

FRED WILLIANS CALONEGO

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE *Schizolobium parahyba*
(Vell.) Blake MODIFICADA TERMICAMENTE**

Botucatu

2017

FRED WILLIANS CALONEGO

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE *Schizolobium parahyba*
(Vell.) Blake MODIFICADA TERMICAMENTE**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Ciência Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Elias Taylor Durgante Severo

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

C165c Calonego, Fred Willians 1977-
Caracterização tecnológica da madeira de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake modificada termicamente / Fred Willians Calonego. - Botucatu: [s.n.], 2017
161 p.: il., color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2017
Orientador: Elias Taylor Durgante Severo
Inclui bibliografia

1. Madeira - Fungos - Resistencia. 2. Madeira - Propriedades físicas. 3. Madeira - Qualidade. I. Severo, Elias Taylor Durgante. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

Elaborada por Maria Lúcia Martins Frederico - CRB-8:5255

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

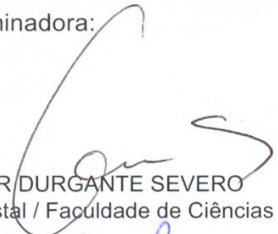
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

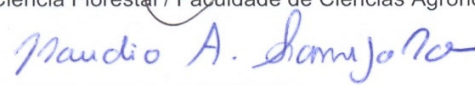
TÍTULO DA TESE: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake MODIFICADA TERMICAMENTE

AUTOR: FRED WILLIAMS CALONEGO

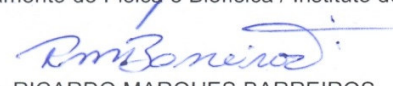
ORIENTADOR: ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO
Depto de Ciência Florestal / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP


Prof. Dr. CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO
Dep de Ciencia Florestal / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP


Prof. Dr. VLADIMIR ELIODORO COSTA
Departamento de Física e Biofísica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. RICARDO MARQUES BARREIROS
Coordenadoria Executiva / Campus de Itapeva


Prof. Dr. FABIO MINORU YAMAJI
Depto. Ciências Ambientais / UFSCAR/SOROCABA

Botucatu, 13 de novembro de 2017

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema, pela oportunidade de aprendizado com o transcorrer desta etapa;

Aos meus pais Gledes e Helio por me ensinarem o significado das palavras 'obrigado', 'com licença', 'por favor' e 'sinto muito', infelizmente pouco em voga nos tempos atuais. Aos meus irmãos Jean e Camila pela convivência desde a infância. Aos meus sobrinhos por me fazer rejuvenescer com suas atitudes de criança.

Ao Prof. Elias Taylor Durgante Severo, pela amizade, por confiar no meu trabalho, me aceitar como orientado e por me 'abrir as portas' da universidade;

Ao Prof. Iraê Amaral Guerrini, coordenador do curso de pós-graduação em Ciência Florestal, pelo respaldo dado durante a realização desse trabalho;

Aos professores Cláudio Angeli Sansígolo, Vladimir Eliodoro Costa, Ricardo Marques Barreiros e Fábio Minoru Yamaji pelos questionamentos e sugestões apresentados durante a defesa de tese;

Ao Adm. Rogério Mazolli, à Eng. Ftal Evelyn Kumayama Abe e ao Técnico de Laboratório Juliano de Oliveira Lopes, da empresa Duratex-S.A., pelo auxílio nas análises colorimétricas;

À técnica de laboratório Liliane Catarina Pereira, do Laboratório de Química da Madeira, do Depto de Ciência Florestal, da FCA-UNESP, pelas análises químicas realizadas;

À secretária Rosângela Cristina Moreci, do Depto de Ciência Florestal, da FCA-UNESP, pela paciência e pelas informações;

À Eng. Agro. Aline Fernanda de Brito, colega de doutorado, pela amizade, parceria durante essa etapa e participação na coleta dos dados;

Ao Sr. Edson Graciano Brito, funcionário do Depto de Ciência Florestal, pela amizade, pelo auxílio na elaboração dos corpos de prova e em inúmeros procedimentos técnicos realizados durante o presente estudo;

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos;

A todos os amigos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desse projeto;

Encerro com uma frase do Aforismo 63 do Tao-Te King, de Lao-Tzu: "Se o Sábio jamais fizer algo grande, então, poderá realizar grandes feitos..."

Obrigado

RESUMO

No Brasil, a espécie pioneira *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, conhecida como Guapuruvu, tem potencial para os projetos de restauração ecológica da Floresta Atlântica, e quando atingem cerca de 15 anos podem ser retiradas mediante plano de manejo. Entretanto, uma característica indesejável da sua madeira é a presença acentuada de lenho juvenil e uma das suas limitações é a baixa durabilidade natural. Uma forma de minimizar este problema é a modificação térmica logo após a sua secagem. Porém, esses tratamentos provocam mudanças na cor da madeira. Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito do tratamento de modificação térmica nas propriedades físicas, químicas e colorimétricas e na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* aos organismos xilófagos e ao intemperismo. Para tanto, foram usadas tábuas provenientes de toras de Guapuruvu, com cerca de 15 anos de idade, retiradas de uma área de recuperação florestal da Faculdade de Ciências Agrônomicas, da UNESP, de Botucatu-SP. Cada tábua foi seccionada de modo a fornecer peças controle e outras destinadas para os tratamentos de modificação térmica, com temperaturas finais de 180°C, 200°C e 220°C. Corpos de prova foram retirados para a caracterização tecnológica dos lenhos juvenil e adulto através dos ensaios de propriedades físicas, químicas, de caracterização colorimétrica da madeira e de resistências aos fungos de podridão parda *Gloeophyllum trabeum* e de podridão branca *Pycnoporus sanguineus*, ao cupim de madeira seca *Cryptotermes brevis* e ao intemperismo. Os resultados mostraram que: (1) o aumento da temperatura de modificação térmica promove decréscimos significativos de até 9,1% na massa específica aparente a 21°C e 65% de umidade relativa da madeira de *S. parahyba*, e reduz em até 51,1% e 54,1% os seus respectivos teores de umidade de equilíbrio e inchamento volumétrico; (2) a massa específica básica e os coeficientes de retratibilidades não variam com os tratamentos térmicos e não são indicados para avaliar a qualidade da madeira modificada termicamente; (3) a modificação térmica provoca reduções significativas de até 25,0% nos teores de holocelulose e um aumento proporcional de até 41,7% e 286,5% nos respectivos teores de lignina e de extrativos totais da madeira; (4) a cor da madeira sem tratamento é classificada como branco amarelada, pois apresenta alta claridade (L^* de 80,41 a 80,85) e presença marcante do pigmento amarelo (b^* de 19,06 a 20,07), e o tratamento térmico provoca o seu escurecimento e avermelhamento; (5) a madeira sem

tratamento é classificada como não resistente ao cupim de madeira seca e ao fungo de podridão parda, e, de resistência moderada ao fungo de podridão branca, sendo que os tratamentos térmicos provocam reduções significativas de até 90,6% nas perdas de massa provocadas pelos fungos apodrecedores e não mudam a classe de resistência da madeira aos cupins; e (6) a madeira sem tratamento ficou mais escurecida, avermelhada e amarelada após o intemperismo, e o tratamento térmico aumenta a sua resistência aos agentes abióticos. Pode-se concluir que a modificação térmica possui um grande potencial para melhorar a estabilidade dimensional e a resistência natural da madeira de *S. parahyba* aos fungos apodrecedores e ao intemperismo, embora, modifique a sua cor e não altera a sua classe de resistência aos cupins.

Palavras-chave: Modificação térmica da madeira. Propriedades físicas. Resistência a fungos e cupins. Caracterização colorimétrica. Lenhos juvenil e adulto. Guapuruvu.

ABSTRACT

In Brazil, the pioneer plant species *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, known as Guapuruvu, has potential for ecological restoration projects in the Atlantic Forest, and when they reach about 15 years can be taken by the management plan. However, an undesirable feature of this wood is the pronounced presence of juvenile wood and a limitation is low biological resistance. An attractive way to mitigate this problem is this thermal modification process after its drying. However, these thermal treatments cause changes in color of wood. The aim of this study was to evaluate the effect of thermal modification on physicochemical and colorimetric properties and biological resistance of juvenile and mature woods from *S. parahyba* to xylophagous organisms and weathering. Boards were taken from a 15-year-old *S. parahyba* forest recovery area of Agronomy Sciences College from UNESP, located in Botucatu, SP, Brazil. Each board was sawed into smaller pieces measuring 0.60 m in length. One small piece was kept in its original condition (untreated wood), whereas the other pieces were reserved for the thermal treatments at final temperature of 180°C, 200°C, and 220°C. Subsequently, samples were cut from all the boards (untreated and thermally modified woods) to technological characterization for both juvenile and mature wood across to tests of physical and chemical properties, colorimetric characterization of wood, decay resistance at brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum* and white-rot fungus *Pycnoporus sanguineus*, biological resistance to termite dry wood *Cryptotermes brevis*, and weathering resistance. The results showed that: (1) the increase in the thermal modification temperature causes significant decreases of up to 9,1% in the density at 21°C and 65% relative humidity of the *S. parahyba* wood and reduces the equilibrium moisture content and volumetric swellings in up to 51.1% and 54.1%, respectively; (2) the density basic and dimensional change coefficient of wood were not the most suitable for evaluating the quality of thermally modified wood; (3) the thermal modification causes significant decreases of up to 25.0% in the holocelloses contents, a proportional increase of up to 41.7% e 286.5% in the lignin and extractives contents, respectively; (4) the color of untreated wood can be classified by yellowish white, because presents high brightness (L^* of 80.41 to 80.85) and strong presence of yellow pigment (b^* of 19.06 to 20.07), and the thermal treatment causes the darkening and reddening of timber; (5) the untreated wood was classified as non-durable to the dry wood termites and brown-rot fungus, and also

was classified as moderate resistance to the white-rot fungus, whereas the thermal modification promotes significant reductions of up to 90.6% in the weight losses caused by rot fungi and do not change the damage caused by termites in wood; and (6) the untreated wood showed darkening, a reddish behavior and a yellowish behavior after weathering tests, and the thermal modification causes significant decreases in the weathering of wood. We concluded that the thermal modification has a great potential to improve the dimensional stability and the natural resistance of *S. parahyba* wood to decay fungi and weathering, although it modifies the color of wood and does not change its resistance class to the termite.

Keywords: Thermal modification of wood. Physical properties. Fungi and termite's durability. Colorimetric characterization. Juvenile and mature wood. Guapuruvu.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Curvas de adsorção e de desorção para a madeira (SKAAR, 1972; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999)27
- Figura 2 - Isoterma higroscópica de adsorção para a madeira de *Eucalyptus regnans* e seus componentes químicos (SKAAR, 1972)28
- Figura 3 - Diagrama colorimétrico pelo sistema CIE L*a*b* (adaptado de ASTM E-308, 1999; GONÇALEZ et al., 2001; BEKHTA e NIENZ, 2003; BRAINARD, 2003).35
- Figura 4 - Resistência mecânica da parede celular de *Pinus sylvestris* durante ensaio de intemperismo (adaptado de TURKULIN e SELL, 2002)46
- Figura 5 - Degradação térmica da madeira (MARTON et al., 2003)52
- Figura 6 - Valor médio das três coordenadas de cor da madeira de *Betula pendula* em diferentes condições de tratamentos térmicos (adaptado de JOHANSSON e MORÉN, 2006)62
- Figura 7 - Relação entre a alteração da cor e a taxa de degradação da lignina para a madeira de *Cryptomeria japonica* (adaptado de MITSUI et al., 2004)68
- Figura 8 - Variação no brilho (ΔL^*) da madeira de *Cryptomeria japonica* pela irradiação de luz, pelo tratamento térmico e pela combinação dos dois processos (MITSUI et al., 2004)69
- Figura 9 - Preparo do material: (A) traçamento do fuste de *S. parahyba*, (B) transporte das toras, (C) pulverização de inseticida nos topos das toras, e (D) processamento mecânico das toras para a obtenção de tábuas centrais e orientadas em relação aos anéis de crescimento72
- Figura 10 - Programa de tempo-temperatura adotado para a modificação térmica da madeira de *S. parahyba*, patenteado por Severo e Calonego (2011)75
- Figura 11 - Modelo de extração dos corpos de prova a partir de uma tábua central.76
- Figura 12 - Medição das dimensões tangencial (A), radial (B) e longitudinal (C) dos corpos de prova de *S. parahyba* e verificação da sua massa (D)78
- Figura 13 - Determinação dos compostos químicos da madeira de *S. parahyba*: (A) determinação do teor de secos da madeira; (B) extração dos extrativos da madeira em etanol e etanol tolueno1/2 (v/v); (C) extração dos extrativos da madeira em água quente; (D) fervura em ácido sulfúrico para a determinação de lignina; (E) solução de NaClO₂ (20%) + ácido acético (1:5) em banho maria a 70-80°C e (F) pesagem de cadinho para a determinação de holocelulose80
- Figura 14 - Calibração do espectrofotômetro de Reflectância Portátil (A) e determinação dos parâmetros colorimétricos da madeira de *S. parahyba* (B)82

