação e são conduzidos em campo aberto, livres de barreiras que interceptem as chuvas e/ou causem sombreamentos. Entretanto, estão condicionados a inúmeras variações na intensidade de radiação que incide sobre as amostras, logo que dependem das variáveis meteorológicas, da sazonalidade, da presença ou não de nuvens e poluentes (RUBEM, 2014).

A fim de minimizar as variações e permitir conformidade entre diferentes ensaios foram desenvolvidos equipamentos laboratoriais, denominados câmara de intemperismo acelerado ou artificial, que permitem o controle das condições climáticas simuladas no ensaio (FIGUEIREDO, 2011).

Através da utilização de equipamentos de intemperismo acelerado é possível realizar um ensaio em curto período de tempo simulando a exposição natural de meses ou anos, o que permite obtenção dos resultados de forma mais rápida e econômica (BRYDSON, 1999).

Os materiais poliméricos são suscetíveis ao intemperismo e podem sofrer reações térmicas, fotoquímicas e de radiação de alta energia que dão início a sua degradação (DE PAOLI, 2008).

A degradação da madeira ocorre independentemente da presença de organismos xilófagos, em função da ação isolada ou conjunta da umidade, calor, forças mecânicas e luz (COSTA et al., 2011). A ação isolada ou a interação entre fatores climáticos (sol, chuva, umidade e vento) que atuam na superfície da madeira é definida como intemperismo, ou seja, a degradação da superfície de um material causada pelas intempéries (HON, 2001).

Apesar dos danos ocorridos na madeira intemperizada serem resultado da complexa interação entre os elementos do clima, a radiação ultravioleta e a precipitação são os principais agentes degradadores (CREEMERS et al., 2002).

Portanto, o desempenho de uma peça de madeira em condição de serviço é resultado da interação do ambiente com sua composição química e anatômica, consequentemente, as propriedades tecnológicas do material podem sofrer alterações causadas pela ação dos agentes intemperizadores (MESQUITA, 2016).

Os produtos fotossensíveis tem sua estabilidade afetada pela energia radiante de fontes luminosas acarretando o início e/ou aceleração da sua decomposição química, sendo mais danosa quanto de menor comprimento de onda. A principal degradadora da madeira, proveniente do espectro solar, é a radiação ultravioleta, uma vez que, forma radicais livres danosos aos seus constituintes majoritários (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo González et al. (2010) a luz solar incidente na madeira inicialmente altera a sua cor, e em seguida reduz suas propriedades mecânicas. Semelhante ao descrito por Pastore et al. (2008), em que relata que os danos causados pelo intemperismo na madeira são primeiramente observados pela mudança de cor, contudo podem afetar outras propriedades do material, tais como as físico-mecânicas e químicas.

A degradação causada pela ação da luz (radiação solar) é superficial, em virtude de sistemas e grupos cromóforos da sua camada externa, uma vez que essas formações atuam na inibição da entrada de luz na madeira (HON, 2001; LIMA et al., 2013).

Para Mesquita (2016) e Silva et al. (2006) apesar da fotodegradação – alterações causadas pela radiação solar – da madeira ser superficial, esta atua diretamente no decréscimo da vida útil do material e tem efeito negativo sobre a aplicação de produtos de acabamento.

A exposição prolongada da madeira a luz, provoca, além da mudança de cor, despolimerização da lignina e de hidratos de carbonos, componentes da parede celular, desta forma, alteram as fibras da superfície da madeira (BAYSAL et al., 2014).

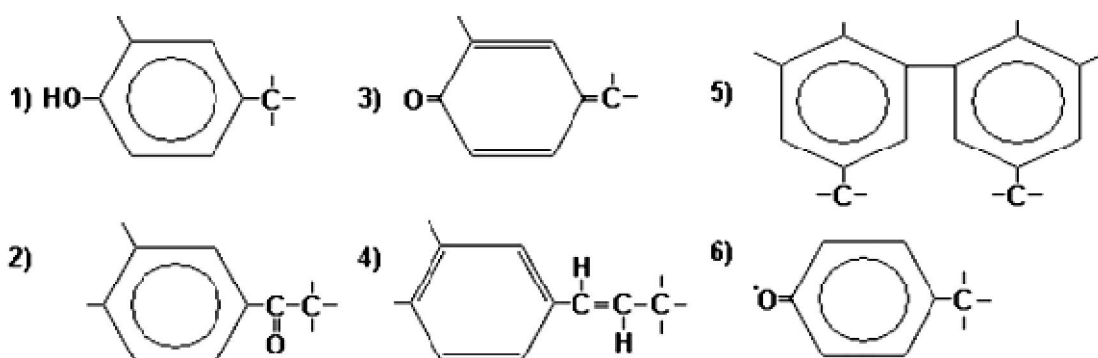
O intemperismo, especialmente por meio da fotodegradação, decompõe os principais constituintes químicos da madeira: celulose, hemicelulose, lignina e extrativos (HON, 2001). Fato também observado por Hon e Feist (1992), em que afirmam que a radiação modifica severamente a estrutura da celuloses, lignina e hemicelulose.

A modificações decorrentes da fotodegradação e lixiviação da madeira intemperizada resultam em alterações na cor, aumento da rugosidade, aparecimento de rachaduras, danos nas propriedades viscoelásticas e prejuízos à sua microestrutura (HON e FEIST, 1992; PASTORE, 2004; GEORGE et al., 2005).

Os constituintes da parede celular são degradados de pela luz de diferentes formas e podem, genericamente, serem agrupados em dois processos distintos. Um referente à fotodegradação da lignina e outro relativo à ação da luz na celulose e hemiceluloses, por sua semelhança química (HON, 2001).

A lignina se destaca entre os componentes da parede celular no processo de fotodegradação, devido aos grupos cromóforos (Figura 4) presentes em sua estrutura e a susceptibilidade à radiação ultravioleta (UV). Sua degradação é apresentada como complexos mecanismos que resultam em inúmeros radicais fenólicos, com destaque para o guaiacol (GEORGE et al., 2005).

Figura 4 – Grupos cromóforos da lignina



Onde: 1 = OH fenólico; 2 = α -carbonil; 3 = quinona; 4 = dupla ligação conjugada; 5 = bifenil; 6 = radical fenóxi.

Fonte: Fengel e Wegener (1989).

O guaiacol pode ser alterado por foto-redução, por clivagem da ligação éter- β -arila ou pela transferência de energia e ser decomposto em estruturas o- ou p-quinonóides, conferindo um aspecto amarelado na superfície da madeira (GEORGE et al., 2005; GOUVEIA, 2008; TELES e COSTA, 2014).

O processo de fotodegradação da celulose, segundo Hon (2001), é dependente do comprimento da onda e infere sobre o tipo de radical e a taxa de sua formação. Em comprimentos de onda acima de 254 nm, ocorre a cisão da ligação C5-C6, por conseguinte o rompimento da cadeia lateral. Já em ondas com comprimentos maiores que 340 nm, na presença de oxigênio, a quebra da ligação glicosídica nas posições C1 e C4 resultam na formação de radicais alcoxi – normalmente estáveis – e carbônicos – transformam-se em radicais hidroperóxidos (HON, 2001; PASTORE, 2004).

De forma simplificada, o processo de fotodegradação ocorre da seguinte forma: inicialmente os grupos cromóforos presentes na lignina absorvem a radiação ultravioleta (300 – 400 nm), enquanto que ligações éteres na lignina são rompidas e ocorre formação de novos radicais. Alguns radicais são quebrados originando grupos fenóis e cetonas que atuam como cromóforos secundários, estes absorvem a luz e iniciam um novo ciclo de fotodegradação da lignina (JOHANSSON, 2000; PASTORE, 2004).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 COLETA E PREPARO DO MATERIAL

Foram amostradas, ao acaso, cinco árvores de *Pinus elliottii* e cinco árvores de *Eucalyptus grandis*, livres de fuste tortuoso e/ou bifurcados, evitando os indivíduos de bordadura e com diâmetro a altura do peito (DAP – 1,30 m) inferior a 25 cm, conforme recomendações da norma *American Society for Testing and Materials - D5536* (ASTM, 2010).

O material proveio de povoamentos experimentais da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, *campus* Sede – localizados na coordenada 29°43'1.95"S, 53°43'33.7"O, com solo Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (EMBRAPA, 2013) a 110 metros de altitude e clima subtropical úmido Cfa, com temperatura média anual de 18 a 20°C e precipitação anual entre 1600 e 1900mm (ALVARES et al., 2013).

O espaçamento inicial dos povoamentos era de 3 x 2 metros, contudo, em virtude da realização de desbastes, no momento da derrubada das árvores selecionadas o espaçamento encontrava-se em 6 x 6 metros, com idades de 21 e 22 anos, para *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, respectivamente.

Com auxílio de motosserra foi retirada a primeira tora, com 3 metros de comprimento, de cada árvore, e desdobradas em serra fita vertical, do Laboratório de Produtos Florestais, a fim de obter-se o pranchão central, com 8 cm de espessura, que foram secos ao ar e aplainados, para posterior confecção dos corpos de prova.

Foram confeccionados cinco corpos de prova por tratamento, portanto, 20 por coleta e, 80 no total, para cada espécie. Todos os corpos de prova foram orientados em relação aos três planos anatômicos, radial, tangencial e longitudinal, com dimensões de 1 x 1 x 25cm³ respectivamente. Previamente à termorretificação em óleo foram dispostos em câmara climatizada (20 ± 2°C e 65 ± 5% de UR), até equilíbrio higroscópico.

4.2 TRATAMENTO DE TERMORRETIFICAÇÃO

O processo de termorretificação foi realizado em um banho laboratorial da marca Quimis[®], modelo 02113-22 com capacidade 16 dm³, em seis etapas, a fim de segregar as temperaturas e espécies e obter as respectivas taxas de aquecimento, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos tratamentos de termorretificação

Espécie	Tratamento	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)
<i>Eucalyptus grandis</i>	E	20	-
	E150	150	4,56
	E180	180	4,38
	E210	210	4,29
<i>Pinus elliottii</i>	P	20	-
	P150	150	3,92
	P180	180	3,68
	P210	210	3,75

Em que: E = *Eucalyptus grandis*; P = *Pinus elliottii*; 150, 180 e 210 = temperaturas de termorretificação.
Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram imersos em óleo de soja refinado a temperatura ambiente (aproximadamente 26 °C) para início do aquecimento, quando atingida a temperatura desejada permaneceram no processo por quatro horas.

Após a termorretificação os corpos de prova foram arrefecidos em estufa laboratorial com circulação forçada de ar até 100°C, e posteriormente acondicionados em câmara climatizada ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de UR) até atingirem o equilíbrio higroscópico.

4.3 INTEMPERISMO ACELERADO

O ensaio foi conduzido em câmara de intemperismo acelerado marca Bass, modelo UUV-STD-SPRAY-4400/2013, pertencente ao Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, da Universidade Federal de Pelotas.

O material, em equilíbrio higroscópico (65% UR e 20 °C) foi submetido a 60 ciclos de 12 horas, conforme norma ASTM G 154: Standart practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials (ASTM, 2000b), divididos em três etapas: a) simulação de luz solar, oito horas de irradiação UV – comprimento de onda de 340 nm – a temperatura controlada em $60 \pm 3^\circ\text{C}$; b) simulação de chuva, 15 minutos com spray de água sem luz e temperatura não controlada; e c) simulação de orvalho, três horas e 45 minutos de condensação a $50 \pm 3^\circ\text{C}$.

A disposição das amostras na câmara de intemperismo foi procedida de forma que a degradação ocorresse em uma das faces tangenciais das amostras, uma vez que a maior parte da madeira serrada encontrada no comércio apresenta desdobro tangencial.

Foram coletados cinco amostras, de cada tratamento, ao fim de 20 ciclos (C1), 40 ciclos (C2) e 60 ciclos (C3), portanto após 240 horas, 480 horas e 720 horas de experimento, respectivamente. Após o material coletado foi disposto em câmara climatizada (65% UR e 20 °C), juntamente com as amostras controle (C0), até a estabilização do teor de umidade, a fim de proceder as análises.

De forma análoga ao intemperismo nas condições de campo da região sul do Brasil, as coletas foram quadrimestrais, com última coleta aos 60 ciclos correspondendo a 12 meses de exposição.

4.4 ANÁLISE MECÂNICA

4.4.1 Flexão estática

O ensaio de flexão estática foi conduzido em Máquina Universal de Ensaio, marca EMIC, modelo ML 2000, com obtenção automática de dados por meio do *software* Tesc, no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da Universidade Federal de Santa Maria, *campus* Frederico Westphalen.

O ensaio seguiu o preconizado na norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2000a), com material em condições de equilíbrio higroscópico e adaptações na distância entre apoios e velocidade de ensaio (Tabela 3), em virtude das dimensões dos corpos de prova.

Tabela 3 – Adaptações da norma ASTM D 143-94 para ensaio de flexão estática

Dimensão (mm)		Distância entre apoios (mm)		Velocidade de ensaio (mm/min)	
Original	Adaptada	Original	Adaptada	Original	Adaptada
Tg: 25	Tg: 10	350	140	1,3	0,52
Rd: 25	Rd: 10				

Fonte: Autor.

A força foi aplicada no centro face tangencial que sofreu a degradação, simulando uma peça em condição de serviço. Após a ruptura, foram obtidos o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR).

4.5 ANÁLISES FÍSICAS

A partir das amostras originais (termorretificadas e controle) foram confeccionados novos corpos de prova de $1 \times 1 \times 5 \text{ cm}^3$ (tangencial x radial x longitudinal) para realização das análises físicas, observando a inexistência de defeitos.

4.5.1 Massa específica básica

A massa específica básica foi calculada através da relação da sua massa seca, obtida para determinação do teor de umidade de equilíbrio, pelo seu volume saturado, obtido na determinação da variação volumétrica, e expressa em g.cm^{-3} .

4.5.2 Teor de umidade de equilíbrio

Foi mensurada a massa das amostras em dois momentos: a) quando em equilíbrio higroscópico em câmara climatizada ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de UR); e b) quando anidras, após massa constante em estufa com circulação forçada de ar, a $103 \pm 3^\circ\text{C}$.

O teor de umidade de equilíbrio foi determinado conforme a norma ASTM D143-94 (ASTM, 2000) e calculado pela equação 1.

$$TU_{eq} = \frac{M_{clim} - M_{seca}}{M_{seca}} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que: TU_{eq} = teor de umidade de equilíbrio (%); M_{clim} = massa climatizada a 20°C e 65% de UR, em gramas; M_{seca} = massa seca após a secagem em estufa a 103°C , em gramas.

4.5.3 Inchamento

Após mensurada as massas das amostras para teor de umidade de equilíbrio (amostras anidras), estas foram medidas com paquímetro digital nos seus três planos anatômicos e imersas em água até sua completa saturação.

Por meio das mensurações pré e pós imersão foi possível, através das equações 2 e 3, determinar o inchamento (radial, tangencial e longitudinal) e a variação volumétrica, respectivamente.

$$\alpha R, T, L = \frac{L_{\text{seco}} - L_{\text{sat}}}{L_{\text{seco}}} * 100 \quad (2)$$

$$\Delta V = \frac{V_{\text{seco}} - V_{\text{sat}}}{V_{\text{seco}}} * 100 \quad (3)$$

Em que: $\alpha T, R, L$ = inchamento tangencial, radial e longitudinal dos corpos de prova (%); L_{sat} = dimensão do corpo de prova saturado nas direções tangencial, radial e longitudinal (mm); L_{seco} = dimensão do corpo de prova seco nas direções tangencial, radial e longitudinal (mm); ΔV = variação volumétrica (%); V_{sat} = volume do corpo de prova saturado (mm³); V_{seco} = volume do corpo de prova seco (mm³)

4.6 ANÁLISE DE SUPERFÍCIE

4.6.1 Colorimetria CIEL*a*b*

A avaliação dos parâmetros colorimétricos foi realizada utilizando um colorímetro portátil Konica Minolta, modelo CR-400 com abertura de sensor de 8mm, adaptado para utilização de fonte iluminante D65 e ângulo de observação de 2°, no espaço de cor CIEL*a*b*.

O parâmetros colorimétricos foram determinados na face tangencial exposta a degradação, a fim de observar a influência do tempo de exposição a agentes degradadores e a capacidade de manutenção das propriedades colorimétricas da madeira termorretificada em óleo.

Foram determinados a luminosidade (L^*), as coordenadas cromáticas verde-vermelho (a^*) e azul-amarelo (b^*), obtidos diretamente do aparelho, e a cromaticidade (C^*), o ângulo de tinta (h) e a variação total de cor (ΔE^*), calculados pelas equações 4, 5 e 6, respectivamente.

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0,5} \quad (4)$$

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (5)$$

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{0,5} \quad (6)$$

Em que: C* = cromaticidade; a* = coordenada cromática verde-vermelho; b* = coordenada cromática azul-amarelo; h = ângulo de tinta; ΔE = variação total de cor; ΔL^* = variação da luminosidade; Δa^* = variação da coordenada cromática verde-vermelho; Δb^* = variação da coordenada cromática azul-amarelo.

4.7 ANÁLISE DOS DADOS

O experimento foi instalado utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em arranjo bifatorial (4x4), apresentando quatro níveis em cada fator, da forma que segue: temperatura (20°C, 150°C, 180°C e 210°C) e tempo (0, 20, 40 e 60 ciclos).

