

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO EM FORNO À VÁCUO E REATOR SOBRE PROPRIEDADES MECÂNICAS E COLORIMÉTRICAS DA MADEIRA DE TRÊS ESPÉCIES FLORESTAIS.

Estudante: Meghan Furtado Guerra – 09/0126351

Orientador: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi – Universidade de Brasília

Coorientadora: Morwenna Spear – Bangor University

Projeto de pesquisa apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Brasília-DF, dezembro de 2015.

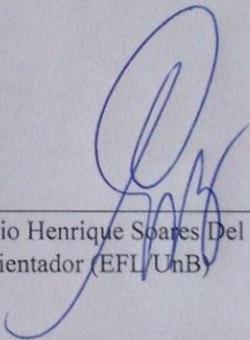
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO EM FORNO À VÁCUO E
REATOR SOBRE PROPRIEDADES MECÂNICAS E COLORIMÉTRICAS
DA MADEIRA DE TRÊS ESPÉCIES FLORESTAIS.

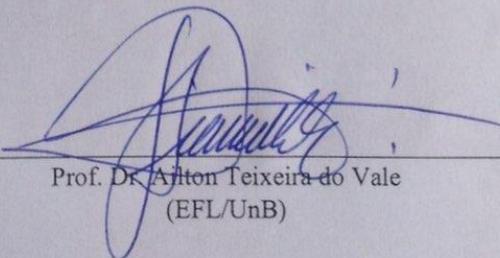
Aluna: Meghan Furtado Guerra
Matrícula: 09/0126351

Menção: SS

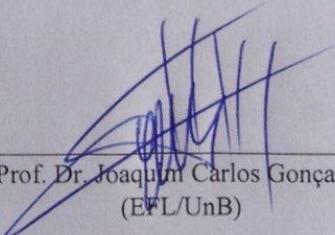
Aprovada por:



Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi
Orientador (EFL/UnB)



Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale
(EFL/UnB)



Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez
(EFL/UnB)

Sumário

RESUMO.....	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO.....	3
2 OBJETIVO	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Espécies Trabalhadas	5
3.1.1 <i>Fagus sylvatica</i>	5
3.1.2 <i>Pinus caribaea</i>	5
3.1.3 <i>Sterculia speciosa</i>	6
3.2 Propriedades Mecânicas da Madeira	6
3.3 Colorimetria aplicada à Madeira	7
3.4 Tratamento Térmico na Madeira.....	9
3.4.1 Tratamento térmico sob características mecânicas da madeira	12
3.4.2 Tratamento térmico sobre características colorimétricas da madeira	14
4 MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 Local de execução do experimento e espécies trabalhadas	16
4.2 Confeção dos corpos de prova para ensaios mecânicos	16
4.3 Confeção dos corpos de prova para ensaios colorimétricos.....	18
4.4 Tratamentos nos corpos de prova para ensaios mecânicos	18
4.5 Tratamentos nos corpos de prova para ensaios colorimétricos.....	21
4.6 Acondicionamento	21
4.7 Testes Mecânicos	21
4.8 Medição de cor	23
4.9 Análise Estatística.....	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1 Propriedades mecânicas	25
5.1.1 Flexão Estática	25
5.1.2 Dureza Janka.....	29
5.2 Colorimetria.....	34
6 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS	42

Lista de Figuras

Figura 1: Distribuição das variáveis colorimétricas no Sistema CIELab 1976.	9
Figura 2: A: mostras tratadas em forno à vácuo (300 x 20 x 20mm) e amostra tratadas em reator (150 x 20 x 20mm). B: Subamostra (50 x 20 x 20mm) retirada de ambas as amostras anteriores. C: Amostra para teste colorimétrico (70 x 15 x 70 mm) após tratamento em reator.	17
Figura 3: A: Forno à vácuo com as amostras sendo colocadas. B: forno à vácuo com o controlador de pressão interna ao lado. C: Cesta a ser colocada no dentro do cilindro para impedir o contato direto das amostras com a água. D: Reator desmontado com a peça de aquecimento, o cilindro que recebe as amostras e as peças de encaixe. E: Reator montado. F: sala de climatização.	20
Figura 4: A: Máquina Instron em execução de teste de flexão estática. B: Máquina Instron em execução de teste de dureza Janka.	22
Figura 5: Gráficos dos módulos de ruptura e elasticidade representando cada tratamento realizado nas espécies juntamente com a condição controle. FV120°C = Tratamento Forno à Vácuo a 120°C; FV140°C = Tratamento Forno à Vácuo a 140°C; FV160°C = Tratamento Forno à Vácuo 160°C. Letras distintas indicam diferença significativa entre médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância.	26
Figura 6: Gráficos de dureza Janka radial e tangencial e gráfico de densidade representando cada tratamento realizado por espécie juntamente com a condição controle. FV120°C=Tratamento Forno à Vácuo a 120°C; FV140°C=Tratamento Forno à Vácuo a 140°C; FV160°C= Tratamento Forno à Vácuo a 160°C; RE120°C = Tratamento Reator a 120°C e RE140°C = Tratamento Reator a 140°C. Letras distintas indicam diferença significativa entre as médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância.	30
Figura 7: Comparação entre métodos e entre temperaturas do tratamento térmico para <i>Fagus Sylvania</i> . Asterisco (*) indica diferença significativa entre as médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância, enquanto NS significa não significativo.	32
Figura 8: Comparação entre métodos e entre temperaturas do tratamento térmico para <i>Pinus caribaea</i> . Asterisco (*) indica diferença significativa entre as médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância, enquanto NS significa não significativo.	34
Figura 9: Gráficos de modificação de tonalidades e luminosidade por espécie. As setas indicam a modificação de cor mostrando o ponto inicial (cor antes do tratamento) até o ponto indicado pela seta (cor após tratamento).	39
Figura 10: Variação total de cor (ΔE) obtido através das variações de luminosidade e coordenadas cromáticas.	40

Lista de Tabelas

Tabela 1: Desenho experimental para o teste de propriedades mecânicas realizado.....	18
Tabela 2: Desenho experimental do teste de propriedades colorimétricas realizado.....	21
Tabela 3: Valores médios das variáveis colorimétricas ao final de cada tratamento para as 3 espécies estudadas.....	35
Tabela 4: Variação colorimétrica das espécies por tratamento.	36

RESUMO

A madeira é um material de uso amplo e de características variáveis dependendo da espécie e condições de crescimento, portanto, estudos de caracterização são muito importantes para entender o comportamento de cada espécie sob determinadas condições. O tratamento térmico vem sendo bastante utilizado para modificar as características físicas da madeira, pois é um método eficiente e de baixo impacto ambiental pois não produz externalidades negativas.

Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico e colorimétrico de diferentes espécies tratadas termicamente em condições brandas de tempo e temperatura de tratamento, com um máximo de 160°C e média de 2h de tratamento, sob condições úmidas (tratamento em reator) e secas (tratamento em forno à vácuo). Sendo as espécies: *Fagus sylvatica* L., espécie folhosa de clima temperado; *Pinus caribaea* Morelet, espécie conífera de clima tropical e *Sterculia speciosa* K. Schum., espécie folhosa de clima temperado.

Os resultados mostraram que a presença de umidade no tratamento térmico em geral degrada mais a madeira causando a redução das propriedades mecânicas e maiores variações colorimétricas da madeira. Já para o tratamento sem umidade os resultados mostram que a madeira pode ter ganho nas propriedades mecânicas dependendo da espécie e apresenta variações colorimétricas mais suaves.

Esse resultado se torna importante por ser inovador, ao aumentar as propriedades mecânicas da madeira após interferência térmica. Foi mostrado que não é necessário alto gasto energético para atingir altas temperaturas ou manter o tratamento por muitas horas, o tratamento térmico brando pode ser eficiente para determinadas espécies. No entanto, mais estudos são necessários para um melhor entendimento na melhoria nas propriedades mecânicas e para avaliar se as melhorias em durabilidade e estabilidade dimensional, garantidas pelos tratamentos térmicos, também são alcançadas com o tratamento térmico brando.

Palavras chave: Madeira, Tratamento Térmico, Propriedades Mecânicas, Colorimetria.

ABSTRACT

Wood is a material largely used with variable properties depending of the specie and growing conditions, therefore characterization studies are very important to understand the conduct of each specie under determinate conditions. Thermal treatments are commonly used for wood modification, being an efficient treatment with low environmental impact, since it does not produce waste on the environment.

This study had the main objective to evaluate mechanical and colorimetric properties in different species being thermally treated in mild conditions of time and temperature, with a maximum of 160°C and an average of 2h of treatment, with presence of humidity (treatment in paar reactor) as well as the absence of humidity (treatment in vacuum oven). With the species: *Fagus sylvatica* L., hardwood natural from temperate weather, *Pinus caribaea* Morelet, softwood natural from tropical weather and *Sterculia speciosa* K. Schum., hardwood natural from tropical weather.

The results show that humidity on the thermal treatment in general, makes the treatment stiffer reducing the mechanical characteristics and causing more variability in colour change. For the treatments in absence of humidity, the results show that wood can have an increase of the mechanical strength depending of the specie and presents softer colorimetric variations.

The result it is important for being innovator, because increased the mechanical properties of wood after thermal interference. It was demonstrated that is not necessary a high energy expenditure to achieve or maintain high temperature treatment for many hours, mild treatments can be efficient for some species. However, more studies are needed for a better understanding on the mechanical improvement, and to evaluate if the dimensional stability as well as durability improvements, guaranteed in the thermal treatment, are also achieved in mild thermal treatments.

Key words: Wood, Thermal Treatment, Mechanical Properties, Colorimetry.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material bastante versátil amplamente utilizado na construção civil, movelaria, produção de celulose, energia e outros. Para cada uso final da madeira é requerido características de rigidez, resistência, densidade, estabilidade dimensional, padrões de cor, trabalhabilidade e outros. A madeira é um material que se difere muito entre outras matérias-primas e também se difere dentre as espécies. Com essa ampla variabilidade de suas propriedades são necessários estudos diversos para entender o material e designar utilizações mais eficientes.

Devido à crescente procura de um material mais sustentável que possa substituir metal, cimento e até o petróleo a utilização da madeira vem ganhando novos mercados. Stangerlin *et al.* (2008) ressaltam que para a avaliação do uso de uma madeira se faz necessário o conhecimento de suas propriedades físico-mecânicas, para, poder comparar com outras madeiras de propriedades conhecidas. Portanto, o conhecimento das características da madeira se faz através de ensaios em laboratórios testando suas propriedades físico-mecânicas simulando situações reais.

Para algumas aplicações da matéria-prima madeira, é necessário o melhoramento de suas propriedades via tratamentos, seja em altas temperaturas, com produtos químicos, umidade e outros métodos. Destacando-se o tratamento térmico, o mais antigo e barato método de modificação das características na madeira e tem sido bem popular na última década sendo bastante desenvolvido, principalmente na Europa (MBURU *et al.*, 2008). Os mesmos autores dizem que além de ser mais barato, o tratamento à base de altas temperaturas é sustentável porque não produz subprodutos poluentes ao meio ambiente. Só em 2014 a ThermoWood, uma das maiores empresas de modificação térmica de madeira, tratou 145.733m³ de madeira, sendo *Pinus* o principal gênero tratado.

Há um certo consenso entre autores de que o tratamento térmico tende a melhorar a estabilidade dimensional e resistência biológica a micro-organismos na madeira, já para às propriedades mecânicas, pode ocorrer uma redução da resistência, deixando a madeira mais frágil (BOONSTRA *et al.*, 2007b).

Para entender o efeito de qualquer tratamento na madeira necessita-se entender sua constituição química. A celulose é o constituinte químico da madeira geralmente menos afetado pelo tratamento térmico (TJEERDSMA; MILITZ, 2005). Sendo sua presença de suma importância para a característica de resistência mecânica na madeira, sua não

degradação ajuda a manter a resistência após interferências térmicas. Enquanto que a hemicelulose é o componente mais degradado termicamente (TJEERDSMA *et al.*, 1998).

Novos estudos estão sendo elaborados nesse campo com o intuito de desenvolver técnicas com um ponto ótimo de tempo e temperatura no tratamento térmico, onde ocorra melhoria das características físicas sem redução das propriedades mecânicas na madeira. Assim o uso industrial de tratamentos térmicos se torna viável para o melhoramento da qualidade da madeira ao agregar valor em seus diversos produtos comerciais finais.

Vernois (2000) em seu estudo sobre tratamentos térmicos esclarece que o tratamento com temperaturas variando de 180°C a 250°C vem sendo bastante estudado em toda a Europa com o objetivo principal de reduzir o comportamento hidrofóbico da madeira e a variabilidade anisotrópica tridimensional. O autor cita como principais fatores influentes durante o tratamento térmico, que devem ser controlados, atmosfera, temperatura, tempo, espécie, dimensões das peças e umidade inicial da peça. Assim, o objetivo final é encontrar um balanço entre ganho de estabilidade dimensional e preservação da madeira com um mínimo de perda das características mecânicas

Usualmente os parâmetros anatômicos, físicos e químicos são mais utilizados para sua caracterização tecnológica, no entanto, existem outros fatores importantes para uma caracterização mais detalhada, dentre eles, os aspectos de cor da madeira. Cor é uma característica considerada importante para produtos que serão utilizados em movelaria, assoalho e outras utilizações em interiores (GONÇALEZ *et al.*, 2001). A aparência visual, definida pelas cores e padrões de desenho da madeira, no ponto de vista decorativo, pode definir a escolha do produto, por isso a indústria madeireira começa a ser preocupar com os processos de modificações de cores em seus produtos. É comum que a madeira se torne em geral mais escura após o tratamento térmico. Geralmente quanto mais alta a temperatura mais escura a madeira no final do processo.

Todas essas avaliações da madeira são relevantes para o setor de movelaria, produção de pisos de madeira e outros produtos madeireiros que valorizem a resistência e qualidade de cor da superfície.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar os efeitos do tratamento térmico, sob duas condições de umidade e três condições de temperatura, nas propriedades mecânicas e colorimétricas da madeira. Três espécies florestais foram estudadas: *Fagus sylvatica*, *Pinus caribaea* e *Sterculia speciosa* testando-as mecanicamente em flexão estática e dureza Janka e também quanto as alterações de suas cores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Espécies Trabalhadas

3.1.1 *Fagus sylvatica*

A faia europeia, em inglês, beech (*Fagus sylvatica* L.), da família Fagaceae é nativa do continente Europeu. Lavers (1969) determinou que sob teor de umidade de 50% apresenta densidade de 833 kg/m³ e sob 15% de teor de umidade apresenta densidade de 689 kg/m³. O gênero *Fagus* pode ser utilizado economicamente na produção de movelaria, painéis, caixas de embalagem, cabo de ferramentas e outros (BEKTAS et al., 2001). Bastante utilizada para movelaria, pisos e construção civil, no mercado europeu essa madeira já é comumente tratada termicamente em escala industrial (TURNER et al., 2010).

O tratamento à vapor é frequentemente aplicado à espécie para melhorar estabilidade e permeabilidade da madeira, diminuir estresses de crescimento e tempo de secagem, obtendo uma cor desejável e o amolecimento da madeira (YILGOR et al., 2001).

3.1.2 *Pinus caribaea*

Pinus (*Pinus caribaea* Morelet), da família Pinaceae nativo da América Central e Sul. Shimizu (2006) estudou o *Pinus* na silvicultura brasileira, trazidos dos EUA, América Central, Ilhas Caribenhas e Ásia as espécies de *Pinus* vêm sendo introduzido no Brasil para fins comerciais e ornamentais há mais de um século. *Pinus caribaea* abrange três variações naturais: *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis*, sendo a última um dos *Pinus* tropicais mais plantados no mundo. O melhoramento genético da espécie torna-se essencial visando a maximização da produtividade.

Segundo Lavers (1969) a espécie sob teor de umidade 50% apresenta densidade de 977 kg/m³.

A abrangência de utilização da madeira de *Pinus* torna o gênero cada vez mais importante e demandado no setor florestal brasileiro. Para Klitzke (2002) a secagem da madeira de *Pinus* surgiu na década de 80 com a demanda de produtos de maior valor agregado nas indústrias concentradas ao sul do país.

Uma das barreiras apresentada pelas espécies de *Pinus* tropicais impedindo sua utilização e seu crescimento em área plantada é especialmente a falta de informação de suas propriedades madeireiras, há necessidade de estudos de caracterização tecnológica destas espécies (TRIANOSKI *et al.*, 2013).