Figura 15 - Aspecto da madeira de <i>S. parahyba</i> após 12 semanas de ensaio de apodrecimento acelerado com os fungos <i>P. sanguineus</i> (A) e <i>G. trabeum</i> (B)	85
Figura 16 - Ensaio de resistência da madeira de <i>S. parahyba</i> ao cupim de madeira seca <i>C. brevis</i> (A), área de ataque no corpo de prova (B) e aspecto visual dos corpos de prova de <i>S. parahyba</i> após o ensaio de cupim (C)	88
Figura 17 - Ensaio de resistência da madeira de <i>S. parahyba</i> ao intemperismo (A), suporte para corpos de prova (B) e aspecto visual dos corpos de prova de <i>S. parahyba</i> após exposição ao ensaio (C)	90
Figura 18 - Efeito da modificação térmica nas massas específicas aparentes dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	95
Figura 19 - Efeito da modificação térmica no teor de umidade de equilíbrio higroscópico dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	97
Figura 20 - Efeito da modificação térmica nos inchamentos volumétricos e lineares máximos dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	102
Figura 21 - Composição química padrão dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i> em função da temperatura de modificação térmica	107
Figura 22 - Efeito da modificação térmica nos padrões colorimétricos CIE L*, a* e b* dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	112
Figura 23 - Perda de massa dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i> mediante aos fungos deterioradores <i>P. sanguineus</i> e <i>G. trabeum</i> , em função da temperatura de modificação térmica	117
Figura 24 - Efeito da modificação térmica na perda de massa, número de furos e desgastes ocasionados pelo cupim de madeira seca <i>C. brevis</i> em corpos de prova de lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	123
Figura 25 - Efeito da modificação térmica na percentagem de cupins mortos após ensaio com os lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	124
Figura 26 - Efeito da modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i> ao intemperismo	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de cor natural de algumas espécies de madeiras (SILVA et al., 2007)	36
Tabela 2 – Programa de secagem utilizado para a madeira de <i>S. parahyba</i>	73
Tabela 3 – Efeito da modificação térmica no rendimento, nas massas específicas e no teor de umidade de equilíbrio higroscópico dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	93
Tabela 4 – Efeito do tratamento de modificação térmica nos inchamentos volumétricos e lineares e no fator anisotrópico dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	100
Tabela 5 – Efeito do tratamento de modificação térmica nos coeficientes de retratibilidade dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	104
Tabela 6 – Efeito do tratamento de modificação térmica na composição química padrão dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	106
Tabela 7 – Efeito do tratamento de modificação térmica nos parâmetros colorimétricos CIE L*a*b* dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i>	109
Tabela 8 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i> ao fungo deteriorador <i>G. trabeum</i>	114
Tabela 9 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i> ao fungo deteriorador <i>P. sanguineus</i>	115
Tabela 10 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i> ao cupim de madeira seca <i>C. brevis</i>	120
Tabela 11 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de <i>S. parahyba</i> ao intemperismo	126

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	O Guapuruvu	21
2.2	Definição e caracterização dos lenhos juvenil e adulto	22
2.3	Propriedades físicas da madeira	23
2.3.1	Massa específica aparente da madeira	24
2.3.2	Relação água-madeira e instabilidade dimensional	25
2.4	Propriedades químicas da madeira	31
2.5	Caracterização colorimétrica da madeira	33
2.6	Durabilidade natural da madeira	38
2.6.1	Durabilidade natural da madeira aos fungos apodrecedores	39
2.6.2	Durabilidade natural da madeira aos cupins	42
2.6.3	Resistência da madeira ao intemperismo	45
2.7	Processo de modificação térmica da madeira	47
2.8	Degradação térmica da madeira	49
2.9	Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas das madeiras	57
2.10	Efeito do tratamento térmico na cor da madeira	61
2.11	Efeito da modificação térmica na durabilidade natural da madeira aos fungos xilófagos	63
2.12	Efeito da modificação térmica na durabilidade das madeiras aos térmitas	65
2.13	Efeito da modificação térmica na resistência da madeira ao intemperismo	67
3	MATERIAL E MÉTODOS	71
3.1	Coleta e preparo do material	71
3.2	Tratamentos de modificação térmica das tábuas de <i>S. parahyba</i> ..	74
3.3	Obtenção de corpos de prova e caracterização das propriedades da madeira modificada termicamente	75
3.4	Caracterização física da madeira de <i>S. parahyba</i>	77

3.5	Caracterização química da madeira de <i>S. parahyba</i>	80
3.6	Determinação da cor da madeira de <i>S. parahyba</i>	81
3.7	Durabilidade natural da madeira de <i>S. parahyba</i> aos fungos deterioradores	83
3.7.1	Preparo dos corpos de prova de madeira e das culturas fúngicas	83
3.7.2	Ensaio de apodrecimento acelerado da madeira de <i>S. parahyba</i>	84
3.7.3	Avaliação da perda de massa no ensaio de apodrecimento acelerado	86
3.8	Durabilidade da madeira de <i>S. parahyba</i> ao cupim de madeira seca	86
3.8.1	Preparo dos corpos de prova de madeira e dos cupins de madeira seca	86
3.8.2	Ensaio de resistência da madeira de <i>S. parahyba</i> ao cupim <i>C. brevis</i> .	87
3.9	Ensaio de resistência da madeira de <i>S. parahyba</i> ao intemperismo	90
3.10	Análise estatística	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.1	Caracterização física e química da madeira de <i>S. parahyba</i> modificada termicamente	93
4.1.1	Efeito da modificação térmica no rendimento do processo, nas massas específicas e no teor de umidade de equilíbrio da madeira de <i>S. parahyba</i>	93
4.1.2	Efeito da modificação térmica na instabilidade dimensional da madeira de <i>S. parahyba</i>	99
4.1.3	Efeito da modificação térmica nas propriedades químicas da madeira de <i>S. parahyba</i>	106
4.2	Efeito da modificação térmica na caracterização colorimétrica da madeira de <i>S. parahyba</i>	109
4.3	Efeito da modificação térmica na resistência a fungos deterioradores da madeira de <i>S. parahyba</i>	113
4.4	Efeito da modificação térmica na resistência da madeira de <i>S. parahyba</i> ao cupim <i>C. brevis</i>	119
4.5	Efeito da modificação térmica na resistência da madeira de <i>S. parahyba</i> ao intemperismo	126
5	CONCLUSÕES	131
	REFERÊNCIAS	133

Apêndice A – Análise exploratória dos dados para as variáveis das propriedades físicas, químicas, colorimétricas e nas resistências da madeira de <i>S. parahyba</i> aos fungos, cupins e intemperismo	145
Apêndice B – Análise de variância das propriedades físicas, químicas e colorimétricas e das resistências da madeira de <i>S. parahyba</i> aos fungos, cupins e intemperismo	147
Apêndice C – Teste de Tukey e de Dunn para comparações múltiplas das variáveis classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica .	157

1 INTRODUÇÃO

A *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, conhecida por vários nomes populares, dentre os quais Guapuruvu, é uma espécie pioneira nativa da Floresta Atlântica e muito utilizada em projetos de restauração ecológica de ecossistemas.

Suas árvores podem atingir entre 25 e 30 metros de altura, seu fuste é reto e cilíndrico com diâmetros de até 1 m, apresenta poucas ramificações e produz madeira clara que pode ser utilizada para miolos de compensados, confecção de portas, embalagens e construção civil leve (RICHTER et al., 1974; MANIERI e CHIMELO, 1989; CARVALHO, 2005). É uma espécie caracterizada como de rápido crescimento, produz grandes volumes de madeira (TRIANOSKI, 2010) e aos 10 anos pode apresentar uma produtividade de 45 m³/ha.ano (CARVALHO, 2005).

Algumas das árvores de Guapuruvu, quando utilizadas em projetos de restauração ecológica, ao atingirem cerca de 15 anos podem ser retiradas mediante plano de manejo. Essa prática permite o crescimento de outras espécies na área a ser recuperada e pode gerar renda ao produtor rural com a comercialização dessa madeira.

Contudo, a área reflorestada com essa espécie ainda não é representativa no Brasil. Mas, segundo Mainieri e Chimelo (1989), na Amazônia, a espécie *Schizolobium amazonicum* Ducke conhecida por Paricá apresenta sua madeira muito semelhante a do Guapuruvu. Segundo relatório da IBÁ (2016), além de plantios com os gêneros *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., a área com reflorestamento de outras espécies ocupa 589,2 mil ha e corresponde à 15,3% da área reflorestada no país. Deste total, aproximadamente 90 mil ha corresponde à área plantada com *S. amazonicum* e a região norte do Brasil possui quase que a totalidade da área reflorestada com essa essência florestal, para a produção de painéis de madeira reconstituída.

Entretanto, a heterogeneidade da madeira causa uma série de transtornos para a sua indústria de transformação e de processamento. A variabilidade das propriedades tecnológicas desse material ocorre devido a vários fatores: espécie, idade, tratamentos silviculturais e principalmente estrutura anatômica da madeira. A madeira juvenil é aquela formada pelo câmbio na seção transversal do fuste, nos primeiros anos de crescimento até certa idade cambial. Essa madeira também pode

ser referida como aquela mais próxima da medula que, do ponto de vista tecnológico, é diferenciada da madeira adulta em diversas propriedades.

Segundo a literatura, a madeira sólida de *S. parahyba* apresenta como principal desvantagem a baixa durabilidade natural aos agentes xilófagos. Essa característica pode inviabilizar o uso dessa madeira em produtos onde a durabilidade natural seja fator importante. Uma forma atrativa de se melhorar a durabilidade natural e conseqüentemente agregar valor à madeira seca dessa espécie é o emprego de tratamentos térmicos no material.

O desenvolvimento da técnica de modificação térmica para estimular o uso da madeira desta espécie pode incentivar o plantio comercial e/ou a recuperação de áreas degradadas com *S. parahyba*. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento de modificação térmica nas características tecnológicas dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar as propriedades físicas e químicas da madeira modificada termicamente;
- Realizar a caracterização colorimétrica da madeira modificada termicamente;
- Avaliar a resistência biológica da madeira modificada termicamente aos fungos *Pycnoporus sanguineus* e *Gloeophyllum trabeum*;
- Avaliar o efeito do tratamento térmico na resistência biológica da madeira ao cupim *Cryptotermes brevis*.
- Verificar o efeito do tratamento térmico na resistência ao intemperismo da madeira estudada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Guapuruvu

A espécie *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake pertence a subfamília botânica Caesalpinioideae, da família Fabaceae. É uma espécie heliófila (ENGEL e PARROTA, 2001), de rápido crescimento (RICHTER et al., 1974), que ocorre naturalmente na Floresta Atlântica, em altitudes de 10 a 900 m e entre as latitudes de 12°30'S a 30°15'S (CARVALHO, 2005), desde os estados brasileiros da Bahia ao Rio Grande do Sul (MANIERI e CHIMELO, 1989).

Dentre os vários nomes vulgares, é conhecida popularmente por Bacurubu, Bageiro, Bandarra, Bucuruvu, Faveira, Ficheira, Garapuva, Guapuruvu, Pau-de-vintém e Pau-de-canoa (MANIERI e CHIMELO, 1989; CARVALHO, 2005).

É uma espécie com potencial para a restauração ecológica de ecossistemas (ENGEL e PARROTA, 2001) e pelo fato de ser caracterizada como uma heliófila de rápido crescimento (RICHTER et al., 1974; ENGEL e PARROTA, 2001; CARVALHO, 2005), é usada para a formação do dossel a fim de sombrear a área para as espécies secundárias tardias e clímax (ATHANÁSIO-HELIODORO, 2015).

Além disso, quando a floresta atinge um estágio sucessional mais avançado, o Guapuruvu acaba por desaparecer do sistema ao qual foi inserido e, pode ser removido desde que não se danifique a regeneração do sub-bosque para criar uma floresta secundária com um desenvolvimento mais acelerado (ENGEL e PARROTA, 2001).

Suas árvores são semidecíduas, podem atingir entre 25 e 30 metros de altura, seu fuste é reto e cilíndrico com até 1 m de diâmetro a altura do peito (DAP), produz grandes volumes de madeira (MANIERI e CHIMELO, 1989; TRIANOSKI, 2010) clara e leve (RICHTER et al., 1974; MANIERI e CHIMELO, 1989), sendo que aos 10 anos pode apresentar uma produtividade de 45 m³/ha.ano (CARVALHO, 2005).

A madeira dessa espécie pode ser utilizada para miolos de compensados, embalagens (MANIERI e CHIMELO, 1989; CARVALHO, 2005), e na construção civil leve, como forma de concreto, ou no uso interno, como portas, esquadrias e tabuados em geral (RICHTER et al., 1974).

2.2 Definição e caracterização dos lenhos juvenil e adulto

A heterogeneidade da madeira causa uma série de transtornos para sua indústria de transformação e processamento. A descontinuidade física da madeira se dá devido a vários fatores: espécie, tratos silviculturais e principalmente estrutura anatômica. A madeira juvenil ocorre na região central da árvore e apresenta a forma de um cilindro, com diâmetro quase uniforme, desde a base até o topo da árvore (ZOBEL, 1980; ZOBEL e Van BUIJTENEN, 1989; CALONEGO et al., 2005; FERREIRA et al., 2011). Esse tipo de lenho difere do lenho adulto por uma série de propriedades, dentre as quais: propriedades químicas, comprimento das fibras, massa específica aparente, estabilidade dimensional e durabilidade natural aos agentes xilófagos (BAO et al., 2001; LARA PALMA e BALLARIN, 2003; LOBÃO et al., 2012; CALONEGO et al. 2013, 2014; SEVERO et al. 2012, 2013, 2016).

Há várias hipóteses para a formação da madeira juvenil. Este tipo de lenho é formado na fase inicial de vida da árvore pela região cambial, as quais são influenciadas pela atividade do meristema apical (BENDTSEN, 1978; COWN, 1992). De acordo com Cown (1992) e Zobel e Van Buijtenen (1989), a formação do lenho juvenil é controlada por um sinal químico relacionado à fotossíntese pela primeira periderme. Esse sinal químico pode ser a auxina, uma vez que foram encontradas na zona cambial de árvores de *Pinus silvestris*, de 50 anos de idade, crescendo ativamente. Assim, o conceito mais aceito é que o lenho juvenil está diretamente relacionado com a idade do câmbio, a qual determina se será formado lenho juvenil, de transição ou adulto.

Oliveira (1997) verificou que nas árvores de *Eucalyptus grandis*, de 16 anos de idade, é grande a proporção de lenho juvenil, o qual corresponde a um raio próximo de 80 mm. Calonego et al. (2005) e Oliveira (1997), estudando *Eucalyptus citriodora*, concluíram pela mensuração do comprimento das fibras e pela análise do perfil densitométrico da madeira, que a formação da madeira juvenil parece estar confinada nos primeiros 40 a 55 mm e 30 a 40 mm de raio, respectivamente. A caracterização anatômica da madeira de *Pinus elliotii* var. *elliotii* mostrou que o lenho juvenil está presente até entre 145 e 185 mm da medula, e corresponde à madeira formada até os 21 anos de idade (PALERMO et al., 2011).

Bhat et al. (1984) estudaram a anatomia da madeira de árvores de *Hevea brasiliensis* com 28 a 30 anos de idade e concluíram que o lenho juvenil ocorre até

90 mm a partir da medula. Entretanto, a caracterização anatômica da madeira de *H. brasiliensis* mostrou que o lenho juvenil está confinado entre 40 e 55 mm a partir da medula (FERREIRA et al. 2011).