Para a análise estatística, primeiramente foram verificados os dados quanto a normalidade e homogeneidade de variância, pressupostos para os testes paramétricos. Em caso de rejeição da hipótese nula procedeu-se com a análise de variância (ANOVA) e quando do aceite da hipótese nula realizou-se o resumo estatístico através da média e desvio padrão.

Na análise de variância fatorial foi verificada, inicialmente, a existência de interação entre os fatores temperatura e tempo (A x B), por meio da comparação de médias pelo teste F com 5% de probabilidade de erro. Na existência de interação entre os fatores ($p < 0,05$), procedeu-se com o desdobramento da interação, por meio da análise de regressão do fator tempo dentro dos níveis do fator temperatura. Quando a interação não foi significativa ($p > 0,05$), os fatores agem de forma independente e foram analisados de forma isolada por meio do teste de médias de Scott-Knott em 5% de probabilidade de erro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE MECÂNICA

5.1.1 Flexão estática

Por meio da ANOVA fatorial (Apêndice A) constatou-se que as propriedades de MOR e MOE para *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* não apresentaram interação significativa entre os fatores temperatura e tempo, portanto os fatores foram analisados isoladamente. O fator tempo não foi significativo em ambas espécies e o fator temperatura apresentou significância apenas para o MOR da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Conforme observado por Pastore et al. (2008), pela ação do intemperismo ocorrem inicialmente alterações na cor, porém podem modificar as propriedades físico-mecânicas. As propriedades mecânicas são reduzidas pela degradação causada pela luz solar (no presente trabalho simulada pela radiação ultravioleta), conforme afirmado por Gonzalez et al. (2010).

Entretanto, o desempenho mecânico da madeira de ambas espécies não sofreu alterações significativas pela degradação causada pela exposição à radiação ultravioleta e umidade (fator tempo), uma vez que alterou apenas a superfície da madeira.

Segundo Hon (2001), o processo de degradação se inicia com a luz solar (radiação ultravioleta) e ocorre até 2,0 mm abaixo da superfície, o que corresponde a aproximadamente 20% da espessura das amostras.

O módulo de ruptura (MOR) decresceu em ambas espécies com a utilização de alta temperatura (E210 e P210), registrando perda de 23,73% e 3,97%, para *E. grandis* e *P. elliottii*, respectivamente, em relação às amostras controle. Contudo houve acréscimo de 1,18% no tratamento a 150°C para *E. grandis* e 4,08% e 5,56% para *P. elliottii* nos tratamentos a 150°C e 180°C, respectivamente. Em ambas espécies o módulo de elasticidade (MOE) foi incrementado pela termorretificação, com 7,75% no tratamento a 150°C para madeira de *E. grandis* e 4,09% no tratamento a 180°C para madeira de *P. elliottii*, quando comparadas às amostras controle, conforme Tabela 4.

Segundo Esteves e Pereira (2009) ensaios de flexão estática são os mais comuns para determinar as propriedades mecânicas da madeira e, um dos maiores limitantes do uso da madeira termorretificada é a perda de resistência. A redução do módulo de ruptura em relação ao aumento da temperatura utilizada no processo foi observado por Militz (2002), Esteves et al. (2007), Mburu et al. (2008), Gunduz et al. (2009), Cademartori et al. (2012), Calonego et

al. (2012), Srinivas e Pandey (2012), Bal e Bektaş (2013), Elaieb et al. (2015), conforme obtido no estudo.

Tabela 4 – Desmembramento fatorial do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) em razão do fator temperatura para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Espécie	Propriedade	Temperatura (°C)			
		20	150	180	210
<i>E. grandis</i>	MOR (kgf/cm ²)	1249,97 ^{±140,55} A	1264,7 ^{±170,96} A	1123,375 ^{±127,68} B	953,32 ^{±153,29} C
	MOE (kgf/cm ²)	129340,25 ^{±12763,81} A	139371,8 ^{±15154,81} A	138339,2 ^{±12425,28} A	136395,5 ^{±17824,36} A
<i>P. elliottii</i>	MOR (kgf/cm ²)	970,93 ^{±140,75} A	1010,585 ^{±172,54} A	1024,935 ^{±140,64} A	932,415 ^{±140,31} A
	MOE (kgf/cm ²)	106992,8 ^{±19491,03} A	107518,4 ^{±18287,14} A	111375,95 ^{±19553,86} A	108517,3 ^{±21781,62} A

Em que: Média^{±desvio padrão}; MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidade. Médias com letras iguais na linha não possuem diferença estatística, segundo teste de Scott-Knott em 5% de probabilidade de erro.
Fonte: Autor.

As alterações na resistência mecânica da madeira termorretificada estão relacionadas à modificação de seus componentes químicos (BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006; HILL, 2006; BOONSTRA et al., 2007), aumento da fragilidade da parede celular (YAO e TAYLOR, 1979) e perda de massa (ESTEVEES et al., 2007).

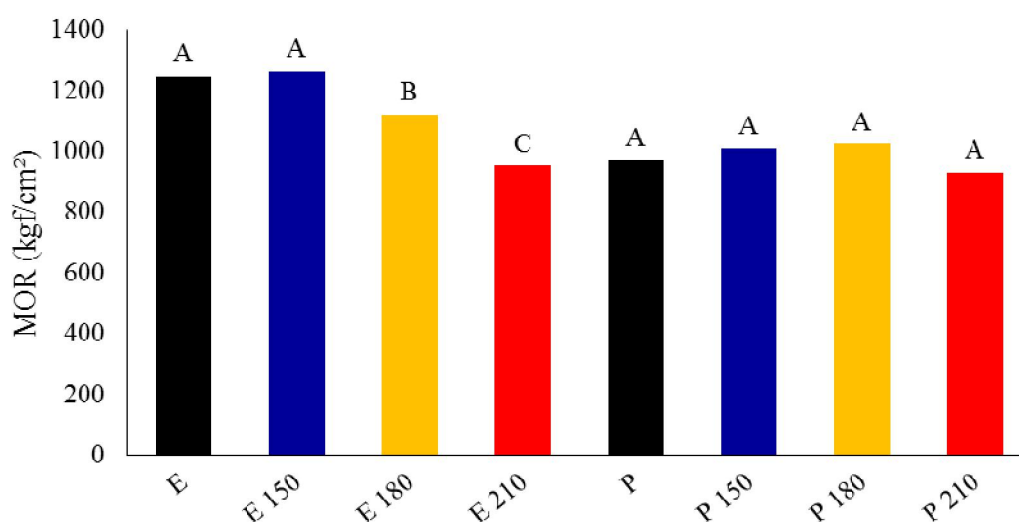
Durante o processo de termorretificação a temperatura age modificando os componentes químicos estruturais da madeira, ou seja, altera os polímeros constituintes da parede celular por meio de reação de despolimerização e degradação das hemiceluloses (HILL, 2006; YILDIZ et al., 2006; BOONSTRA et al., 2007).

Alguns autores conferem à degradação das hemiceluloses o principal fator de redução da resistência mecânica (SWEET e WINANDY, 1999; WINANDY e LEBOW, 2001), são corroborados por Brito et al. (2008) e Cademartori, Pedro Henrique G. et al. (2013) que relataram que as hemiceluloses são o principal constituinte degradado pela ação da temperatura, e por Kačíková et al. (2013) que descreveram a redução das hemiceluloses em função do aumento da temperatura e sua relação com a diminuição do MOR.

Segundo Sundqvist (2004) a temperatura age de forma branda nas hemiceluloses na faixa entre 50°C e 150°C, intensificando a degradação acima dessa faixa, o que explica o agrupamento do tratamento E150 com o controle (E) para madeira de *E. grandis*, e a diferença significativa entre os tratamentos E150, E180 e E210, conforme Figura 5.

O módulo de ruptura foi significativo para madeira de *E. grandis*, porém não apresentou diferença significativa para *P. elliottii* (Figura 5), fato que pode ser explicado pelas diferenças quantitativas e qualitativas de hemiceluloses presente em coníferas – menor quantidade e elevado teor de galactoglucomananas e glucomananas parcialmente acetilados e baixo teor de xilanas – e em folhosas – maior quantidade e alto teor de xilanas altamente acetiladas (RAMOS, 2003).

Figura 5 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o módulo de ruptura (MOR) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.



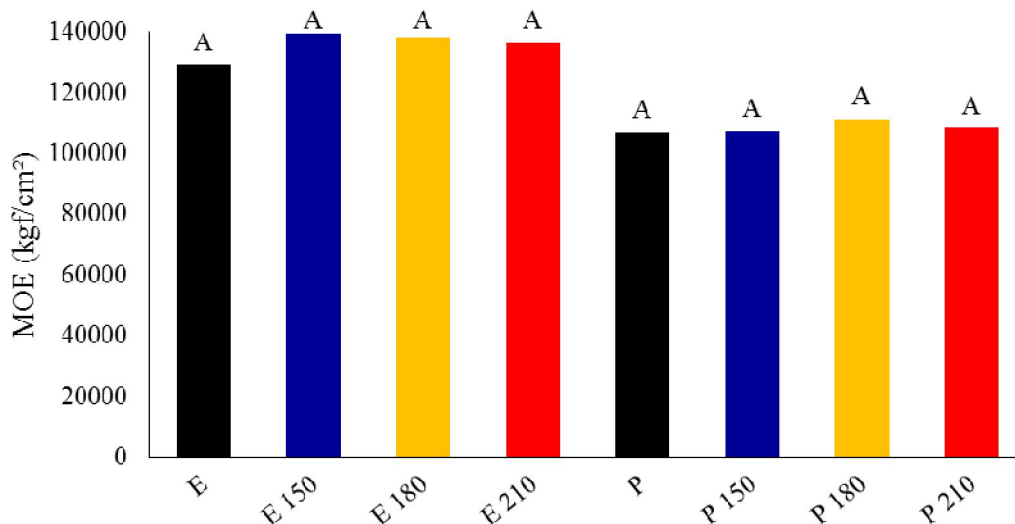
Em que: Médias com letras iguais não possuem diferença estatística em 5% de probabilidade de erro.
Fonte: Autor.

Em comparação a outras pesquisas de termorretificação com *E. grandis*, o presente trabalho resultou em menores perdas de MOR, Bal e Bektaş (2013) trabalhando com madeira adulta obtiveram decréscimo de 27,20% a 180°C e Calonego et al. (2012) perdas de 24% e 33% em temperaturas de 180°C e 200°C respectivamente.

Contudo, quando analisadas as curvas de carga-deflexão observa-se que a madeira sem termorretificação apresenta maior área abaixo da curva após a região linear elástica, portanto ocorrem pequenas deformações plásticas até o momento de ruptura. Entretanto, nas madeiras termorretificadas, ocorre uma ruptura abrupta logo após a região linear, caracterizando pequena área de deformação plástica. Ambas espécies, tornaram-se mais quebradiças após os tratamentos de termorretificação, corroborando com o observado em outros trabalhos (PHUONG et al., 2007; TAJVIDI e TAKEMURA, 2009; PFRIEM et al., 2010).

O material estudado não apresentou diferença significativa para o módulo de elasticidade entre os tratamentos para ambas espécies (Figura 6), fato também observado por Calonego et al. (2012), quando trabalharam com *E. grandis* nas temperaturas de 180°C e 200°C. Entretanto, outros autores relataram a diminuição (BAL e BEKTAŞ, 2013; KAČÍKOVÁ et al., 2013) e o aumento (TODOROVIC et al., 2012) do módulo de elasticidade de madeiras termorretificadas.

Figura 6 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o módulo de elasticidade (MOE) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.



Em que: Médias com letras iguais não possuem diferença estatística em 5% de probabilidade de erro.
Fonte: Autor.

O módulo de elasticidade tende a aumentar em madeiras submetidas a temperaturas brandas (ESTEVES e PEREIRA, 2009) e está relacionado às alterações nas hemiceluloses e celulose (PANDEY, 1999; BOONSTRA et al., 2007) e ao teor de umidade do material (KRETSCHMANN, 2010).

O leve incremento no módulo de elasticidade da madeira termorretificada, de ambas espécies, pode ser explicado pela diminuição dos seus valores de teor de umidade de equilíbrio. Uma vez que há uma relação inversa entre o teor de umidade e a rigidez da madeira, conforme Thermo Wood Handbook (2003) a diminuição da umidade incrementa as propriedades mecânicas.

A degradação da hemicelulose e celulose amorfa, causada pela temperatura, conferem maior proporção de celulose cristalina na madeira, aprimorando a estrutura das fibras e

microfibrilas de celulose (BOONSTRA et al., 2007). Corroborando com Yildiz e Gümüşkaya (2007), que relataram o aumento da celulose cristalina (em proporção) com o aumento da temperatura. Em concordância, Calonego et al. (2012) e Pandey (1999), afirmam que o incremento na elasticidade (MOE) e resistência mecânica da madeira está relacionado à largura dos cristais de celulose e ao elevado grau de polimerização.

5.2 ANÁLISES FÍSICAS

5.2.1 Massa específica básica

A partir da ANOVA da massa específica básica relacionando os fatores temperatura e tempo (Apêndice B), constatou-se diferença significativa apenas para o fator temperatura, para ambas espécies. O fator tempo, bem como a interação entre os fatores (Temperatura x Tempo) não apresentou diferença significativa para *P. elliotti* e *E. grandis*.

No desmembramento do fator temperatura (Tabela 5) observa-se que a massa específica básica, de ambas espécies, foi incrementada pela termorretificação. Para a madeira de *E. grandis* foi encontrada maior variação no tratamento E210 (+8,31%) e menor variação para o E 180 (+1,19%), que não diferiu significativamente do tratamento controle (E). Já para *P. elliottii*, todos tratamentos diferiram das amostras *in natura* (P), entretanto os tratamentos P180 e P210 não diferiram entre si e o tratamento P150, que diferiu dos demais, apresentou o maior ganho de massa específica básica (57,73%).

A alteração da massa específica da madeira é dependente de variações de seu volume e massa, uma vez que sofrerem variações análogas, inexistirá alteração da sua massa específica (HILL, 2006).

A afirmação supracitada, juntamente com o descrito por Hon (2001), em que a ação das intempéries atuam em até 2 mm abaixo da superfície, pode-se afirmar que a inexistência de significância para o fator tempo decorre da baixa massa de constituintes degradados e lixiviados no período de exposição, visto que o volume não foi alterado, pois apenas uma das faces foi exposta à luz ultravioleta e umidade.

Tabela 5 – Desmembramento fatorial da massa específica básica (ρ_b) em razão do fator temperatura para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Espécie	Temperatura (°C)			
	20	150	180	210
<i>E. grandis</i>	0,5895 \pm 0,0394 B	0,6230 \pm 0,530 A	0,5965 \pm 0,0421 B	0,6385 \pm 0,0497 A
<i>P. elliottii</i>	0,5389 \pm 0,0352 C	0,8500 \pm 0,0659 A	0,6440 \pm 0,0535 B	0,6342 \pm 0,0669 B

Em que: Média \pm desvio padrão. Médias com letras iguais na linha não possuem diferença estatística, segundo teste de Scott-Knott em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

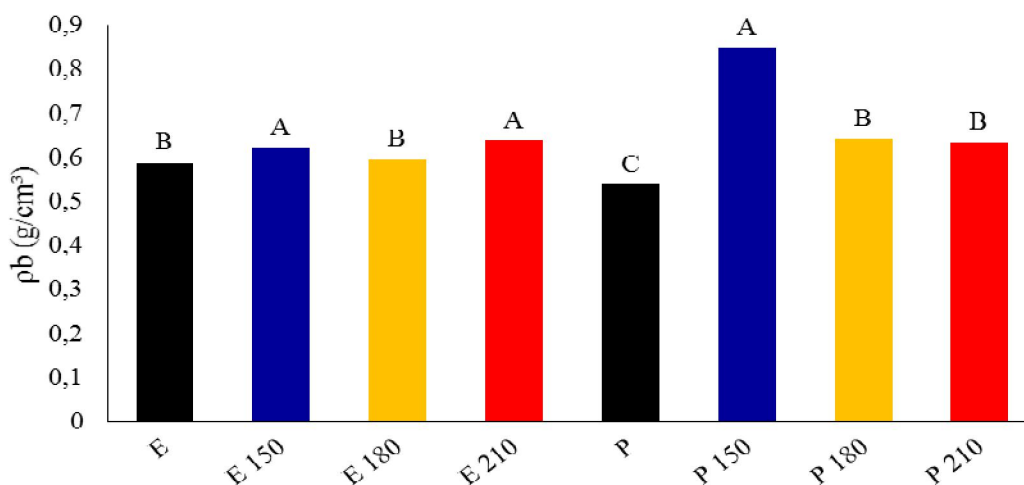
A variação da massa específica básica é dependente da variação percentual de massa ocorrida durante o processo de termorreificação, esta, é tão maior quanto for a temperatura empregada, conforme observado por Brito et al. (2006), Esteves et al. (2007), Gunduz et al. (2010), Karlsson et al. (2011), Bal e Bektaş (2012), Cademartori et al. (2012), Dubey et al. (2012), Kačíková et al. (2013).