3.1.3 *Sterculia speciosa*

O chichá, também conhecido como achichá (*Sterculia speciosa* K. Schum.), da família Malvacea é nativa do Bioma Cerrado brasileiro. Lavers (1969) não estudou *S. speciosa* em si, mas para *Sterculia pruriens*, espécie de mesmo gênero originária da Guiana encontrou-se densidade de 529 kg/m³ a 15% de teor de umidade.

De acordo com Nascimento *et al.* (1997) que classificaram espécies da Amazônia quanto a suas possíveis utilizações, *Sterculia speciosa* pode ser utilizada para assoalhamento, construção leve e embarcações, por isso a importância de se fazer testes mecânicos na espécie.

3.2 Propriedades Mecânicas da Madeira

Segundo Holmberg (2000), as propriedades mecânicas da madeira são influenciadas por diversos fatores intrínsecos da madeira: anatomia, idade da árvore, ângulo da grã, massa específica, falhas da madeira como nós e outros defeitos. Também os fatores do meio externo, por exemplo, teor de umidade, grau de apodrecimento e claro da força aplicada em si bem como a duração da tensão aplicada. Saber as limitações mecânicas da madeira é importante para entender as limitações de seu uso e aplicação.

A flexão estática é uma combinação de tensões: tração, compressão e cisalhamento. Stangerlin *et al.* (2010) destacam o teste de flexão estática dentre os ensaios mecânicos de

avaliação de qualidade da madeira. E ainda explica que a flexão estática se refere a capacidade da madeira de receber uma carga (força) em sua face, com o objetivo de provocar seu flexionamento, assim, até determinado ponto se cessada a carga aplicada a madeira pode retornar ao seu estado original, a partir do momento em que a madeira deixa de ser elástica e passa a ser plástica não retornará ao estado original.

O ensaio de flexão se torna ainda mais importante para madeiras provenientes de plantios comerciais de rápido crescimento, porque tais madeiras são as matérias-primas mais utilizadas no mercado e por serem de rápido crescimento apresentam grande quantidade de lenho juvenil que pode interferir negativamente no módulo de elasticidade em flexão (YANG; EVANS, 2003).

Outro teste bastante utilizado para caracterizar as propriedades mecânicas da madeira é a dureza *Janka*, o teste de dureza de *Janka* é mais utilizado para madeiras enquanto o teste de dureza *Brienell* para materiais sintéticos e metais (BEKTAS *et al.*, 2001). Para ambos os tipos de materiais o teste de dureza é importante, principalmente quando utilizados em pisos e movelaria, pisos que estão sujeitos a arraste de móveis, queda de objetos e pisoteio de diversos tipos solados e salto podem sofrer impactos que o teste de dureza explicita previamente.

O teste de *Janka* mede a força necessária para penetrar uma esfera de ferro de 1cm³, nos sentidos de secção da madeira (HANSSON; ANTTI, 2006). Holmberg (2000) reforça que a dureza é fortemente influenciada pela densidade, teor de umidade da amostra e fortemente pela orientação da grã, devido a quantidade e rigidez das fibras que geralmente são mais baixas quando a carga é aplicada angulada à grã do que paralela.

3.3 Colorimetria aplicada à Madeira

Existem diferentes mercados definidos pela coloração da madeira, por exemplo, enquanto os italianos preferem móveis de madeira escura, os franceses preferem peças mais claras (GOUVEIA, 2008). Da mesma forma cada região tem uma tendência de preferência pela cor da madeira, é importante que o mercado se adapte a essas preferências. Mitsui *et al.* (2001) acrescentam que a alteração artificial da coloração da madeira pode ser um método capaz de aumentar a comercialização de espécies que ainda não são muito procuradas devido à baixa atratividade estética.

Grandes alterações na coloração da madeira durante a secagem não é interessante. No entanto, para algumas espécies a modificação da coloração pode ser interessante para agregar valor e ampliar sua utilização. Além de que a codificação de cor por tintas emite tolueno e xileno nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, assim a coloração por métodos não químicos se torna preferível (KORKUT, 2012).

As diversas aplicações da madeira sejam de uso interior ou exterior expõem o material às ações de intempéries que modificarão suas propriedades, principalmente a cor e a textura (SUDIYANI *et al.*, 1999). No entanto, quando devidamente tratadas antes de serem expostas, a peça em madeira pode preservar sua aparência por mais tempo, com variações menos evidentes (GOUVEIA, 2008).

Gouveia (2008) reafirma a questão da sustentabilidade dos tratamentos térmicos em madeira também para modificações superficiais, eliminando a utilização de produtos químicos tais como vernizes, tintas e *stains*, além de também ser um tratamento econômico e técnico. Já Esteves (2006) e Yildiz *et al.* (2006) afirmaram que a ação desses produtos sintéticos pode ser potencializada em madeiras tratadas termicamente previamente.

A descrição de cores pode sofrer dificuldades por se tratar de uma opinião, que pode seguir padrões estéticos de um grupo maior, mas não existem regras. Gonzalez *et al.* (2001) ainda acrescentam que a descrição de cor não é precisa, principalmente para madeiras tropicais, os métodos mais utilizados (atlas de cor) podem não ser recomendados para pesquisa científica. Para evitar confusões de variabilidade pela subjetividade do observador, a colorimetria se fez necessária, uma forma de quantificar a cor por meio de variáveis numéricas (Gonzalez *et al.*, 2001).

O sistema mais utilizado para medição de cores, o CIELab 1976, mede variáveis colorimétricas L^* , a^* , b^* , h^* e C se baseando em três elementos: luminosidade (L^*), coordenadas cromáticas (a^* e b^*) e saturação (C). Três eixos são estabelecidos: eixo (L^*) de claridade, variando de preto (0%) a branco (100%); eixo (a^*), variando de verde (-a) a vermelho (+a) e o eixo (b^*), variando de azul (-b) a amarelo (+b). Esses três eixos se cruzam formando uma escala tridimensional, onde o ângulo de tinta (h^*) é o ângulo do círculo, derivados dos valores de a^* e b^* . Já a saturação (C) é o desvio a partir do ponto no eixo de luminosidade, quanto mais distante do eixo, mais saturada será a cor. (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001), (Figura 1).

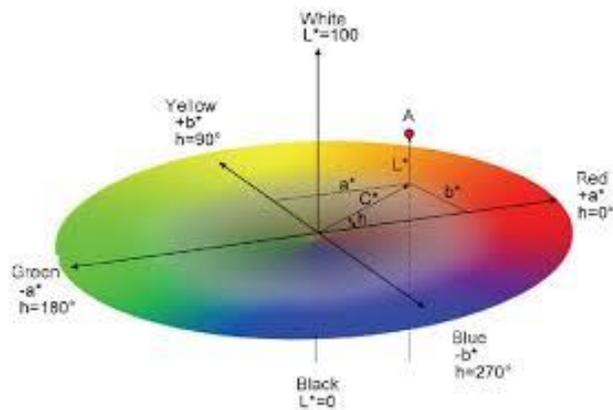


Figura 1: Distribuição das variáveis colorimétricas no Sistema CIELab 1976.

Alguns fatores que podem influenciar a cor da madeira, são os elementos anatômicos, composição química, forma de desdobro da tora, assim como a idade da árvore e fatores relacionados ao meio ambiente (GONÇALEZ *et al.*, 2001). Rappold e Smith (2004) afirmam que as interações químicas entre extrativos fenólicos e enzimas estão relacionadas à cor. Zerbini (2008) e Rappold e Smith (2004) afirmam que os extrativos que mais podem se relacionar com cor são flavonoides, lignanas e os taninos.

Não só as condições intrínsecas determinarão a cor da madeira, mas também diferenciar-se-á pelas condições extrínsecas, as condições do meio. Burtin (1998) cita a alteração de cor pelo teor de umidade da madeira, temperatura, degradação, reações fotoquímicas, fatores ecológicos e silviculturais.

No entanto, a cor não estável na madeira, mas sim, se modifica com a fotodegradação, com a ação do tempo e intemperismo (ROSU, *et al.*, 2010). A mudança de cor pode ser causada por reações derivadas da degradação da madeira (ZERBINI, 2008). Umidade e luz são os principais agentes de contribuição para a degradação natural da madeira (AYADI *et al.*, 2003). Mitsui (2004) reafirma que a degradação da lignina por radiação solar (luz) e chuvas (umidade) é causadora da mudança de coloração.

3.4 Tratamento Térmico na Madeira

O tratamento térmico em madeira é bastante antigo e teve seu interesse renovado recentemente devido à preferência por tratamentos em madeira sem a utilização de produtos químicos e a necessidade de materiais sustentáveis e duráveis (BOONSTRA, 2008).

O tratamento térmico pode inserir no mercado madeiras que antes eram marginalizadas (AZEVEDO, 2006). Por exemplo, espécies madeireiras menos utilizadas como o *poplar*, são tratadas termicamente para poderem competir no mercado com espécies mais procuradas, espécies nobres (WEILAND; GUYONNET, 2003).

A Thermowood, uma das principais empresas que trabalham com modificação térmica de madeira mostra que o consumo desse tratamento vem crescendo exponencialmente desde 2001, em 2014 só essa empresa modificou termicamente 145733m³ de madeira, sendo principalmente madeira de *Pinus* (ThermoWood association).

Segundo Spear *et al.* (2014) madeiras modificadas termicamente estão sendo altamente conhecidas no mercado, preferidas por sua cor realçada, melhora da estabilidade dimensional e durabilidade da peça, o tratamento pode garantir todas essas modificações desejadas. Atualmente o tratamento térmico pode ser utilizado em diversas áreas da tecnologia da madeira, Del Menezzi *et al.* (2008) afirmaram que o tratamento com temperatura vem sendo bastante utilizado para melhorar as propriedades mecânicas também de painéis OSB, e esse assunto vem sendo estudado no Brasil desde 2001, permitindo ao painel de partículas orientadas alcançar novos mercados.

Durlo e Marchiori (1992) afirmaram que a anisotropia e variações dimensionais da madeira são características indesejáveis porque limita drasticamente seu uso para diversas finalidades se essas condições não forem controladas. Boonstra (2007) e Boonstra (2008) afirmam que a modificação térmica é um efetivo meio de melhorar tais características. Por fim Korkut *et al.* (2008) reafirmam que o tratamento térmico é um dos processos de modificação da madeira para melhorar as propriedades naturais como estabilidade dimensional e resistência a biodegradação.

Segundo Tsoumis (1991) a evolução do processo de carbonização é o seguinte: temperaturas acima de 100°C iniciam a evaporação da umidade na madeira, entre 95°C e 150°C substâncias voláteis evaporam, como os extrativos, entre 150°C e 200°C ocorre carbonização superficial com início de degradação de alguns elementos, entre 200°C e 370°C ocorre liberação rápida de gases inflamáveis e o processo de carbonização se sustenta acima de 370°C até 500°C ocorre a formação de carvão vegetal.

A extensão da modificação da madeira no tratamento térmico irá depender do método de tratamento como tempo, atmosfera e temperatura; e das condições da madeira como espécie, teor de umidade e dimensões (Korkut *et al.*, 2008).

Na revisão realizada por Esteves e Pereira (2009) é afirmado que madeiras tratadas termicamente tem grande utilização externa como em decks, móveis de jardim, portal de

janela e revestimento como também na utilização interna em cozinhas, painéis decorativos, assoalhos e saunas.

Para Esteves e Pereira (2009), a perda de massa é uma das mais importantes características no tratamento térmico, frequentemente utilizada como indicador de qualidade. Igualmente importante é a diminuição do teor de umidade de equilíbrio que conseqüentemente diminui a higroscopicidade melhorando a estabilidade dimensional da peça.

Além da perda de massa os tratamentos térmicos modificam a estrutura química da madeira, degradando componentes da parede celular e extrativos, especialmente os mais voláteis. Tais modificações químicas vão depender da temperatura e duração do tratamento (BOURGOIS *et al.*, 1989). A hemicelulose é o primeiro componente a se degradar sob altas temperaturas, provavelmente por sua forma cristalina (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Spear *et al.* (2014) constataram que a utilização do tratamento térmico tem sido amplamente utilizada, mas tipicamente conduzidos em altas temperaturas e por longos períodos de tempo. Na literatura não é comum encontrar modificações térmicas de curta duração, com poucas horas de exposição quanto os realizados neste trabalho, a maioria dos trabalhos sujeita a madeira a aquecimento por 24h (MITSUI, 2004; WEILAND; GUYONNET, 2003).

O tratamento térmico é geralmente realizado sem alteração de atmosfera e sem presença de umidade, mas essas condições podem ser controladas. Recentemente o vácuo foi proposto como uma solução para assegurar a atmosfera inerte durante o processo térmico (ALLEGRETTI *et al.*, 2012; SURINI *et al.*, 2012). A atmosfera inerte impacta diretamente nas reações de termodegradação da madeira resultando em compostos químicos finais diferentes (CANDELIER *et al.*, 2013a), e também indica efeitos limitados quanto ao nível de degradação dos polissacarídeos (CANDELIER *et al.*, 2013b).

Quanto à presença de umidade no tratamento térmico, as principais mudanças ocorridas no tratamento se devem as transformações autocatalíticas que ocorrem com os constituintes na parede celular, hemicelulose, celulose e lignina (TJEERDSMA; MILITZ, 2005). Segundo os mesmos autores que fizeram experimentos dividindo o tratamento em duas fases (úmida e seca), a primeira fase (úmida) do tratamento hidrotermal caracteriza-se por uma despolarização parcial dos componentes da parede celular e na segunda fase (seca) acontece reações de cura onde os produtos serão recondensados. A fase de hidrotermólise mostrou-se mais crítica que a fase seca, afetando tanto a qualidade quanto as propriedades da madeira.

Boonstra (2007) afirma que o processo industrial de tratamentos térmicos em madeira deve ser o tratamento em duas fases. Onde a primeira fase é sob presença de vapor d'água, sendo a fase crítica de modificação de características, porém a segunda fase de aquecimento a seco também é importante e utilizada. Para tratamentos térmicos em condições úmidas ácido carbônico e ácido acético vão ser formados pela quebra da hemicelulose (BOURGOIS *et al.*, 1989). Hemicelulose é despolimerizada em monômeros e oligômeros (cadeia de baixo peso molecular) pelas reações de hidrólise (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006). Íons hidrônios gerados por auto ionização da água podem ser os possíveis catalisadores no estágio inicial da reação, nos estágios posteriores íons hidrônios gerados por auto ionização do ácido acético e outros ácidos se tornam mais importantes como catalisadores (GARROTTE *et al.*, 1999).

Com tais explicações sobre o efeito da atmosfera modificada e presença de umidade nos tratamentos térmicos explica-se a escolha dos dois diferentes métodos de tratamento realizados no trabalho: forno à vácuo (atmosfera inerte) e reator (presença de umidade).

Enquanto a celulose é o componente menos afetado pelo tratamento e a hemicelulose aparenta ser bastante modificada, a lignina pode ser degradada mas pode também ser condensada ou sofrer reações de repolarização (TJEERDSMA *et al.*, 1998). Tal comportamento da hemicelulose pode ser explicado devido ao seu baixo peso molecular e estrutura ramificada (PONCSÁK *et al.*, 2006).

A degradação de hemicelulose vai depender de temperatura, pressão e tempo e principalmente de temperatura e pressão para tratamentos térmicos úmidos (TJEERDSMA; MILITZ, 2005). A presença de água altera a reatividade do sistema principalmente na degradação da hemicelulose que não se altera para tratamento secos de até 180°C (WEILAND; GUYONNET, 1997).

3.4.1 Tratamento térmico sobre propriedades mecânicas da madeira

O principal objetivo do tratamento térmico é aumentar a estabilidade dimensional e resistência contra impregnação de micro-organismos (TIRYAKI; HAMZAÇEBI, 2013), no entanto, observa-se em alguns casos a redução do teor de umidade de equilíbrio e capacidade de absorção de água pela madeira (YILDIZ *et al.*, 2006). Quanto às propriedades mecânicas podem haver reduções em suas características (TJEERDSMA; MILITZ, 2005; BOONSTRA *et al.*, 2007; KORKUT, *et al.*, 2008), dependendo da intensidade do tratamento que pode causar perda de massa e degradação térmica (KORKUT *et al.*, 2008).

Aquecer a madeira em altas temperaturas pode modificar suas características físicas e mecânicas. Geralmente o tratamento térmico em madeira usa temperaturas variando entre 120°C e 250°C com tempo de exposição de 15 minutos a 24 horas, mudanças físicas e químicas começam a ocorrer por volta dos 150°C. Os efeitos positivos ou negativos da temperatura na resistência mecânica vão depender da espécie da madeira e suas características anatômicas juntamente com o procedimento do tratamento utilizado. (KOCAEFE *et al.*, 2010).