Em estudo realizado com a madeira de *S. parahyba*, proveniente de árvores com 15 anos de idade, foi constatado que o lenho juvenil ocorre até 109,1 mm da medula. O comprimento médio das fibras do lenho juvenil apresentou-se na ordem de 1196,7 μm , enquanto que no lenho adulto foi de 1492,0 μm (ATHANÁSIO-HELIODORO, 2015).

Lobão et al. (2012) estudaram a estrutura anatômica do fuste de *S. amazonicum* de uma área de floresta primária e de outra em processo de regeneração, no Acre, Brasil. Os autores concluíram que na madeira proveniente de árvores da floresta primária apresenta o comprimento das fibras do lenho juvenil de 922,98 μm , enquanto que o lenho adulto de 1374,38 μm . Já, o comprimento das fibras próximas à medula de árvores que foram plantadas em área de recuperação apresentou-se na ordem de 1328,78 μm , enquanto que próximo à casca foi de 1586,63 μm . Os mesmos autores concluíram que o lenho juvenil corresponde entre 8% e 46% da área do DAP do fuste de *S. amazonicum* dos sítios de área em recuperação e de floresta primária, respectivamente.

Assim, o uso do termo madeira juvenil é de certa forma errônea, pois não há uma mudança abrupta da madeira juvenil para a adulta, mas sim uma variação das propriedades da madeira em um período longo de anos, caracterizando assim a zona juvenil que apresenta propriedades variáveis quando comparadas com a zona adulta que as apresenta de forma constante (ZOBEL, 1980).

2.3 Propriedades físicas da madeira

Dentre as propriedades físicas, as que melhor caracterizam a madeira e, portanto, as mais importantes são: (1) densidade ou massa específica aparente - relação entre a massa e o volume da madeira, em g/cm^3 ou em kg/m^3 ; (2) teor de umidade - quantidade de água presente na madeira em relação ao seu peso seco, expresso em %; (3) contração e inchamento - quantificação da instabilidade dimensional, em %, associada ao fenômeno de sorção de água na madeira (SKAAR,

1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996; OLIVEIRA, 1997; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

2.3.1 Massa específica aparente da madeira

A massa específica aparente da madeira é uma das características que melhor expressa a sua qualidade, para o seu uso ou para a sua transformação industrial. Essa propriedade física caracteriza-se por apresentar uma variabilidade entre as espécies, entre os indivíduos de uma mesma espécie e ao longo do mesmo fuste. Como a madeira é um material higroscópico, a sua massa específica é influenciada pelo seu teor de umidade.

As massas específicas aparentes comumente utilizadas para caracterizar fisicamente as madeiras são: (1) massa específica aparente básica - relação entre a massa seca da madeira e o seu volume saturado; (2) massa específica aparente a 0% de umidade - relação entre a massa e o volume da madeira completamente seca; e (3) massa específica aparente a 12% de umidade - relação entre a massa e o volume da madeira a 12% de umidade (HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

De acordo com Almeida et al. (2013), a massa específica básica da madeira de *S. amazonicum* está entre 0,30 e 0,37 g/cm³. Essa propriedade física da madeira de *S. parahyba* varia de 0,30 a 0,40 g/cm³ (RICHTER et al., 1974) e de 0,24 a 0,27 g/cm³ (CARVALHO, 2005). Segundo Carvalho (2005), a respectiva espécie apresenta madeira com massa específica a 12% de umidade na ordem de 0,32 e 0,40 g/cm³.

Bortoletto Junior e Belini (2002) estudaram lâminas da madeira, provenientes de árvores de *S. parahyba* com 16 anos de idade, e concluíram que a sua massa específica básica é 0,39 g/cm³, enquanto que no estudo de Trianoski (2010) ficou constatado que as árvores dessa espécie, com 15 anos, produzem madeira com 0,264 g/cm³.

Segundo Vidaurre et al. (2012), a massa específica básica da madeira de *S. amazonicum* variou significativamente entre 0,262 e 0,303 g/cm³ entre indivíduos com 5 a 11 anos de idade. Os autores mostraram que essa propriedade física nas

madeiras provenientes entre a base e o topo do fuste de árvores com 11 anos variou significativamente entre 0,360 e 0,290 g/cm³.

O comportamento da massa específica da base para o topo do fuste é peculiar para cada espécie, porém, ela aumenta no sentido radial até se apresentar de forma constante no lenho adulto (ZOBEL e BUIJTENEN, 1989; HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Bao et al. (2001) verificaram que as massas específicas básicas do lenho juvenil de *Cunninghamia lanceolata*, *Larix olgenis*, *Pinus massoniana*, *Pinus yunnanensis*, *Larix kaempferi*, *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*, *Eucalyptus citriodora*, *Paulownia elongata* e *Populus nigra* x *P. simonii* foram 0,309, 0,489, 0,428, 0,469, 0,505, 0,530, 0,520, 0,807, 0,225 e 0,348g/cm³, respectivamente, enquanto que no lenho adulto das respectivas espécies foram 0,352, 0,557, 0,480, 0,594, 0,518, 0,448, 0,488, 0,893, 0,241 e 0,364 g/cm³. Os autores concluíram que a essa propriedade física foi maior no lenho adulto devido aos maiores comprimentos, diâmetros e espessura das paredes celulares dos traqueídes e/ou fibras das espécies estudadas.

Lobão et al. (2012) estudaram a estrutura anatômica do fuste de *S. amazonicum* provenientes de uma área de floresta primária e de outra em processo de regeneração, no Acre, Brasil. Segundo os autores, os respectivos lenhos juvenil e adulto de árvores de *S. amazonicum* da floresta primária apresentam massa específica a 12% de umidade de 0,312 g/cm³ e 0,535 g/cm³. Já, a propriedade física estudada dos respectivos lenhos de árvores que foram plantadas em área de recuperação foram 0,544 g/cm³ e 0,623 g/cm³.

Em estudo realizado com a madeira de *S. parahyba*, proveniente de árvores com 15 anos de idade, foi constatado que o lenho juvenil apresentou massa específica a 12% de umidade na ordem de 0,289 g/cm³, enquanto que no lenho adulto essa propriedade foi de 0,375 g/cm³ (ATHANÁSIO-HELIODORO, 2015).

2.3.2 Relação água-madeira e instabilidade dimensional

Para entender como a água interfere na estabilidade dimensional da madeira é necessário conhecer as condições em que ela ocorre nas células lenhosas. Os tipos de água existentes na madeira são classificados da seguinte forma: (1) água livre - localizada nos lumes celulares, espaços intercelulares e aberturas de pontoações; e

(2) água higroscópica - encontra-se adsorvida pelas paredes celulares, por pontes de hidrogênio presentes nos polímeros da madeira (SKAAR, 1972, 1988; GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996, FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Segundo Skaar (1972, 1988), Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999) e Bhuiyan et al. (2000, 2001), os polímeros de celulose possuem duas regiões: (1) cristalina - os grupos hidroxilas (OH) da celulose estão interligados e, portanto, não há sítios livres para a adsorção de água; e (2) amorfa - os grupos OH não estão interligados e encontram-se disponíveis para adsorver as moléculas de água.

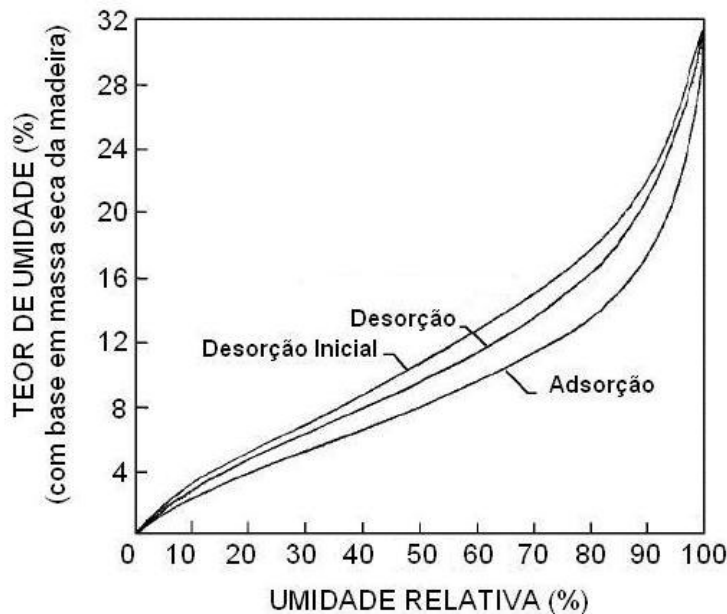
Na secagem, a primeira água a ser removida é aquela contida nas cavidades celulares. Quando toda a água livre foi removida da madeira e a parede celular está saturada de água, define-se, então, o ponto de saturação das fibras (PSF) (SKAAR, 1972, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996). Simpson (1991) afirma que para as espécies, em geral, o PSF está estabelecido em 30% de umidade.

Abaixo do PSF começa a perda de água higroscópica até o teor de umidade em que a madeira entra em equilíbrio com as condições atmosféricas. Este ponto é denominado de teor de umidade de equilíbrio da madeira (TUE), e os principais fatores que o influenciam são: espécie, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e histórico de exposição (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; SKAAR, 1988).

Quando uma peça de madeira, no PSF, é exposta à umidade relativa do ar decrescente, ela assumirá um TUE cada vez menor, formando uma curva de dessorção sigmoidal. Quando essa mesma peça de madeira, depois de completamente seca, é exposta em umidade relativa do ar crescente, ela assumirá um TUE cada vez maior, cuja curva de adsorção também é uma sigmóide (SKAAR, 1972, 1988; GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; HAYGREEN e BOWYER, 1996; OLIVEIRA, 1997).

No entanto, a Figura 1 mostra que, a curva de adsorção se posiciona abaixo da curva de dessorção. Esta diferença é denominada de histerese e implica que a madeira se comporta diferentemente quando em contato com a água e quando essa é retirada (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; SKAAR, 1988; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Figura 1 – Curvas de adsorção e de desorção para a madeira (SKAAR, 1972; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

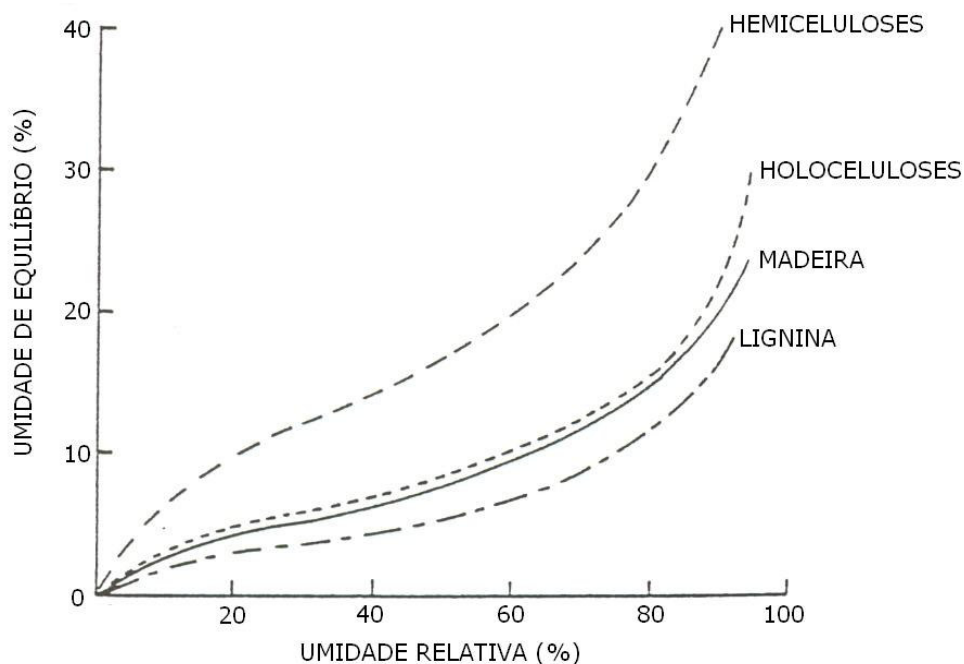


As curvas de desorção e de adsorção de umidade pelas madeiras de *Albizia chinensis*, *Gmelina arbore*, *Erythrina variegata* e *Lannea coromandelica* evidenciam a característica de histerese. Durante a adsorção, as pontes de hidrogênio entre as moléculas de celulose são quebradas e substituídas por pontes de hidrogênio entre moléculas de celulose e de água, resultando no inchamento da madeira. Entretanto, na desorção as pontes de hidrogênio entre água e celulose são quebradas antes mesmo que toda a água livre seja evaporada, devido ao gradiente de umidade que se forma durante a secagem da peça de madeira (CHAUHAN e AGGARWAL, 2004). Almeida e Hernández (2006) confirmam o fenômeno, ao mostrarem que, embora os PSF das madeiras de *Fagus grandifolia*, de *Broximum alicastrum* e de *Casiniana domestica* sejam 31%, 24% e 25%, as contrações já começam em teores de umidade de 40,2%, 43,0% e 56,0%, respectivamente.

Para Galvão e Jankowsky (1988), a causa mais provável dessa histerese seria o rearranjo das moléculas dos polímeros da madeira durante a secagem inicial, quando os grupos hidroxílicos seriam deslocados para uma distância menor entre si, estabelecendo pontes de hidrogênio e ficando indisponíveis para atrair e reter moléculas de água. Numa posterior adsorção, parte dessas hidroxilas continuaria a “satisfazer-se mutuamente” e, um menor número de sítios de adsorção estaria disponível.

Segundo Skaar (1972), Galvão e Jankowsky (1988) e Oliveira (1997), a forma das curvas de sorção de água na madeira são semelhantes para todas as espécies, entretanto a variação dos valores absolutos da higroscopicidade é função dos teores de celulose, lignina, hemiceluloses e extrativos totais. Através da Figura 2, verifica-se que as hemiceluloses são os constituintes químicos que mais contribuem com a adsorção de água pela madeira e que a lignina é um dos componentes mais hidrófobos.

Figura 2 – Isoterma higroscópica de adsorção para a madeira de *Eucalyptus regnans* e seus componentes químicos (SKAAR, 1972).