Apesar da massa específica ter apresentado variação significativa para a termorreificação, ocorreu de forma distinta para cada espécie (Figura 7). Para a madeira de *Pinus elliottii* houve uma tendência de diminuição do percentual de ganho decorrente do aumento da temperatura. Entretanto a madeira de *Eucalyptus grandis* não apresentou tendência em função das variações de temperatura de termorreificação, diante disso pode-se inferir que na madeira de *E. grandis* a degradação dos constituintes químicos foi compensada pelo acréscimo na estabilidade dimensional. Resultados semelhantes a outros trabalhos com termorreificação de madeira do gênero *Eucalyptus* (CALONEGO et al., 2012; CADEMARTORI, MISSIO, et al., 2014; MISSIO, 2014).

A magnitude da perda de massa na termorreificação é influenciada, segundo Hill (2006), entre outros fatores, pela origem da madeira – conífera ou folhosa – e pela atmosfera em que o material é submetido.

Atmosferas inertes, condições anaeróbicas ou sob vácuo ocorrem baixa perda de massa em comparação à atmosferas com ar (HILL, 2006). Portanto, as condições de termorreificação do presente estudo tenderam a minimizar as reduções de massa. Quanto as diferenças advindas da espécie, a madeira das coníferas apresenta menor perda de massa que a das folhosas (MILITZ, 2002; HILL, 2006), refletida na não significância do módulo de ruptura da madeira de pinus (Item 5.1.1).

Figura 7 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para a massa específica básica (ρ_b) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.



Médias com letras iguais não possuem diferença estatística em 5% de significância.
Fonte: Autor.

Os acréscimos na massa específica estão diretamente relacionados com o aumento da massa das amostras decorrentes da substituição do ar (massa específica de $1,23 \times 10^{-6}$ g/cm³) pelo óleo de soja (massa específica do óleo 0,92g/cm³).

Segundo Olsson et al. (2001) e Hill (2006) o óleo é armazenado nos lúmens celulares e não adentra a parede celular, uma vez que sua molécula é demasiadamente grande. Portanto, ocorre apenas a eliminação do ar e água livre/capilar, não acarretando em modificações do volume da peça (inchamento ou contração).

Cabe ressaltar que sempre ocorre despolimerização dos componentes da madeira mesmo que ocorra um aumento na massa específica básica (DUBEY et al., 2012). Dessa forma, o ganho de massa específica é atribuído à maior massa de óleo absorvida que a massa de madeira degradada.

A madeira de *Pinus elliottii* apresentou elevado ganho de massa específica no tratamento P150 em função da menor degradação dos seus componentes da parede celular – resultando em menor perda de massa e pouca variação em volume – aliada a absorção de óleo nos espaços vazios – aumento considerável da massa sem variação no volume. A igualdade entre os tratamentos P180 e P210 pode ser explicada pela semelhança na perda de massa ocorrida pela degradação térmica, logo que Sundqvist (2004) afirma que a degradação dos componentes da parede celular inicia em torno de 140°C e é mais acentuada acima dos 180°C.

Outro fator a ser observado é a menor disponibilidade de grupos OH após a termorreificação, relacionados a degradação das hemiceluloses (SALIM et al., 2010; CALONEGO et al., 2012), que acarreta na alteração do volume saturado do material e por consequência eleva o valor da massa específica básica.

5.2.2 Teor de umidade de equilíbrio

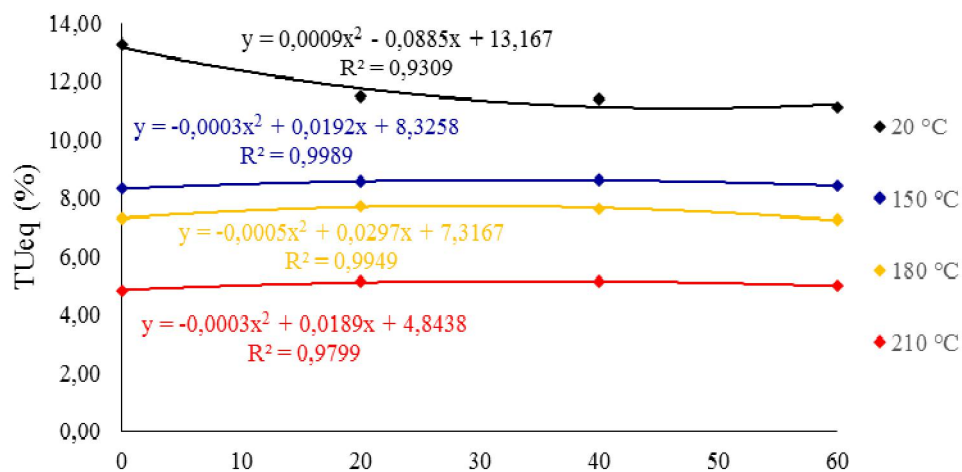
Os fatores temperatura e tempo, bem como a sua interação (A x B), foram significativos para o teor de umidade de equilíbrio de ambas espécies, conforme ANOVA (Apêndice B). Portanto a variável em estudo é resultado da combinação dos efeitos dos fatores e foi desmembrada através da análise de regressão do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura.

Para ambas espécies a temperatura ocasionou redução do teor de umidade de equilíbrio, com maiores alterações nos tratamentos mais severos, verificou-se diminuição de 63,52% para madeira de *Eucalyptus grandis* (E210) e 48,65% para *Pinus elliottii* (P210). Para a espécie *E. grandis* a maior variação em relação ao tempo foi nas amostras *in natura*, com decréscimo de 16,05% no teor de umidade, enquanto que para *P. elliottii* ocorreu diminuição de 9,39% no tratamento controle (P).

No desmembramento da interação para *E. grandis* (Figura 8), observa-se, para todos os tratamentos, que as maiores variações ocorreram até o ciclo 20 e posteriormente tenderam a estabilização do teor de umidade. Os tratamentos de termorreificação influenciaram de forma semelhante o desempenho da madeira, com leve aumento inicial do teor de umidade, contrastando com o decréscimo inicial ocorrido para a madeira *in natura*.

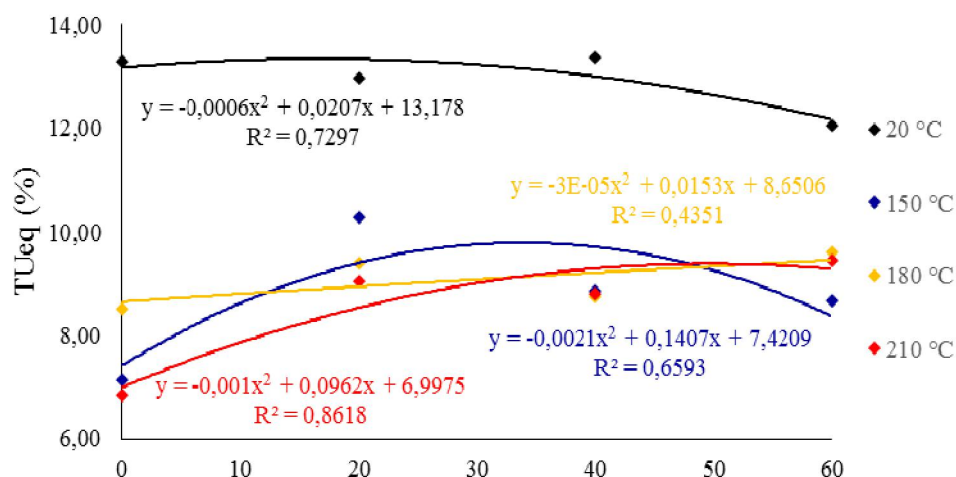
Para a madeira de *P. elliotti*, no desmembramento da interação entre os fatores (Figura 9), é possível observar que a amostra controle (P) apresentou tendência de estabilidade, até o intervalo entre os ciclos 20 e 40, e posterior declínio, divergindo dos tratamentos com termorreificação, que por sua vez, tiveram maior variação até ciclo 20 e tenderam a estabilizar após o ciclo 40.

Figura 8 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o teor de umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis*.



Fonte: Autor.

Figura 9 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o teor de umidade de equilíbrio da madeira de *Pinus elliottii*.



Fonte: Autor.

Com relação a temperatura, estudos anteriores relataram a diminuição do teor de umidade de equilíbrio em madeiras termorretificadas (BRITO et al., 2006; AKYILDIZ e ATES, 2008; BAL e BEKTAS, 2012; BATISTA, 2012; CONTE et al., 2014; MISSIO et al., 2016).

A redução do teor de umidade de equilíbrio está associada com a menor acessibilidade da água na madeira (BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006; DEL MENEZZI e TOMASELLI, 2006), resultante da diminuição de grupos OH e/ou clivagem das cadeias glicosídicas, ocasionada pela despolimerização dos seus componentes, essencialmente as hemiceluloses (AKYILDIZ e ATES, 2008).

A degradação da região amorfa da celulose, e conseqüente, acréscimo da sua região cristalina – em temperaturas superiores a 150°C – torna a madeira mais hidrofóbica pois, dificulta o acesso aos grupos hidroxilas (ESTEVES e PEREIRA, 2009).

A formação de furfural e hidroximetilfurfural decorrentes da desidratação das pentoses e hexoses, respectivamente, tornam a madeira menos higroscópica, dessa forma reduzindo seu teor de umidade de equilíbrio, conforme proposto por Rowell et al. (2009).

Em detrimento da instabilidade das camadas superficiais da madeira frente a fotodegradação (ação do intemperismo) e a presença de revestimento superficial (película hidrofóbica causada pela termorreificação) tornam complexa a caracterização da relação entre a umidade e a madeira durante o intemperismo (KALNINS e FEIST, 1993; SHARRATT et al., 2010).

Para os tratamentos controle, de ambas espécies, o teor de umidade decresceu ao longo do tempo de exposição, resultados que convergem com o descrito por Sharratt et al. (2010), em que os autores concluem que a afinidade da madeira com a umidade foi menor nas amostras fotodegradadas devido ao bloqueio de sítios de sorção de umidade causado por polimerizações cruzadas da lignina.

Os tratamentos de termorreificação, para *E. grandis*, apresentaram grande estabilidade frente ao tempo de exposição, de tal modo que pode-se afirmar que o tratamento térmico foi eficiente na manutenção do teor de umidade de equilíbrio.

Entretanto, o óleo vegetal absorvido, possivelmente, não apresentou influência sobre o teor de umidade de equilíbrio por estar apenas nos espaços vazios da madeira e não ter penetrado na parede celular (OLSSON et al., 2001; HILL, 2006). Fato corroborado por Dubey et al. (2012), em que a temperatura teve maior efeito na higroscopicidade que a absorção de óleo na madeira de *Pinus radiata* termorreificada em óleo.

Semelhante ao descrito para o fator temperatura, a redução de locais de sorção (grupos OH) relacionados a modificações químicas na matriz da parede celular contribuem para o menor teor de umidade. A principal alteração deve-se a degradação das hemiceluloses pela radiação ultravioleta e lixiviação da superfície, conforme relatado por Temiz et al. (2007), Sharratt et al. (2010), Yildiz et al. (2011), Yildiz et al. (2013).

5.2.3 Inchamento

Em virtude da semelhança entre as possíveis explicações dos efeitos dos fatores temperatura e tempo sobre as variáveis de inchamento (αT , αR e αL) e variação volumétrica (ΔV), os seus respectivos resultados foram apresentados de forma agrupada, com posterior discussão conjunta dos mesmos.

Analisando ANOVA (Apêndice C), observou-se que a interação entre os fatores (A x B) e o fator tempo não foram significativos para o inchamento tangencial da madeira de ambas espécies, entretanto o fator temperatura apresentou significância e foi avaliado isoladamente.

Através do desmembramento do fator temperatura (Tabela 6) é possível observar que as maiores reduções na variável em estudo foram nos tratamentos a 210°C, para ambas espécies. A madeira de *E. grandis* sofreu decréscimos entre 15,50% e 53,43%, para os tratamentos E150 e E210, respectivamente, quando comparados às amostras controle. De forma análoga, para *P. elliottii* as reduções no inchamento tangencial foram de 12,15% e 27,12%, respectivamente aos tratamentos P150 e P210.

Tabela 6 – Desmembramento fatorial do inchamento tangencial (αT) em razão do fator temperatura para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Espécie	Temperatura (°C)			
	20	150	180	210
<i>E. grandis</i>	9,5540 ^{±1,2759}	8,0730 ^{±1,1997}	7,1545 ^{±0,8805}	4,4495 ^{±0,4694}
	D	C	B	A
<i>P. elliottii</i>	8,9558 ^{±0,6974}	7,8679 ^{±0,7780}	7,5920 ^{±0,9055}	6,5268 ^{±0,5458}
	C	B	B	A

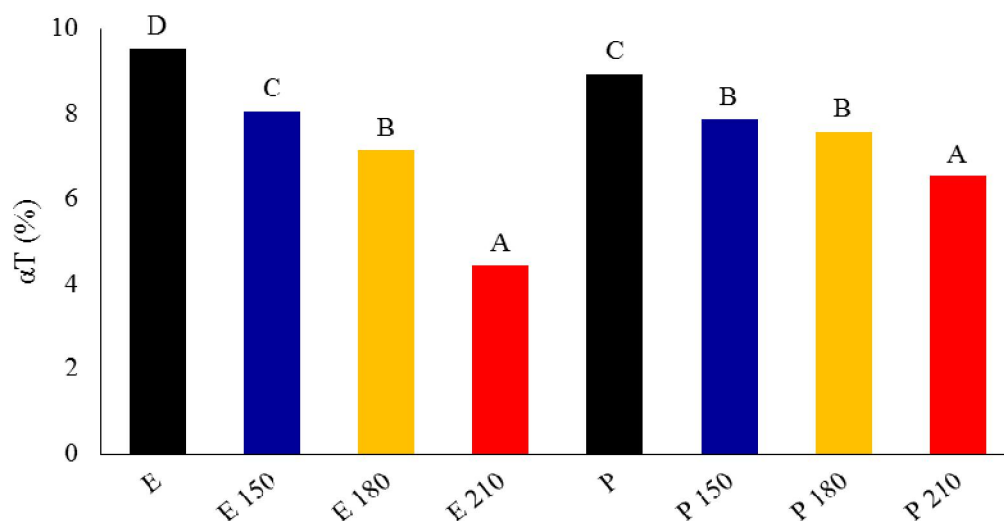
Em que: Média^{±desvio padrão}. Médias com letras iguais na linha não possuem diferença estatística, segundo teste de Scott-Knott em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

Por meio da comparação de médias pelo teste Scott-Knott e pela Figura 10 evidencia-se o efeito semelhante da temperatura nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Pinus elliottii*, reduzindo o inchamento tangencial em detrimento da severidade da termorreificação. Notoriamente, a primeira espécie foi afetada de forma mais drástica que a segunda, logo que todos os seus tratamentos apresentaram diferença significativa entre si e maiores variações

relativas. Para a segunda espécie, os tratamentos de termorretificação diferiram da amostra controle (P), contudo os tratamentos P150 e P180, não diferiram entre si.

Figura 10 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o inchamento tangencial (αT) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.



Médias com letras iguais não possuem diferença estatística em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

Para o inchamento radial foi constatado a inexistência de interação entre os fatores tempo e temperatura (A x B), bem como a não significância para o fator tempo, entretanto o fator temperatura, para ambas espécies, foi significativo, conforme ANOVA fatorial (Apêndice C).

Desmembrando o fator temperatura, conforme Tabela 7, é possível observar que a menor variação para madeira de *E. grandis* ocorreu no tratamento a 150°C e a maior no tratamento a 210°C, com reduções de 6,78% e 48,74%, respectivamente. Contudo, para a madeira de *P. elliottii*, a menor variação ocorreu no tratamento intermediário (P180) e a maior no tratamento mais severo (P210), com decréscimos respectivos de 16,22% e 24,56%.

Seguindo a mesma tendência que no inchamento tangencial, a madeira de *P. elliottii* não apresentou diferença significativa entre os tratamentos P150 e P180, entretanto os demais diferiram entre si, enquanto que para madeira de *E. grandis* apenas o tratamento mais severo diferiu dos demais. De maneira geral, as duas espécies apresentaram reduções no inchamento radial em função do aumento da temperatura empregada na termorretificação, conforme Figura 11.

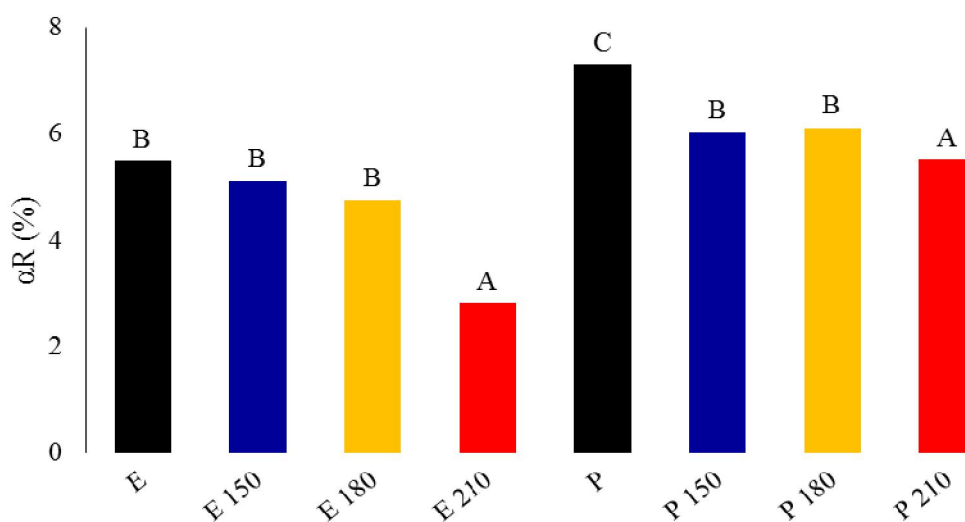
Tabela 7 – Desmembramento fatorial do inchamento radial (αR) em razão do fator temperatura para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Espécie	Temperatura (°C)			
	20	150	180	210
<i>E. grandis</i>	5,4965 \pm 1,0465 B	5,1240 \pm 1,3486 B	4,7635 \pm 2,4801 B	2,8175 \pm 0,4516 A
<i>P. elliottii</i>	7,3105 \pm 0,8436 C	6,0421 \pm 0,9741 B	6,1245 \pm 0,7931 B	5,5153 \pm 0,6166 A

Em que: Média \pm desvio padrão. Médias com letras iguais na linha não possuem diferença estatística, segundo teste de Scott-Knott em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

Figura 11 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para o inchamento radial (αR) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.