De acordo com a revisão da literatura de Esteves e Pereira (2009) o módulo de ruptura tende sempre a diminuir com tratamentos térmicos enquanto que o módulo de elasticidade tende a aumentar levemente para tratamentos mais brandos devido a cristalização de celulose, porém diminui para tratamentos mais severos, já que a redução da higroscopicidade deixa a madeira menos plástica pela falta de umidade. Já Boonstra (2007) afirma que módulo de elasticidade sempre aumenta em madeiras tratadas em temperaturas altas em comparação a madeira não tratada que tem alta rigidez e assumirá menor deslocamento vertical à carga aplicada.

O fator mais contribuinte para a perda de força de flexão é a hemicelulose, degradada no processo térmico. Sua degradação contribui para fraturas abruptas observadas no teste de flexão o rompimento da parede celular de células perpendiculares a fibra, resultando em rupturas transversas, tanto para folhosas quanto coníferas (BOONSTRA, 2007).

Boonstra (2008) avaliou que amostras tratadas em altas temperaturas tem seus rompimentos mais abruptos e maiores enquanto amostras não tratadas tem seus rompimentos mais suaves e graduais. A capacidade de suportar força externa após a falha inicial do processo é menor para madeiras tratadas em calor. Aparentemente após tempo de exposição externa as madeiras tratadas termicamente tendem a manter sua força e resistência, enquanto madeiras não tratadas tendem a diminuir suas características com o tempo.

Bekhta e Niemz (2003) afirmaram que módulo de ruptura em madeiras aquecidas a altas temperaturas diminui entre 44-50%, já o módulo de elasticidade diminui menos, entre 4-9%. Apesar de geralmente a madeira perder resistência mecânica e física com tratamentos térmicos é possível com técnicas diferenciadas limitar a perda de resistência da peça e várias espécies podem ser tratadas sem perda nenhuma de resistência (Korkut *et al.*, 2008). Os mesmos autores afirmam que a estabilidade dimensional pode ser melhorada mesmo para tratamentos térmicos de pouca duração.

Bekhta e Niemz (2003) experimentaram a madeira de Pinus a 200°C e obtiveram resultados de reduções de até 50% para módulo de ruptura. Já Esteves *et al.* (2008) obtiveram redução de 4% quando tratou madeira de Pinus por 2 horas e redução de 38% quando tratou por 12 horas nos resultados de módulo de ruptura, sob temperatura de 180°C, mostrando a interferência do tempo de tratamento nos resultados mecânicos.

Johansson e Morén (2006) estudaram bétula sob tratamento térmico de 200°C por 3 horas e obtiveram 43% de redução nos resultados de módulo de elasticidade. Korkut (2008) identificou para módulo de ruptura e elasticidade (f_m e E_m) 19% e 40% respectivamente de redução para o tratamento de 10 horas a 180°C em espécie do gênero Abies.

É importante ressaltar que para todos esses estudos citados em que f_m e E_m obtiveram significativa redução as temperaturas de tratamento foram sempre superiores a 180°C e a duração do tratamento foi de muitas horas seguidas em sua maioria.

Finalizando, Phuong *et al.* (2007) constataram que a fragilidade da madeira tratada em calor aumenta devido degradação que causa perda de polissacarídeos amorfos. A diminuição do teor de umidade de equilíbrio pode aumentar a resistência mecânica, porém, a degradação química tem efeito superior resultando na diminuição da resistência mecânica (ESTEVEZ; PEREIRA, 2009). Para Winandy e Rowell (2005) durante a degradação térmica a madeira tende a perder resistência mecânica devido a diminuição de componentes como xilose, arabinose e galactose.

3.4.2 Tratamento térmico sobre características colorimétricas da madeira

Uma série de autores como (BEKHTA; NIEMZ, 2003; MITSUI *et al.*, 2001) reportaram que a madeira escurece com aumento do tempo e temperatura do tratamento térmico. Esteves *et al.* (2008b) afirmaram que uma considerável mudança de cor pode ocorrer ainda que pequena a perda de massa (2-4%), mas os efeitos dependerão da intensidade do tratamento e composição química da madeira, os mesmos autores dizem que em ar as alterações de cor são mais altas e rápidas do que em presença de vapor, contradizendo autores que afirmam ser fator importante a umidade para alteração colorimétrica, por exemplo, Boonstra (2007) que afirmou que a mudança ocorrerá principalmente em tratamentos térmicos úmidos, hidro-termólise. Boonstra e Tjeerdsma (2006) afirmam que a coloração de madeira se modifica no tratamento térmico úmido pela caramelização do componente holocelulose.

Ayadi *et al.* (2003) encontraram para *Fraxinus sp.*, *Fagus sylvatica* e *Populus sp.*, o aumento da concentração de compostos fenólicos presentes nas madeiras após as espécies terem sido tratadas termicamente. A tonalidade escura de madeira tratada termicamente se dá pela degradação de hemicelulose (SEHLSTEDT-PERSSON, 2003) e extrativos (SUNDQVIST; MORÉN, 2002). A característica de cor da madeira também é influenciável pelo tratamento térmico.

Stenudd (2004) concluiu num trabalho com a espécie *birch* que a cor pode ser alterada em tratamentos térmicos e de secagem da madeira. Para minimizar essas alterações as indústrias podem diminuir a temperatura de secagem nas estufas, porém, isso pode resultar num aumento de 30% a 40% no tempo de secagem, o que não é interessante economicamente para as empresas. Em outro estudo do mesmo autor, utilizando a espécie *beech*, ele constatou que o aumento da claridade se associa a uma menor cromaticidade e maior matriz, tornando a madeira menos saturada e mais amarelada, como é o *beech*, faia europeia.

Tanto tempo quanto temperatura da secagem da madeira influenciam diretamente nas alterações de cor, a alta temperatura e o tempo estendido na fase crítica de teor de umidade, com o ponto de saturação de fibras até 15%, diminui a claridade e faz da madeira mais avermelhada e saturada (STENUDD, 2004). Outro estudo, avaliando *hard maple* concluiu que a alteração de cor na madeira é mais influenciada pelo tratamento de secagem do que pela idade ou estação do ano em que foi abatida (RAPPOLD; SMITH, 2004). A madeira aquecida em alta temperatura por curto período tem efeito semelhante sobre a cor ao se aquecer a madeira em baixa temperatura por longo período. (PATZELT *et al.*, 2003).

Patzelt *et al.* (2003) encontram para o gênero *Picea* relação direta entre perda de massa e diminuição da matriz e do brilho no corpo de prova. Sugeriram então que a colorimetria poderia ser utilizada como um dos instrumentos de controle de qualidade da madeira em relação à estabilidade dimensional. Os mesmos autores afirmam que a cor pode ser usada como método de classificação para madeiras tratadas em calor porque apresenta forte correlação com perda de massa. Já outros autores como Johansson e Morén (2006) não acreditam que a cor possa ter uma boa correlação com resistência já que a cor não é igualmente modificada na amostra de madeira durante o tratamento térmico.

Por fim, Ayadi *et al.* (2003) estudaram algumas espécies, dentre elas a *Fagus sylvatica* e concluiu a mudança de cor pelo tratamento térmico pode causar um bom impacto para os consumidores, fazendo das peças mais atrativas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de execução do experimento e espécies trabalhadas

Todo o experimento foi realizado no laboratório BioComposites Centre, na Universidade de Bangor, País de Gales- Reino Unido. Seguindo, portanto as normas europeias, britânicas (B5.373:1957).

Foram escolhidas para a realização do trabalho três espécies de madeira. *Fagus sylvatica* L., da família Fagaceae, nativa do centro-sul da Europa, conhecida popularmente em português como ‘faia-europeia’ e em inglês como ‘beech’; *Pinus caribaea* Morelet, da família Pinaceae, nativo da América Central, conhecido popularmente como pinus cubano; e *Sterculia speciosa* K. Schum., da família Malvaceae, nativa do bioma Cerrado brasileiro, popularmente conhecida como xixá, achichá e outras variações.

Para cada espécie foram selecionados três caibros de madeira nas dimensões convencionais de secção retangular de 5x10cm e comprimento de 1m. Para a espécie de *F. sylvatica* o laboratório já possuía a madeira armazenada e para as espécies de *P. caribaea* e *S. speciosa*, através de uma parceria, o departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília doou e enviou três caibros de cada espécie para o laboratório da Universidade de Bangor. Para as madeiras oriundas do Brasil seguindo os procedimentos do laboratório esperou-se uma semana antes de qualquer manuseio de corte para que a madeira pudesse estar em equilíbrio com o ambiente.

4.2 Confeção dos corpos de prova para ensaios mecânicos

Os caibros foram encaminhados para a serraria do laboratório onde as amostras foram confeccionadas. Dois tipos de amostras foram confeccionados por espécie: 300 x 20 x 20 mm e 150 x 20 x 20 mm (radial x tangencial x longitudinal respectivamente) como pode ser visto na figura 2 (A). As amostras com 300mm de comprimento foram destinadas ao tratamento em forno à vácuo (tratamento térmico seco) e teste de flexão estática. Enquanto as amostras de 150mm de comprimento foram destinadas ao tratamento em reator de pressão (tratamento térmico úmido) e teste de dureza *Janka*.

Amostras de 300mm não sofreram tratamento térmico úmido por limitações de tamanho do reator. Todas as amostras de 150mm após serem tratadas foram cortadas em 3

partes iguais de 50mm de comprimento cada para o teste de dureza *Janka*, como pode ser visto na figura 2 (B).

Dessa forma as amostras tratadas em forno à vácuo foram testadas apenas em flexão estática e amostras tratadas em reator seriam testadas apenas em dureza *Janka*. Para tornar o trabalho mais completo com maior nível de comparações fez-se um reaproveitamento das amostras de 300mm após o teste de flexão estática. A região da madeira que sofreu deformação com o teste, foi descartada, enquanto as porções da amostra que se mostravam sem defeitos foram cortadas em amostras de 50mm para também efetuar o teste de dureza *Janka* em madeiras tratadas em forno à vácuo.

Após a confecção dos corpos de prova estes foram lixados para se retirar as imperfeições de corte com serra, de forma a não interferir nos resultados obtidos.

Antes dos tratamentos todas as amostras foram mensuradas com auxílio de paquímetro, sensibilidade de duas casas decimais e balança sensibilidade de quatro casas decimais, em condições ambiente. Tanto para as amostras de 300mm quanto de 150mm estabeleceu-se fazer três medições equidistantes no sentido radial e três no sentido tangencial, para o sentido longitudinal foi considerada a medida de confecção do corpo de prova (300mm e 150mm).

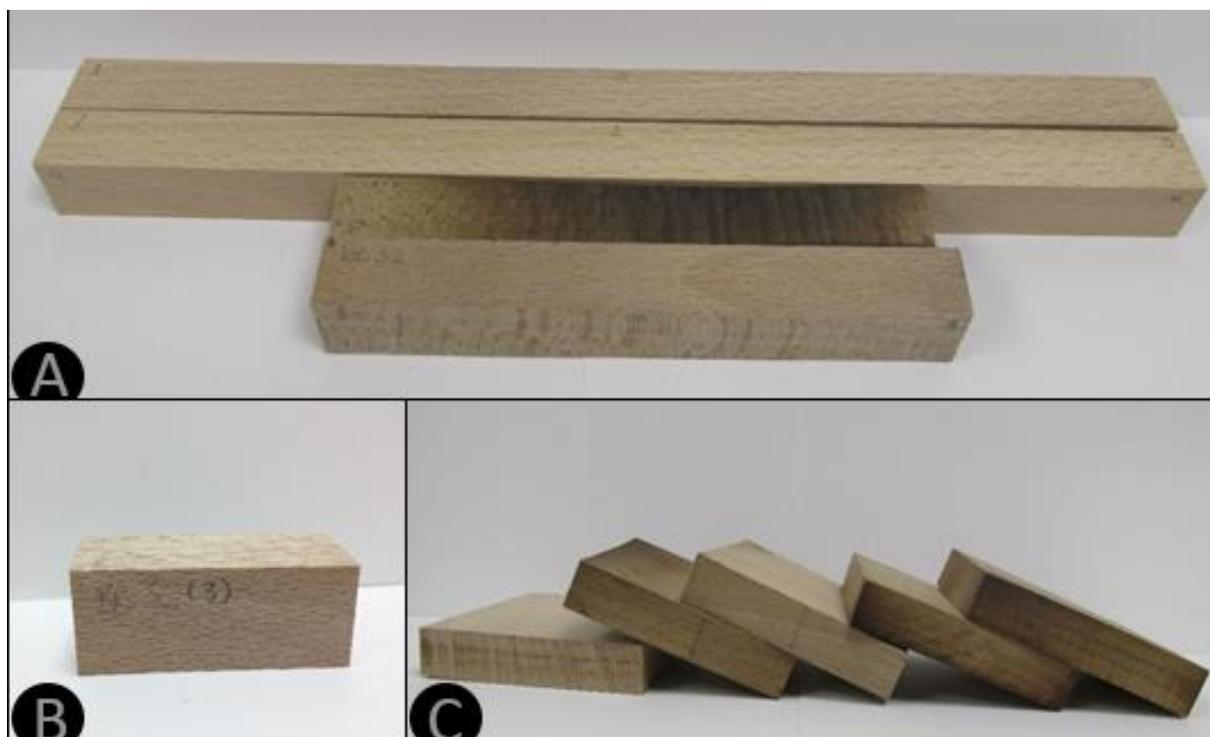


Figura 2: A: mostras tratadas em forno à vácuo (300 x 20 x 20mm) e amostra tratadas em reator (150 x 20 x 20mm). B: Subamostra (50 x 20 x 20mm) retirada de ambas as amostras anteriores. C: Amostra para teste colorimétrico (70 x 15 x 70 mm) após tratamento em reator.

4.3 Confeção dos corpos de prova para ensaios colorimétricos

Na serraria do laboratório da Universidade de Bangor, as amostras para testes colorimétricos foram serradas a 70 x 70 x 15 mm (radial x longitudinal x tangencial respectivamente) como pode ser visto na figura 2 (C). Após o corte as amostras foram lixadas para retirar imperfeições e recuperação da cor natural das espécies.

Após as amostras entrarem em equilíbrio com o ambiente mediu-se as seções longitudinal, radial e tangencial sempre na posição central da seção com auxílio de paquímetro sensibilidade duas casas decimais e pesou-se as amostras em balança sensibilidade quatro casas decimais. Em seguida as amostras foram secas por dois dias, 24h em forno à 50°C e mais 24h em forno a 105°C para se refazer as mesmas mensurações e estimar o teor de umidade de equilíbrio na condição ambiente.

4.4 Tratamentos nos corpos de prova para ensaios mecânicos

Dois técnicas principais foram definidas. Tratamento térmico em no forno à vácuo em três diferentes temperaturas: 120°C, 140°C e 160°C, e tratamento térmico em reator de pressão em duas diferentes temperaturas: 120°C e 140°C, (Tabela 1).

Tabela 1: Desenho experimental para o teste de propriedades mecânicas realizado.

Espécie	Teste	Tratamento	Método	Temperatura	
<i>Fagus sylvatica</i>	Flexão Estática	I	Forno à Vácuo	120°C	
		II	Forno à Vácuo	140°C	
		III	Forno à Vácuo	160°C	
		IV	Controle	-	
	Dureza Janka		I	Forno à Vácuo	120°C
			II	Forno à Vácuo	140°C
			III	Reator	120°C
			IV	Reator	140°C
			V	Controle	-

<i>Pinus caribaea</i>	Flexão Estática	I	Forno à Vácuo	120°C
		II	Forno à Vácuo	140°C
		III	Forno à Vácuo	160°C
		IV	Controle	-
	Dureza Janka	I	Forno à Vácuo	120°C
II		Forno à Vácuo	140°C	
III		Reator	120°C	
IV		Reator	140°C	
V		Controle	-	
<i>Sterculia speciosa</i>	Flexão Estática	I	Forno à Vácuo	140°C
		II	Forno à Vácuo	160°C
		III	Controle	-
	Dureza Janka	I	Forno à Vácuo	140°C
II		Forno à Vácuo	160°C	
III		Controle	-	

Devido ao número reduzido de amostras disponíveis da espécie *S. speciosa* o tratamento em reator e a temperatura mais baixa de 120°C em forno à vácuo não foram realizadas.