Quando a madeira perde água higroscópica, ela contrai devido à aproximação das cadeias de celulose e de hemiceluloses, ao passo que o seu inchamento é caracterizado pela adsorção de água. A contração e o inchamento apresentam-se diferenciados nas três direções estruturais da madeira, sendo que nas direções tangencial, radial e longitudinal estão entre 3,5% e 15,0%, 1,9% e 11,0%, e 0,1% e 1,0%, respectivamente, e, originam a instabilidade dimensional (HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; BAO et al., 2001; CHAUHAN e AGGARWAL, 2004).

Como as microfibrilas da camada S2 da parede secundária formam ângulos menores que 30° com o eixo longitudinal e, a maioria das células da madeira está

disposta paralelamente à grã, a mudança na direção longitudinal das microfibrilas é pequena com a remoção de água. Assim, a madeira pouco contrai na direção longitudinal e de modo considerável nos planos transversais (SKAAR, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Contudo, os ângulos microfibrilares são maiores no lenho juvenil e menores no adulto. Para Donaldson (1992), as microfibrilas do lenho juvenil de *Pinus radiata* formam ângulo de 55° com o eixo longitudinal, enquanto que no lenho adulto são de 9°. Bao et al. (2001) caracterizaram tecnicamente a madeira de sete coníferas e de três folhosas e, concluíram que, os ângulos das microfibrilas variaram entre 9,77° e 16,60° no lenho juvenil e entre 8,56° e 14,00° no adulto.

Skaar (1972, 1988), Haygreen e Bowyer (1996) e Forest Products Laboratory (1999) salientam que um parâmetro tão importante quanto à retratibilidade é o seu Fator Anisotrópico (FA), razão entre as retrações tangencial e radial. E, que sendo próximo de um revela uma madeira com maior estabilidade dimensional.

Bao et al. (2001) verificaram que as contrações tangenciais do lenho juvenil de *Cunninghamia lanceolata*, *Larix olgenis*, *Pinus massoniana*, *Pinus yunnanensis*, *Larix kaempferi*, *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*, *Eucalyptus citriodora*, *Paulownia elongata* e *Populus nigra* x *P. simonii* foram 6,33%, 9,13%, 8,81%, 9,55%, 6,50%, 6,68%, 8,10%, 10,06%, 4,89% e 8,82%, respectivamente, enquanto que no lenho adulto apresentaram-se na ordem de 7,06%, 8,53%, 9,09%, 9,56%, 6,80%, 7,67%, 9,00%, 10,61%, 4,21% e 8,00%. Os autores concluíram que, no lenho juvenil das respectivas espécies, as contrações radiais foram 3,54%, 3,31%, 3,53%, 4,06%, 4,30%, 4,20%, 3,50%, 7,39%, 1,99% e 3,88%, enquanto que no lenho adulto foram de 3,46%, 3,24%, 3,85%, 4,84%, 4,90%, 5,41%, 5,20%, 8,70%, 1,86% e 3,20%.

A madeira de *Fagus grandifolia* apresenta, respectivamente, os seguintes valores médios para as contrações volumétrica e lineares tangencial e radial máximas: 13,00%, 9,50% e 4,00%. As mesmas propriedades físicas apresentam-se na ordem de 8,00%, 5,70% e 2,90% para a madeira de *Broximum alicastrum* e, respectivamente, em torno de 8,10%, 5,00% e 3,20% para a de *Casiniana domestica* (ALMEIDA e HERNÁNDEZ, 2006).

Para o lenho adulto de *Pinus taeda*, com 37 anos de idade, os respectivos valores das contrações volumétricas e lineares tangencial, radial e longitudinal máximas foram 14,20%, 7,89%, 6,43% e 0,47%. No lenho juvenil da mesma

espécie, esses valores foram de 12,26%, 7,42%, 4,84% e 0,41%, respectivamente (LARA PALMA e BALLARIN, 2003).

O lenho adulto proveniente de *Eucalyptus grandis* com 30 anos de idade apresenta, respectivamente, os seguintes valores médios para as contrações volumétrica e lineares tangencial, radial e longitudinal máximas: 29,04%, 17,03%, 9,74% e 0,298%. As mesmas propriedades físicas no lenho juvenil apresentam-se na ordem de 20,90%, 11,84%, 7,79% e 0,269% (CALONEGO et al., 2014).

Em estudo realizado por Melo et al. (2013) foram relatados que as contrações volumétricas, tangencial, radial e longitudinal máximas e o fator de anisotropia da madeira de *S. amazonicum* apresentaram-se na ordem de 10,55%, 7,24%, 3,17%, 0,42% e 2,94, respectivamente. Para Mainieri e Chimelo (1989) a contrações volumétrica, tangencial e radial da madeira de *S. parahyba* apresentam-se na ordem de 8,4%, 5,5% e 1,8%, respectivamente. Em outro estudo, ficou constatado que as respectivas contrações da madeira de *S. parahyba* estão em torno de 10,03%, 8,31% e 1,72%, e que o seu fator de anisotropia é 4,79 (BORTOLETTO JUNIOR e BELINI, 2002).

Athanásio-Heliodoro (2015) caracterizou tecnologicamente a madeira de *S. parahyba*, proveniente de árvores com 15 anos de idade. Segundo a autora, o lenho juvenil apresentou contrações volumétricas e lineares tangencial, radial e longitudinal máximas de 10,66%, 6,86%, 2,50% e 0,36%, respectivamente. Já, no lenho adulto, as respectivas propriedades físicas foram 12,35%, 7,43%, 2,88%, 0,36%. Salienta-se que a autora classificou a madeira dessa espécie como de alta homogeneidade, pois não há diferenciação significativa nas propriedades físicas dos diversos tipos de lenho de *S. parahyba*. Entretanto, segundo esse estudo, a madeira dessa espécie apresenta alta instabilidade dimensional, constatada pelo fator de anisotropia de 2,74 e 2,64 apresentado pelos respectivos lenhos juvenil e adulto.

Conhecidas as causas da instabilidade dimensional da madeira, as seguintes técnicas são propostas para amenizar o problema: laminação cruzada, revestimento, alteração química, preenchimento e tratamentos térmicos (SKAAR, 1988). Entre estes métodos, a modificação térmica é uma técnica que vem sendo empregada por vários autores para melhorar a estabilidade dimensional e aumentar a durabilidade biológica das madeiras (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; VERNONIS, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; BEKHTA e NIEMZ, 2003; WEILAND e GUYONNET, 2003; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; HAKKOU et al., 2006; MBURU

et al., 2007; CALONEGO et al., 2010, 2012, 2013, 2014; SEVERO et al., 2012; 2016).

2.4 Propriedades químicas da madeira

A madeira é um material orgânico e seus constituintes químicos estão relacionados com suas propriedades. Assim, o conhecimento da composição química da madeira é importante para a definição do uso do material.

A composição química da madeira é caracterizada pela presença de componentes fundamentais e acidentais. Os componentes fundamentais caracterizam a madeira, pois são partes integrantes das paredes das fibras e da lamela média. São considerados componentes fundamentais: a celulose, as hemiceluloses e a lignina (LEPAGE, 1986a; OLIVEIRA, 1997; FENGEL e WEGENER, 1989; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; SILVA, 2002). O conjunto da celulose e das hemiceluloses compõe o conteúdo total de polissacarídeos contidos na madeira e é denominado holocelulose (LEPAGE, 1986a; ZOBEL e VAN BUIJTENEN, 1989). Os extrativos totais atuam como componentes complementares ou acidentais e, também, devem ser quantificados (LEPAGE, 1986a; OLIVEIRA, 1997 e SILVA, 2002).

A celulose é o principal componente da parede celular e é constituída por uma única unidade monomérica glicosídica (β -D-glicopirranose). Segundo Lepage (1986), apresenta grau de polimerização entre 8.000 e 10.000, sendo que esse valor pode chegar até 30.000, conforme salienta Haygreen e Bowyer (1996). Possui regiões cristalinas e amorfas e, conseqüentemente, devido à baixa acessibilidade dos grupos hidroxilas (OH) é lentamente atacada por ácidos e apresenta-se insolúvel em álcali (LEPAGE, 1986a; FENGEL e WEGENER, 1989; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). Lepage (1986a) afirma que o teor de celulose com base na massa seca da madeira encontra-se, em geral, na ordem de 40-50%, o que é muito próximo aos 40-45% conforme relatado por Foelkel (1977) e Haygreen e Bowyer (1996).

As hemiceluloses são polissacarídeos de cadeias ramificadas e, embora possam ser constituídas por uma única unidade (homopolímero), normalmente são compostas por diferentes unidades de açúcares, com cinco (pentosanas) e/ou seis

átomos de carbono (hexosanas) (LEPAGE, 1986a; FENGEL e WEGENER, 1989; HAYGREEN e BOWYER, 1996). Segundo Lepage (1986a), apresenta grau de polimerização baixo e, como somente possui regiões amorfas, são facilmente degradadas por ácidos e apresentam-se solúveis em álcali (LEPAGE, 1986a; FENGEL e WEGENER, 1989; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). Entretanto, em tratamentos que ocasionam a perda de alguns substituintes da cadeia, as hemiceluloses podem sofrer cristalização induzida pela formação de pontes de hidrogênio, a partir das hidroxilas de cadeias adjacentes, dificultando a atuação de um produto químico com o qual esteja em contato (LEPAGE, 1986a) ou, também, aumentando a elasticidade da madeira e diminuindo o seu caráter hidrofílico (BHUIYAN et al., 2000, 2001; MBURU et al., 2007; ARNOLD, 2010). Para Foelkel (1977), em geral, constituem cerca de 20 a 30% da substância madeira. Contudo, Haygreen e Bowyer (1996) afirmam que o teor de hemiceluloses nas folhosas encontra-se na ordem de 15 a 35% e nas coníferas em torno de 20 a 32%.

As ligninas são substâncias amorfas, complexas, tridimensionais e de alto peso molecular. Conferem rigidez à parede celular e são constituídas de unidades de fenil-propano. Nas coníferas são essencialmente formadas por unidades do tipo guaiacil e nas folhosas possuem unidades do tipo guaiacil e do tipo siringil. Em função da presença de um radical metoxila adiconal nas unidades siringil, a lignina das folhosas são menos condensadas do que as das coníferas e, portanto, proporciona menor proteção à celulose (LEPAGE, 1986a; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FENGEL e WEGENER, 1989; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). Os teores de lignina nas folhosas encontram-se na ordem de 18 a 25% e nas coníferas em torno de 25 a 35% (FOELKEL, 1977; HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Os extrativos são compostos solúveis em água e solventes orgânicos, localizados nos lumes celulares, nas paredes celulares e nas células parenquimáticas da madeira e apresentam-se na ordem de 2 a 25% da substância madeira (FOELKEL, 1977; LEPAGE, 1986a; FENGEL e WEGENER, 1989; HAYGREEN e BOWYER, 1996). Segundo Lepage (1986a), a unidade química que pode ser considerada como básica desses compostos é o isopreno (C_5H_8). Contudo, os extrativos não se distribuem homogeneamente pelo fuste, sendo que a sua maior concentração ocorre nos lenhos das partes externas do cerne e próximos à base da árvore (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; HAUPT et al., 2003; LATORRACA et al., 2011).

Bao et al. (2001) verificaram que os teores de lignina no lenho juvenil das madeiras de *Pinus massoniana*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* equivale a 27,03%, 28,39% e 28,58% e os encontrados no lenho adulto são 27,49%, 27,53% e 26,93%. Concomitantemente, os teores de holocelulose presentes no lenho juvenil das respectivas espécies são 69,95%, 68,05% e 69,25% e significativamente inferiores aos 71,05%, 70,09% e 71,66% encontrados no lenho adulto.

Severo et al. (2012) caracterizaram quimicamente a madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* e concluíram que os respectivos teores de extrativos totais e de lignina Klason no lenho juvenil equivalem a 3,23% e 28,64% e são estatisticamente superiores aos 1,58% e 27,00% encontrados no lenho adulto. Entretanto, os 67,60% de holocelulose presente no lenho juvenil é estatisticamente inferior aos 71,00% contidos no lenho adulto.

Calonego et al. (2016) citam que a espécie *Eucalyptus grandis* apresenta lenho juvenil com 2,06%, 26,12% e 73,69% de extrativos, lignina Klason e holocelulose, respectivamente. No lenho adulto, os respectivos componentes químicos se apresentam na ordem de 2,46%, 28,27% e 72,77%.

Severo et al. (2016) afirmam que o lenho juvenil de *Hevea brasiliensis* apresenta valores médios de extrativos totais, de lignina Klason e de holocelulose na ordem de 5,96%, 19,25% e 73,55%, respectivamente. As respectivas propriedades químicas apresentam valores de 5,83%, 18,18% e 73,89%.

Em estudo realizado por Trianoski (2010) foram relatados que os respectivos teores de extrativos totais, de lignina Klason e de holocelulose da madeira de *S. parahyba* apresentaram-se na ordem de 8,65%, 21,01% e 69,39%.

2.5 Caracterização colorimétrica da madeira

O emprego de madeiras em determinadas situações, onde o seu aspecto e sua aparência superficial seja importante, implica na necessidade da sua caracterização colorimétrica (CAMARGOS e GONÇALEZ, 2001; GONÇALEZ et al., 2001), sendo que o seu preço pode variar em até cinco vezes em função da cor (GONÇALEZ et al., 2001). Assim, esta propriedade deve ser incorporada ao planejamento, visando à caracterização tecnológica da madeira, para atender aos usos mais nobres desse

material (CAMARGOS e GONÇALEZ, 2001; ISHIGURI, 2003; MORI et al., 2005; OLTEAN et al, 2008).

A colorimetria quantitativa é a metodologia mais recente e a mais interessante para determinar a qualidade da madeira em função da sua cor e se baseia na distribuição espacial das cores (ASTM E-308, 1999; CAMARGO e GONÇALEZ, 2001; GONÇALEZ et al., 2001; BEKHTA e NIENZ, 2003; MITSUI, 2004, 2006; MITSUI et al., 2004; MORI et al., 2005).

A radiação eletromagnética, provinda das fontes luminosas ou dos objetos através da reflexão ou transmissão, é percebida por células presentes na retina do olho humano. Essas células são fotossensíveis a comprimentos de onda longos, médios e curtos (vermelho, verde e azul), e esses triestímulos são normalmente conhecidos pelas iniciais em inglês 'R', 'G' e 'B' (SMITH e POKORNY, 2003; GOMES, 2013).