Médias com letras iguais não possuem diferença estatística em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

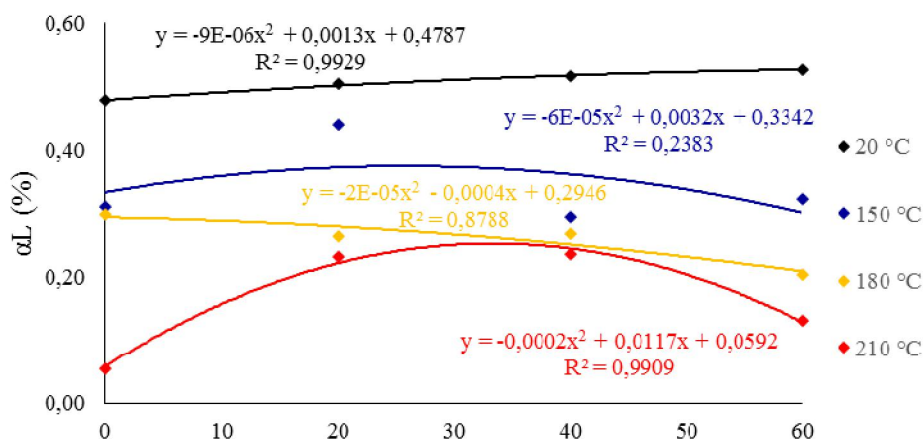
A interação entre os fatores temperatura e tempo foi significativa para o inchamento longitudinal de ambas espécies, conforme ANOVA (Apêndice C). Portanto a variável é resultado da combinação dos efeitos dos fatores e foi desmembrada através da análise de regressão do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura.

A temperatura, em ambas espécies, reduziu o inchamento longitudinal de forma que as maiores alterações foram encontradas nos tratamentos com temperaturas mais elevadas, na madeira de *E. grandis* o decréscimo foi de 87,50% para o tratamento E210 e redução de

68,63% para a madeira de *P. elliotii* termorretrificada a 210°C. Em relação ao tempo, a maior variação (45,45%) na madeira de *P. elliotii* foi encontrada no tratamento a 150°C e para *E. grandis* a maior variação foi de 33,33% no tratamento E180.

Para a madeira de *E. grandis*, por meio do desmembramento da interação (Figura 12), pode-se observar que o tratamento controle apresentou maior variação até o vigésimo ciclo e tendeu a estabilizar entre os ciclos 40 e 60. Já os tratamentos com termorretrificação apresentaram desempenho distinto, convergindo no decréscimo do inchamento longitudinal entre os ciclos 40 e 60, tendência oposta ao tratamento controle.

Figura 12 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o inchamento longitudinal (α_L) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

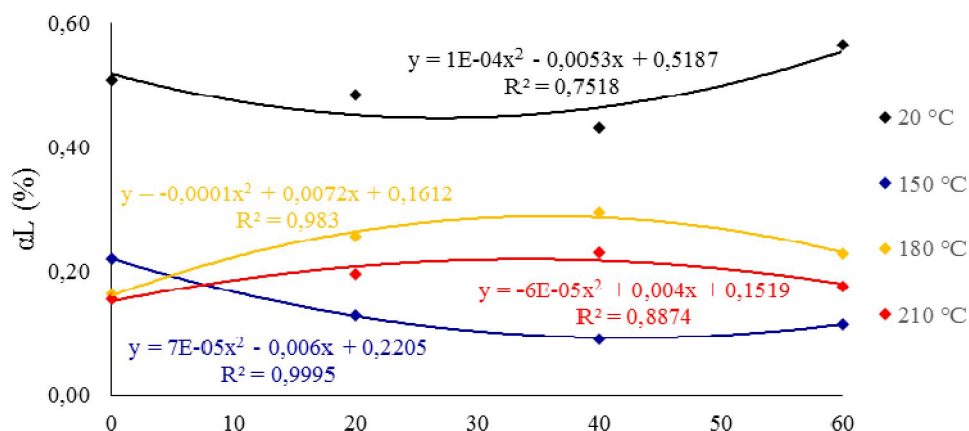


Fonte: Autor.

Por meio do desmembramento da interação entre os fatores (Figura 13), para a madeira de *P. elliotii*, evidencia-se a semelhança entre as curvas do tratamento controle e do tratamento a 150°C, e dos tratamentos com maior temperatura de termorretrificação.

Para o primeiro grupo (P e P150) ocorreu inicialmente decréscimo no inchamento longitudinal, com posterior acréscimo, para o tratamento controle as variações foram mais pronunciadas e a inversão da curva ocorreu entre os ciclos 20 e 40. No segundo grupo (P180 e P210) observa-se acréscimo na variável em estudo até meados do ciclo 40 com posterior decréscimo até do ciclo 60.

Figura 13 – Desmembramento do fator tempo dentro de cada nível do fator temperatura por análise de regressão para o inchamento longitudinal (α_L) da madeira de *Pinus elliottii*.



Fonte: Autor.

Em análise da ANOVA fatorial (Apêndice C) constatou-se que para ambas espécies não houve interação significativa entre os fatores temperatura e tempo, para a variação volumétrica, portanto os fatores foram avaliados isoladamente. O fator temperatura foi significativo para ambas espécies, entretanto o fator tempo, apresentou significância apenas para *Pinus elliottii*.

Para *P. elliottii*, o fator tempo foi estimado por meio da análise de regressão e resultou no modelo $y = 15,540749 - 0,057952x + 0,000688x^2$ que explicou 99% dos dados ($R^2 = 0,99$). Entre o início da exposição – valor médio de 15,52% – até o ciclo 40 ocorreu uma diminuição de 7,99% na variação volumétrica e entre os ciclos 40 e 60 tornou a aumentar, encerrando com valor médio de 14,56%.

Por meio do desmembramento do fator temperatura (Tabela 8) observa-se que, para ambas espécies, as maiores reduções na variação volumétrica aconteceram nos tratamentos a 210°C, com decréscimos de 51,23% e 27,92%, enquanto que as menores reduções ocorreram nos tratamentos a 150°C, com diminuição de 13,40% e 16,88% para *E. grandis* e *P. elliottii*, respectivamente.

Tanto para madeira de *E. grandis* quanto para de *P. elliottii*, a variação volumétrica foi reduzida conforme a temperatura de termorretificação foi aumentada, tendência essa observada nos inchamentos. O teste Scott-Knott de médias resultou na mesma classificação que o inchamento tangencial, com diferença significativa entre todos tratamentos para *E. grandis*, e agrupamento dos tratamentos P150 e P180 para *P. elliottii* (Figura 14).

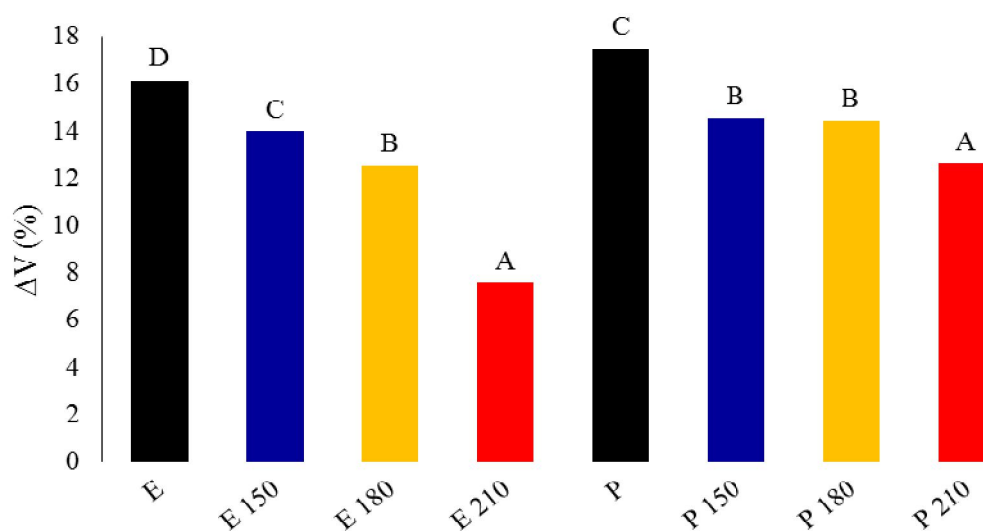
Tabela 8 – Desmembramento fatorial da variação volumétrica (ΔV) em razão do fator temperatura para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Espécie	Temperatura (°C)			
	20	150	180	210
<i>E. grandis</i>	16,1580 \pm 1,7308 D	13,9935 \pm 1,6080 C	12,5440 \pm 2,5976 B	7,5725 \pm 0,9158 A
<i>P. elliottii</i>	17,5016 \pm 1,5139 C	14,5468 \pm 1,6106 B	14,4560 \pm 1,5714 B	12,6153 \pm 0,9368 A

Em que: Média \pm desvio padrão. Médias com letras iguais na linha não possuem diferença estatística, segundo teste de Scott-Knott em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

Figura 14 – Comparação de médias pelo teste Scott-Knott para a variação volumétrica (ΔV) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.



Médias com letras iguais não possuem diferença estatística em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

Em análise aos resultados apresentados, torna-se evidente o ganho em estabilidade dimensional decorrente da termorretificação, para ambas as espécies, bem como sua relação positiva com o aumento da temperatura do processo. Resultados semelhantes ao encontrado no presente trabalho foram relatados por Cademartori et al. (2012), Srinivas e Pandey (2012), Calonego et al. (2012), Dubey et al. (2012), Esteves et al. (2014), Missio et al. (2016).

O acréscimo da estabilidade está relacionado com a menor higroscopicidade da madeira após os tratamentos de termorretificação, logo que essa sofre modificações químicas de degradação de seus componentes (KOCAEFE et al., 2008).

A diminuição de grupos OH livres torna a madeira mais estável, pois diminui a acessibilidade da água (BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006). Para Hill (2006) a degradação da hemicelulose é o principal fator de redução dos grupos OH, por ser o constituinte mais hidrofílico.

A utilização de óleo vegetal tende a aumentar a estabilidade dimensional da madeira através da ação de repelência, por ser uma substância hidrofóbica. Entretanto, em estudo de termorretificação em óleo com madeira de *Pinus radiata*, Dubey et al. (2012) encontraram os menores valores de inchamento nas amostras com temperaturas mais elevadas (210°C) e não nas com maior quantidade de óleo absorvida (160°C), tais resultados convergem com os encontrados no presente trabalho. Portanto, a estabilidade dimensional é influenciada de forma mais pronunciada pela temperatura do que pela absorção de óleo.

O intemperismo causa modificações químicas na madeira tornando sua superfície mais áspera, com presença de fissuras e causa danos na sua microestrutura (HON e FEIST, 1992; RUBEM, 2014), favorecendo dessa forma a absorção de água e, conseqüentemente, aumentando seu inchamento.

O aumento da rugosidade na madeira intemperizada, para Temiz et al. (2005) é decorrente da remoção, pela água (simulação da precipitação), de fibras e partículas oriundas da ação da radiação ultravioleta.

A sensível repelência à água da superfície da madeira não intemperizada foi reduzida em estágios iniciais de exposição as intempéries, antes mesmo de serem observados efeitos de degradação superficial das amostras, segundo Kalnins e Feist (1993).

A restrição do inchamento da madeira pode ser consequência da ligação cruzada de componentes macromoleculares que reduzem a capacidade de sorção de umidade, conforme proposto por Sharratt et al. (2010).

Em estudo com madeiras amazônicas submetidas ao intemperismo artificial Mesquita (2016) concluiu que a celulose praticamente não foi degradada no período de 700 horas de exposição. Corroborado por Temiz et al. (2007), que concluíram que os polímeros de celulose não foram afetados pelo intemperismo acelerado.

As hemiceluloses são degradadas no processo de intemperismo (FENGEL e WEGENER, 1989), dessa forma ocorre um aumento nos níveis de celulose na superfície da madeira ao longo do tempo de exposição (SHARRATT et al., 2011).

Contudo, a absorção óleo vegetal pela madeira proporcionam uma proteção química-mecânica ou física das hemiceluloses, impedindo parcialmente a sua degradação pelo intemperismo e tem ação repelente a umidade (TEMIZ et al., 2007).

5.3 ANÁLISE DE SUPERFÍCIE

5.3.1 Colorimetria CIEL*a*b*

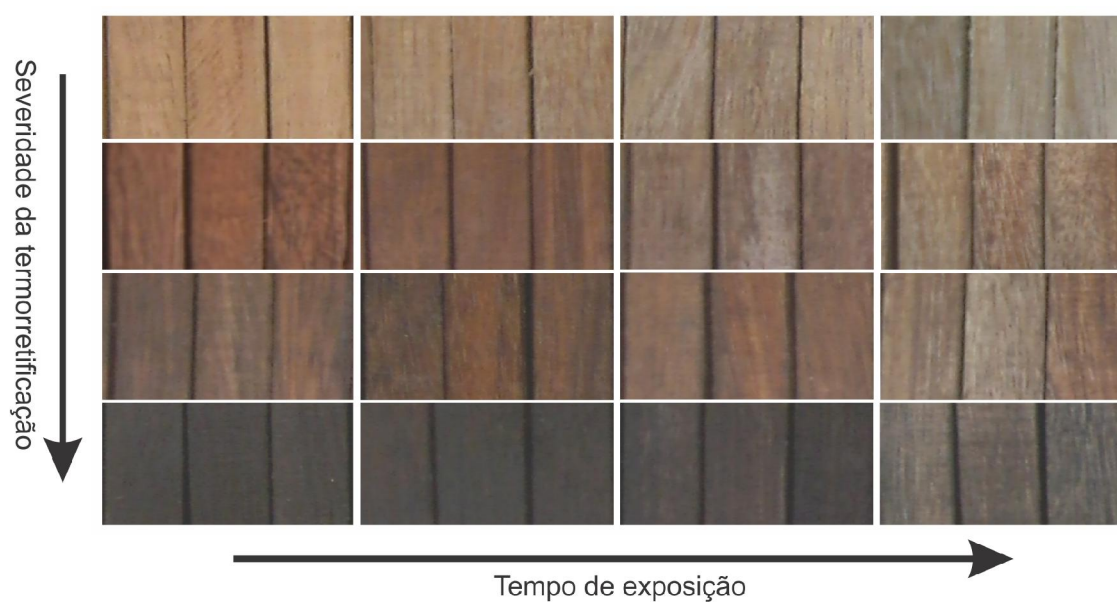
Os dados obtidos para os parâmetros colorimétricos não atenderam os pressupostos para a análise estatística paramétrica, dessa forma, distintamente das propriedades anteriormente estudadas, não pode-se realizar a ANOVA fatorial. Portanto, foi realizado um resumo estatístico por meio da exposição das médias e do desvio padrão, conforme Apêndices “D” e “E”, para *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* respectivamente.

A cor da madeira é decorrente da sua composição química e está sujeira a sofrer variações devido a susceptibilidade dos seus componentes frente a reações com luz e calor, em diferentes intensidades para cada espécie (HON, 2001), de forma generalizada as madeiras claras tendem a amarelar e as escuras a descolorir (FEIST, 1983).