Para o forno à vácuo a logística do tratamento era ligar o forno, esperar o aquecimento até a temperatura desejada para só então adicionar as amostras e ligar o vácuo estabelecendo a pressão interna em 500mbar. As amostras ficavam em forno sob as condições de temperatura e pressão determinadas por 2 horas. A pressão interna era então desligada para equilibrar com a pressão externa e ser possível abrir o forno para retirar as amostras (Figura 3 A-B).

Para o reator, adicionava-se 300ml de água destilada em seu interior com as amostras acima numa cesta de metal sem contato com a água. Como o reator não pode ser aberto no meio do processo, as amostras eram colocadas com este desligado, programava-se a temperatura desejada e a partir da temperatura desejada, contava-se 1 hora até desligá-lo. Portanto, o tempo médio total do tratamento era 45 minutos de aquecimento, mais 1 hora na temperatura desejada e mais 1 hora resfriando, para só então as amostras serem retiradas do reator, totalizando 2h45min de tratamento (Figura 3 C-E).

Os tempos de tratamento foram estabelecidos pela experiência do laboratório com a intenção de se realizar tratamentos mais curtos do que se realiza geralmente na maioria dos estudos.



Figura 3: A: Forno à vácuo com as amostras sendo colocadas. B: forno à vácuo com o controlador de pressão interna ao lado. C: Cesta a ser colocada no dentro do cilindro para impedir o contato direto das amostras com a água. D: Reator desmontado com a peça de aquecimento, o cilindro que recebe as amostras e as peças de encaixe. E: Reator montado. F: sala de climatização.

4.5 Tratamentos nos corpos de prova para ensaios colorimétricos

Seguiu-se as mesmas condições de tratamentos para as amostras de teste colorimétrico. No entanto, com a quantidade maior de amostras disponíveis foi possível realizar todos os tratamentos, com todas as temperaturas, para as três espécies (Tabela 2).

Tabela 2: Desenho experimental do teste de propriedades colorimétricas realizado.

Espécie	Tratamento	Método	Temperatura
<i>Fagus sylvatica</i>	I	Forno à Vácuo	120°C
	II	Forno à Vácuo	140°C
	III	Reator	120°C
	IV	Reator	140°C
	V	Controle	-
<i>Pinus caribaea</i>	I	Forno à Vácuo	120°C
	II	Forno à Vácuo	140°C
	III	Reator	120°C
	IV	Reator	140°C
	V	Controle	-
<i>Sterculia speciosa</i>	I	Forno à Vácuo	120°C
	II	Forno à Vácuo	140°C
	III	Reator	120°C
	IV	Reator	140°C
	V	Controle	-

4.6 Acondicionamento

Todas as amostras foram acondicionadas em sala de climatização regulada a 20°C e 60% de teor de umidade por duas semanas antes de realizar os testes, (Figura 3 F). Seguindo os procedimentos do laboratório duas semanas de aclimação é suficiente para amostras pequenas que entram na sala de aclimação numa média de 12% de teor de umidade. As amostras foram pesadas e medidas antes do teste.

4.7 Testes Mecânicos

O teste de flexão (Figura 4 A) foi realizado nas amostras sob tratamento térmico seco e controle, utilizando a máquina universal de ensaios mecânicos Instron seguindo a norma europeia B5.373:1957. O vão entre apoios de amostra é definido em 280mm e a carga é aplicada na região central do corpo de prova, posicionado-o radialmente, com os anéis de crescimento em sentido vertical. Seguindo os procedimentos do laboratório essa posição

radial do corpo de prova se explica porque se a amostra fosse posicionada tangencialmente a variação dos resultados seria muito grande pois dependeria do lenho (juvenil ou adulto) que estaria recebendo a carga de acordo com corte da amostra. A carga quando aplicada em lenho juvenil teria resultados diferentes de carga aplicada em lenho tardio, isso quando em amostras pequenas de 20x20mm resulta em grandes variações de resultados. Para contornar essa grande variabilidade que só poderia ser evitada com a classificação dos corpos de prova dependendo do lenho de crescimento exposto a carga, o corpo de prova costuma ser posicionado radialmente, assim a carga é igualmente distribuída entre os lenhos juvenis e adultos.

Para avaliação da flexão estática foram utilizados os valores de módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade (E_m), com 10 repetições para cada tratamento.

O teste de dureza *Janka* (Figura 4 B) foi realizado com amostras de ambos tratamentos térmico seco e à vapor, além da condição controle. O teste *Janka* foi realizado na máquina Instron seguindo a norma europeia B5.373:1957, tanto em sentido radial como tangencial. No caso de fratura completa da amostra no primeiro sentido do teste o segundo sentido ficava inviabilizado.

Para avaliação da dureza foi utilizado a força máxima necessária para introduzir meia esfera de 1cm³ de volume nos sentidos da amostra, com número de repetições variando entre 15 e 35 pois dependia do grau de aproveitamento das amostras já testadas em flexão.



Figura 4: A: Máquina Instron em execução de teste de flexão estática. B: Máquina Instron em execução de teste de dureza Janka.

4.8 Medição de cor

Foi utilizado para medição de cor um espectrofotômetro Datacolor Check II Plus, empregando-se o sistema CIELAB 1976, criado pela Comissão Internacioanl de Iluminantes. O aparelho era calibrado todos os dias antes de ser utilizado. As medições foram realizadas na face radial da peça. Para maior precisão e evitar erros de amostragem, cada corpo de prova teve sua cor medida em quatro pontos diferentes, optando-se pelos quatro cantos da amostra, assim o aparelho fazia uma média das quatro leituras e lançava os valores médios de L^* , a^* e b^* para cada peça. No teste colorimétrico cada corpo de prova foi seu próprio controle pois a cor foi medida antes de qualquer interferência de tratamentos e após os tratamentos para avaliar a variação.

A partir das variáveis obtidas, foi possível calcular cromaticidade (C) e ângulo de tinta (h^*) seguindo o sistema CIELAB 1976, utilizando-se as equações:

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$h^* = tg^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (\text{Equação 2})$$

Como método auxiliar de avaliação das alterações de cor da madeira, utilizou-se a variação total da cor (ΔE) dada pela equação:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo ΔL , Δa e Δb as variações das medições antes e depois do tratamento.

4.9 Análise Estatística

Para análise dos dados do experimento foi utilizado o pacote estatístico SPSS 20.0.

Para o teste mecânico foi realizada ANOVA de um fator, seguida do pós teste de Tukey admitindo-se 5% de significância. O teste de Tukey comparou as médias de tratamento e controle sempre aos pares, quando houve tratamentos com mais de um fator aplicou-se também a análise multivariada fatorial dois por dois.

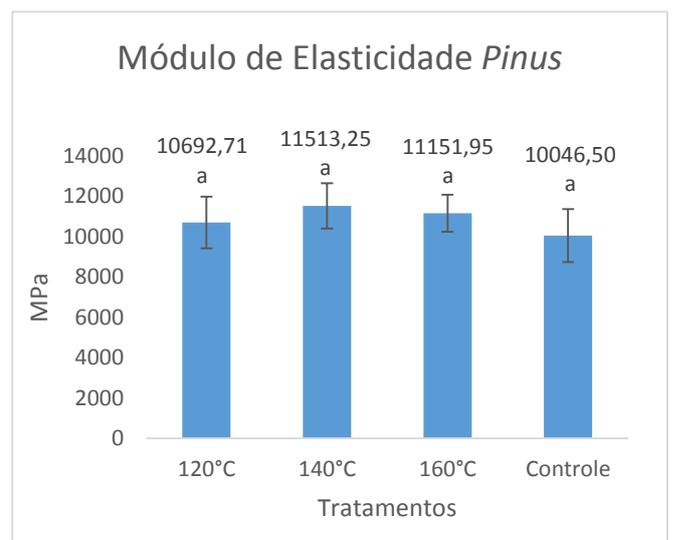
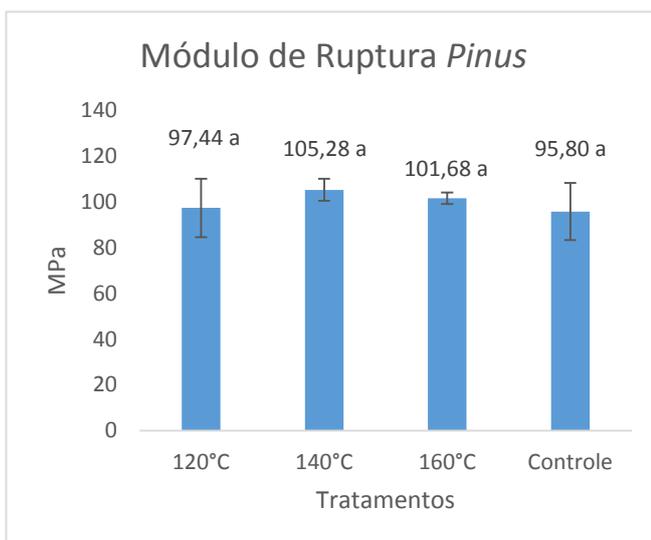
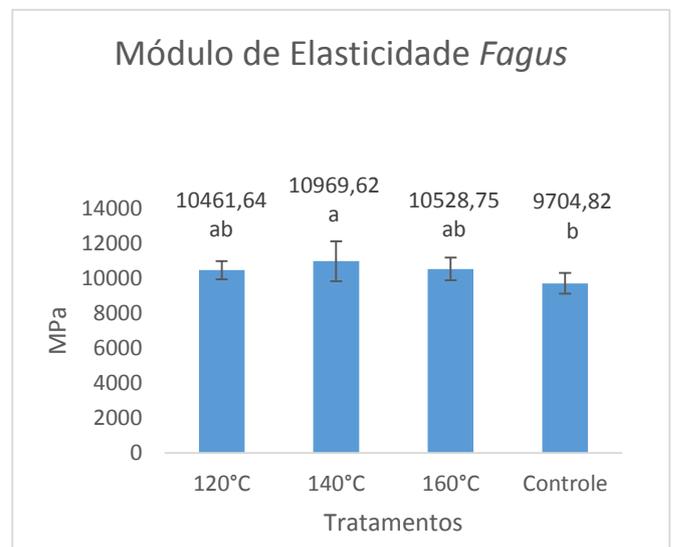
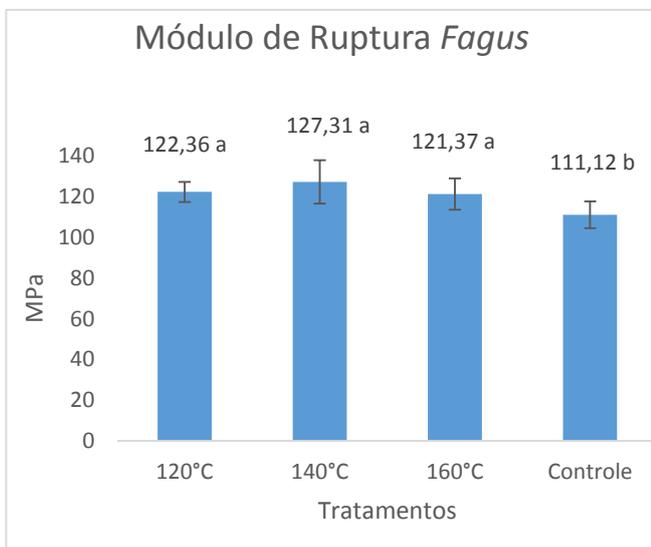
Para o teste colorimétrico foi realizada ANOVA de um fator, seguida de teste t pareado onde cada amostra foi seu próprio controle com a medição anterior ao tratamento, admitindo-se 5% de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades mecânicas

5.1.1 Flexão Estática

Para o teste de flexão estática as amostras foram testadas apenas em forno à vácuo. *Fagus* e *Pinus* sob as temperaturas de 120°C, 140°C e 160°C e *Sterculia* sob as temperaturas 140°C e 160°C (pois não havia amostras suficientes para todos os tratamentos), durante 2 horas de tratamento. Resultados do teste mecânico apresentados na figura 5.



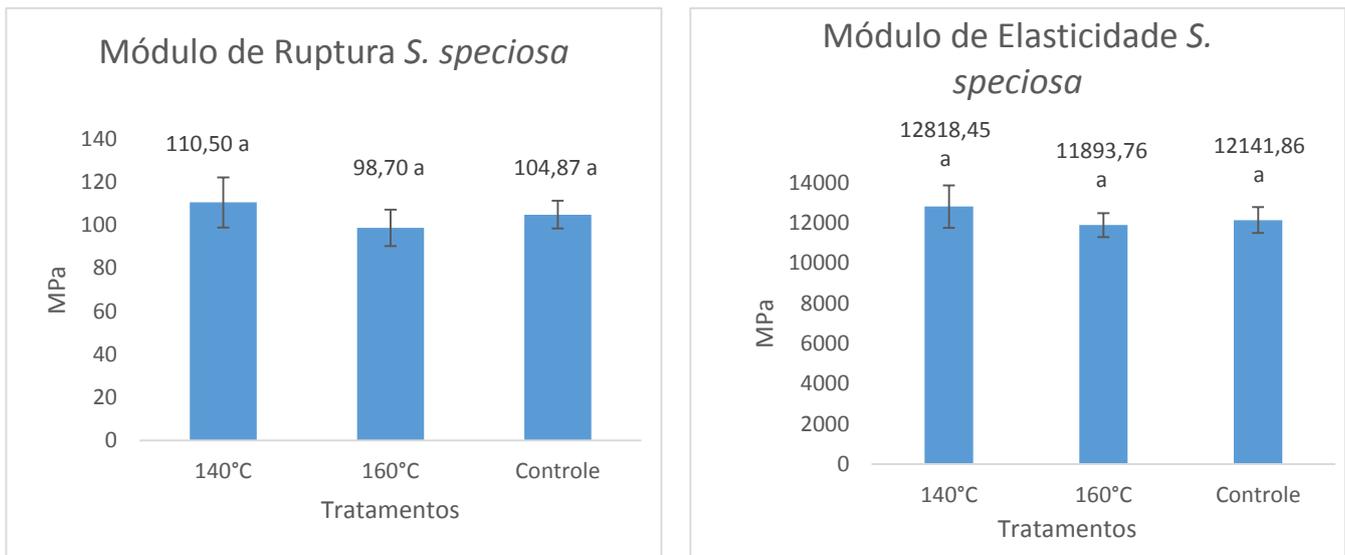


Figura 5: Gráficos dos módulos de ruptura e elasticidade representando cada tratamento realizado nas espécies juntamente com a condição controle. FV120°C = Tratamento Forno à Vácuo a 120°C; FV140°C = Tratamento Forno à Vácuo a 140°C; FV160°C = Tratamento Forno à Vácuo 160°C. Letras distintas indicam diferença significativa entre médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância.

A madeira de *Pinus* apresenta os menores valores de ruptura e elasticidade, em conformidade com as madeiras de coníferas, *Fagus* apresenta os maiores valores para módulo de ruptura, enquanto *Sterculia* apresenta os maiores valores para módulo de elasticidade.

Para *F. sylvatica* o teste estatístico ANOVA identificou diferença significativa para a propriedade de módulo de ruptura em todos os tratamentos comparados com controle, mas os tratamentos não foram diferentes entre si. Já para a propriedade de módulo de elasticidade apenas o tratamento sob temperatura de 140°C, com 10969,92Mpa, foi estatisticamente diferente de controle.

Os resultados significativos de *Fagus* para fm (módulo de ruptura) e Em (módulo de elasticidade) foram superiores em amostras tratadas termicamente. Apesar de muitos estudos indicarem ocorrer decréscimo das propriedades mecânica em madeiras tratadas termicamente Vernois (2000) ressalta que, os resultados vão depender da espécie estudada, as propriedades mecânicas tratadas sob temperaturas de até 210°C podem permanecer com valores próximos aos originais das testemunhas.

Para as espécies de *Pinus* e *Sterculia* a situação controle é preferível para o uso da madeira, pois não houve diferença significativa, mas o tratamento térmico ainda pode ser utilizado com objetivo de melhorar a estabilidade dimensional e degradação da madeira, de forma que dentro das temperaturas avaliados a resistência mecânica não será reduzida. Santos *et al.* (2012) afirmaram que propriedades mecânicas de madeira de baixa densidade como as

coníferas podem ser melhoradas com a combinação de tratamentos térmicos, químicos e compressão da madeira. Os mesmos autores encontraram pequeno aumento das propriedades mecânicas para madeiras tratadas termo-mecanicamente, porém, sem diferença estatística, o mesmo ocorreu neste trabalho.