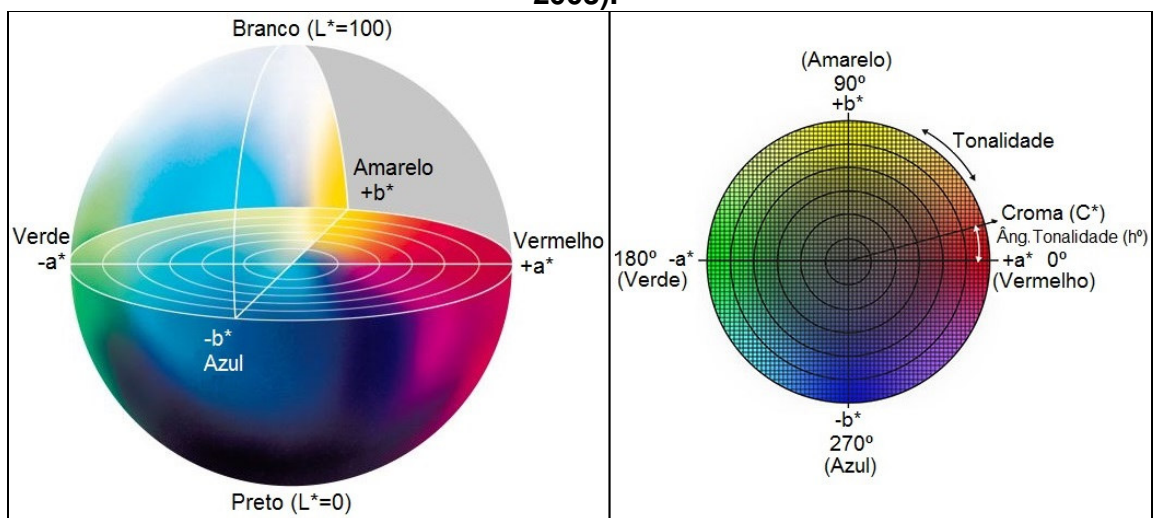
Embora o sistema de cores RGB seja o padrão para os aparelhos de TV, scanners, monitores e câmeras digitais, ele não apresenta um espaço de cor perceptivelmente uniforme (MENDOZA et al., 2006), pois a resposta do olho aos estímulos espectrais não é linear (SMITH e POKORNY, 2003), o que significa dizer que as diferenças entre algumas cores no espaço RGB não correspondem às diferenças de cor na percepção dos seres humanos (MENDOZA et al., 2006).

Assim, o sistema de cores CIE XYZ é derivado de uma transformação linear do RGB e foi normatizado pela Comissão Internacional de Iluminantes (Comission Internacional de L'éclaire - CIE) em 1931 (SMITH e POKORNY 2003; MENDOZA et al., 2006). Esse sistema de cores além de ser usado pela indústria serve como a base de definição de muitos outros espaços de cor (BRAINARD, 2003; MENDOZA et al., 2006).

Porém, quando a cor é expressa em coordenadas de triestímulo, a distância entre as coordenadas de dois estímulos não se correlaciona bem com a sua discriminabilidade. Assim, o propósito do espaço de cor CIE $L^*a^*b^*$, o qual foi derivado do CIE XYZ e desenvolvido pela CIE em 1976, é o de quantificar as pequenas diferenças de cor (BRAINARD, 2003). Ele apresenta espaço de cor perceptualmente uniforme, pois fornece cores consistentes, independente se o dispositivo de entrada ou saída for uma câmera, scanner, monitor ou impressora (MENDOZA et al., 2006).

Como mostra a Figura 3, a cor dos objetos pode ser expressa pela distância geométrica regular entre os pontos medidos nos eixos L^* , a^* e b^* . A claridade ou brilho (L^*) varia de 0 a 100 e define a escala entre o preto e o branco. A variável a^* posiciona a cor no eixo verde-vermelho; se negativa indica que o objeto reflete o verde e quando positiva o vermelho. A variável b^* posiciona a cor no eixo azul-amarelo; quando negativa indica que o objeto reflete o azul e se positiva o amarelo. A tonalidade (h°) é dada pelas cores verde, vermelho, azul e amarelo. A saturação ou cromaticidade (C^*) é o desvio a partir do ponto, no eixo L^* , correspondente ao cinza e quanto mais distante dele mais saturada é a cor (ASTM E-308, 1999; CAMARGO e GONÇALEZ, 2001; GONÇALEZ et al., 2001; BEKHTA e NIENZ, 2003; BRAINARD, 2003; MITSUI, 2004, 2006; MITSUI et al., 2004; MORI et al., 2005).

Figura 3 – Diagrama colorimétrico pelo sistema CIE $L^*a^*b^*$ (adaptado de ASTM E-308, 1999; GONÇALEZ et al., 2001; BEKHTA e NIENZ, 2003; BRAINARD, 2003).



Segundo Gonzalez et al. (2001) e Mori et al. (2005) os principais equipamentos utilizados para a medição de cores são o colorímetro e o espectrofotômetro. O colorímetro usa o iluminante do tipo “emissão da luz do dia” e possui quatro filtros de cor que fornecem apenas os valores triestímulos (X , Y e Z) e, portanto, não permitem a formulação direta da cor. Os espectrofotômetros são mais complexos, pois permitem a formulação de cor, através da verificação dos valores triestímulos, da curva de sensibilidade do olho do observador padrão (2° ou 10°) e do comprimento de onda luminosa. Assim, Brainard (2003), Mendoza et al. (2006) e Gomes (2013) afirmam que as cores do sistema CIE $L^*a^*b^*$ provêm de cálculos

matemáticos que contemplam os valores triestímulos dos espaços de cores RGB e/ou CIE XYZ, o grau do observador e o tipo de iluminante.

Johanson e Morén (2006) em seu estudo para correlacionar as propriedades mecânicas e colorimétricas da madeira de *Betula pendula* utilizaram um scanner de linha com três sensores sensíveis à luz (vermelho, verde e azul). O equipamento trabalha com o espaço de cores RGB e cada pixel de cada linha da imagem é registrado por cada sensor, através de um número que varia de 0 a 255. Posteriormente, esses valores foram convertidos através de um software matemático para o sistema CIE L* a* b*.

Camargos e Gonçalves (2001) estudaram a cor das madeiras de 350 espécies tropicais brasileiras e concluíram que os valores máximos do brilho (L*), dos parâmetros a* e b*, da saturação (C*) e da tonalidade (h°) foram 86,44 (madeira de cor branca), 26,82, 46,59, 47,03 e 87° (madeira correspondente ao amarelo) e que os respectivos valores mínimos foram 26,93 (madeira de cor preta), 1,16, 1,92, 2,31 e 13,94° (madeira correspondente ao vermelho). Os autores verificaram que as tonalidades (h) de todas as cores dessas madeiras se enquadram entre 0° e 90° (primeiro quadrante), e, portanto, variam entre o vermelho e o amarelo.

Silva et al. (2007) quantificaram os parâmetros das cores das madeiras de Ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa*), Itaúba (*Mezilaurus itauba*), Maçaranduba (*Manilkara huberi*), Tatajuba (*Bagassa guianensis*) e Tauari (*Couratari* sp.) pelo sistema CIE L*a*b* e as classificaram pelo sistema Munsell de ordenamento de cor, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de cor natural de algumas espécies de madeiras (SILVA et al., 2007).

Espécie	Brilho (L*)	Coordenada Verde-vermelho (a*)	Coordenada Azul-amarelo (b*)	Cor pelo sistema Munsell
Ipê-roxo	34,67	6,71	9,15	Oliva-amarronzado-escuro
Itaúba	43,22	6,74	16,88	Marrom-amarelado
Maçaranduba	35,74	8,64	7,27	Marrom-avermelhado-escuro
Tatajuba	47,09	6,76	21,27	Marrom-dourado
Tuari	50,43	5,72	15,65	Marrom-amarelado-claro

Gonçalves et al. (2001) verificaram que as cores das faces tangenciais das madeiras de *Vataireopsis speciosa*, *Cariniana micrantha*, *Rauwolfia parensis*,

Aspidosperma macrocarpum, *Swietenia macrophylla*, *Amburana acriana*, *Peltogyne angustiflora* e *Bowdichia virgilioides* continuam brilho (L^*) de 56,20, 55,45, 69,49, 58,73, 56,34, 78,85, 44,42 e 51,22, respectivamente. Os brilhos nas faces radiais das respectivas madeiras apresentaram-se na ordem de 53,25, 53,44, 69,33, 55,58, 69,34, 43,51 e 51,79. Os autores concluíram que as faces tangencial e radial das madeiras possuem diferença significativa nos seus brilhos, indicando que a coloração é mais clara na face que tangencia os anéis de crescimento. Como os parâmetros cromáticos a^* e b^* indicam a presença de pigmentos de coloração vermelha e amarela na madeira, nas madeiras estudadas, as faces radiais apresentam-se mais avermelhadas e/ou amareladas que as faces tangenciais.

Mori et al. (2005) verificaram que o brilho (L^*), os parâmetros a^* e b^* , a saturação (C^*) e a tonalidade (h°) da madeira retirada de 1,30 m de altura de vários clones de *Eucalyptus* sp. foram, respectivamente, 72,96, 9,79, 19,85, 22,27 e 64,01^º. Na madeira proveniente de 2,80 m de altura, as respectivas variáveis apresentaram-se em torno de 74,84, 9,15, 19,17, 21,36 e 64,69^º. Assim, em direção ao topo do fuste, a madeira apresentou-se mais clara e menos avermelhada, menos saturada e com menor tonalidade.

Mori et al. (2004) correlacionaram as propriedades químicas com as cores da madeira de *Eucalyptus* sp. e constataram que os teores de extrativos totais variam significativamente entre 5,91% e 4,69% para as alturas do fuste de 1,30m e 2,80m. O teor de extrativos totais foi a característica da madeira que melhor se correlacionou com os parâmetros da sua cor, sendo que apresentou uma correlação positiva com os parâmetros a^* , b^* e C^* , e uma correlação negativa com a claridade (L^*) e a tonalidade (h°). Assim, o aumento no teor de extrativos da madeira aumenta a sua cor avermelhada. Foi mostrado que o teor de lignina afeta menos os parâmetros de cor do que o teor de extrativos presentes na madeira. Entretanto, pode não ser o seu teor de lignina o mais importante na comparação com os parâmetros e, sim, o tipo de polímero.

Contudo, Mori et al. (2005) salientaram que, todas as coordenadas cromáticas que determinam a cor da madeira de *Eucalyptus* sp. variam significativamente no sentido radial do fuste. O brilho (L^*) aumenta da medula em direção à periferia do fuste. A variável a^* aumenta em direção ao cerne externo e diminui no alburno, indicando que o cerne é mais avermelhado que os outros tipos de lenho. A variável b^* apresenta-se constante e indica uma homogeneidade da cor amarela no sentido

radial. O alburno é menos saturado (C^*) e apresenta a tonalidade (h) com valores mais elevados do que as amostras do cerne.

Melo et al. (2013) verificaram que o brilho (L^*), os parâmetros a^* e b^* , a saturação (C^*) e a tonalidade (h°) de lâminas de madeira de *S. amazonicum*, com 5 a 7 anos, foram 87,51, -0,30, 27,56, 27,57 e 90,68°. Os autores classificaram a madeira de Paricá como branco-acinzentada devido à alta claridade (L^*) e a presença marcante o pigmento amarelo (alto valor de b^*).

Athanázio-Heliodoro (2015) através da análise visual da madeira concluiu que o *S. parahyba* possui o cerne com cor amarelada e o alburno esbranquiçado. Através de análise semelhante, Trianoski (2010) classifica a madeira dessa espécie como de cor branco palha com nuances amarelado ou rosado. Entretanto as autoras não realizaram análises quantitativas dos padrões colorimétricos dessa madeira.

Assim, constata-se que a análise de cor pelo sistema CIE $L^*a^*b^*$ permite classificar os lotes de madeira pelo padrão cor e diferenciar o material em função da espécie e do plano anatômico, além de ser um fator chave na qualidade final de um produto (Gonzalez, 2001; Mori et al., 2005).

2.6 Durabilidade natural da madeira

A durabilidade biológica ou natural da madeira é a capacidade inerente da espécie em resistir à ação dos agentes degradadores, incluindo os agentes físicos, os químicos e os biológicos (OLIVEIRA et al., 1986; BARREAL, 1998; LELIS et al., 2001; ASTM D-2017, 2005) e apresenta-se como uma das propriedades de maior importância para a caracterização da madeira como material de construção (OLIVEIRA, 1997).

É uma propriedade de suma importância para que se possa recomendar um emprego mais adequado do material, evitar gastos desnecessários com reposição de peças deterioradas e reduzir os impactos sobre as florestas naturais remanescentes (OLIVEIRA et al., 1986; LELIS et al., 2001; PAES et al., 2004).

A madeira é degradada biologicamente porque os organismos reconhecem os polímeros naturais da parede celular como fonte de nutrição e, os metabolizam em unidades digeríveis através da ação de sistemas enzimáticos específicos

(CLEVELAND, 1923; OLIVEIRA et al., 1986; DUTTON et al., 1993; GOODELL et al., 1997; AGUIAR e FERRAZ, 2011).

As madeiras com alta resistência natural devem esta característica à presença, em seu cerne, de substâncias de natureza fenólica com propriedades fungicidas e inseticidas. Entretanto, os extrativos não se distribuem homoganeamente pelo fuste, sendo que a sua maior concentração e, conseqüentemente, a maior resistência natural ocorre nos lenhos das partes externas do cerne e próximos à base da árvore. No alburno, devido aos baixos teores de extrativos totais a resistência natural desse tipo de lenho é baixa (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; OLIVEIRA et al., 1986; OLIVEIRA, 1997; HAUPT et al., 2003; PAES, 2004; LATORRACA et al. 2011).

2.6.1 Durabilidade natural da madeira aos fungos apodrecedores

Os fungos são organismos que necessitam de compostos orgânicos como fonte de alimento. Aqueles que utilizam os componentes químicos da madeira são conhecidos como fungos xilófagos (OLIVEIRA et al., 1986; LELIS et al., 2001) e estão entre os principais e mais importantes agentes biodeterioradores das madeiras existentes no mundo (OLIVEIRA, 1997).