O processo de modificação da cor da madeira pelo intemperismo ocorre rapidamente e em duas etapas distintas, a primeira torna a madeira mais escura e intensifica cores amareladas ou marrons, em virtude da decomposição da lignina e formação de grupos cromóforos. A segunda, confere a madeira tons de cinza prateado, logo que os produtos formados na primeira etapa são lixiviados e fica exposta a celulose parcialmente degradada e superfície com baixa concentração de lignina (FEIST e HON, 1984)

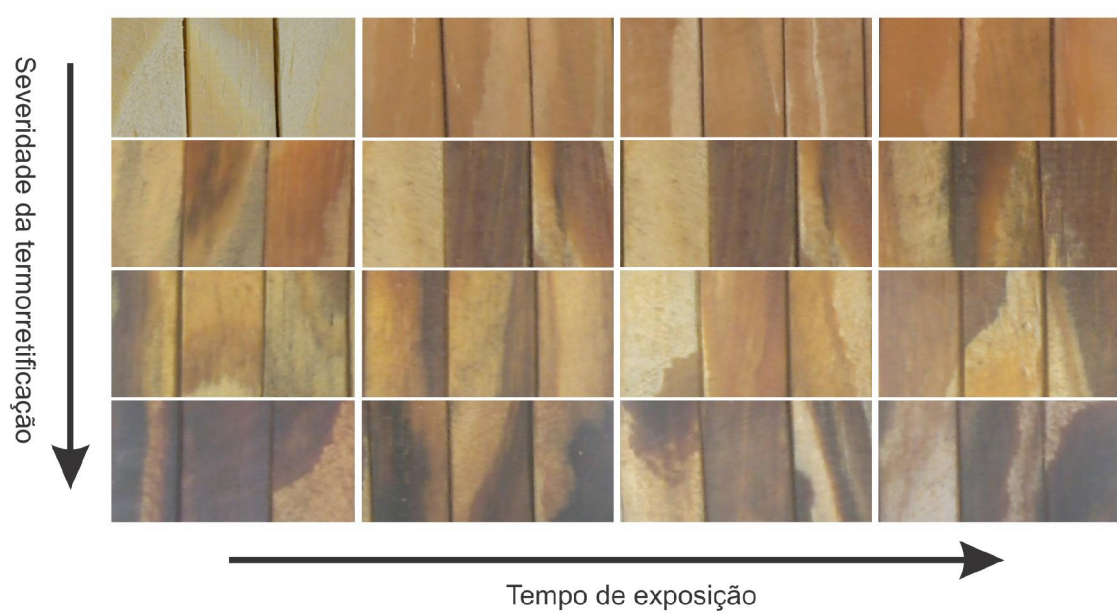
De maneira geral, para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, foram observadas duas tendências de alteração da cor da madeira, conforme exemplificado nas Figuras 15 e 16. Verticalmente, ocorreu uma variação ocasionada pela termorreificação em óleo, em que o escurecimento foi proporcional ao aumento da temperatura (severidade do tratamento), enquanto que horizontalmente, a superfície foi tornando-se opaca e acinzentada em função do aumento do tempo de exposição ao intemperismo acelerado.

Figura 15 – Aspecto da madeira de *Eucalyptus grandis* termorretrificada em óleo e exposta ao intemperismo acelerado.



Fonte: Autor.

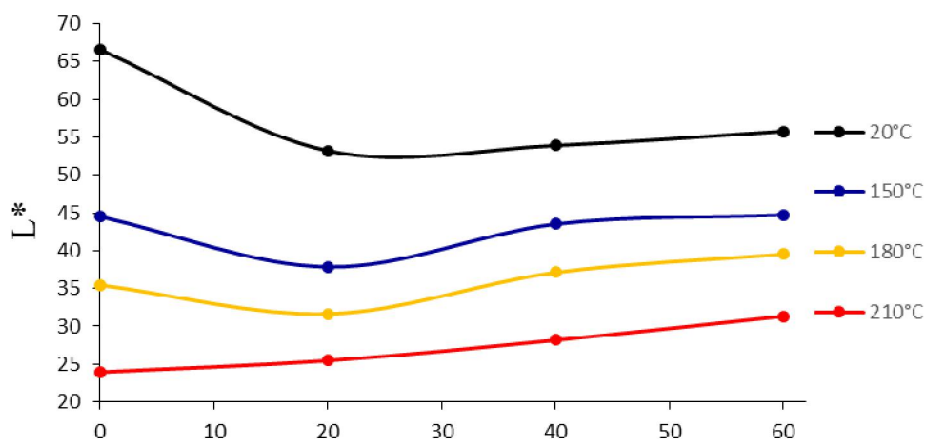
Figura 16 – Aspecto da madeira de *Pinus elliottii* termorretrificada em óleo e exposta ao intemperismo acelerado.



Fonte: Autor.

A redução da luminosidade da madeira de *Eucalyptus grandis* (Figura 17) foi maior conforme o aumento na temperatura de termorretificação, chegando a decrescer em 64,02% no tratamento mais severo (210°C). A exposição à degradação, inicialmente, reduziu os valores de luminosidade e apresentou maior variação na amostra controle nos primeiros 20 ciclos, com redução de 20,08%. Entre as madeiras termorretificadas, as com menor temperatura apresentaram tendência semelhante, com maior variação entre os ciclos 20 e 4. Já a madeira com maior temperatura apresentou variação mais elevada nos últimos ciclos.

Figura 17 – Variação da luminosidade para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Eucalyptus grandis*.

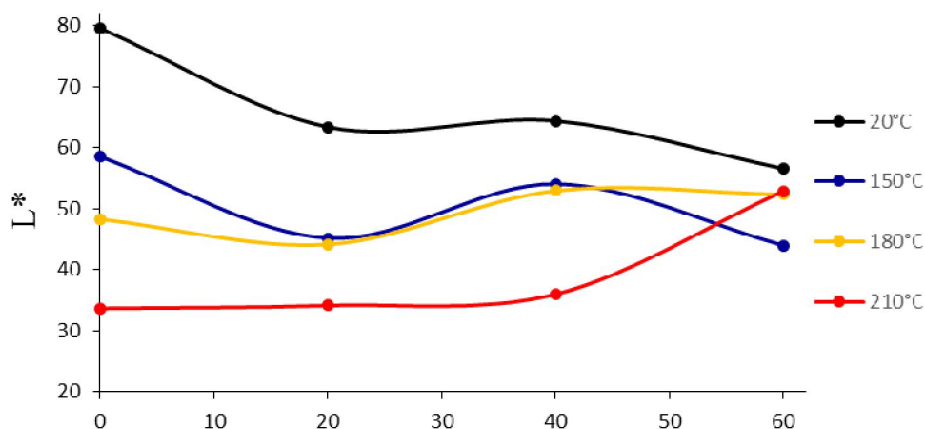


Fonte: Autor.

Para a madeira de *Pinus elliottii* (Figura 18) a temperatura influenciou de forma semelhante ao descrito para espécie anterior, decrescendo de 26,48% até 42,26%, valores respectivos para os tratamentos a 150°C e 210°C. O tempo de exposição influenciou de forma mais acentuada o tratamento controle que apresentou contínuo decréscimo da luminosidade, com redução de 28,92% ao final de 60 ciclos, entretanto o tratamento mais severo não apresentou variação superior a 7% até o ciclo 40.

Pelo exposto, pode-se inferir que a manutenção da luminosidade é dependente da temperatura do processo, ou seja, as madeiras termorretificadas tendem a permanecer mais tempo em condição de serviço sem sofrer alterações.

Figura 18 – Variação da luminosidade para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Pinus eliottii*.



Fonte: Autor.

A diminuição da luminosidade da madeira, ou seja, o seu escurecimento, é um fator positivo para Tuong e Li (2010) e Gonzalez et al. (2006), por agregar valor ao torná-la semelhante com as madeiras tropicais.

A degradação das hemiceluloses e alterações no conteúdo de extrativos ocorridos durante a termorretificação são os principais responsáveis pela redução da luminosidade da madeira (TUONG e LI, 2010; DUBEY et al., 2012; PINCELLI et al., 2012).

A degradação das hemiceluloses foi maior conforme o aumento da temperatura de termorretificação para Dubey et al. (2012) em madeira de *Pinus radiata* e para Cademartori et al. (2013) em madeira de *Eucalyptus cloeziana*. Portanto o decréscimo da luminosidade em função do aumento da temperatura de termorretificação pode ser explicada pela maior degradação das hemiceluloses.

A diminuição da claridade no início do intemperismo está relacionado com modificação da lignina e formação de grupos cromóforos e o posterior acréscimo decorre da lixiviação de tais produtos (FEIST e HON, 1984). Convergindo com o descrito por Hon (2001), que atribui a diminuição da luminosidade à degradação da lignina pela radiação ultravioleta na presença de oxigênio e, conseqüente, na formação de compostos quinoidais.

Da mesma forma, Pastore et al. (2008) relataram a decomposição contínua da lignina com o aumento do tempo de exposição à radiação ultravioleta e, conseqüente, formação de novos produtos.

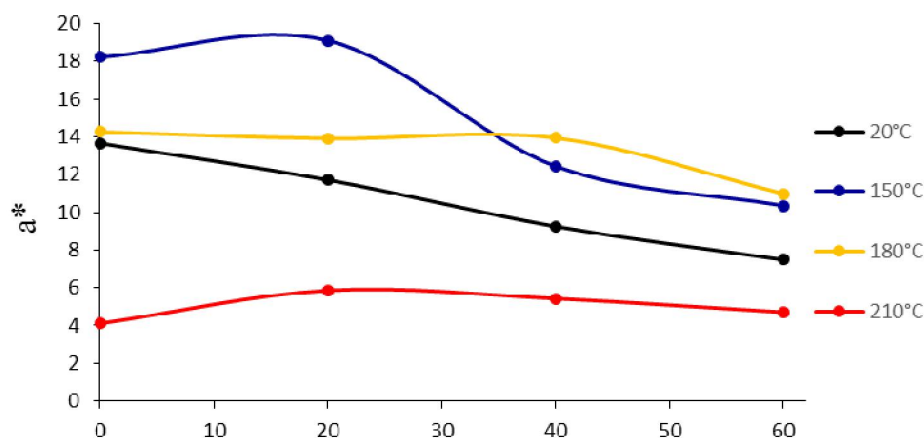
O aumento da luminosidade nos ciclos finais de intemperismo está relacionada ao aumento da concentração de celulose na superfície, visto que os produtos formados são lixiviados pela água (HON, 2001; SILVA et al., 2006).

A lignina tem alta susceptibilidade a absorção da radiação ultravioleta, portanto é altamente fotodegradada, e atua como protetora indireta da celulose, prevenindo-a de ser oxidada pela luz (DIRCKX et al., 1992)

A tendência de variação de luminosidade encontrada no presente trabalho está de acordo com o descrito por outros autores que realizaram intemperismo em madeira (SILVA e PASTORE, 2004; SILVA et al., 2006; PASTORE et al., 2008; TELES e COSTA, 2014; MESQUITA, 2016).

Para a coordenada cromática verde-vermelho, na madeira de *Eucalyptus grandis*, (Figura 19), ocorreu acréscimo de 33,48% para a madeira termorretificada a 150°C e decréscimo de 69,89% para o tratamento a 210°C em relação as amostras controle. Entretanto, dentre as amostras termorretificadas os valores da coordenada cromática verde-vermelho são maiores quanto menor a temperatura. Todos os tratamentos, exceto o mais severo (210°C), apresentaram decréscimo ao final de 60 ciclos, com maiores variações nos tratamentos controle (- 45,20%) e termorretificação a 150°C (- 43,19%).

Figura 19 – Variação da coordenada cromática verde-vermelho para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Eucalyptus grandis*.

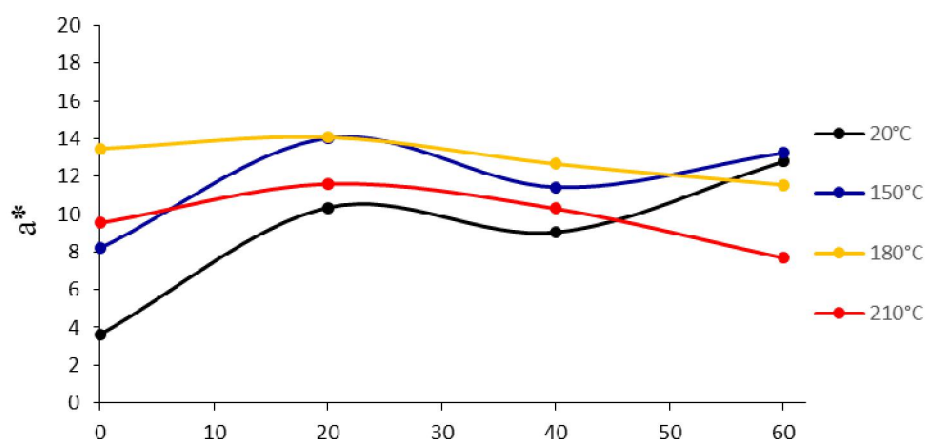


Fonte: Autor.

A temperatura de termorretificação não apresentou uma tendência na variação dos valores da coordenada cromática verde-vermelho para a madeira termorretificada de *Pinus elliottii* (Figura 20), entretanto houve incremento em todos tratamentos em relação as

amostras controle. Em relação ao intemperismo acelerado, os tratamentos com maior temperatura, apresentaram tendência semelhante, com pouca variação nos primeiros 20 ciclos, seguido de gradual decréscimo até o ciclo 60, diferente dos tratamentos controle e termorretificação a 150°C, que apresentaram acréscimo ao final do tempo de exposição.

Figura 20 – Variação da coordenada cromática verde-vermelho para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Pinus elliottii*.



Fonte: Autor.

O aumento dos valores da coordenada cromática verde-vermelho até 180°C e declínios em tratamentos mais severos, para espécies de eucalipto e acréscimos proporcionais ao aumento da temperatura para *Pinus sp.*, foi relatada em pesquisas anteriores (PINCELLI et al., 2012; CADEMARTORI, MATTOS, et al., 2014; CONTE, 2014; MISSIO, 2014), corroborando com o encontrado no presente estudo.

Os tratamentos térmicos condensam, oxidam e/ou decompõem constituintes da madeira em novos produtos que ocasionam o aumento da coordenada cromática a^* (VARGA e VAN DER ZEE, 2007; CHEN et al., 2012). Já para Gierlinger et al. (2004) o aumento deve-se a concentração de fenóis.

O aumento da coordenada cromática a^* é determinado sobretudo pelas modificações químicas dos extrativos e por produtos cromóforos resultantes da degradação térmica das hemiceluloses (TOLVAJ et al., 2014)

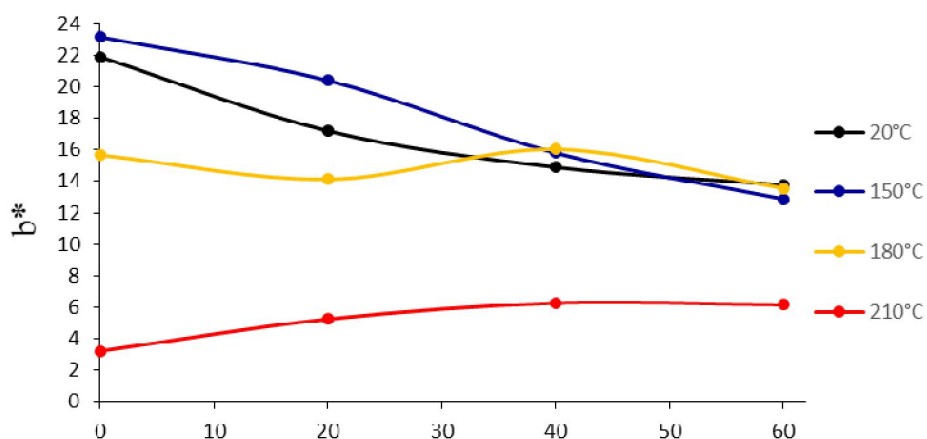
As menores variações de a^* causadas pelo intemperismo nos tratamentos mais severos são corroborados por Tolvaj et al. (2014), que encontrou resultados mais estáveis na temperatura de 200°C e conclui que a baixa variação está relacionada a estabilidade dos subprodutos formados a esta temperatura.

A redução da coordenada cromática a^* foi descrita em estudos com madeira intemperizada com fotodegradação e simulação de chuva (SILVA e PASTORE, 2004; YILDIZ et al., 2013; TELES e COSTA, 2014; MESQUITA, 2016). Entretanto, em estudo de fotodegradação de madeiras termorretificadas sem simulação de chuvas, Tolvaj et al. (2014) encontrou rápidas variações da coordenada cromática a^* de espécies com alto teor de extrativos, convergindo para um aumento gradual.

Portanto, corroborando com o descrito por Silva et al. (2006), em que o decréscimo da coordenada cromática a^* ocasionada pelo intemperismo está relacionada com a lixiviação dos compostos cromóforos e extrativos de cor vermelha. Claramente observado para a madeira de *Eucalyptus grandis*, que naturalmente apresenta coloração mais avermelhada.

A coordenada cromática azul-amarelo para *Eucalyptus grandis* (Figura 21), apresentou decréscimos conforme o aumento da temperatura entre as amostras termorretificadas, em relação as amostras controle. A menor variação (aumento de 5,75%) ocorreu na temperatura de 150°C e a maior (redução de 85,35%) no tratamento a 210°C. Os tratamentos mais severos (180°C e 210°C) apresentaram menor variação ao final de 60 ciclos e tendência mais estável ao longo do tempo de exposição, enquanto que o tratamento a 150°C teve a maior variação, com redução de 44,41%.

Figura 21 – Variação da coordenada cromática azul-amarelo para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Eucalyptus grandis*.