É recomendado para *Fagus* o tratamento de menor custo energético (120°C) já que não houve diferença entre as temperaturas para módulo de ruptura, no entanto, se o objetivo é melhorar também o módulo de elasticidade, recomenda-se o tratamento a 140°C, única temperatura que se diferenciou do controle.

É importante ressaltar que os resultados encontrados de melhor qualidade mecânica em madeira tratada podem ser relacionados com o tratamento brando aplicado, com baixas temperaturas (máximo de 160°C) e baixa duração de tratamento (máximo de 2h45min). Del Menezzi *et al.* (2008), por exemplo, encontraram para tratamento de painel OSB em baixa duração (12 minutos) que as características de estabilidade foram melhoradas enquanto que as características mecânicas não diferiram do controle. Pode ser observado que para todas as espécies os resultados de flexão estática foram superiores no tratamento a 140°C do que em 160°C onde começa a reduzir os resultados, mostrando que tratamento a 160°C confere maior degradação de componentes da madeira do que tratamento a 140°C, dessa forma, tratamento mais brandos podem apresentar resultados melhores quanto às propriedades mecânicas.

Xavier (2013) encontrou menores resistências à ruptura para tratamentos longos (3-4 horas) quando comparados a tratamentos curtos (1-2 horas) evidenciando a importância do tempo de tratamento para os resultados de propriedades mecânicas da madeira.

Ao mesmo tempo Tjeerdsma e Militz (2005) e Tjeerdsma *et al.* (2002) afirmam que o fator que mais influencia no tratamento é a temperatura. Portanto esse não usual aumento da resistência pode ser explicado pela suavidade do tratamento em temperatura e tempo, como se o tratamento fosse interrompido antes de causar extrema deterioração de lignina, celulose e hemicelulose, evitando a redução de resistência da madeira.

Esse aumento de resistência mecânica na madeira tratada pode ser explicado também pela redução do teor de umidade de equilíbrio que ocorre naturalmente em madeiras tratadas termicamente, ou ainda ser explicado por fatores químicos. Boonstra *et al.* (2007) afirmam que essa maior resistência presente no tratamento térmico pode ser explicada pelo aumento de organizada celulose cristalina, causada pela degradação e/ou cristalização da celulose amorfa. Essa celulose cristalina mostra significativa anisotropia, e com uma estrutura bastante rígida pode ser responsável pelo aumento da resistência à compressão

longitudinal. Segundo os mesmos autores outra explicação talvez seja devido a um aumento nas ligações cruzadas da rede polimérica da lignina. A lignina atua como um reforçador das microfibrilas de celulose e o aumento da ligação cruzada do polímero, pode impedir ou limitar o movimento da grã.

Outro exemplo, são os autores Esteves e Pereira (2009) que perceberam que o módulo de elasticidade geralmente aumenta com o aumento da cristalinidade da celulose e com a redução do conteúdo de umidade. Para tanto a cristalinidade prevalece no início do tratamento, mas com a continuidade do tratamento a degradação térmica é superior, levando a redução dessa variável. Portanto, conclui-se que o módulo de elasticidade pode aumentar para tratamentos mais curtos, onde a cristalinidade da celulose ainda se preserva.

Korkut *et al.* (2008) fizeram um experimento semelhante, porém sem alteração de atmosfera com a espécie *Pinus sylvestris* sob as temperaturas 120°C e 150°C. Foi encontrado para 'fm' redução de 0,84% e 11,09% respectivamente e para 'Em' redução de 7,40% e 18,89%. Neste trabalho, foi encontrado resultados contrários onde há aumento dos módulos de ruptura e elasticidade, para 'fm' foi encontrado aumento de 1,71% e 9,89% respectivamente para 120°C e 140°C, e para 'Em' aumento de 6,43% e 14,6%.

Já os autores Kocafe *et al.* (2010) trabalharam com madeira de *Pinus taeda* também encontraram resultados superiores de 'Em' para amostras tratadas termicamente em até 160°C, porém com menor duração de tratamento do que o realizado neste trabalho. Del Menezzi *et al.* (2009) experimentaram pós tratamentos em OSB e afirmaram que a característica de módulo de elasticidade (Em) é mais resistente ao tratamento térmico, ao contrário do módulo de ruptura (fm), o mesmo foi encontrado para *Fagus* e *Sterculia*. Os mesmos autores também encontraram leve aumento em fm e Em perpendicular para amostras tratadas termicamente.

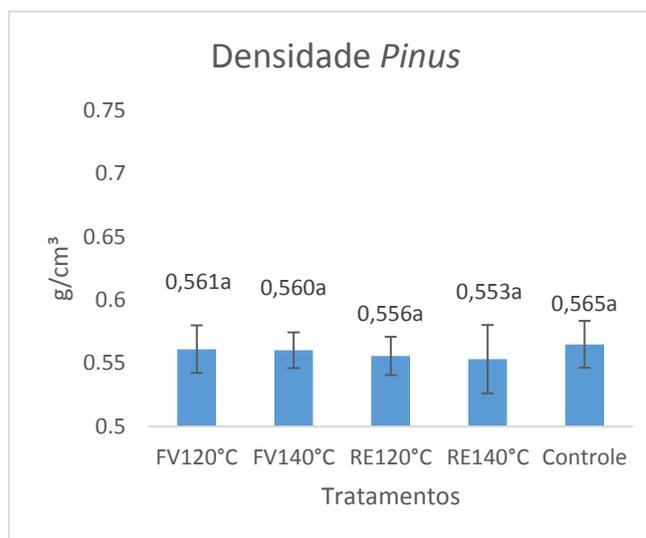
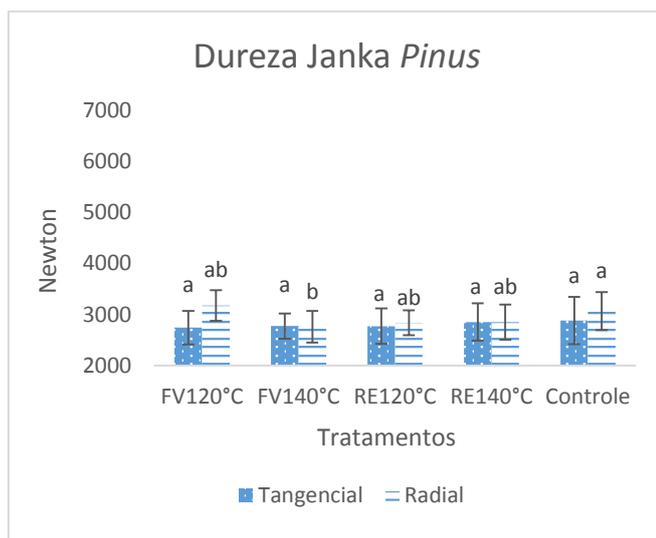
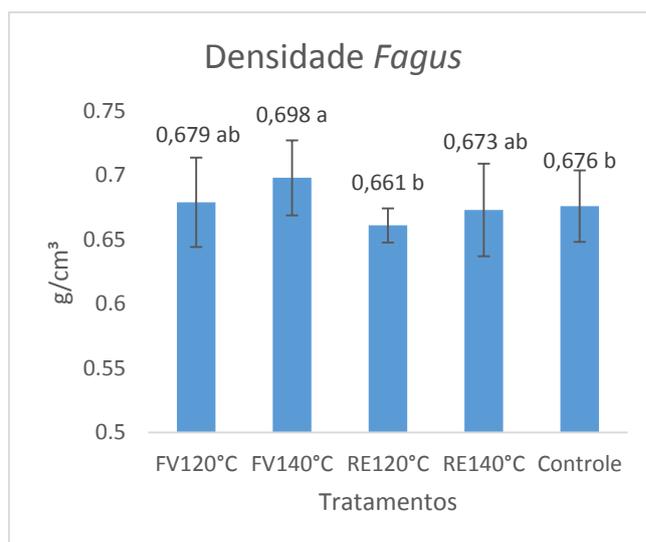
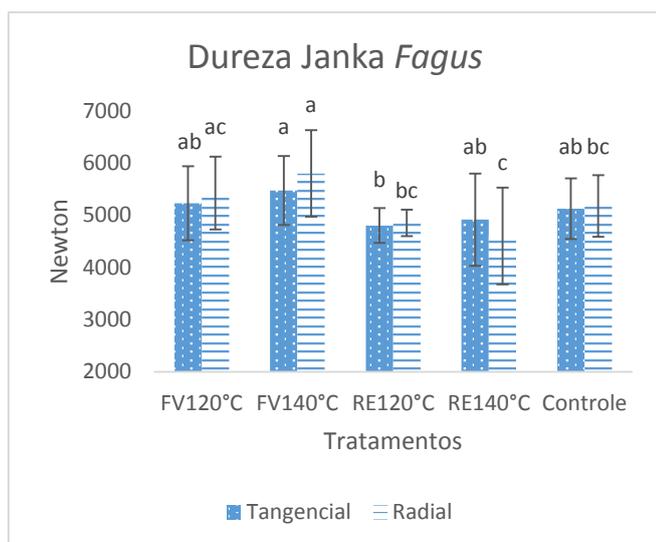
Spear *et al.* (2014) afirmou que tratamento térmicos brandos podem também melhorar a usinagem da madeira reduzindo os defeitos provocados durante o processamento da mesma.

Para a espécie de *Sterculia* o tratamento a 120°C não foi realizado (pois não havia amostras suficientes), porém, seria interessante realizar, pois os valores a 140°C foram superiores ao controle, sem significância. Talvez os valores a 120°C seriam também superiores e significativamente diferentes do controle.

Araújo (2002) encontrou para módulo de ruptura e módulo de elasticidade para *Sterculia speciosa* são respectivamente 90,52Mpa e 13631Mpa, resultados superiores a amostra controle do presente estudo.

5.1.2 Dureza Janka

Para o teste de dureza Janka as amostras foram testadas em forno à vácuo e em reator ambos sob as temperaturas de 120°C e 140°C, exceto a espécie *Sterculia speciosa* que foi tratada apenas em forno à vácuo sob as temperaturas de 140°C e 160°C por falta de corpos de prova. Resultados do teste mecânico apresentados na figura 6.



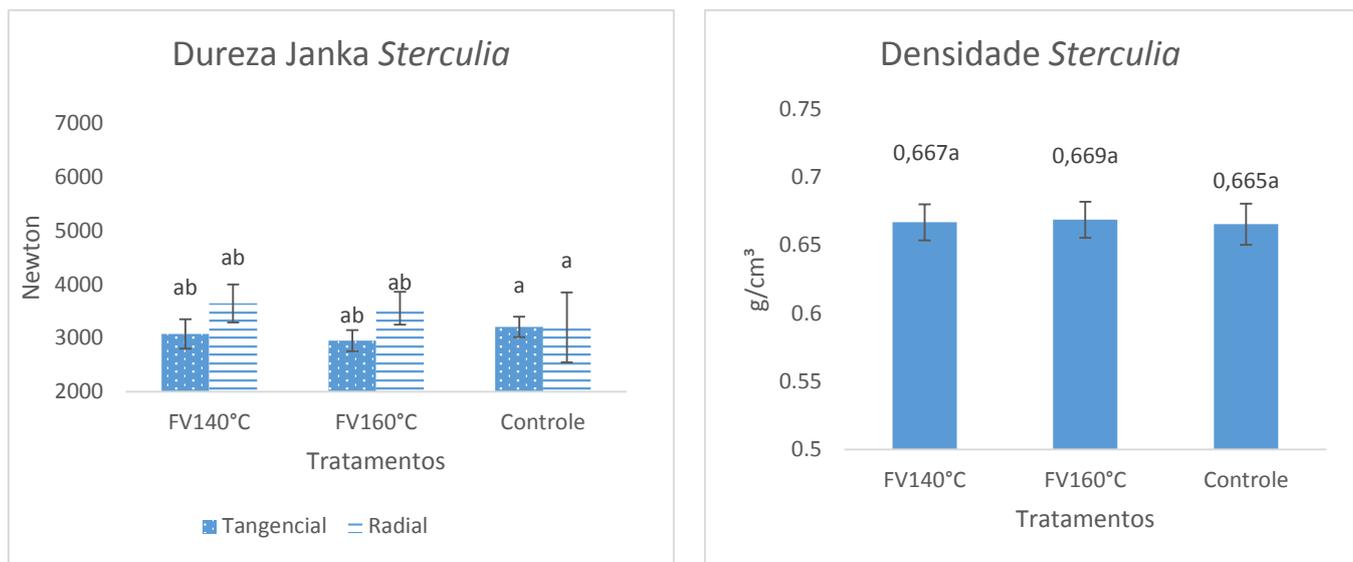


Figura 6: Gráficos de dureza Janka radial e tangencial e gráfico de densidade representando cada tratamento realizado por espécie juntamente com a condição controle. FV120°C=Tratamento Forno à Vácuo a 120°C; FV140°C=Tratamento Forno à Vácuo a 140°C; FV160°C= Tratamento Forno à Vácuo a 160°C; RE120°C = Tratamento Reator a 120°C e RE140°C = Tratamento Reator a 140°C. Letras distintas indicam diferença significativa entre as médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância.

Os resultados de *Fagus sylvatica* são variados dependendo do método de tratamento (forno à vácuo ou reator). As médias se mostram superiores para as amostras tratadas em forno à vácuo quando comparadas com controle, e as médias de amostras tratadas em reator se mostram inferiores quando comparadas com controle. Para dureza tangencial a ANOVA não indica haver diferença significativa entre tratamentos e controle, mas existe diferença entre o tratamento forno à vácuo 140°C (5475,19MPa) e reator 120°C (4804,20MPa). Para dureza radial a ANOVA indica diferença significativa entre os tratamentos em forno à vácuo 140°C (5800,85Mpa) e controle (5176,74MPa) e também houve diferença significativa entre os métodos de tratamento. Para o fator densidade foi encontrada diferença significativa apenas entre tratamento forno à vácuo 140°C (0,698g/cm³) e controle (0,676g/cm³), madeira tratada apresenta densidade superior a madeira controle.

Candelier *et al.* (2013b) encontraram para *F. sylvatica* tratada à vácuo uma redução de 2%, no entanto, foi realizada o teste de dureza *Brinell*. Neste trabalho para Dureza *Janka* a mesma espécie apresentou um aumento máximo de 6,8% no tratamento forno à vácuo 140°C e uma redução máxima de 6,2% no tratamento reator 120°C.

Sobre o decaimento de resistência para tratamento em reator Yilgor *et al.* (2001) estudaram *Fagus orientalis*, e afirmaram que a presença de umidade afetará as propriedades

químicas da madeira desde a temperatura de 80°C e que aparentemente afetará também na resistência da madeira.

Continuando com os resultados da figura 6 é possível perceber que os resultados médios de dureza e densidade, para *Pinus caribaea*, não seguem uma tendência clara onde um método se mostra mais eficiente que outro. Para a dureza tangencial a ANOVA não indicou nenhuma diferença significativa. Para dureza radial ANOVA indicou diferença entre tratamento em forno à vácuo 140°C (2759,88MPa) e controle (3067,83MPa), no entanto, diferente do que aconteceu com *Fagus*, o resultado do tratamento térmico foi inferior ao resultado de controle. Para densidade não houve diferença significativa entre tratamentos e controle.

Korkut *et al.* (2008) testaram *Pinus sylvestris* em diferentes temperaturas e tempo de exposição, e concluíram que quanto maior a temperatura e maior o tempo de exposição mais as propriedades tecnológicas da madeira diminuirão. Com outra espécie do mesmo gênero, *Pinus taeda*, os autores Kocaefe *et al.* (2010) encontraram valores de maior dureza para amostras tratadas termicamente, os autores explicam que isso pode ocorrer até temperaturas por volta de 120°C porque a madeira será principalmente secada e não quimicamente modificada, resultado semelhante pode ser encontrado neste trabalho, onde o tratamento em forno à vácuo a 120°C elevou a média de dureza radial. Os mesmos autores constataram que dureza radial foi maior que dureza tangencial após todos os tratamentos, resultado semelhante foi encontrado no presente trabalho, apenas tratamento em reator a 140°C como exceção.

Por último, os resultados da figura 6 mostram que para *Sterculia* os dois únicos tratamentos realizados diferiram do controle, mas não diferiram entre si, para ambos os sentidos de teste de dureza. Os resultados de amostras tratadas foram levemente superiores aos resultados em controle. A densidade não apresentou diferença significativa.

Após o teste estatístico a ANOVA foi realizado pós teste de análise multivariada fatorial dois por dois, para comparar os resultados entre métodos e temperaturas de tratamento. Os resultados da análise multivariado para *Fagus sylvatica* são apresentadas na figura 7.