Os fatores que facilitam a deterioração da madeira por fungos são os teores de umidade do material acima de 25%, a temperatura entre 20°C e 35°C e os baixos teores de extrativos totais presentes na madeira (OLIVEIRA et al., 1986; BARREAL, 1998; LELIS et al., 2001). Para Forest Products Laboratory (1999) as condições ótimas para o desenvolvimento dos fungos compreendem temperaturas entre 10°C e 35°C e madeira com teores de umidade em torno de 20% a 30%.

Oliveira et al. (1986), Oliveira (1997), Barreal (1998), Forest Products Laboratory (1999) e Lelis et al. (2001) citam que os fungos xilófagos são reunidos, em função do tipo de ataque à madeira, nos seguintes grupos: (1) Fungos Emboloradores e/ou Manchadores - responsáveis por alterações na superfície da madeira e popularmente conhecidos como bolor e/ou por manchas profundas no alburno das madeiras devido à presença de hifas pigmentadas ou de pigmentos liberados pelos fungos. As propriedades mecânicas das madeiras atacadas por esses fungos são pouco alteradas, pois esses organismos não possuem complexos enzimáticos capazes de degradar os polímeros da madeira e apenas utilizam as substâncias de

fácil assimilação (açúcares simples, proteínas e gorduras) encontradas nos lumes celulares; e (2) Fungos Apodrecedores - responsáveis por profundas alterações nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras, devido às progressivas deteriorações das moléculas que constituem as suas paredes celulares. Os fungos apodrecedores são agrupados conforme o tipo de deterioração da madeira: (2.1) Fungos de Podridão Branca - tornam a madeira esbranquiçada, devido, principalmente, à degradação da lignina; (2.2) Fungos de Podridão Parda - causam a coloração pardo-escura devido à degradação da celulose e das hemiceluloses da madeira; e (2.3) Fungos de Podridão Mole - amolecem as superfícies das madeiras, com altos teores de umidade e quando se encontram em baixa disponibilidade de oxigênio, devido à degradação das hemiceluloses e da celulose.

Em geral, os fungos de podridão parda, incluindo a espécie *Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murrill, produz peróxido de hidrogênio extracelular (H_2O_2) e ácido oxálico ($H_2C_2O_2$), os quais reagem com os íons de ferro presentes nos materiais lignocelulósicos. Os radicais hidroxilas produzidos pela reação de Fenton ocasiona a clivagem das moléculas da longa cadeia de celulose em pequenos fragmentos. Assim, há um aumento da porosidade da parede celular permitindo a penetração das enzimas celulolíticas que aumentam a deterioração causada pelo fungo de podridão parda na madeira (GOODELL et al., 1997; XU e GOODELL, 2001; ARANTES e MILAGRES, 2009; WATANABE et al., 2010; AGUIAR e FERRAZ, 2011). Dutton et al. (1993) mostraram que o fungo da podridão parda secreta grande quantidade de oxalato no meio de cultura, o que reduz o pH do substrato, quando comparado aos fungos de podridão branca, os quais não reduzem o pH do meio onde crescem.

No estudo sobre a avaliação da resistência natural das madeiras de *Aspidosperma desmanthum*, *Parinari excelsa*, *Mouriri callocarpa*, *Marmaroxylon racemosum*, *Peltogyne paniculata* and *Astronium* sp. ao fungo de podridão parda *G. trabeum* e ao de podridão branca *P. sanguineus* foi mostrado que o apodrecimento causado pelo primeiro foi maior. As madeiras estudadas apresentaram perda de massa entre 1,97% e 12,2% quando degradada pelo *G. trabeum* e entre 0,05% e 3,21% pelo *P. sanguineus*, após o teste de apodrecimento acelerado de seis semanas (ALVES et al., 2006).

Calonego et al. (2013) realizaram estudo semelhante e concluíram que o fungo *G. trabeum* também causa maior degradação na madeira de *E. grandis* quando

comparado ao fungo *P. sanguineus*. Após 12 semanas de apodrecimento acelerado o fungo de podridão parda ocasionou 50,33% de perda de massa e o de podridão branca 34,32%.

De acordo com Andrade et al. (2012), a madeira de *E. grandis* quando exposta por 8 semanas aos fungos de podridão branca *Ganoderma applanatum* (Pers.) Pat., *P. sanguineus*, *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler e *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Singer apresentaram respectivas perdas de massa de 34,0%, 29,0%, 27,5% e 13,0%.

Severo et al. (2016) verificaram que os lenhos juvenil e adulto de *Hevea brasiliensis* depois de expostos por 12 semanas ao fungo *G. trabeum* apresentaram, respectivamente, perda de massa de 29,26% e 27,56%. Os mesmos lenhos quando submetidos ao fungo *P. sanguineus* apresentaram perda de massa de 37,24% e 40,78%.

Paes et al. (2004) avaliaram a resistência natural, em condições de laboratório, da madeira de 9 (nove) espécies do semiárido brasileiro e concluíram que os fungos xilófagos não atacam as diferentes madeiras com a mesma intensidade. O alburno de *Schinopsis brasiliensis* (Brauna) foi o lenho mais deteriorado pelos fungos *Postia placenta* e *Neolentinus lepideus*, com, respectivamente, cerca de 35,96% e 38,26% de perda de massa. Nas mesmas condições, a madeira que teve o alburno menos deteriorado foi a *Senna siamea* (Cássia), com perda de massa de 1,87% e 2,76%. Os corpos de prova retirados do cerne interno (próximo à medula), do cerne intermediário e do cerne externo (próximo ao alburno) da madeira de *Aspidosperma pyriformium* (Pereiro) foram os que apresentaram a menor resistência significativa ao fungo *Postia placenta*, com perdas de massa na ordem de 37,54%, 34,23% e 21,07%, respectivamente. Os cernes que apresentaram maior resistência à ação do mesmo fungo foram os da madeira de *Tabebuia impetiginosa* (Ipê), respectivamente, com perda de massa de 0,44%, 1,13% e 0,49%.

Guilley et al. (2004) concluíram que há uma variação de 10,5% na resistência da madeira no sentido da medula à casca e que a resistência da madeira diminui do cerne externo para o interno. Segundo os autores, 65,8% dos corpos de prova do cerne externo e 62,7% do cerne interno de *Quercus petraea*, quando expostos ao fungo *Coriolus versicolor*, apresentaram perda de massa inferior a 15,00% e foram classificados como muito durável.

Em estudo realizado por Jankowsky e Lepage (1986) ficou constatado que a perda de massa da madeira de *S. parahyba* após ensaios de apodrecimento

acelerado com fungo de podridão mole foi 9,5%. Contudo, são escassos os estudos sobre a durabilidade natural da madeira de Guapuruvu. Um estudo mais detalhado sobre a resistência dessa madeira foi encontrado na literatura, contudo trata-se da resistência ao cupim *C. brevis*.

2.6.2 Durabilidade natural da madeira aos cupins

Os cupins são insetos da ordem isoptera, que apresentam metamorfose incompleta, formam colônias com diferentes castas e quando xilófagos são os maiores degradadores da madeira. A ordem isoptera contém mais de duas mil espécies distribuídas em sete famílias, sendo que espécies de quatro dessas famílias: serritermitidae, termitidae, rhinotermitidae e kalotermitidae, vivem no Brasil (OLIVEIRA et al., 1986; LELIS et al., 2001).

A celulose é o alimento básico dos cupins, porém é uma substância de difícil digestão, a qual exige complexos enzimáticos específicos que esses insetos não produzem (CLEAVELAND, 1923; OLIVEIRA et al., 1986; LELIS et al., 2001; GONÇALVES e OLIVEIRA, 2006). Assim, muitas espécies de cupins estão associadas simbioticamente com microrganismos capazes de degradar a celulose em moléculas de glicose (CLEAVELAND, 1923; OLIVEIRA et al., 1986). Cleaveland (1923), ao estudar várias espécies de 36 gêneros de mastotermitidae, termitidae, rhinotermitidae e kalotermitidae, constatou que existe correlação direta e positiva entre o hábito de comer madeira e a presença de protozoários no intestino desses insetos.

Segundo Barreal (1998) e Lelis et al. (2001), na prática, esses insetos podem ser classificados em função do local de permanência da colônia nos seguintes grupos: (1) cupins arborícolas; (2) cupins subterrâneos ou de solo; e (3) cupins de madeira. Os representantes típicos dos cupins de madeira são da família kalotermitidae e, segundo Oliveira et al. (1986), Lelis et al. (2001) e Evans et al. (2005), se caracterizam por apresentarem colônias pequenas e totalmente inseridas dentro da peça de madeira. Esses cupins são classificados em: (1) cupins de madeira úmida, pois se desenvolvem no material acima do PSF; e (2) cupins de madeira seca, pois se estabelecem em madeira com baixos teores de umidade.

Evans et al. (2005) realizaram estudos com o cupim de madeira seca *Cryptotermes domesticus*, em amostras com diferentes dimensões de *Pinus radiata*, e concluíram que esses insetos preferem fazer seus túneis em peças menores de madeira tais como móveis, com o objetivo de evitar a competição com espécies de cupins maiores, os quais estabelecem suas colônias em peças maiores, pois precisam de um volume maior de madeira. Assim, conseqüentemente, esses cupins têm suas colônias transportadas ao redor do mundo e tornaram-se uma praga cosmopolita.

Os cupins de madeira seca são considerados os mais importantes, do ponto de vista econômico, e, no Brasil, o representante típico desse grupo é o *C. brevis* (OLIVEIRA et al., 1986; LELIS et al., 2001; GONÇALVES e OLIVEIRA, 2006). Para avaliar a durabilidade natural da madeira a esses cupins de madeira seca, procedimentos podem ser realizados conforme preconiza a norma IPT-1157 (1980). Contudo, de acordo com Ribeiro et al. (2014), estudos sobre a resistência natural das madeiras aos cupins *C. brevis* são escassos.

Na avaliação da resistência natural da madeira de *Tectona grandis* (Teca) ao cupim *C. brevis* foi mostrado que a mortalidade dos insetos durante o ensaio, a perda de massa e a nota de desgaste provocado pelos insetos são fatores que caracterizam a durabilidade natural da madeira. O cerne e o alburno da madeira estudada apresentaram respectivas perdas de massa de 0,24% e 0,93%, enquanto que as notas de desgaste foram 0,86 (desgaste pouco expressivo) e 2,44 (desgaste moderado a acentuado) e a percentagem de cupins mortos durante o ensaio foram 64,8% e 55,0% (PAES et al., 2015). Os autores classificaram a madeira de Teca como de resistência moderada aos cupins de madeira seca.

A madeira de *Toona ciliata* (Cedro australiano) apresentou maior teor de extrativos (13,0%) e menor massa específica básica ($0,32 \text{ g/cm}^3$) que a de *Pinus* sp. (6,4% e $0,36 \text{ g/cm}^3$), porém a perda de massa provocada pelo cupim *C. brevis* foi 1,74% na madeira da folhosa e de 6,62% na da conífera estudada (RIBEIRO et al., 2014). Os autores salientam que embora a madeira do Cedro australiano apresente menor massa específica que a de *Pinus*, o que facilitaria a sua degradação pelo inseto, o efeito químico (maior teor de extrativos, principalmente limonóides) foi mais relevante para a resistência natural da folhosa perante aos insetos xilófagos.

Gonçalves et al. (2013) avaliaram a resistência natural, a composição química e a massa específica aparente da madeira de várias espécies comerciais brasileiras e concluíram que o cupim *C. brevis* não ataca as diferentes madeiras com a mesma intensidade. As madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, de *Dalbergia nigra* (Jacarandá-da-Bahia) e de *Hymenolobium petracum* (Angelim pedra) foram as mais deterioradas pelos cupins, com, respectivamente, notas 4,0 (maior desgaste), 3,0 e 1,87. Já as madeiras de *Caesalpiniae echinata* (Pau Brasil), *Eucalyptus cloeziana*, *Anadenanthera peregrina* (Angico verdadeiro) e de *Eucalyptus toreliana* apresentaram desgaste intermediário, como mostram as notas 1,73, 1,73, 1,40 e 1,07. Nas mesmas condições, as madeiras que foram menos atacadas pelo agente xilófago foram a *Anadenanthera columbrina* var. *cebil* (Angico vermelho), *Manilkara longifolia* (Parajú), *Chlorophora tinctoria* (Amoreira) e *Peltogine nitens* (Roxinho), com notas de 0,27, 0,53, 1,0 e 1,0, respectivamente. Segundo os autores, não existe uma característica única que possa ser empregada para relacionar o ataque provocado pelos cupins nas madeiras estudadas, mas que os maiores valores de mortalidade dos cupins ocorreram em madeiras com maiores massa específicas aparentes a 5%, maiores teores de extrativos e cinzas.

Em estudo sobre a avaliação da resistência natural das madeiras de *Pinus* sp., *S. parahyba* (Guapuruvu), *Toona ciliata* (Cedro-australiano), *Tachigalia myrmecophylla* (Cacunda), *Goupia glabra* (Cupiúba), *Cedrela fissilis* (Cedro-rosa) e *Caryocar brasiliense* (Pequi) ao cupim *C. brevis* foi mostrado que as respectivas madeiras apresentaram nota de ataque de 4 (maior desgaste), 2,78, 1,94, 1,33, 0,45, 0,28 e 0,22. Nas madeiras estudadas, a mortalidade de cupins foram 17,5%, 21,67%, 69,58%, 66,67%, 90,42%, 73,75% e 70,83%, respectivamente. Ficou constatado que as madeiras de *Pinus* e de Guapuruvu foram as únicas que apresentaram furos causados pelo cupim, 2 e 6 respectivamente, e são as menos resistentes ao inseto, pois apresentaram desgaste de moderado a acentuado (GONÇALVES e OLIVEIRA, 2006).

Kartal et al. (2009) explicam que a presença de compostos de sílica na madeira aumenta a sua resistência aos cupins. Para tanto, os autores modificaram a madeira de *Cryptomeria japonica* com tetraetoxissilano e metiltrietoxissilano e, concluíram que a madeira não tratada apresentou perda de massa de 30% após 3 semanas de ensaio com os cupins subterrâneos *Coptotermes formosanus*, enquanto que as modificadas com os compostos de sílica apresentaram resistência total aos térmitas.