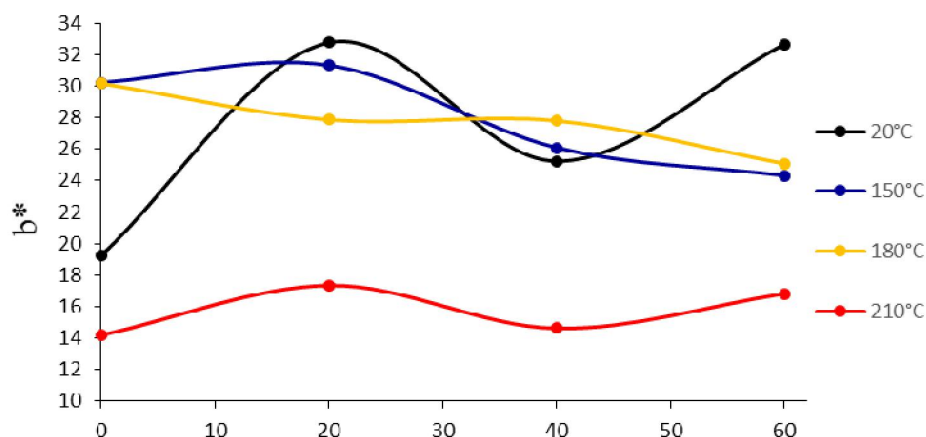


Fonte: Autor.

A termorretificação da madeira de *Pinus elliottii* incrementou a coordenada cromática azul-amarelo (Figura 22) em ~57% nos tratamentos a 150°C e 180°C, entretanto reduziu em 26,37% no tratamento a 210°C. O intemperismo acelerado provocou alteração de forma

semelhante nos tratamentos a 150 e 180°C com redução de ~18%, a maior variação foi encontrada no tratamento controle (acréscimo de 69,68%) e a menor no tratamento mais severo (15,37%).

Figura 22 - Variação da coordenada cromática azul-amarelo para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Pinus elliottii*.



Fonte: Autor.

De forma semelhante a coordenada cromática a^* , a coordenada cromática b^* apresentou acréscimo em termorretificações até 180°C e decréscimos em temperaturas mais elevadas, convergindo com outros estudos (DUBEY et al., 2012; PINCELLI et al., 2012; SRINIVAS e PANDEY, 2012; MISSIO, 2014).

As alterações na coordenada cromática b^* , após a termorretificação, estão relacionadas com as modificações e/ou alteração na proporção da lignina, logo que esta apresenta estruturas que tornam a madeira amarelada (FALKEHAG et al., 1966; PINCELLI et al., 2012).

O aumento de tal coordenada cromática pode estar relacionado com a modificação química das hemiceluloses e incremento de açúcares de baixo peso molecular oriundos da degradação térmica (GUNDUZ et al., 2010)

Produtos formados a partir da oxidação dos constituintes da madeira, a exemplo das quinonas e lignina solúvel, contribuem para o amarelecimento da madeira (TJEERDSMA et al., 1998)

No intemperismo, a primeira fase tende a intensificar as cores amarelas ou marrons tanto quanto ocorre decomposição da lignina e formação de grupos cromóforos (FEIST e HON, 1984). Esta variação é mais nítida em madeiras claras, conforme encontrado para a madeira

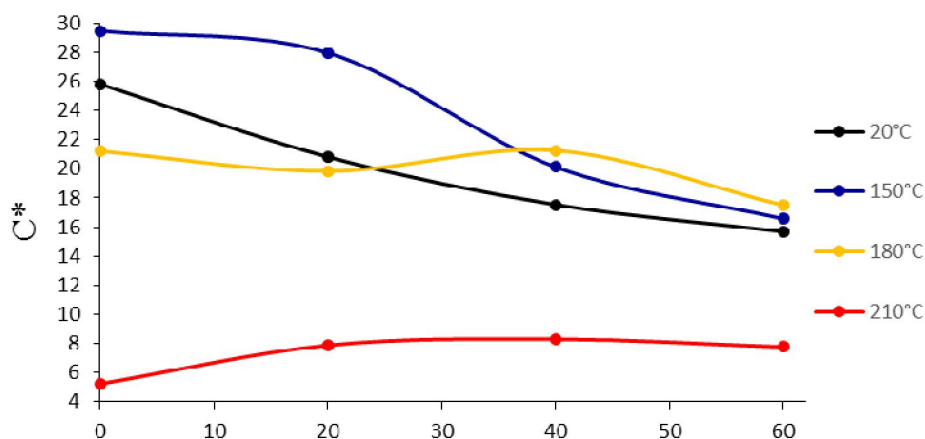
de *Pinus elliottii*, em que ocorre um aumento da coordenada cromática b^* no início do ensaio de intemperismo.

Os subsequentes decréscimos são ocasionados pela maior quantidade de grupos cromóforos lixiviados em relação aos produzidos a partir da lignina, esta tendência foi encontrada e descrita por Silva et al. (2006).

Os resultados encontrados se assemelham a outros estudos que avaliaram a coordenada cromática b^* após o intemperismo com simulação de chuva (SILVA et al., 2006; TELES e COSTA, 2014; MESQUITA, 2016).

A cromaticidade da madeira de *Eucalyptus grandis* (Figura 23) apresentou a mesma relação com a termorretificação e tempo de exposição que a coordenada cromática azul-amarelo. Portanto, quanto maior a temperatura, menor a cromaticidade e menor a variação provocada pelo intemperismo acelerado. A termorretificação causou uma redução de 79,74% na cromaticidade para o tratamento a 210°C e o intemperismo acelerado provocou decréscimo de 17,49% no tratamento a 180°C.

Figura 23 – Variação da cromaticidade para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Eucalyptus grandis*.

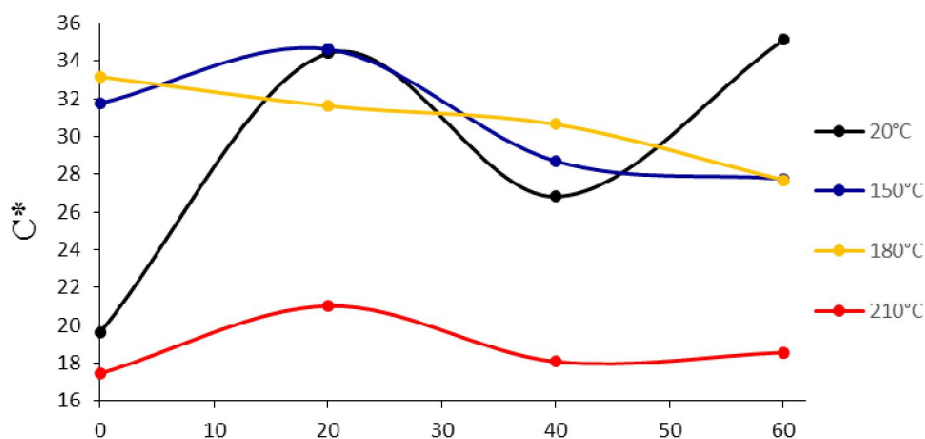


Fonte: Autor.

Para a madeira de *Pinus elliottii*, a cromaticidade (Figura 24) do tratamento mais severo (210°C) apresentou as menores variações, com redução de 11,11% provocado pela termorretificação e acréscimo de 6,36% decorrente da degradação em 60 ciclos de intemperismo acelerado. Alterações análogas ocorreram para os tratamentos a 150°C e 180°C,

em que houve acréscimo da cromaticidade após a termorretificação e redução em função do tempo de exposição.

Figura 24 - Variação da cromaticidade para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Pinus elliottii*.



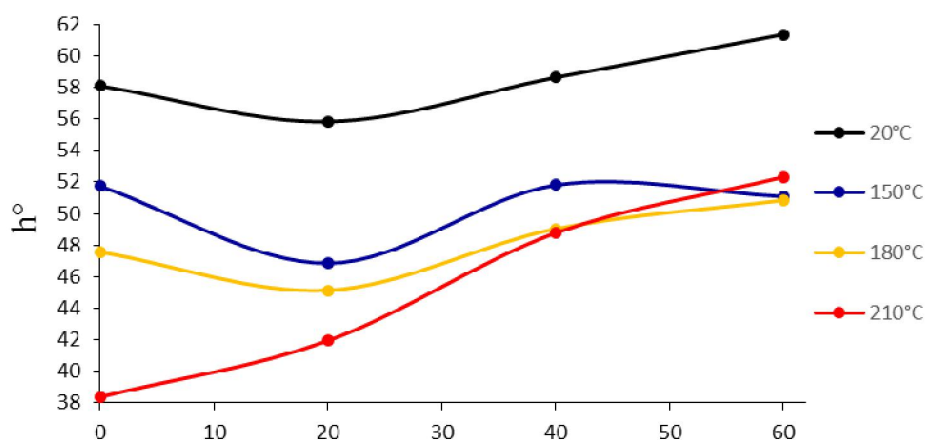
Fonte: Autor.

O decréscimo da cromaticidade a partir da termorretificação em *Eucalyptus sp.* e o acréscimo para *Pinus elliotti* em temperaturas brandas foi descrita em outras pesquisas e retornaram resultados semelhantes aos deste trabalho (PINCELLI et al., 2012; CONTE, 2014; PERTUZZATTI, 2015). As termorretificações conferem a madeira tonalidades de cinza escuro, dessa forma, decrescendo os valores de cromaticidade, conforme proposto por Cademartori et al. 2013.

O valor da cromaticidade é resultante da combinação dos valores das coordenadas cromáticas a^* e b^* . Portanto, o efeito majoritário do intemperismo acelerado está relacionado com a lixiviação dos compostos cromóforos da superfície. Os resultados do presente trabalho são corroborados por Teles e Costa (2014) e Mesquita (2016), em estudos com intemperismo de madeira.

Semelhante ao ocorrido para a luminosidade, o ângulo de tinta, da madeira de *Eucalyptus grandis* (Figura 25), foi reduzido pela ação da temperatura de forma proporcional à severidade do tratamento, atingindo decréscimo de 33,97% a 210°C. Nos primeiros 20 ciclos ocorreu diminuição do ângulo de tinta, exceto para a temperatura de 210°C, seguido de acréscimo até os 60 ciclos de intemperismo. A maior variação ao longo do tempo de exposição foi o aumento de 36,39% encontrada no tratamento a 210°C e menor alteração foi de 1,26% na madeira termorretificada a 150°C

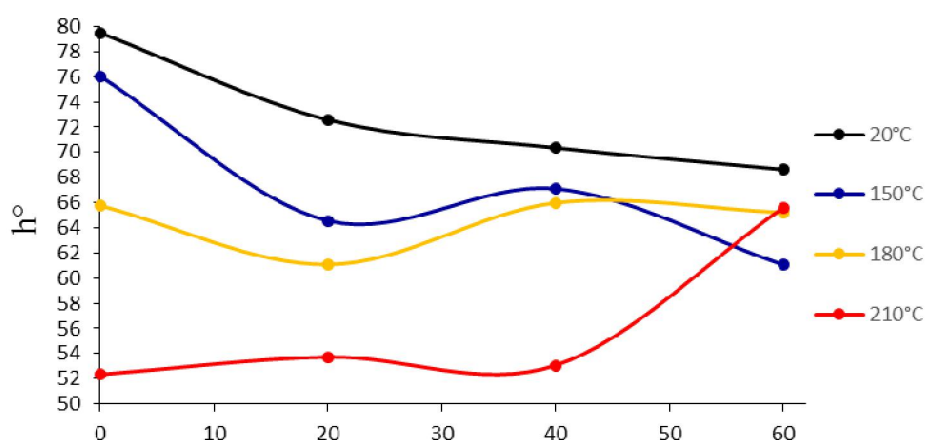
Figura 25 – Variação do ângulo de tinta para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Eucalyptus grandis*.



Fonte: Autor.

Para a madeira de *Pinus elliottii* a variação do ângulo de tinta (Figura 26) seguiu a mesma tendência que a luminosidade, com maior redução em função do aumento da temperatura de termorretificação, decrescendo entre 4,35% e 34,14%, respectivamente para o tratamento a 150°C e 210°C, em comparação as amostras controle. O tempo de exposição influenciou de forma decrescente e contínua os tratamentos controle e a 150°C, este que apresentou a maior redução (19,70%), o tratamento a 180°C apresentou a menor variação ao final de 60 ciclos (~1%), foi observado acréscimo apenas para o tratamento a 210°C, que apresentou ganho de 25,33%.

Figura 26 – Variação do ângulo de tinta para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Pinus elliottii*.



Fonte: Autor.

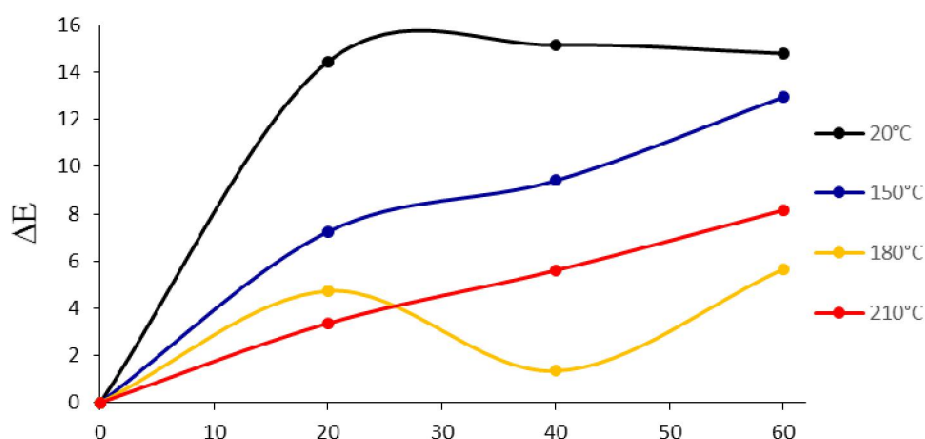
O ângulo de tinta pode variar entre 0° (cor vermelha) e 90° (cor amarela), conforme Tolvaj e Németh (2008), evidenciando os tons amarelados da madeira de *Pinus elliotti* (~80°) e rosados da madeira de *Eucalyptus grandis* (58°), ambas em estado natural.

O processo de termorretificação decresceu os valores para ambas espécies, tornando-as mais avermelhadas, entretanto, reduziu a diferença entre tonalidades, corroborando com o descrito por Pincelli et al. (2012), em que a tonalidade da madeira de espécies diferentes foram homogeneizadas após a termorretificação.

Para Sundqvist (2004) as alterações dos grupos cromóforos da madeira podem ser identificados pelo ângulo de tinta, dessa forma, é possível observar que a madeira de *Eucalyptus grandis* sofreu maior lixiviação de grupos que conferem tons avermelhados, possivelmente extrativos evidenciado pelo aumento do ângulo de tinta, e que na madeira de *Pinus elliottii* ocorreu lixiviação dos grupos cromóforos de cor amarela, exceto para o tratamento mais severo, logo que apresentaram diminuição do ângulo de tinta ao longo do tempo de exposição.

As variações na cor da madeira de *Eucalyptus grandis* (Figura 27) ocorreram de forma distinta entre a madeira *in natura* e a madeira termorretificada. A primeira apresentou pronunciada variação até o ciclo 20 e posterior estabilização até o final de 60 ciclos, dentre as termorretificadas houve uma tendência de crescente de variação ao longo do tempo, entretanto com intensidade diferentes para cada temperatura.

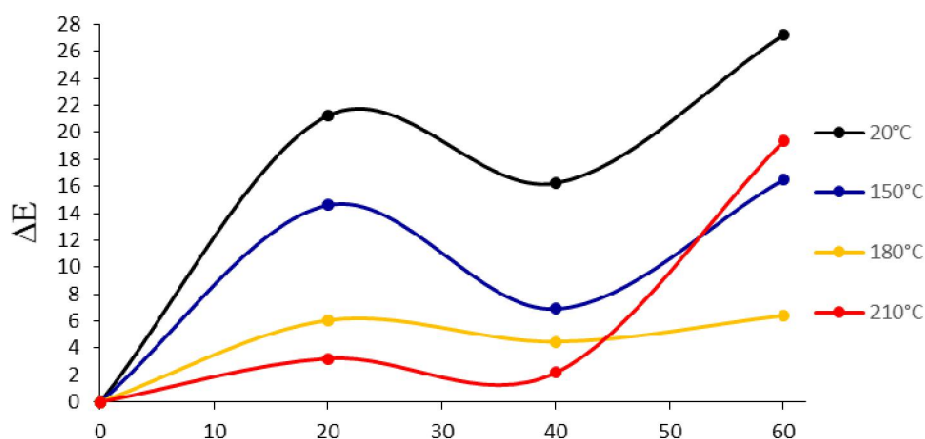
Figura 27 – Variação total de cor para cada temperatura de termorretificação em função do tempo de exposição para madeira de *Eucalyptus grandis*.



Fonte: Autor.

A madeira de *Pinus elliottii* termorretrificada a 150°C e a *in natura* foram as mais alteradas ao longo do tempo apresentaram a mesma tendência de variação de cor, mais pronunciada até o ciclo 20. Para os tratamentos a 180°C e 210°C a alteração foi semelhante até o ciclo 40, com menor variação, entretanto em virtude do ganho de luminosidade a madeira a 210°C apresentou um pico de variação na cor ao final do tempo de exposição.

Figura 28 – Variação total de cor para cada temperatura de termorretrificação em função do tempo de exposição para madeira de *Pinus elliottii*.



Fonte: Autor.

As maiores variações ocorreram nos primeiros ciclos de intemperismo com reduções na variação dos ciclos posteriores, resultados semelhantes foram encontrados por Pastore (2004), Silva et al. (2006), Teles e Costa (2014).

A termorretrificação em óleo reduziu a alteração de cor provocada pela ação do intemperismo acelerado na madeira de ambas espécies, tornando-as menos susceptíveis a degradação superficial, com destaque para os tratamentos a 180°C.