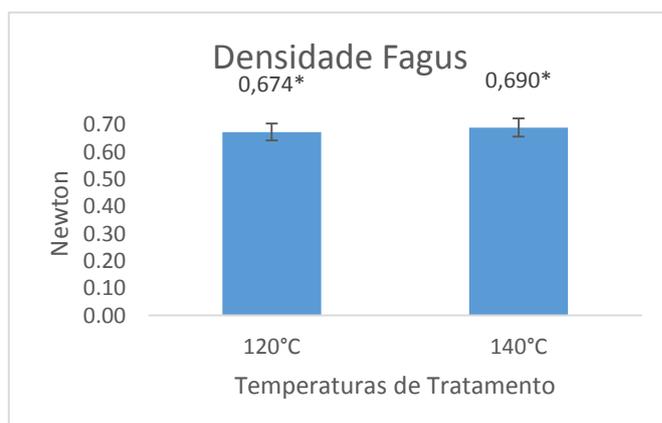
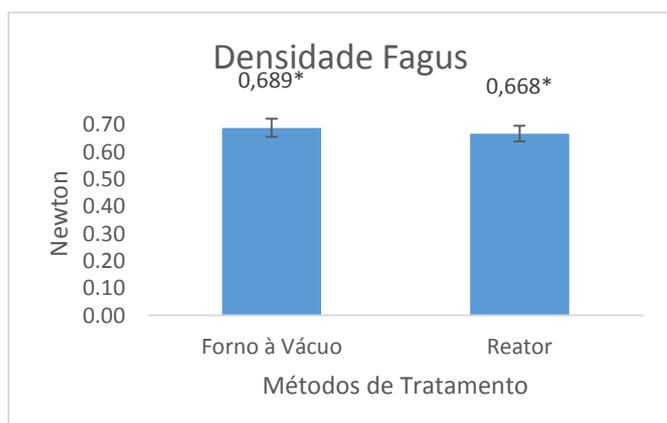
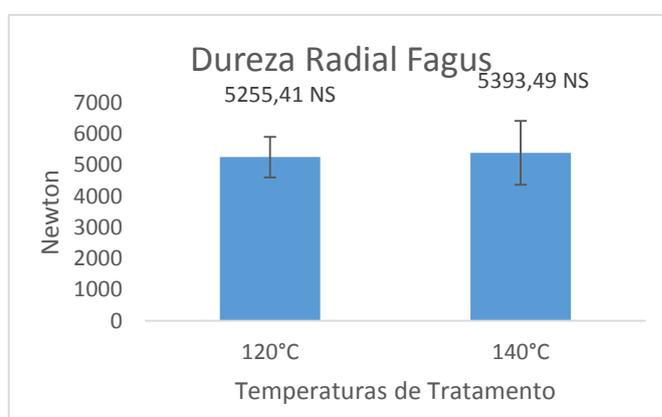
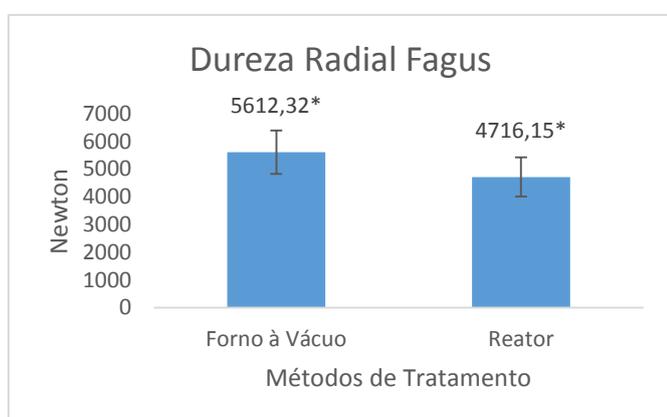
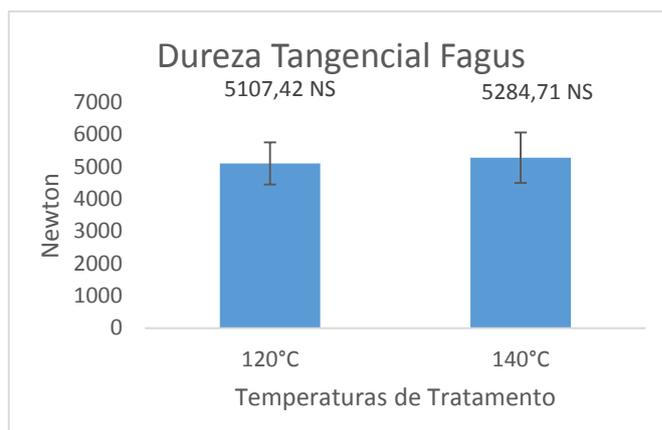
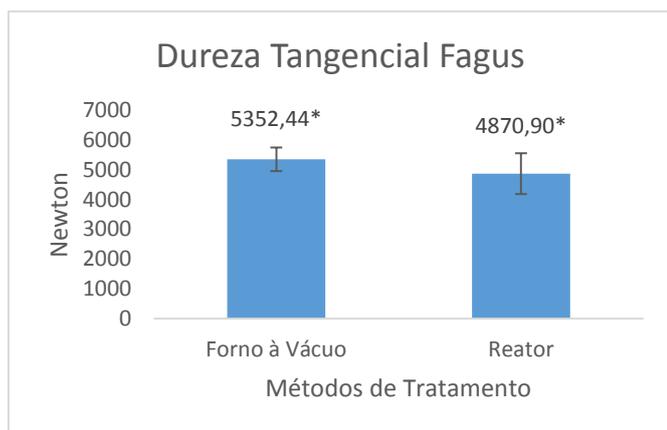


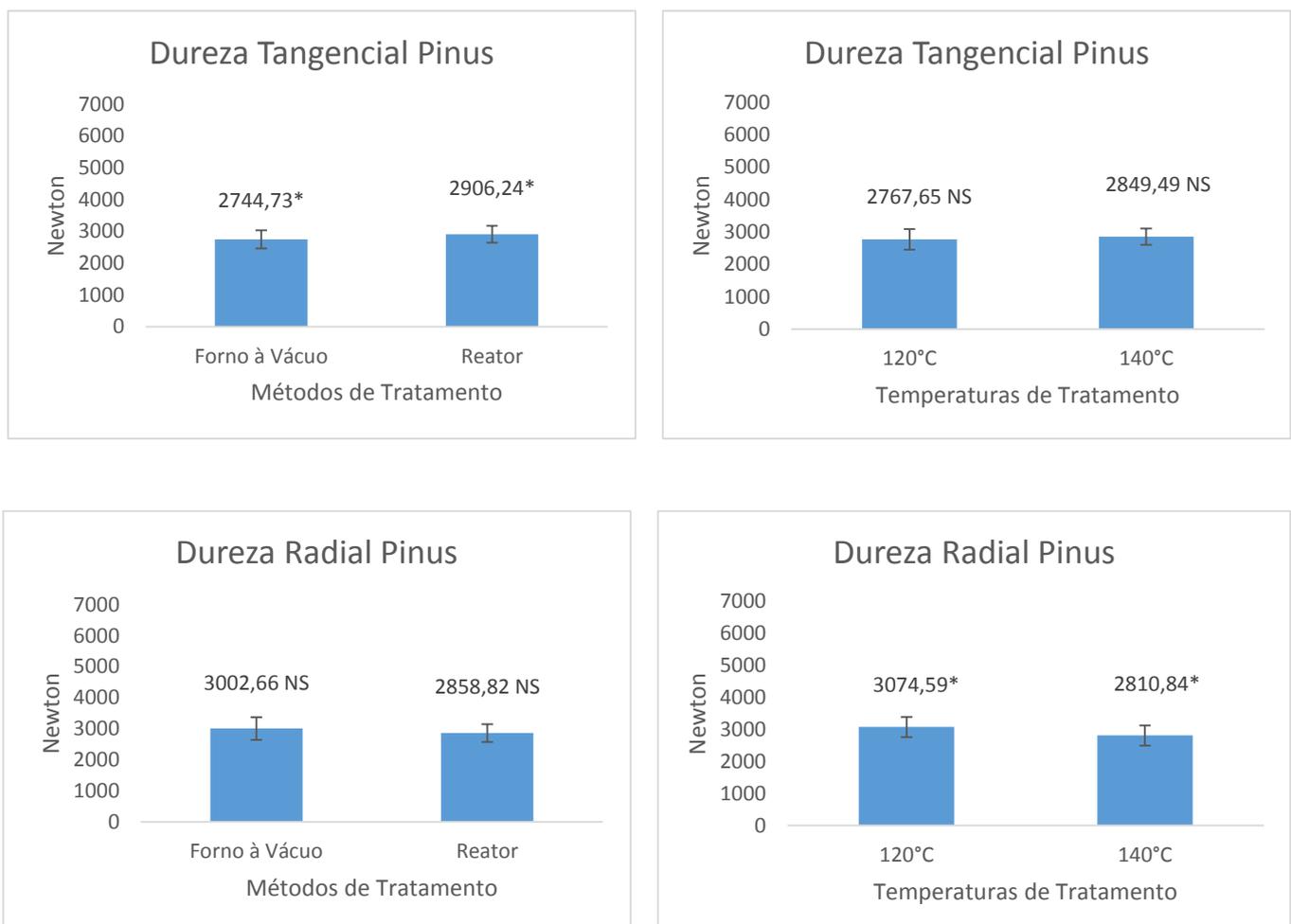
Figura 7: Comparação entre métodos e entre temperaturas do tratamento térmico para *Fagus Sylvatica*. Asterisco (*) indica diferença significativa entre as médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância, enquanto NS significa não significativo.

A análise multivariada indicou que os métodos de tratamento foram diferentes para os três fatores, dureza tangencial, radial e densidade, para todos os fatores forno à vácuo se mostrou com maiores resultados. Já as temperaturas foram diferentes apenas para o fator

densidade, para todos os fatores a temperatura de 140°C se mostrou com maiores resultados. Não houve interação significativa entre método e temperatura para nenhum fator.

A termo modificação com controle de atmosfera tem um efeito significativo no módulo de ruptura e menos significativo no módulo de elasticidade e dureza, indicando benefícios de usar o vácuo para criar condições inertes no tratamento térmico podendo reduzir o tempo de tratamento (Candelier *et al.*, 2013b). Daí a importância da utilização do vácuo em substituição ao forno comum, o vácuo retira Oxigênio da atmosfera, tornando-a inerte, a ausência de O₂ reduz a oxidação das células da madeira, reduzindo a degradação dos componentes.

Os resultados da análise multivariada para *Pinus caribaea* são apresentadas na figura 8.



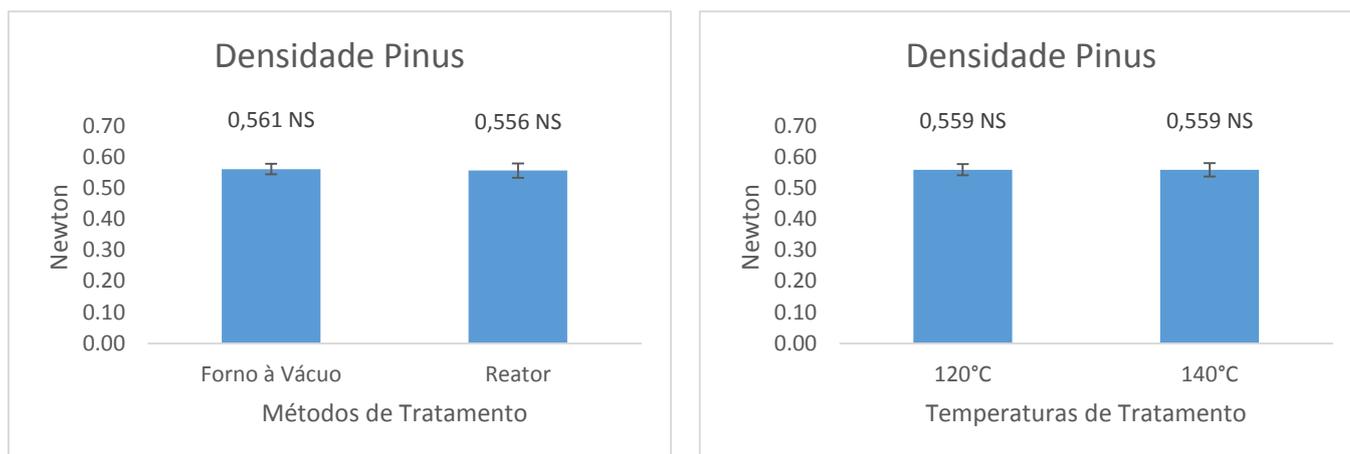


Figura 8: Comparação entre métodos e entre temperaturas do tratamento térmico para *Pinus caribaea*. Asterisco (*) indica diferença significativa entre as médias segundo o teste de Tukey a 5% de significância, enquanto NS significa não significativo.

A análise multivariada indicou que os métodos de tratamento foram diferentes estatisticamente apenas para o fator de dureza tangencial, enquanto que as temperaturas foram diferentes apenas para o fator de dureza radial. Além disso, houve interação significativa entre método e temperatura para o fator dureza radial.

Kocafe *et al.* (2010) encontraram que a ausência de umidade torna o processo mais destrutivo, amostras com menor dureza, resultados semelhantes foram encontrados para as espécies de *Fagus* e *Pinus* este trabalho.

Não foi realizada pós teste estatístico para *Sterculia speciosa* pois para essa espécie não foi realizado tratamentos em diferentes métodos.

5.2 Colorimetria

As madeiras estudadas são caracterizadas colorimetricamente conforme segue: *Fagus sylvatica* ($L^* = 71,38$; $a^* = 7,40$; $b^* = 19,29$; $C = 20,67$ e $h^* = 69,01$), de acordo com a classificação de cores da madeira pelo agrupamento de Cluster apresentado por Camargos e Gonzalez (2001) a espécie mais se aproxima do grupo 9, cor de oliva. *Pinus caribaea* ($L^* = 76,84$; $a^* = 8,40$; $b^* = 28,38$; $C = 29,60$ e $h^* = 73,52$), seguindo a mesma classificação de cores, a espécie mais se aproxima do grupo 5, cor amarelo claro. *Sterculia speciosa* ($L^* = 67,11$; $a^* = 6,47$; $b^* = 22,89$; $C = 23,80$ e $h^* = 74,21$), ainda na mesma classificação a espécie mais se aproxima do grupo 18, cor oliva-amarelado.

Seguindo o método CIELab a medição de coloração das madeiras se torna precisa, diferente dos catálogos para comparação, a descrição da cor da madeira irá facilitar sua aquisição e uso específico (GONÇALEZ, *et al.*, 2001).

A tabela 3 apresenta as variáveis colorimétricas para cada espécie ao final de cada tratamento estudado.

Tabela 3: Valores médios das variáveis colorimétricas ao final de cada tratamento para as 3 espécies estudadas.

		L*	a*	b*	C	h*
<i>Fagus sylvatica</i>	FV120°C	67,11	6,67	16,33	17,64	69,28
	FV140°C	65,39	5,97	16,08	17,16	69,63
	RE120°C	60,55	7,83	16,89	18,63	65,13
	RE140°C	54,37	8,06	17,78	19,56	65,62
	Controle	71,38	7,40	19,29	20,67	69,01
<i>Pinus caribaea</i>	FV120°C	74,95	7,57	29,94	30,89	75,82
	FV140°C	74,17	7,96	31,06	32,06	75,62
	RE120°C	72,89	8,02	29,95	31,01	75,00
	RE140°C	68,51	8,74	30,87	32,19	74,18
	Controle	76,84	8,40	28,38	29,60	73,52
<i>Sterculia speciose</i>	FV120°C	66,88	6,27	23,22	24,06	74,88
	FV140°C	65,61	6,22	23,15	23,98	74,96
	RE120°C	64,01	5,96	23,49	24,23	75,76
	RE140°C	63,10	6,23	23,71	24,52	75,28
	Controle	67,11	6,47	22,89	23,80	74,21

L* = luminosidade; a* e b* = Tonalidades; C = Cromaticidade; h* = Ângulo de tinta. FV120°C = Tratamento Forno à vácuo a 120°C; FV140°C = Tratamento Forno à vácuo a 140°C; RE120°C = Tratamento Reator a 120°C; RE140°C = Tratamento Reator a 140°C.