Segundo Oliveira et al. (1986) e conforme exposto anteriormente há três formas para impedir, ou pelo menos atenuar, a ação dos agentes deterioradores da madeira: (1) usar madeira com elevada resistência biológica; (2) incorporar produtos químicos, conhecidos como preservativos, na madeira; ou (3) promover alterações químicas permanentes na estrutura dos componentes poliméricos da madeira com o intuito de impedir o reconhecimento do substrato pelos organismos xilófagos.

2.6.3 Resistência da madeira ao intemperismo

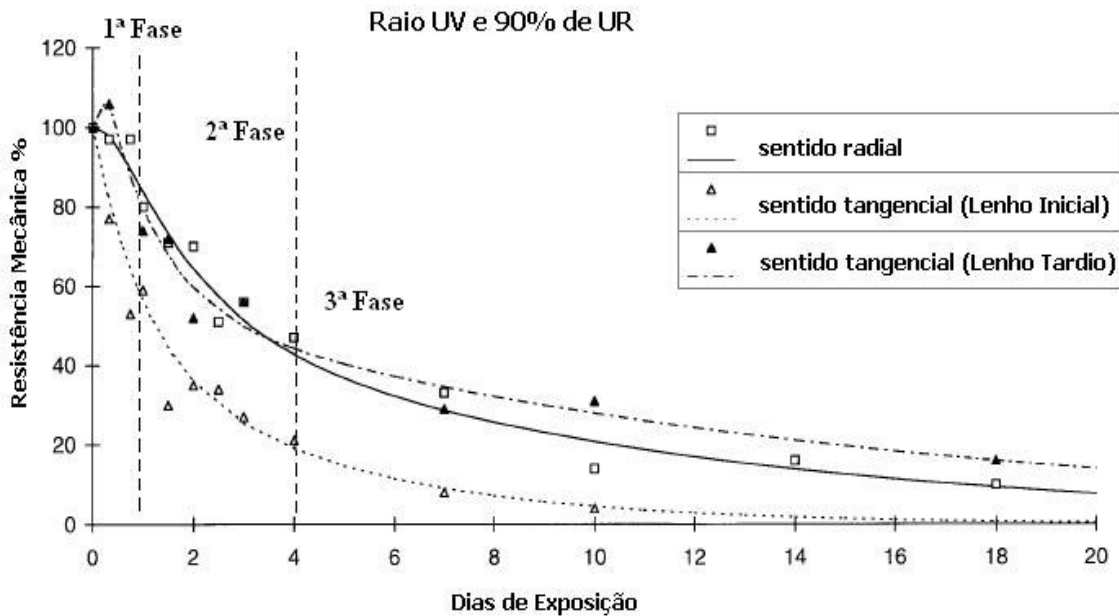
Quando a madeira é exposta às intempéries, fora do contato do solo, vários fatores químicos, mecânicos e energéticos (luz) contribuem para que ela se torne rugosa, que ocorra levantamento da grã, surjam fendilhamentos e que as fibras fiquem soltas e a superfície da peça apresente aparência desagradável e mude de cor (LEPAGE, 1986b; KATAOKA e KIGUCHI, 2001; TURKULIN e SELL, 2002; ISHIGURI, 2003; MORI et al., 2004, 2005; SILVA et al., 2007; SILVA e PASTORE, 2004; OLTEAN et al., 2008).

Os fótons emitidos pela radiação solar são os componentes mais deletérios que promovem as alterações da superfície da madeira. A degradação fotoquímica da madeira é provocada principalmente pela ação da luz ultravioleta (espectro eletromagnético menor que 300 nm) que é capaz de ocasionar a ruptura das ligações químicas do material (LEPAGE, 1986b; KATAOKA e KIGUCHI, 2001).

Turkulin e Sell (2002) verificaram a qualidade da madeira de *Pinus sylvestris* exposta, durante 20 dias, aos raios ultravioletas e atmosfera com 90% de umidade relativa. Os autores concluíram que após esse período, as células das camadas superficiais e intemperizadas da madeira apresentaram 20% da sua resistência mecânica original. A Figura 4 mostra que, após o primeiro dia de exposição, as células da camada superficial da madeira apresentaram um ligeiro aumento na sua resistência mecânica devido ao rearranjo dos seus polímeros; do primeiro ao quarto dia (2ª fase do intemperismo) ocorreu a máxima redução na sua resistência mecânica, devido à degradação fotoquímica da lignina e, posteriormente, ocorreu ligeira redução na sua resistência mecânica, devido à degradação fotoquímica da celulose (3ª fase do intemperismo).

Em estudo sobre a influência da foto-exposição na alteração da cor e da composição química da madeira de *Cryptomeria japonica* ficou constatado que a madeira exposta à irradiação de luz apresenta coeficiente de correlação entre a degradação da lignina e a mudança de cor de 0,95 (MITSUI et al., 2004). A fotodecomposição da lignina nas camadas superficiais da peça de madeira diminui a resistência das ligações das paredes celulares e induz a formação de fendas inter e/ou intracelulares. As principais alterações microscópicas observadas são o alargamento das pontuações, formação de microfissuras nas paredes celulares e a delaminação da lamela média (LEPAGE, 1986b; TURKULIN e SELL, 2002).

Figura 4 – Resistência mecânica da parede celular de *Pinus sylvestris* durante ensaio de intemperismo (adaptado de TURKULIN e SELL, 2002).



Kataoka e Kiguchi (2001) estudaram as modificações químicas causadas na superfície da madeira de *Cryptomeria japonica* durante o ensaio de intemperismo, com 60°C e irradiação luminosa artificial (>290nm) por até 1500 horas, e, concluíram que o aumento do tempo de exposição induz ao aumento exponencial de até 500 µm na profundidade de fotodecomposição dos componentes químicos da madeira.

Oltean et al. (2008) ao caracterizarem a cor de dezoito madeiras Europeias após o ensaio de intemperismo, concluíram que as espécies apresentam mudança de cor diferenciada mediante a fotodecomposição. Algumas se tornaram mais escuras (*Picea abies* com ΔL^* de -11,3 e *Robinia pseudoacacia* com ΔL^* de -10,9), outras

mais avermelhadas (*Robinia pseudoacacia* com Δa^* de 4,6 e *Picea abies* com Δa^* de 4,3) ou amareladas (*Picea abies* com Δb^* de 10,5 e *Abies alba* com Δb^* de 10,0) ou, ainda, mais esverdeadas (*Prunus avium* com Δa^* de -3,4 e *Pyrus communis* com Δa^* de -2,8) ou mais azuladas (*Pinus sylvestris* com Δb^* de -1,1) ou mais claras (*Juglans regia* com ΔL^* de 6,1 e *Ulmus glabra* com ΔL^* de 5,2). Após as primeiras 120 horas de ensaio, as madeiras das coníferas que apresentaram as maiores e as menores mudanças nas suas cores foram *Picea abies* e *Larix deciduas*, com ΔE^* de 16,0 e 5,5, respectivamente. Nas folhosas, a amplitude de variações nas cores variou entre 3,8 para *Quercus petraes* e 14,2 para a madeira de *Acer plantanoides*.

2.7 Processo de modificação térmica da madeira

Muitos processos de modificação térmica da madeira estão descritos na literatura. Em geral, eles apresentam em comum o fato da madeira ser exposta a temperaturas próximas à 200°C durante várias horas (WASKETT e SELMES, 2001; RAPP e SAILER, 2001; ROUSSET et al., 2004; METSÄ-KORTELAINE et al., 2005; ESTEVES e PEREIRA, 2009; KOROŠEC et al., 2009; CALONEGO et al., 2012, 2016; SEVERO et al., 2012).

Segundo Homan et al. (2000), Rapp e Sailer (2001), Syrjänen (2001), Vernois (2001), Waskett e Selmes (2001), Alén et al. (2002), Rousset et al. (2004) e Metsä-Kortelainen et al. (2005), Esteves e Pereira (2009), Korošec et al. (2009), atualmente, os tratamentos térmicos utilizados comercialmente na Europa com o objetivo de melhorar a estabilidade dimensional e aumentar a resistência biológica da madeira mediante a ação de agentes xilófagos são: “ThermoWood® Process” (na Finlândia), “Retification®” e “Le Bois Perdure®” (ambos na França), “Plato-Process®” (na Holanda) e “Oil-Heat-Treatment®” (na Alemanha). No Brasil, um processo utilizado em escala industrial é denominado de “Vap HolzSysteme®” (BATISTA et al, 2016). As principais diferenças entre esses tratamentos são: temperatura máxima aplicada, uso ou não de atmosfera inerte com nitrogênio ou com vapor, uso de óleos e/ou se o processo é adequado para a madeira seca ou úmida.

Syrjänen (2001), Jämsä e Viitaniemi (2001), Metsä-Kortelainen et al. (2005) e Esteves e Pereira (2009) afirmam que, o “ThermoWood® Process” é baseado no aquecimento a altas temperaturas (150°C a 250°C) utilizando-se vapor de água

como gás protetor. O processo consiste de três fases: (1) período de aumento de temperatura - utiliza-se uma temperatura preliminar de 100°C, que pode perdurar por até 48 horas, até o início da fase 2. A secagem do material pode ser inserida neste período e o teor de umidade da madeira não deve ser inferior a 10%; (2) aquecimento - utiliza-se uma temperatura constante (entre 150°C e 240°C) durante 0,5 a 4 horas, em função da espécie de madeira e da qualidade desejada do produto; e (3) resfriamento e estabilização - decréscimo da temperatura até a temperatura ambiente, fase que dura aproximadamente 24 horas.

Vernois (2001), Metsä-Kortelainen et al. (2005) e Esteves e Pereira (2009) afirmam que, na França existem dois processos comerciais de tratamentos térmicos da madeira: (1) “Retification[®]” - consiste em colocar a madeira previamente seca (12% de umidade) em temperatura de 210°C a 240°C, com atmosfera com alta concentração de nitrogênio e apenas 2% de oxigênio; e (2) “Le Bois Perdure[®]” - consiste em secar artificialmente a madeira verde e em seguida aquecer com até 230°C de temperatura, sob atmosfera com vapor.

Homan et al. (2000), Militz e Tjeerdsma (2001) e Esteves e Pereira (2009) ao caracterizarem o “Plato-Process[®]” afirmam que neste processo deve ser utilizada madeira verde, pois a abundância de água na parede celular provoca o aumento da reatividade dos componentes químicos da madeira. Os autores afirmam que o processo é composto de três fases: (1) hidrotermólise da madeira - aquecimento da madeira verde entre 160°C e 190°C, durante 4 a 5 horas, para que ocorra a despolimerização das hemiceluloses por hidrólise ácida e, formação do furfural, composto monomérico e hidrofóbico; (2) secagem convencional da madeira tratada por 3 a 5 dias, até que a madeira atinja 10% de umidade; e (3) cura da madeira modificada - aquecimento da madeira, sob 170°C a 190°C por 14 a 16 horas, para que ocorra a (re) condensação dos componentes em um polímero complexo e modificado (reticulação).

Boonstra e Tjeerdsma (2006) estudaram o efeito dos estágios de hidrotermólise, entre 165°C e 185°C por 30 minutos, e de cura, entre 170°C e 180°C por 4 horas, sobre a composição química da madeira de *Picea abies*, *Pinus sylvestris* e *Pinus radiata*. Os autores confirmaram que durante a primeira fase ocorre a produção de ácido acético, que catalisa a reação de despolimerização das hemiceluloses e produz monômeros de furfural, e, na segunda fase ocorre a degradação da região

amorfa da celulose e das hemiceluloses e as reações de condensação e reticulação da lignina, responsáveis pela redução da higroscopicidade da madeira.

Já, Rapp e Sailer (2001) e Esteves e Pereira (2009) explicam que no “Oil-Heat-Treatment[®]” o óleo aquecido entre 180°C e 220°C circula, durante 2 a 4 horas, em torno de cargas de madeira acondicionadas no interior de uma autoclave sem a aplicação de pressão. Os mesmos autores afirmam que o ponto de ebulição de muitos óleos e resinas é maior do que a temperatura requerida para tratar termicamente a madeira e isso permite a opção de tratar a madeira através do banho em óleo quente.

Contudo, cerca de 80.000 m³ de madeira sólida modificada termicamente é comercializada por ano na Europa (TJEERDSMA, 2006), sendo que pelo menos 10 empresas utilizam um dos processos de tratamentos térmicos desenvolvidos e patenteados na Finlândia (ThermoWood[®] Process), na França (Retificação[®] e/ou Le Bois Perdure[®]), na Holanda (Plato-Process[®]) e na Alemanha (Oil-Heat-Treatment[®]). Salienta-se que as principais espécies de madeira tratadas são as dos gêneros *Aspen* sp., *Betula* sp., *Picea* sp., *Pinus* sp. e *Populus* sp.

Em escala laboratorial, a modificação térmica da madeira é realizada por alguns pesquisadores em estufa elétrica, na qual a madeira é submetida ao ar aquecido com temperaturas entre 100°C e 200°C durante um período que varia de 2 a 24 horas, para que ocorra a degradação das hemiceluloses e a condensação dos componentes em um polímero complexo e modificado (BEKHTA e NIEMZ, 2003; JUODEIKIENĖ e MINELGA, 2003; BRITO et al., 2006, 2008; CALONEGO et al., 2010, 2012, 2013, 2014; SEVERO e CALONEGO, 2011; SEVERO et al., 2012, 2016).

2.8 Degradação térmica da madeira

O aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos, o que, conseqüentemente, altera o seu desempenho (STAMM, 1956; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; HOMAN et al., 2000; WASKETT e SELMES, 2001; BEKHTA e NIEMZ, 2003; BRITO, 2006, 2008; ARNOLD, 2010; CALONEGO et al., 2010, 2012, 2014, 2016; SEVERO et al., 2012).

A degradação da madeira apresenta comportamento diferenciado conforme as condições do processo utilizado. Essa degradação e, conseqüentemente, as mudanças nas propriedades que caracterizam a madeira (cor, umidade de equilíbrio, retração e inchamento, durabilidade biológica e propriedades mecânicas) estão relacionadas com fatores inerentes à madeira: espécie, teor de umidade e dimensão das peças; e ao processo: temperatura, tempo de exposição, gradiente de temperatura e condições da atmosfera do tratamento (STAMM, 1956; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; HOMAN et al., 2000; ZAMAN et al., 2000; JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; RAPP e SAILER, 2001; SYRJÄNEN, 2001; VERNOS, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; ALÉN et al., 2002; BEKHTA e NIEMZ, 2003; ROUSSET et al., 2004; HAKKOU et al., 2005a, 2005b; BRITO, 2006, 2008; JOHANSSON e MORÉN, 2006; ARNOLD, 2010; CALONEGO et al., 2010, 2012, 2014; SEVERO et al., 2012).