Em última análise, os parâmetros colorimétricos foram utilizados para atribuir a cor da madeira, conforme proposto por Camargos e Gonzalez (2001), e organizadas nas Tabelas 9 e 10. A madeira de *Eucalyptus grandis*, naturalmente apresenta cor rosa e passou para cor rosa-acinzentado após 60 ciclos de intemperismo e a preto-avermelhado quando termorretrificada a 210°C. A madeira de *Pinus elliottii*, no seu estado natural apresentou cor branca e passou a amarelo-alaranjado após intemperizada e a marrom-escuro após termorretrificada a 210°C.

A madeira de *Eucalyptus grandis* (Tabela 9) apresentou melhor manutenção do seu aspecto quando termorretrificada a 180°C, não apresentando alterações na cor durante o tempo de exposição. A madeira em seu estado natural apresentou mudança de cor nos primeiros 20

ciclos de intemperismo, enquanto que os tratamentos a 150°C e 180°C as alterações foram visíveis após 40 ciclos. Portanto, a termorretificação tornou a madeira de *E. grandis* menos susceptível às modificações da cor da superfície provocada pelo intemperismo acelerado.

Tabela 9 – Cor da madeira de *Eucalyptus grandis* conforme proposto por Camargos e Gonzalez (2001) em função da temperatura de termorretificação e tempo de exposição ao intemperismo acelerado.

Tempo (ciclos)	Temperatura (°C)			
	20	150	180	210
0	Rosa	Vermelho	Marrom-escuro	Preto-avermelhado
20	Marrom-claro	Vermelho	Marrom-escuro	Preto-avermelhado
40	Marrom-claro	Marrom-escuro	Marrom-escuro	Preto
60	Rosa-acinzentado	Marrom-escuro	Marrom-escuro	Preto

Fonte: Autor.

Para a madeira de *Pinus elliottii* (Tabela 10) os tratamentos a 180°C e a 210°C apresentaram a maior estabilidade de cor, apresentando variação somente após 40 ciclos de intemperismo acelerado. Entretanto, o tratamento controle apresentou a maior variação de cor, iniciada nos primeiros ciclos de exposição, indicando a eficiência da termorretificação na manutenção das propriedades colorimétricas.

Tabela 10 – Cor da madeira de *Pinus elliottii* conforme proposto por Camargos e Gonzalez (2001) em função da temperatura de termorretificação e tempo de exposição ao intemperismo acelerado.

Tempo (ciclos)	Temperatura (°C)			
	20	150	180	210
0	Branco	Oliva-amarelado	Amarelo-amarronzado	Marrom-escuro
20	Amarelo-claro	Amarelo-amarronzado	Amarelo-amarronzado	Marrom-escuro
40	Oliva-amarelado	Amarelo-amarronzado	Amarelo-amarronzado	Marrom-escuro
60	Amarelo-alaranjado	Marrom-claro	Marrom-claro	Oliva

Fonte: Autor.

6. CONCLUSÕES

O intemperismo não afetou de forma significativa as propriedades mecânicas da madeira no período de exposição estudado, entretanto, o processo de termorreificação em óleo incrementou a sua fragilidade.

As propriedades físicas da madeira foram melhoradas pelo processo de termorreificação e, de maneira geral, não foram comprometidas pela ação das intempéries, portanto, os tratamentos térmicos foram eficientes na manutenção de tais propriedades.

A termorreificação em óleo apresentou resultados positivos na manutenção dos parâmetros colorimétricos da madeira, de ambas espécies, durante o tempo de exposição ao intemperismo acelerado. Portanto, o tratamento térmico é eficiente no retardamento da ação das intempéries (radiação ultravioleta e umidade) que resultam em variação indesejada da cor da madeira.

7. RECOMENDAÇÕES

A madeira pode ser utilizada em ambientes externos sem apresentar significativos decréscimos em seu desempenho mecânico provocados pela degradação da radiação ultravioleta e umidade. Entretanto, deve-se avaliar a perda de resistência mecânica provocado pelos tratamentos térmicos, a fim de evitar acidentes com a peça em condição de serviço.

Em detrimento das reduções da variação volumétrica e teor de umidade de equilíbrio a madeira termorretificada em óleo pode ser empregada em ambientes com considerável umidade.

Contudo, sua resistência à deterioração por organismos xilófagos não foi estudada no presente trabalho, dessa forma orienta-se cautela no emprego da madeira em contato com o solo.

Em análise dos benefícios – ganho de estabilidade dimensional e manutenção da cor – e dos prejuízos – perda de resistência mecânica – da termorretificação frente ao intemperismo acelerado, de maneira geral, é recomendado o uso de madeira termorretificada (preferencialmente com temperatura de 180°C) em ambientes externos e internos, visto que apresentam maior vida útil em condição de serviço, prolongando o tempo entre manutenções e evitando reposição ou reparo das peças.

REFERÊNCIAS

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**, v. 4, n. 6, p. 660-665, 2008.

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

ANDREAS, O.; SAILER, M. Oil Heat Treatment of wood in germany – state of the art. Review on heat treatments of wood. **European cooperation in the filed of scientific and technical research**, p. 18, 2001.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 7. São Paulo: Guanabara, 2008. 594.

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

_____. Standart practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials: G 154 - 00. In: (Ed.). **Annual Book of ASTM Standard**. West Conshohocken, 2000b.

_____. Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties: D5536 - 94. In: (Ed.). **Annual Book of ASTM Standart**. West Conshohocken, 2010.

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

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

_____. The effects of heat treatment on some mechanical properties of juvenile wood and mature wood of *Eucalyptus grandis*. **Drying Technology**, v. 31, n. 4, p. 479-485, 2013.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme**. 2012. 339 (Tese). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

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

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

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 64, n. 3, p. 204-211, 2006.

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

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

BRYDSON, J. A. **Plastics Materials**. 7 ed. 1999. ISBN 0750641320.

CADEMARTORI, P. H. G. **Propriedades tecnológicas da madeira termorreificada de três espécies de *Eucalyptus***. 2012. 132 (Dissertação). Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CADEMARTORI, P. H. G.; DOS 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**, v. 45, n. 0, p. 360-366, 2013. ISSN 0926-6690.

CADEMARTORI, P. H. G.; EDUARDO SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R.; STANGERLIN, D. M. Modification of Static Bending Strength Properties of *Eucalyptus grandis* heat-treated wood. **Material Research**, v. 15, n. 6, p. 922-927, 2012.

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. **Material Research**, v. 17, n. 2, p. 487-493, 2014.

CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A. Effect of thermal treatment on technological properties of rose gum and Sydney blue gum wood. **Anais da academia brasileira de ciências**, 2014.

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

CALONEGO, F.; SEVERO, E.; BALLARIN, A. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 4, p. 453-460, 2012. ISSN 0018-3768.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, v. 71, p. 12, 2001.

CHANG, T.-C.; CHANG, H.-T.; WU, C.-L.; LIN, H.-Y.; CHANG, S.-T. Stabilizing effect of extractives on the photo-oxidation of *Acacia confusa* wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 9, p. 1518-1522, 2010. ISSN 0141-3910.

CHEN, C. L. Lignins: Occurrence in wood tissues isolation reactions and structure. In: (Ed.). **Wood structure and composition**, 1991.

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

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**, v. 42, n. 104, 2014.

CONTE, B. M., A. L.; PERTUZZATTI, A.; CADEMARTORI, P. H. G. DE; GATTO, D. A. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretificada de *Pinus elliotti* var. elliotti. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 8, 2014.

COSTA, J. D. A.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: Jatobá (*Hymenaea courbaril*) e Tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Revista Cerne**, v. 17, n. 1, p. 6, 2011.

CREEMERS, J.; DE MEIJER, M.; ZIMMERMANN, T.; SELL, J. Influence of Climatic Factors on the Weathering of Coated Wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 60, n. 6, p. 411-420, 2002. ISSN 0018-3768.

DE PAOLI, M. A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2008. 286.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I. Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: A preliminary study. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 64, n. 3, p. 212-217, 2006. ISSN 0018-3768.

DIRCKX, O.; TRIBOULOT-TROUY, M.; MERLIN, A.; DEGLISE, X. Modifications de la couleur du bois d'Abies grandis exposé à la lumière solaire. **Ann. For. Sci.**, v. 49, n. 5, p. 425-447, 1992.

DUBEY, K.; PANG, S.; WALKER, J. Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of *Pinus radiata* D. Don wood with oil heat-treatment. **Holzforschung**, v. 66, n. 1, p. 8, 2012.

DWSANTO, W.; NORIRNOTO, M.; MOROOKA, T.; TANAKA, F.; INOUE, M.; LIU, Y. Radial compression of sugi wood (*Cryptomeria japonica* D. Don). **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 56, n. 6, p. 403, 1998. ISSN 1436-736X.

ELAIEB, M.; CANDELIER, K.; PÉTRISSANS, A.; DUMARÇAY, S.; GÉRARDIN, P.; PÉTRISSANS, M. Heat treatment of Tunisian soft wood species: Effect on the durability, chemical modifications and mechanical properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 17, p. 699-710, 2015. ISSN 0718-221X.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. Distrito Federal - DF: Embrapa, 2013. 353 ISBN 978-85-7035-198-2.

ESTEVEES, B.; MARQUES, A.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 193-207, 2007. ISSN 0043-7719.

ESTEVEES, B.; NUNES, L.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Comparison between heat treated sapwood and heartwood from *Pinus pinaster*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 1, p. 53-60, 2014/01/01 2014. ISSN 0018-3768.

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

FALKEHAG, S. I.; MARTON, J.; ADLER, E. Chromophores in Kraft Lignin. In: (Ed.). **Lignin Structure and Reactions**: American Chemical Society, v.59, 1966. cap. 7, p.75-89. (Advances in Chemistry). ISBN 0-8412-0060-2.

FEIST, W. C. **Finishing wood for exterior use**. Proceedings 87318 - Finishing Eastern Hardwoods. Iowa: Roy M. Carter - Forest Products Research Society: 185-198 p. 1983.

FEIST, W. C.; HON, D. N. S. Chemistry of Weathering and Protection. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **The Chemistry of Solid Wood, Advances in Chemistry**. Washington: American Chemical Society, 1984. cap. 11, p.401-451.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Berlin: Walter De Gruyter, 1989. 613.

FERREIRA, V. F.; ROCHA, D. R. D.; SILVA, F. D. C. D. Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares. **Química Nova**, v. 32, p. 623-638, 2009.

FIGUEIREDO, R. C. **Modernização de uma câmara calorimétrica para execução de testes climáticos de envelhecimento acelerado**. 2011. 80 p. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

GEORGE, B.; SUTTIE, E.; MERLIN, A.; DEGLISE, X. Photodegradation and photostabilisation of wood – the state of the art. **Polymer Degradation and Stability**, v. 88, n. 2, p. 268-274, 2005. ISSN 0141-3910.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRABNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L. E. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees**, v. 18, n. 1, p. 102-108, 2004. ISSN 1432-2285.

GONÇALEZ, J. C.; BREDA, L. D. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F. D.; VALE, A. T. D. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 12, 2006.

GONÇALEZ, J. C.; FÉLIX, T. L. F.; GOUVEIA, F. N.; CAMARGOS, J. A. A.; RIBEIRO, P. G. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 7, 2010.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. 2008. 131 p. (Tese). Universidade de Brasília, Brasília, DF.

GUNDUZ, G.; AYDEMIR, D.; KARAKAS, G. The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. **Materials & Design**, v. 30, n. 10, p. 4391-4395, 2009. ISSN 0261-3069.

GUNDUZ, G.; AYDEMIR, D.; KORKUT, S. The effect of heat treatment on some mechanical properties and color changes of uludag fir wood. **Drying Technology**, v. 28, n. 2, p. 249-255, ISSN 0737-3937.

HILL, C. A. S. **Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes**. 1st. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. 260 ISBN 0470021721.

HOLMBOM, B. Extractives. In: SJÖSTRÖM, E. A., R. (Ed.). **Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking**. Heidelberg: Springer, 1999. p.125-148 p.

HON, D. Weathering and photochemistry of wood. In: HON, D. e SHIRAIISHI, N. (Ed.). **Wood and Cellulosic Chemistry**. New York: Marcel Dekker, 2001. p.513-546.

HON, D. N. S.; FEIST, W. C. Hydroperoxidation in photoirradiated wood surfaces. **Wood and fiber science**, v. 24, 1992.

IBÁ. **Relatório anual 2016**. São Paulo: 2016. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>.

JOHANSSON, M. **Formation of chromophores and leucochromophores during manufacturing of mechanical pulp**. 2000. (Licentiate Thesis). Royal Institute of Technology, Estocolmo.

KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F.; ČABALOVÁ, I.; ĎURKOVIČ, J. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. **Bioresource Technology**, 2013. ISSN 0960-8524..

KALNINS, M. A.; FEIST, W. C. Increase in wettability of wood with weathering. **Forest Products Journal**, v. 43, n. 2, p. 3, 1993.

KARLSSON, O.; SIDOROVA, E.; MORÉN, T. Influence of heat transferring media on durability of thermally modified wood. **BioResources**, v. 6, n. 1, p. 16, 2011.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da Madeira**. UFPR, 2005.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; DORÉ, G.; YOUNSI, R. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 66, n. 5, p. 355-361, 2008. ISSN 0018-3768.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical Properties of Wood. In: LABORATORY, F. P. (Ed.). **Wood Handbook**. Madison: General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory., 2010. p.508.

LAPIERRE, C. Application of new methods for the investigation of lignin structure. In: (Ed.). **Forage cell wall structure and digestibility**. Madison: American Society for Agronomy, 1993. cap. 133, p.30.

LIMA, C. M.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, T. R. V. D.; PEREIRA, R. S.; LIMA, J. B. M.; LIMA, M. D. S. A. Comportamento da cor de lâminas de madeira de Pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum*) tratada com produtos de acabamento. **Revista Árvore**, v. 37, p. 377-384, 2013. ISSN 0100-6762.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; BOCQUET, J. F.; PETRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevillea robusta* wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 2, p. 401-405, 2008. ISSN 0141-3910.

MENZ. **Menz OHT: The future of wood treatment** 2013.

MESQUITA, R. R. S. **Comportamento das madeiras de curupixá (*Micropholis* sp.) e tauari (*Couratari* sp.) submetidas ao intemperismo artificial com diferentes produtos de acabamento**. 2016. 71 p. (Dissertação). Universidade de Brasília, Brasília, DF.

MILITZ, H. Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art. Enhancing the durability of lumber and engineered wood products, **Forest Products Society**, 2002.

MISSIO, A. L. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* submetida a tratamentos de congelamento e termorreificação**. 2014. 152 (Dissertação). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; DE CADEMARTORI, P. H. G.; GATTO, D. A. Effects of Two-Step Freezing-Heat Treatments on Japanese Raisintree (*Hovenia Dulcis* Thunb.) Wood Properties. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 36, n. 1, p. 16-26, 2016. ISSN 0277-3813.

MORAIS, S. A. L. **Contribuição ao estudo químico e espectroscópico da lignina de madeira moída do *Eucalyptus grandis*: Isolamento, quantificação e análise estrutural**. 1992. 260 p. (Tese). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MORAIS, S. A. L. D.; NASCIMENTO, E. A. D.; MELO, D. C. D. Chemical analysis of *Pinus oocarpa* wood part I: quantification of macromolecular components and volatile extractives. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005. ISSN 0100-6762.

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

OLSSON, T.; MEGNIS, M.; VARNA, J.; LINDBERG, H. Measurement of the uptake of linseed oil in pine by the use of an X-ray microdensitometry technique. **Journal of Wood Science**, v. 47, n. 4, p. 275-281, 2001. ISSN 1435-0211.

OWEN, J. A.; OWEN, N. L.; FEIST, W. C. Scanning electron microscope and infrared studies of weathering in Southern pine. **Journal of Molecular Structure**, v. 300, p. 105-114, 1993. ISSN 0022-2860.

PANDEY, K. K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 71, n. 12, p. 1969-1975, 1999. ISSN 1097-4628.

PASTORE, T. C. M. **Estudos do efeito da radiação ultravioleta em madeiras por espectroscopias raman (ft-raman), de refletância difusa no infravermelho (drift) e no visível (cie-1*a*b*)**. 2004. (Tese) Universidade de Brasília, Brasília.

PASTORE, T. C. M.; OLIVEIRA, C. C. K. D.; RUBIM, J. C.; SANTOS, K. D. O. Efeito do intemperismo artificial em quatro madeiras tropicais monitorado por espectroscopia de infravermelho (DRIFT). **Química Nova**, v. 31, p. 2071-2075, 2008. ISSN 0100-4042.

PERTUZZATTI, A. **Influência dos tratamento termomecânicos na madeira**. 2015. 97 p. (Dissertação). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

PFRIEM, A.; BUCHELT, B.; ZAUER, M.; WAGENFÜHR, A. Comparative analysis of thermally modified and native spruce loaded perpendicular to the grain. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 68, n. 3, p. 267-270, 2010. ISSN 0018-3768.

PHUONG, L.; SHIDA, S.; SAITO, Y. Effects of heat treatment on brittleness of *Styrax tonkinensis* wood. **Journal of Wood Science**, v. 53, n. 3, p. 181-186, 2007. ISSN 1435-0211.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of thermal rectification on colors of *Eucalyptus saligna* and *Pinus caribaea* woods. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 14, n. 2, p. 239-248, 2012.