De uma forma geral, observa-se que os tratamentos com reator escurecem mais as madeiras, para as três espécies estudadas, que o tratamento em forno à vácuo. Isso é confirmado pelo aumento da variável a* (coloração vermelha) para a madeira de Fagus e Pinus. Já para Sterculia, a variável b* (coloração amarela) foi a principal responsável pela coloração mais escura entre os dois métodos de tratamento.

Comparando os tratamentos com o controle, ambos os processos utilizados (forno e reator) escureceram as madeiras. Neste caso, verifica-se uma participação de ambas as variáveis (a* e b*) na formação da cor final da madeira após os tratamentos. No entanto, as madeiras de Pinus e Sterculia a variável b* teve uma participação mais efetiva, mostrando valores mais elevados que o controle.

A tabela 4 mostra a variação dos fatores L*, a* e b* para as 3 espécies estudadas, considerando as amostras tratadas com seus controles pareados.

Tabela 4: Variação colorimétrica das espécies por tratamento.

		ΔL	Δa	Δb
<i>Fagus sylvatica</i>	FV120°C	-4.425*	-0.590	-2.475*
		(1.218)	(0.447)	(0.433)
	FV140°C	-5.720*	-1.547*	-3.580*
		(0.312)	(0.215)	(0.495)
	RE120°C	-11.647*	0.445	-2.477*
		(2.977)	(1.736)	(1.727)
	RE140°C	-16.292	0.610	-1.557*
		(10.661)	(1.855)	(0.861)
<i>Pinus caribaea</i>	FV120°C	-2.150*	-0.865*	1.700*
		(1.174)	(0.331)	(0.903)
	FV140°C	-3.012*	-0.402	2.382*
		(0.654)	(0.303)	(0.629)
	RE120°C	-4.100*	-0.330	1.882*
		(2.290)	(0.834)	(1.003)
	RE140°C	-7.490*	0.310	2.445*
		(3.867)	(1.259)	(1.233)
<i>Sterculia speciosa</i>	FV120°C	-0.077	-0.497	-0.172
		(1.127)	(0.321)	(0.253)
	FV140°C	-0.897	-0.687*	-0.302
		(0.672)	(0.160)	(0.217)
	RE120°C	-4.242*	1.875	1.337*
		(0.610)	(0.142)	(0.495)
	RE140°C	-3.005*	-0.217	1.132*
		(0.397)	(0.161)	(0.436)

ΔL = Variação de Luminosidade; Δa e Δb = Variação de Coordenadas Cromáticas. Δ com valores positivos indicam aumento de média enquanto Δ com valores negativos indicam redução de média após tratamento. FV120°C = Tratamento Forno à vácuo a 120°C; FV140°C = Tratamento Forno à vácuo a 140°C; RE120°C = Tratamento Reator a 120°C; RE140°C = Tratamento Reator a 140°C. Asterisco (*) indica diferença significativa entre tratamento e controle pareado segundo o teste 't' a 5% de significância. Números entre parênteses representam o desvio padrão da média.

A variação do fator L^* foi sempre negativa, pois a luminosidade da madeira sempre reduziu com o tratamento térmico. A espécie de *Fagus* obteve maiores reduções no geral, principalmente quando considerando os resultados para os tratamentos em reator. Segundo Militz (2002) e Bekhta e Niemz (2003) a diferença de cor entre controle e madeira tratada aumenta com a severidade do tratamento de tempo e temperatura, as três espécies estudadas obtiveram maiores reduções para tratamentos a 140°C do que a 120°C, exceto *Sterculia* quando tratada em reator.

A cor de cada esp[ecie, conforme foi comentado, foi mais afetada pelo tratamento em reator e também se mostrou mais severo pois a diferença entre controle e reator foi maior que

a diferença entre controle e forno à vácuo. Ding *et al.* (2011) compararam tratamento térmico úmido sob pressão atmosférica e úmido pressurizado, como o reator utilizado neste estudo, e constataram que a modificação de cor é mais óbvia para tratamento com pressão modificada. Se o objetivo final é uma redução maior da variável L^* pode significar uma substituição de métodos de tratamento, pois a mesma redução em secagem convencional demoraria mais tempo, o método em reator pode melhorar a eficiência de tempo do tratamento.

Esteves (2008b) também comparou resultados de luminosidade em modificação térmica com e sem umidade para a espécie folhosa estudada (*Eucalyptus sp.*), o resultado foi semelhante, onde a presença de umidade torna o tratamento mais severo. No entanto, o mesmo autor ao realizar o mesmo teste em espécie conífera (*Pinus pinaster*) encontrando que a presença de umidade torna o tratamento mais brando para essa espécie, resultado oposto ao encontrado neste trabalho. Como o autor utilizou uma autoclave para realizar a modificação térmica, provavelmente não só a presença ou ausência de umidade pode ter afetado os resultados, mas também a tecnologia do método de tratamento.

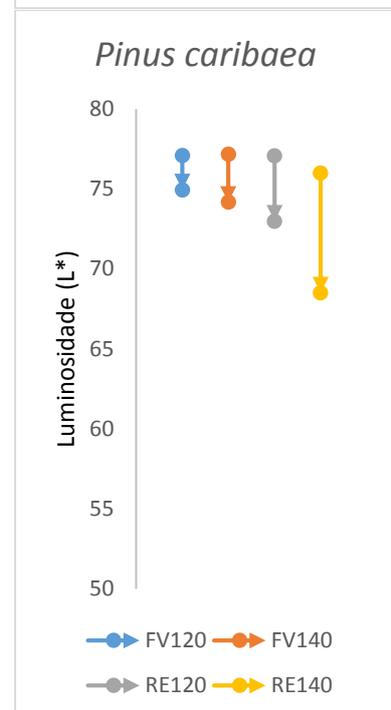
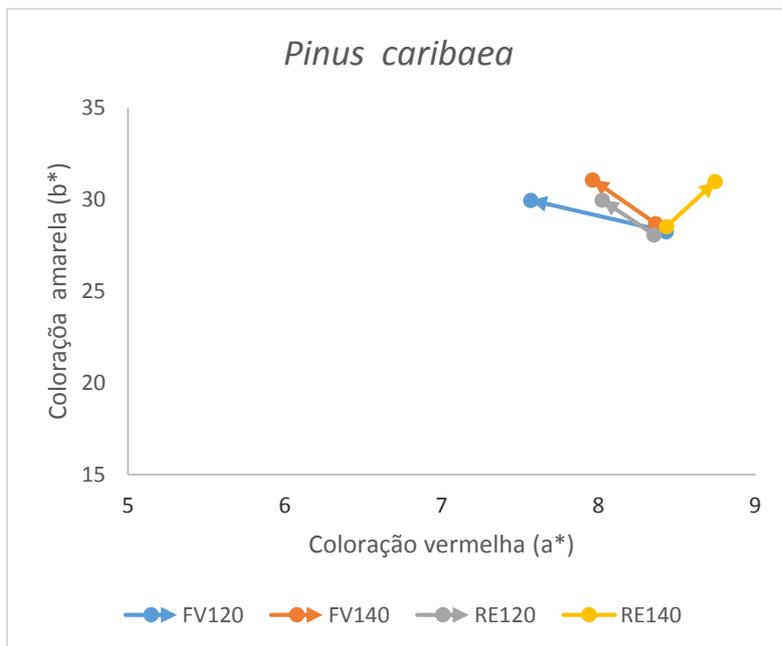
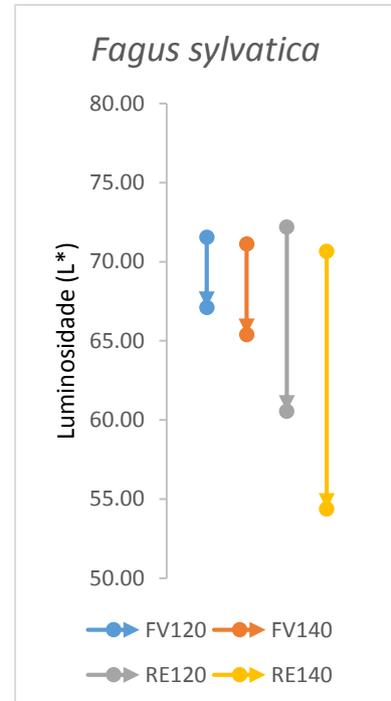
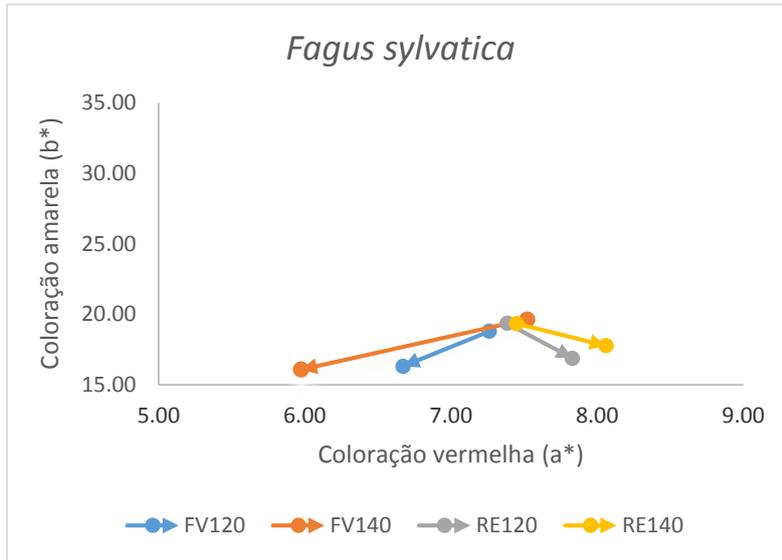
A variação das coordenadas cromáticas a^* e b^* foram negativas/positivas, dependendo do tratamento e espécie. O fator a^* , se mostrou o mais constante com raras diferenças significativas, apenas um tratamento por espécie foi significativo. Já os fatores L^* e b^* foram quase sempre estatisticamente diferentes para *Fagus* e *Pinus*. Já para *Sterculia* foram diferentes apenas para tratamento em reator.

Os tratamentos em forno à vácuo 140°C para *Fagus* e forno à vácuo 120°C para *Pinus* foram os únicos a resultarem com as três variáveis estatisticamente diferentes. Gonzalez *et al.* (2001) afirmam que o conhecimento da cor da madeira é fundamental para melhor conhecer a madeira e melhorar seu preço no mercado. O mesmo pode-se dizer para a transformação de cor da madeira pelo tratamento térmico, conhecendo quais faixas cromáticas a madeira pode atingir com determinadas temperaturas.

Todas as espécies fazem parte do primeiro quadrante do quadro de cores do sistema CIELab 1976, padrão esperado por Camargos (1999) indicando madeira de coloração amarelo avermelhada. A Figura 9 representa a modificação de cores por espécie, para cada tratamento.

Del Menezzi *et al.* (2009) afirmam que a variação colorimétrica deve ser mais afetada por temperatura de tratamento do que pelo tempo. Para a maioria dos resultados obtidos, os tratamentos de 140°C apresentaram maior variação do que tratamento de 120°C, considerando todas as variáveis colorimétricas.

Com os valores de colorimetria da madeira antes e após o tratamento foi possível elaborar gráficos que mostraram o deslocamento em gráfico da cor da madeira quanto a sua luminosidade e coordenadas cromáticas (amarelo e vermelho).



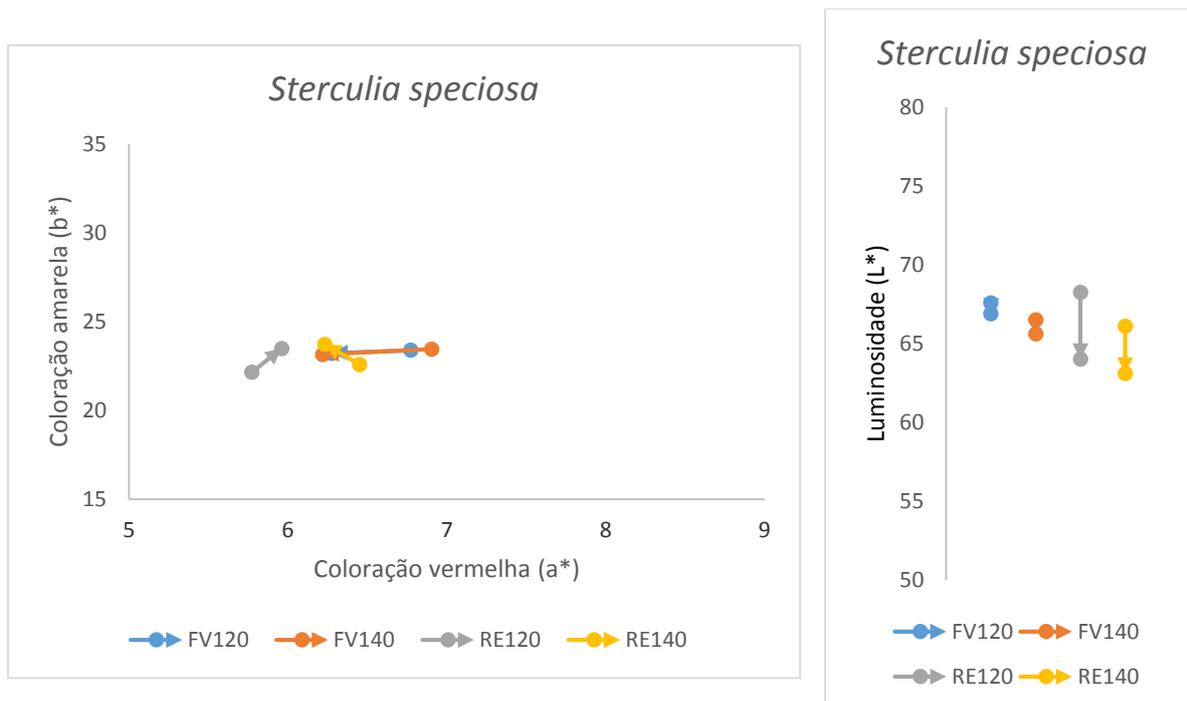


Figura 9: Gráficos de modificação de tonalidades e luminosidade por espécie. As setas indicam a modificação de cor mostrando o ponto inicial (cor antes do tratamento) até o ponto indicado pela seta (cor após tratamento).

A espécie *F. sylvatica* obteve maior variação tanto em tonalidade como em luminosidade compara às outras espécies. As amostras submetidas a tratamento se tornaram menos amarelas e havendo uma variação quanto a pigmentação vermelha (não há um padrão). Para o *Pinus*, que é uma madeira amarelada (influência forte do pigmento amarelo), notou-se que o tratamento térmico torna a madeira ainda mais amarela, aumentando a coordenada b^* . Para o tratamento mais severo (reator a 140°C), notou-se aumento do pigmento vermelho (a^*) enquanto para outros tratamentos houve redução deste. Para *Sterculia* tanto a variação das coordenadas a^* e b^* quanto luminosidade foram bem sutis, o tratamento que mais reduziu luminosidade foi reator a 120°C e as variações de tonalidade não seguiram um padrão.

Outra forma de avaliar a modificação colorimétrica é pela variação total da cor (ΔE) que considera ΔL , Δa e Δb (Figura 10).

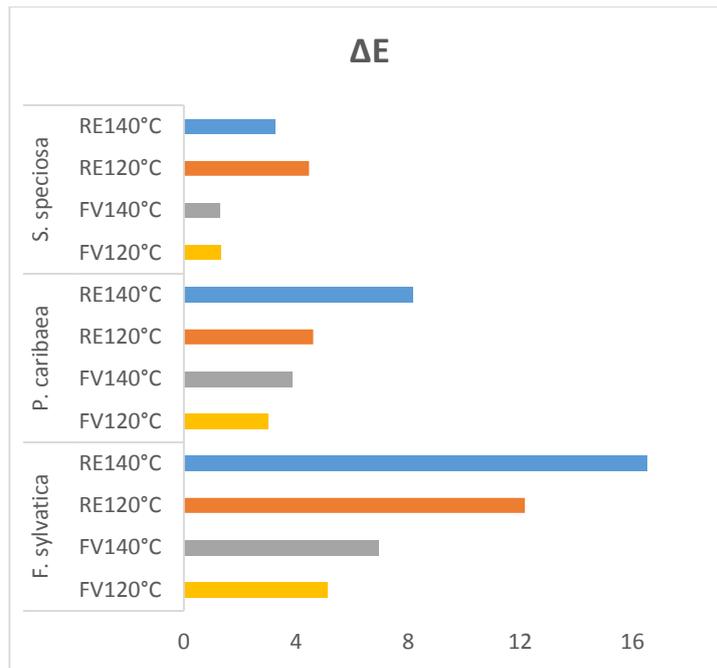


Figura 10: Variação total de cor (ΔE) obtido através das variações de luminosidade e coordenadas cromáticas.

O tratamento em reator a 140°C foi o que resultou numa maior modificação total da cor da madeira para as espécies *Fagus* e *Pinus*. Para *Sterculia* o tratamento em reator a 120°C se mostrou com maior modificação. Esses dados reafirmam a hipótese de que a presença de umidade pode tornar o tratamento mais severo para as características colorimétricas. A presença de constituintes químicos como por exemplo, extrativos podem colaborar na maior modificação da cor das duas espécies mais modificadas.

A modificação total de cor da madeira foi fortemente influenciada pelos resultados de modificação de luminosidade, que é a variável que sofre maior alteração, com o tratamento térmico. Segundo Esteves *et al.* (2008b) esta variável tem maior influência devido a aumento de perda de massa.

A modificação de cor da madeira por tratamento térmico pode viabilizar a substituição de espécies, reduzindo o consumo de madeiras que não tenham exploração sustentável ou que sejam muito caras. O tratamento térmico pode melhorar o preço da madeira no mercado, além de tornar o produto mais homogêneo quanto a sua cor (GONÇALVEZ *et al.*, 2001).

6 CONCLUSÃO

O tratamento térmico quando conduzido de forma branda em tempo e temperatura pode aumentar as características mecânicas da madeira (módulo de ruptura, módulo de elasticidade e dureza *Janka*) dependendo da espécie. Neste estudo a espécie que retornou resultados mais positivos depois de tratada termicamente foi *Fagus sylvatica*, a espécie de clima temperado.

O método sem presença de umidade, em forno à vácuo, com atmosfera controlada se mostrou eficiente, com resultados positivos sendo um método prático de trabalhar. O método com presença de umidade, em reator, não se mostrou eficiente, pois em sua maioria causou redução das propriedades mecânicas. A máquina visivelmente não distribuiu calor de forma homogênea causando aquecimento desuniforme na amostra o que gera resultados errôneos.

No geral as temperaturas testadas em forno à vácuo não retornaram diferença entre si, portanto recomenda-se a temperatura de 120°C, com menor gasto energético. É importante lembrar que a curta duração e baixa temperatura do tratamento é interessante para as empresas pois representa redução do custo energético para o tratamento tornando-o economicamente mais viável.

Por ser um resultado inovador se faz necessário estudos futuros para entender melhor a melhoria nas propriedades mecânicas. Recomenda-se estudar o efeito do tratamento térmico sobre as características químicas e físicas da madeira que permitiram o aumento das propriedades mecânicas. Além de verificar se o tratamento térmico brando garante as melhorias de estabilidade dimensional e durabilidade da madeira como acontece em tratamentos mais rígidos.

Para a colorimetria, este estudo mostrou que a madeira de *Fagus sylvatica* teve maior variação total de cor e *Sterculia speciosa* teve a menor variação sob os tratamentos térmicos, com resultados significativos apenas para tratamento em reator. *Pinus* se tornou mais amarelado após interferência térmica. A pesquisa confirma que o método em reator (presença de umidade) causou mudança de coloração da madeira de forma desuniforme e se mostra mais rígido, pois teor de umidade interfere na cor. Neste estudo a variação total da cor foi influenciada principalmente pela perda de luminosidade da madeira e em segundo lugar pela variação do eixo b*, representando coloração amarela, sendo, então, o eixo a*, representando coloração vermelha, mais estável.

REFERÊNCIAS

- ALLEGRETTI, O.; BRUNETTI, M.; CUCCUI, I.; FERRARI, S.; NOCETTI, M.; TERZIEV, N. Thermo-vacuum modification of spruce (*Picea abies* Karst.) and fir (*Abies alba* Mill.) wood. *Bioresources*, v. 7, p.3656-3669, 2012.
- AMORIM, P. G. R. GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. *Cerne*, v. 19, p. 461-466, 2013.
- ARAÚJO, H. J. B. Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do projeto de colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridades das propriedades físicas e mecânicas. 2002. 158f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) –Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiros”, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.
- AZEVEDO, A. C. S. Aumento da estabilidade na madeira de eucalipto através de tratamento térmico. *REMADE - Revista da madeira* n° 98, Agosto. 2006.
- AYADI, N.; LEJEUNE, F. CHARRIER, F.; CHARRIER, B.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v.61, p.221-226, 2003.
- BEKTAS, I.; ALMA, M. H.; AS, N. Determination of the relationships between Brinell and Janka hardness of eastern Beech (*Fagus orientalis* Lipsky). *Forest Products Journal*, 51, p, 84-88, 2001.
- BEKTHA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of Spruce wood. *Holzforchung*, v.57, p.539-546, 2003.
- BOONSTRA, M. J.; ACKER, J. V.; PIZZI, A. Anatomical and molecular reasons for property changes of wood after Full-scale Industrial Heat Treatment. *European Conference of Wood Modification*, 2007.
- BOONSTRA, M. J.; ACKER, J. V.; TJEERDSMA, B. F.; Kegel, E. V. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*, v.64, p.679-690, 2007b.
- BOONSTRA, M. J. A two-stage thermal modification of wood. 2008. 297f. Tese (Ph.D. in Applied Biological Science: Soil and Forest Management). Ghent University and Université Henry Poincaré -Nancy 1. França. 2008.
- BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. F. Chemical analysis of heat-treated softwoods. *Holz als Roh Werkstoff*, v.64, p.204-211, 2006.
- BOURGOIS, J.; BARTHOLIN, M. C; GUYONNET, R. Thermal treatment of wood: analysis of obtained product. *Wood Science and Technology*, v.23, p.303-310, 1989.
- BURTIN, P.; JAY-ALLEMAND, C.; CHARPENTIER, J.P.; JANIN, G. Natural wood colouring process in *Juglans* sp. (*J. nigra*, *J. regia* and hybrid *J. nigra* 23 *J. regia*) depends on

native phenolic compounds accumulated in the transition zone between sapwood and heartwood. *Trees*, v.12, p.258-264, 1998.

BROSSE, N.; HAGE, R.; CHAOUCH, M.; PÉTRISSANS, M.; DUMARÇAY, S.; GÉRARDIN, P. Investigation of the chemical modifications of beech wood lignin during heat treatment. *Polymer Degradation and Stability*, v. 95, p. 1721-1726, 2010.

CAMARGOS, J. A. A. *Colorimetria quantitativa aplicada na elaboração de uma tabela de cores para madeiras tropicais*. 1999. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, 1999.

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

CANDELIER, K.; DUMARÇAY, S.; PÉTRISSANS, A.; DESHARNAIS, L.; GÉRARDIN, P.; PÉTRISSANS, M. Comparison of chemical composition and decay durability of heat treated wood cured under different inert atmospheres: Nitrogen or vacuum. *Polymer degradation and stability*, v.98, p.677-681, 2013a.

CANDELIER, K.; DUMARÇAY, S.; PÉTRISSANS, A.; GÉRARDIN, P.; PÉTRISSANS, M. Comparison of mechanical properties of heat treated beech wood cured under nitrogen or vacuum. *Polymer degradation and stability*, v.98, p.1762-1765, 2013b.

DEL MENEZZI, C. H. S. Relationship between color modification and dimensional stability improvement of a thermally treated OSB. In: 51st Annual Convention of the Society of Wood Science and Technology, 2008, Concepción. Annual Convention, 2008.

DEL MENEZZI, C. H. S.; RIBEIRO, R. B.; STERNADT, G. H.; TEIXEIRA, D. E.; OKINO, E. Y. A. Effect of thermal post-treatment on some surface-related properties of oriented strandboards. *Drvna Industrija*, v. 59, p. 61-67, 2008.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; OKINO, E. Y. A.; TEIXEIRA, D. E.; SANTANA, M. A. E. Thermal modification of consolidated oriented strandboards: effects on dimensional stability, mechanical properties, chemical composition and surface color. *European Journal of Wood and Wood Products*, p. 383-396, 2009.

DING, T; GU, L.; LI, T. Influence of steam pressure on physical and mechanical properties of heat-treated Mongolian pine lumber. *European Journal of Wood and Wood Products*, p. 121-126, 2011

DURLO, M.A.; MARCHIORI, J.N.C. *Tecnologia da madeira: retratibilidade*. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 33p. 1992.

ESTEVES, B. M. M. L. Melhoria tecnológica por modificação térmica de madeiras portuguesas. 2006. 289f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2006.

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I. J.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. *Bioresources*, v.3, p.142-154, 2008.

- ESTEVEVES, B. M.; MARQUES, A. V.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science Technology*, v.42, p.369-384, 2008b.
- ESTEVEVES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources*, v.4, p.370-404, 2009.
- GARROTE, G.; DOMÍNGUEZ, H.; PARAJÓ, J. C. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Roh Werkstoff*, v.57, p.191-202, 1999.
- GONÇALEZ, J. C.; JANIN, G.; SANTORO, A. C. S.; COSTA, A. F.; VALLE, A. T. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. *Brasil Florestal*, v.72, p.47-58, 2001.
- GOUVEIA, F. N. *Aplicação de tratamentos térmicos para a estabilização colorimétrica de madeiras tropicais*. 2008. 131f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília. 2008.
- HANSSON, L.; ANTTI, A. L. The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 171, p.467-470, 2006.
- HOLMBERG, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Holz als Roh Werkstoff*, v.58, p.91-95, 2000.
- JOHANSSON, D.; MORÉN, T. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh Werkstoff*, v.64, p.104-110, 2006.
- KLITZKE, R. J. *Uso do inversor de frequência na secagem da madeira*. 2002. 218f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais e da Madeira) Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2002.
- KOCAEFE, D.; PONCSÁK, S.; TANG, J. Effect of heat treatment on mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study. *J Mater Sci*, v.45, p. 681-687, 2010.
- KORKUT, S.; AKGÜL, M.; DÜNDAR, T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Bioresouce Technology*, v. 99, p.1861-1868, 2008.
- KORKUT, S. Performance of three thermally treated tropical wood species commonly used in Turkey. *Industrial Crops and Products*, v. 36, p. 355-362, 2012.
- KORKUT, S. The effects of heat treatment on some technological properties in Uludag fir (*Abies bornmelleriana* Mattf.) wood. *Building and Environment*, v.43, p. 422-428, 2008.
- LAVERS, G. M. *The strength properties of timbers*. Forest Products Research, Bulletin No 50. Second Edition, metric units. HMSO, London, 62p. 1969.
- 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, p.401-408, 2008.

MILITZ, H. Heat treatment technologies in Europe: Scientific background and technological state-of-art. *Conference on Enhancing the Durability of Lumber and Engineered Wood Products*, 2002.

MITSUMI, K. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment Part 2. Effect of light-irradiation time and wavelength. *Holz als Roh Werkstoff*, v.62, p.23-30, 2004.

MITSUMI, K.; TAKADA, H.; SUGIYAMA, M.; HASEGAWA, R. Changes in the properties of high-irradiated wood with heat treatment: Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color. *Holzforchung*, v.55, p.601-605, 2001.

NASCIMENTO, C. C.; GARCIA, J. N.; DIÁZ, M. P. Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia em função da densidade básica e propriedades mecânicas. *Madeira y Bosques*, v. 3, p. 33-52, 1997.

PATZELT, M.; EMSENHUBER, G.; STINGL, R. Color measurement as means of quality control of thermally treated wood. Abstracts of the First European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium, 2003.

PHUONG, L. X.; SHIDA, S.; SAITO, Y. Effects of heat treatment on brittleness of *Styrax tonkinensis* wood. *Japan Wood Research Society*, v.53, p.181-186, 2007.

PONCSÁK, S.; KACAEFE, D.; BOUAZARA, F. M. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Sci Technol*, v.40, 2006.

RAPOLD, P. M.; SMITH, W. B. An investigation of the relationships between harvest season, log age, and drying schedule on the coloration of hard maple lumber. *Forest Products Journal*, v.54, p.178-184, 2004.

RIBEIRO, P. G. *Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de Pinus caribaea Var. hondurensis e de Eucalyptus grandis*. 2009. 114f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, 2009.

ROSU, D.; TEACA, C. A.; BODIRLAU, R.; ROSU, L. FTIR and color change of the modified wood as a result of artificial light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 99, p. 144-149, 2010.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R. Properties of thermo-mechanically treated wood from *Pinus caribaea* Var. Hondurensis. *BioResources*, v. 7, p. 1850-1865, 2012.

SEHLSTEDT-PERSSON, S. M. B. Colour Responses to Heat-Treatment of Extractives and Sap from Pine and Spruce. 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, p.459-464, 2003.

SHIMIZU, J. Y. Pinus na silvicultura brasileira. *Revista árvore*, v.16, p.4-14, 2006.

SPEAR, M.; BINDING, T.; JENKINS, D.; NICHOLLS, J.; ORMONDROYD, G. Mild thermal modification to enhance the machinability of larch. *European Conference on Wood Modifications 2014*.

STANGERLIN, D.M.; MELO, R.R.; SANTINI, E.J.; GATTO, D.A.; DOMINGUES, J.M.X.; CALEGARI, L.; MULLER, M.T. Avaliação da resistência ao impacto para as madeiras de *Eucalyptus botrioides* e *Eucalyptus saligna*. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 10., 2008, Nova Prata. Anais. Santa Maria: UFSM, 2008. p.1-7.

STANGERLIN, D. M.; MELO, R. R.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G. Propriedades de Flexão Estática da Madeira de *Carya Illinoensis* em Duas Condições de Umidade. *Ciência da Madeira*, v.01, p. 70-79, 2010.

STENUDD, S. Color response in silver birch during kiln-drying. *Forest Products Journal*, v.54, p.31-36, 2004.

SUDIYANI, Y.; TSUJIYAMA, S; IMAMURA, Y.; TAKAHASHI, M.; MIMATO, K.; KAJITA, H. Chemical characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering. *Journal of Wood Science*, v.45, p.348-353, 1999.

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

SURINI, T.; CHARRIER, F.; MALVESTIO, J.; CHARRIER, B.; MOUBARIK, A.; CASTÉRA, P.; GRELIER, S. Physical properties and termite durability of maritime pine *Pinus pinaster* Ait., heat-treated under vacuum pressure. *Wood science technology*, v. 46, p. 487-501, 2012.

TIRYAKI, S.; HAMZAÇEBI, C. Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heated treated woods by artificial neural networks. *Measurement*, v.49, p.266-274, 2014.

THERMOWOOD ASSOCIATION. Production Statistics 2014. Disponível em: < https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/production_statistics2014.pdf >. Acesso em 23 de nov de 2015.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and heat-treated wood. *Holz als Roh Werkstoff*, v.63, p.102-111, 2005.

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 Werkstoff*, v.56, p.149-153, 1998.

TJEERDSMA, B. F.; STEVES, M.; MILITZ, H.; ACKER, V. J. Effect of process conditions on moisture content and decay-resistance of hydro-thermally treated wood. *Holzforchung und Holzverwertung*, v. 54, p. 94-99, 2002.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de pinus tropicais. *Floresta e Ambiente*, v. 20, p. 398-406, 2013.

TSOUMIS, G. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Chapman e Hall, 1991.

TURNER, I.; ROUSSET, P.; RÉMOND, R.; PERRÉ, P. An experimental and theoretical investigation of thermal treatment of wood (*Fagus sylvatica* L.) in the range 200 - 260°C. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 53, p.715-725, 2010.

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France – stat of the art. Paris: *Centre Technique du Bois et de l'Ameublement*, p. 1-6, 2000.

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modification and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh-und Werkstoff*, v. 61, p.216-220, 2003.

WINANDY, Jerrold, E.; ROWELL, Roger, M. *Chemestry of wood strength*. In: Rowell, Roger, M. ed. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton FL: CR Press LLC: 303-347, 2005.

YANG, J. L.; EVANS, R. Prediction of MOE of Eucalyptus wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh Werkstoff*, v.61, p.449-452, 2003.

XAVIER, G. S. Influência de Tratamentos Térmicos em duas Propriedades Mecânicas das Madeiras de *Pinus sp.* e *Eucalyptus urograndis*. 2013. 35f. Monografia (Engenharia Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília. 2013.

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

YILGOR, N.; UNSAL, O.; KARTAL, S. N. Physical, mechanical and chemical properties of steamed beech wood. *Forest Products Journal*, v. 51, p. 89-93, 2001.

ZERBINI, N. J. *Madeiras tropicais com potencial comercial da região do rio Xingu (Pará, Brasil): propriedades tecnológicas e cadeia produtiva*. 2008. 187f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília. 2008.