PLATO. The Plato Technology. p. 2, 2009. Disponível em: <<http://www.platowood.nl/afbeeldingen/Infobladen/Engels/The%20Plato%20Technology.pdf>>

RAMOS, L. P. The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. **Química Nova**, v. 26, p. 863-871, 2003. ISSN 0100-4042.

RETIWOOD. Retiwood: retified wood process. 2013. Disponível em: <<http://www.retiwood.com/en/processes.html>>.

ROWELL, R. M.; IBACH, R. E.; MCSWEENEY, J.; NILSSON, T. Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood. **Wood Material Science & Engineering**, v. 4, n. 1-2, p. 14-22, 2009. ISSN 1748-0272.

RUBEM, É. G. **Estudo da ação do intemperismo natural e artificial nos componentes químicos do lenho de três espécies madeireiras da amazônia por espectroscopia de infravermelho próximo (FT-NIR)**. 2014. 89 p (Dissertação). Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM.

SALIBA, E. D. O. S.; RODRIGUEZ, N. M.; MORAIS, S. A. L. D.; PILÓ-VELOSO, D. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, v. 31, p. 917-928, 2001. ISSN 0103-8478.

SALIM, R.; ASHAARI, Z.; SAMSI, H. W.; WAHAB, R.; ALAMJURI, R. H. Effect of Oil Heat Treatment on Physical properties of Semantan Bamboo (*Gigantochloa scortechinii Gamble*). **Modern Applied Science** v. 4, n. 2, p. 107-113, 2010.

SHARRATT, V.; HILL, C. A. S.; ZAIHAN, J.; KINT, D. P. R. Photodegradation and weathering effects on timber surface moisture profiles as studied using dynamic vapour sorption. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 12, p. 2659-2662, 2010. ISSN 0141-3910.

_____. The influence of photodegradation and weathering on the water vapour sorption kinetic behaviour of scots pine earlywood and latewood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 96, n. 7, p. 1210-1218, 2011. ISSN 0141-3910..

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest products and wood science: an introduction**. 6 ed. 2011.

SILVA, J. O. E.; PASTORE, T. C. M. Fotodecomposição e proteção de madeiras tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 11, n. 2, p. 7, 2004.

SILVA, J. O. E.; PASTORE, T. C. M.; JUNIOR, F. P. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 7, 2006.

SILVA, M. R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalipo citriodora* e *Pinus taeda***. 2012. 223 (Tese). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and application**. London: Academic Press, 1993.

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**, v. 32, n. 4, p. 304-316, 2012. ISSN 0277-3813.

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 2004. 154 (Tese). Division of Wood Material Science, Lulea University of Technology, Skelleftea.

SWEET, M. S.; WINANDY, J. E. Influence of degree of polymerization of cellulose and hemicellulose on strength loss in fire-retardant-treated southern Pine. **Holzforschung**, v. 53, n. 3, p. 311-317, 1999.

TAJVIDI, M.; TAKEMURA, A. Thermal Degradation of Natural Fiber-reinforced Polypropylene Composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, 2009 .

TELES, R. F.; COSTA, A. F. Influência do Intemperismo Acelerado nas Propriedades Colorimétricas da Madeira de Angelim Pedra. **Revista Nativa**, v. 2, n. 2, p. 5, 2014.

TEMIZ, A.; TERZIEV, N.; EIKENES, M.; HAFREN, J. Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood. **Applied Surface Science**, v. 253, n. 12, p. 5355-5362, 2007. ISSN 0169-4332.

TEMIZ, A.; YILDIZ, U. C.; AYDIN, I.; EIKENES, M.; ALFREDSEN, G.; ÇOLAKOĞLU, G. Surface roughness and color characteristics of wood treated with preservatives after accelerated weathering test. **Applied Surface Science**, v. 250, n. 1-4, p. 35-42, 2005. ISSN 0169-4332. .

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**, v. 56, p. 149-153, 1998. ISSN 0018-3768, 1436-736X.

TODOROVIC, N.; POPOVIC, Z.; MILIC, G.; POPADIC, R. Estimation of heat-treated beechwood properties by color change. **BioResources**, v. 7, n. 1, p. 799-815, 2012.

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

TOLVAJ, L.; NEMETH, R.; PASZTORY, Z.; BEJO, L.; TAKATS, P. **Colour Stability of Thermally Modified Wood during Short-Term Photodegradation**. 2014. ISBN 1930-2126.

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

VARGA, D.; VAN DER ZEE, M. E. Influence of steaming on selected wood properties of four hardwood species. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 66, n. 1, p. 11, 2007. ISSN 1436-736X.

WINANDY, J. E.; LEBOW, P. K. Modeling strength loss in wood by chemical composition. PartI. An individual component model for southern pine. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 2, p. 239 - 254, 2001.

YAO, J.; TAYLOR, F. Effect of high-temperature drying on the strength of southern pine dimension lumber. **Forest products journal**, v. 29, n. 8, p. 3, 1979.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, v. 41, n. 12, p. 1762-1766, 2006. ISSN 0360-1323.

YILDIZ, S.; GÜMÜŞKAYA, E. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 5, 2007.

YILDIZ, S.; TOMAK, E. D.; YILDIZ, U. C.; USTAOMER, D. Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 8, p. 1419-1427, 2013. ISSN 0141-3910.

YILDIZ, S.; YILDIZ, U. C.; TOMAK, E. D. The effects of natural weathering on the properties of heat-treated alder wood. **BioResources**, v. 6, n. 3, 2011.

APÊNDICES

Apêndice A – Análise de variância fatorial para módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) em razão dos fatores temperatura e tempo para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Eucalyptus grandis</i>					
MOR (kgf/cm ²)	Temperatura (A)	3	1.250.467,26	416.822,42	16,67*
	Tempo (B)	3	38.052,31	12.684,10	0,51 ^{ns}
	A x B	9	48.967,32	5.440,81	0,22 ^{ns}
	Resíduo	64	1.599.861,34	24.997,83	-
MOE (kgf/cm ²)	Temperatura (A)	3	1,22 x 10 ⁹	4,08 x 10 ⁸	1,82 ^{ns}
	Tempo (B)	3	2,80 x 10 ⁸	9,32 x 10 ⁷	0,42 ^{ns}
	A x B	9	1,79 x 10 ⁹	1,99 x 10 ⁸	0,87 ^{ns}
	Resíduo	64	1,44 x 10 ¹⁰	2,24 x 10 ⁸	-
<i>Pinus Elliottii</i>					
MOR (kgf/cm ²)	Temperatura (A)	3	104.244,43	34.748,14	1,53 ^{ns}
	Tempo (B)	3	45.226,11	15.075,37	0,66 ^{ns}
	A x B	9	196.749,27	21.861,03	0,96 ^{ns}
	Resíduo	64	1.449.962,56	22.655,66	-
MOE (kgf/cm ²)	Temperatura (A)	3	2,29 x 10 ⁸	7,64 x 10 ⁷	0,20 ^{ns}
	Tempo (B)	3	1,04 x 10 ⁹	3,47 x 10 ⁸	0,89 ^{ns}
	A x B	9	3,96 x 10 ⁹	4,40 x 10 ⁸	1,13 ^{ns}
	Resíduo	64	2,48 x 10 ¹⁰	3,88 x 10 ⁸	-

Em que: FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrado médio; F = F calculado; ^{ns} = Não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * = Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Apêndice B – Análise de variância fatorial para teor de umidade de equilíbrio (T_{Ue}) e massa específica básica (ρ_b) em razão dos fatores temperatura e tempo para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Eucalyptus grandis</i>					
T _{Ue} (%)	Temperatura (A)	3	477,09	159,03	2715,27*
	Tempo (B)	3	2,34	0,7800	13,32*
	A x B	9	13,27	1,47	25,18*
	Resíduo	64	3,75	0,0586	-
ρ_b (g/cm ³)	Temperatura (A)	3	0,0314	0,0105	4,59*
	Tempo (B)	3	0,0045	0,0015	0,66 ^{ns}
	A x B	9	0,0154	0,0017	0,75 ^{ns}
	Resíduo	64	0,1457	0,0023	-
<i>Pinus Elliottii</i>					
T _{Ue} (%)	Temperatura (A)	3	258,54	86,18	82,80*
	Tempo (B)	3	23,12	7,71	7,41*
	A x B	9	28,28	3,14	3,02*
	Resíduo	61	63,49	1,04	-
ρ_b (g/cm ³)	Temperatura (A)	3	0,9788	0,3263	102,34*
	Tempo (B)	3	0,0186	0,0062	1,95 ^{ns}
	A x B	9	0,0256	0,0028	0,89 ^{ns}
	Resíduo	61	0,1945	0,0032	-

Em que: FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrado médio; F = F calculado; ^{ns} = Não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * = Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Apêndice C – Análise de variância fatorial para inchamento tangencial (αT), inchamento radial (αR), inchamento longitudinal (αL) e variação volumétrica (ΔV) em razão dos fatores temperatura e tempo para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	F
<i>Eucalyptus grandis</i>					
αT (%)	Temperatura (A)	3	276,49	92,16	97,44*
	Tempo (B)	3	1,03	0,3423	0,36 ^{ns}
	A x B	9	15,62	1,73	1,83 ^{ns}
	Resíduo	64	60,53	0,9458	-
αR (%)	Temperatura (A)	3	85,45	28,48	12,54*
	Tempo (B)	3	5,41	1,80	0,79 ^{ns}
	A x B	9	25,35	2,82	1,24 ^{ns}
	Resíduo	64	145,35	2,27	-
αL (%)	Temperatura (A)	3	1,27	0,4224	57,58*
	Tempo (B)	3	0,0663	0,0221	3,02*
	A x B	9	0,1417	0,0157	2,15*
	Resíduo	64	0,4694	0,0073	-
ΔV (%)	Temperatura (A)	3	797,51	265,84	84,20*
	Tempo (B)	3	8,17	2,72	0,86 ^{ns}
	A x B	9	39,81	4,42	1,40 ^{ns}
	Resíduo	64	202,07	3,16	-
<i>Pinus Elliottii</i>					
αT (%)	Temperatura (A)	3	56,80	18,93	37,35*
	Tempo (B)	3	3,03	1,01	1,99 ^{ns}
	A x B	9	6,66	0,7400	1,46 ^{ns}
	Resíduo	61	30,92	0,5068	-
αR (%)	Temperatura (A)	3	32,76	10,92	17,07*
	Tempo (B)	3	4,89	1,63	2,55 ^{ns}
	A x B	9	4,79	0,5326	0,83 ^{ns}
	Resíduo	61	39,03	0,6399	-
αL (%)	Temperatura (A)	3	1,42	0,4739	68,96*
	Tempo (B)	3	0,0031	0,0010	0,15 ^{ns}
	A x B	9	0,1439	0,0160	2,33*
	Resíduo	61	0,4192	0,0069	-
ΔV (%)	Temperatura (A)	3	232,90	77,63	39,53*
	Tempo (B)	3	16,97	5,65	2,88*
	A x B	9	13,93	1,55	0,79 ^{ns}
	Resíduo	61	119,78	1,96	-

Em que: FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrado médio; F = F calculado; ^{ns} = Não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * = Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Apêndice D – Resumo estatístico dos parâmetros colorimétricos luminosidade (L*); coordenada cromática verde-vermelho (a*); coordenada cromática azul-amarelo (b*); cromaticidade (C*) e ângulo de tinta (h°) para madeira de *Eucalyptus grandis*.

Propriedade	Tempo	Temperatura (°C)			
		20	150	180	210
L*	0	66,57 ^{±2,07}	44,49 ^{±2,28}	35,45 ^{±3,12}	23,95 ^{±0,55}
	20	53,20 ^{±1,60}	37,85 ^{±2,42}	31,64 ^{±2,45}	25,46 ^{±0,99}
	40	53,90 ^{±5,72}	43,51 ^{±2,66}	37,11 ^{±1,70}	28,16 ^{±2,04}
	60	55,77 ^{±6,46}	44,72 ^{±3,80}	39,52 ^{±4,53}	31,32 ^{±2,45}
a*	0	13,65 ^{±0,74}	18,22 ^{±1,10}	14,26 ^{±1,40}	4,11 ^{±1,03}
	20	11,71 ^{±1,24}	19,10 ^{±1,55}	13,91 ^{±1,81}	5,86 ^{±1,30}
	40	9,25 ^{±3,28}	12,44 ^{±2,09}	13,94 ^{±1,79}	5,43 ^{±0,75}
	60	7,48 ^{±2,47}	10,35 ^{±2,36}	10,99 ^{±2,22}	4,71 ^{±0,69}
b*	0	21,91 ^{±0,34}	23,17 ^{±2,25}	15,67 ^{±2,11}	3,21 ^{±0,70}
	20	17,20 ^{±0,66}	20,41 ^{±1,92}	14,13 ^{±2,80}	5,24 ^{±1,09}
	40	14,89 ^{±4,23}	15,80 ^{±2,39}	16,03 ^{±1,82}	6,26 ^{±1,22}
	60	13,77 ^{±4,57}	12,88 ^{±2,92}	13,56 ^{±2,98}	6,15 ^{±1,14}
C*	0	25,82 ^{±0,63}	29,48 ^{±2,39}	21,21 ^{±2,27}	5,22 ^{±1,23}
	20	20,82 ^{±1,15}	27,97 ^{±2,13}	19,84 ^{±3,25}	7,87 ^{±1,65}
	40	17,54 ^{±5,31}	20,13 ^{±3,03}	21,26 ^{±2,37}	8,29 ^{±1,37}
	60	15,68 ^{±5,17}	16,57 ^{±3,55}	17,50 ^{±3,46}	7,75 ^{±1,27}
h°	0	58,10 ^{±1,13}	51,73 ^{±1,46}	47,56 ^{±3,13}	38,36 ^{±2,56}
	20	55,84 ^{±2,21}	46,85 ^{±2,54}	45,13 ^{±2,25}	41,93 ^{±2,74}
	40	58,64 ^{±2,37}	51,81 ^{±2,82}	49,03 ^{±2,55}	48,77 ^{±2,92}
	60	61,37 ^{±1,98}	51,08 ^{±4,33}	50,85 ^{±5,01}	52,32 ^{±2,90}

Em que: Média^{±desvio padrão}.

Apêndice E – Resumo estatístico dos parâmetros colorimétricos luminosidade (L*); coordenada cromática verde-vermelho (a*); coordenada cromática azul-amarelo (b*); cromaticidade (C*) e ângulo de tinta (h°) para madeira de *Pinus elliottii*.

Propriedade	Tempo	Temperatura (°C)			
		20	150	180	210
L*	0	79,55 ^{±4,32}	58,48 ^{±8,37}	48,25 ^{±6,41}	33,62 ^{±7,64}
	20	63,36 ^{±4,16}	45,15 ^{±11,59}	44,12 ^{±9,56}	34,10 ^{±6,10}
	40	64,36 ^{±4,64}	54,01 ^{±10,48}	52,92 ^{±6,38}	35,95 ^{±7,10}
	60	56,54 ^{±4,21}	43,95 ^{±5,51}	52,29 ^{±5,24}	52,85 ^{±9,51}
a*	0	3,64 ^{±1,31}	8,21 ^{±6,39}	13,47 ^{±3,12}	9,53 ^{±2,23}
	20	10,35 ^{±1,92}	14,03 ^{±4,59}	14,07 ^{±3,49}	11,60 ^{±3,55}
	40	9,04 ^{±1,96}	11,43 ^{±4,72}	12,66 ^{±3,70}	10,29 ^{±3,36}
	60	12,79 ^{±1,93}	13,25 ^{±1,74}	11,55 ^{±2,35}	7,68 ^{±2,48}
b*	0	19,26 ^{±2,12}	30,24 ^{±5,74}	30,18 ^{±5,30}	14,18 ^{±8,89}
	20	32,78 ^{±1,87}	31,34 ^{±12,97}	27,87 ^{±9,10}	17,34 ^{±8,22}
	40	25,24 ^{±4,87}	26,10 ^{±4,42}	27,81 ^{±3,51}	14,61 ^{±6,67}
	60	32,68 ^{±2,17}	24,33 ^{±5,01}	25,09 ^{±4,03}	16,82 ^{±4,26}
C*	0	19,62 ^{±2,28}	31,76 ^{±6,63}	33,16 ^{±4,45}	17,44 ^{±8,39}
	20	34,40 ^{±2,30}	34,62 ^{±12,94}	31,61 ^{±8,22}	21,01 ^{±8,57}
	40	26,81 ^{±5,23}	28,69 ^{±5,41}	30,64 ^{±4,48}	18,07 ^{±6,92}
	60	35,11 ^{±2,65}	27,75 ^{±5,04}	27,69 ^{±4,22}	18,55 ^{±4,69}
h°	0	79,49 ^{±3,05}	76,03 ^{±10,09}	65,76 ^{±4,95}	52,35 ^{±11,21}
	20	72,58 ^{±2,25}	64,56 ^{±8,12}	61,08 ^{±11,66}	53,73 ^{±8,34}
	40	70,36 ^{±1,00}	67,11 ^{±7,40}	65,98 ^{±4,76}	53,07 ^{±9,17}
	60	68,63 ^{±1,96}	61,05 ^{±3,39}	65,21 ^{±3,98}	65,61 ^{±4,94}

Em que: Média^{±desvio padrão}.