Quando a superfície da madeira é aquecida por mecanismos de irradiação e/ou convecção de calor originam-se zonas isotérmicas, com a forma definida pela superfície exposta ao aquecimento. Quanto maior for a umidade da peça de madeira maior será a quantidade de calor necessária para elevar a sua temperatura, devido ao consumo de energia durante a evaporação da água. Contudo, a água aumenta a condutividade térmica da madeira, aumentando, conseqüentemente, o fluxo de calor pela região úmida. No processo de degradação térmica da madeira, inicialmente, o avanço da isoterma T_0 (temperatura pouco acima da temperatura inicial da madeira) cria uma região cuja temperatura está compreendida entre T_0 e 200°C . Nesta região ocorre a liberação e o fluxo de vapor d'água e de traços de gás carbônico e de ácidos acético e fórmico. Enquanto a isoterma T_0 avançar, haverá um fluxo efluente de vapor de água que expulsa o ar e cria um ambiente sem oxigênio, impedindo a reação de combustão, e permitindo a ocorrência das reações de pirólise. Mantido o aquecimento externo, a temperatura da superfície da peça de madeira eleva-se até 280°C , formando uma nova isoterma entre 200°C e 280°C , e deslocando a isoterma T_0 - 200°C para o interior da peça. Na isoterma 200 - 280°C ocorre a pirólise suave da madeira, de caráter endotérmico, com a liberação de vapor d'água, dióxido de carbono e de ácidos acético e fórmico juntamente com os produtos originados da isoterma T_0 - 200°C . Se a temperatura da madeira eleva-se acima de 280°C ocorrerá o surgimento de novas isotermas. A partir de 320°C ocorre a degradação da lignina e da celulose, com caráter exotérmico e, conseqüentemente, a combustão dos

produtos gerados na pirólise e formação de carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 1986; BRITO, et al., 2006, 2008).

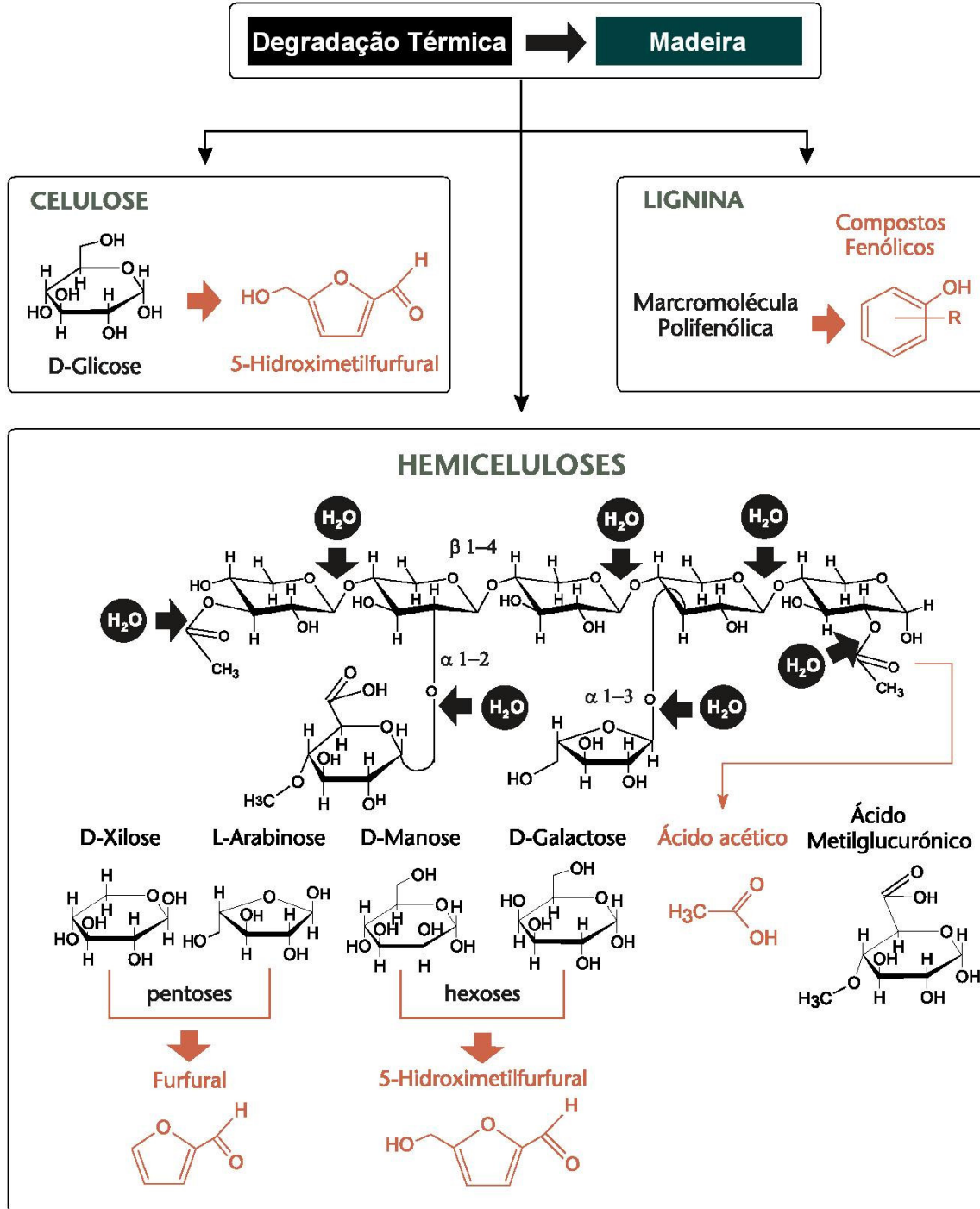
Durante a modificação térmica da madeira ocorre a formação de ácidos carbônicos, principalmente dos ácidos acético e fórmico, devido, respectivamente, à ruptura dos grupos acetilas das hemiceluloses e à degradação das hexoses (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; TJEERDSMA e MILITZ, 2005; SUNDQVIST et al., 2006; BÄCHLE et al., 2010). A Figura 5 mostra que estes ácidos catalisam as reações de desacetilação dos carboidratos, formando estruturas monoméricas e oligoméricas. Com a ruptura das unidades de pentoses e de hexoses dos açúcares monoméricos, formam-se, respectivamente, os aldeídos furfural e hidroximetilfurfural (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; MARTON et al., 2003; TJEERDSMA e MILITZ, 2005).

Posteriormente, ainda sob condições de altas temperaturas, ocorre a ruptura de algumas ligações da lignina resultando em aumento da concentração de grupos fenólicos, que reagem com os grupos aldeídos (monômeros de furfural e de hidroximetilfurfural) formando um complexo polimérico modificado. A extensão dessas reações é suave, mas elas promovem uma reticulação entre a lignina e os polímeros resultantes da degradação térmica e, conseqüentemente, reduzem a higroscopicidade das celulosas e melhora a estabilidade dimensional da madeira (BHUIYAN et al., 2000; HOMAN et al., 2000; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; YILGOR et al., 2001; ROUSSET et al., 2004; SCHWANNINGER et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; HAKKOU et al., 2005b; REPELLIN e GUYONNET, 2005; BOONSTRA e TJEERSDMA, 2006; ESTEVES e PEREIRA, 2009; KOROŠEC et al., 2009; BÄCHLE et al., 2010).

Lepage (1986a) e Bächle et al. (2010) salientam que as folhosas são mais facilmente termo-degradadas do que as coníferas, quando expostas na mesma condição de temperatura. Dentre as razões para explicar essa diferença destacam-se: (1) o componente hemicelulósico majoritário nas folhosas são as xilanas, que correspondem por 15 a 30% das massas secas das madeiras e são facilmente hidrolisadas em meio ácido, e, nas coníferas, as hemiceluloses, são constituídas quase que essencialmente por unidades de Galactoses e Glucomanas, que correspondem por 20% da massa seca desse tipo de madeira e suas ligações são dificilmente quebradas por ácidos; (2) as folhosas possuem maior quantidade de

grupos acetilas em suas hemiceluloses, do que as coníferas; e (3) as coníferas possuem maiores teores de lignina e menores de hemiceluloses do que as folhosas.

Figura 5 – Degradação térmica da madeira (MARTON et al., 2003).



Hakkou et al. (2005a) estudaram o efeito da temperatura, entre 40°C e 260°C, durante 8 horas, na perda de massa das madeiras das folhosas *Fagus sylvatica* e

Populus nigra e das coníferas *Pinus sylvestris* e *Abies alba* tratadas pelo processo “Retification®”. Os autores concluíram que a perda de massa tornou-se significativamente apreciável a partir dos 180-200°C para as folhosas e, já ocorreu, a partir de 50°C nas coníferas. No primeiro grupo de madeiras, a degradação das hemiceluloses é o principal responsável pela perda de massa, e, no segundo grupo, os extrativos voláteis também interferem neste fenômeno, pois são volatilizados em baixas temperaturas.

Esteves et al. (2007) estudaram o efeito da modificação térmica entre 190°C e 210°C nas madeiras de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus* e concluíram que a folhosa apresentou perda de massa, melhora no teor de umidade de equilíbrio e na estabilidade dimensional e reduções no MOR e no MOE em flexão, na ordem de 14,5%, 61,0%, 90,0%, 50,0% e 15,0%, respectivamente. A conífera estudada foi menos influenciada pelo tratamento, devido à sua composição química, sendo que as respectivas variáveis foram reduzidas em cerca de 7,3%, 46,0%, 57,0%, 40,0% e 5,0%.

Bächle et al. (2010) caracterizaram as madeiras modificadas termicamente da folhosa *Fagus sylvatica* e da conífera *Picea abies* através da tecnologia de infravermelho próximo (FT-NIR) e, concluíram que o tratamento térmico apresenta efeito mais pronunciado na folhosa. Segundo os autores, o tratamento a 180-220°C durante 4 horas provocou uma maior variação da banda espectral da região referente aos carboidratos da madeira de *F. sylvatica*.

O lenho de compressão, eventualmente encontrado em coníferas, e o lenho juvenil presente tanto nas folhosas quanto nas coníferas, são caracterizados pelo alto teor de lignina quando comparados com a madeira normal e adulta e, portanto, apresentam um efeito adverso à modificação química provocada pelos tratamentos térmicos. As perdas de massa provocadas pela modificação térmica no lenho juvenil tanto de *Pinus elliotii* (SEVERO et al., 2012) quanto de *Eucalyptus grandis* (CALONEGO et al., 2014) foram reduzidas quando comparadas com as perdas de massa no lenho adulto.

Em estudo sobre o efeito do tratamento térmico à 200°C nas propriedades químicas da madeira de *Pinus elliotii* var. *elliotii* constata-se que o lenho adulto apresentou maiores modificações quando comparado com o juvenil. Este lenho apresentou reduções de até 65,6%, 48,7% e 14,5% nos respectivos teores de arabinose, galactose e manose. Já, no lenho adulto da conífera estudada, as

respectivas variáveis foram reduzidas em cerca de até 65,6%, 50,0% e 15,8%. Devido à degradação das hemiceluloses houve um incremento proporcional nos teores da lignina de 4,2% e 6,9%, respectivamente, dos lenhos juvenil e adulto da espécie estudada. Com o tratamento térmico, o teor de extrativos totais no lenho juvenil foi significativamente reduzido em 34,1% e no adulto em 89,2% (SEVERO et al., 2012).

Entretanto, o lenho adulto da madeira de *Hevea brasiliensis*, tratada termicamente a 220°C, apresentou menores modificações químicas do que o juvenil. Este lenho apresentou reduções de até 60,9%, 100,0%, 34,7% e 11,7% nos respectivos teores de arabinose, galactose, xilose e glicose. Já, no lenho adulto da madeira estudada, as respectivas variáveis foram reduzidas em 52,6%, 100,0%, 15,5% e 4,8%. Devido à degradação das hemiceluloses houve um incremento proporcional de 21,8% e 20,7% nos teores da lignina dos respectivos lenhos juvenil e adulto. Com o tratamento térmico, o teor de extrativos totais no lenho juvenil foi significativamente aumentado em 98,7% e, no adulto, em 63,8% (SEVERO et al., 2016). Segundo esses autores, estudos prévios sobre as propriedades químicas da madeira de seringueira podem explicar esse comportamento.

Para Kadir and Sudin (1989), esta espécie apresenta altos teores de frutose, glicose, sacarose, maltose e amido no lume celular. Esses componentes estão em baixa quantidade na região central do fuste (onde ocorre o lenho juvenil) e em grande quantidade na sua periferia (onde ocorre o lenho adulto). Além disso, de acordo com o explicado por Shanks and Gunaratne (2011), os tratamentos térmicos promovem a gelatinização do amido, presente na madeira de seringueira, o que resulta num menor calor específico. Assim, estes açúcares e amidos, que estão presentes principalmente nos lumes celulares da periferia do fuste, podem atrasar a degradação térmica da parede celular da madeira e, portanto, manter o lenho adulto mais perto da sua condição original. Porém, eventos cinéticos relacionados à transferência de calor devem ser estudados em madeira que contenha altos teores de amido e açúcares nos lumes celulares e que seja modificada termicamente.

Em estudo sobre a determinação da composição química dos produtos voláteis, coletados por um condensador acoplado na saída dos gases do modificador térmico, regulado com temperaturas entre 180°C e 225°C durante 2 a 8 horas, ficou evidente a degradação das hemiceluloses da madeira de *Picea abies*. Constata-se que o aumento do tempo e da temperatura do tratamento promove o aumento da

percentagem do ácido acético e diminui a percentagem do ácido fórmico no total de ácidos orgânicos produzidos. Após 2,9 horas e a 180°C, os ácidos acético e fórmico correspondem a 67,3% e 24,6% do total dos gases produzidos; e após 6,8 horas do início do tratamento a 225°C, os mesmos ácidos correspondem a 76,1% e 12,2% do produto volatilizado (ALÉN et al., 2002).

A madeira de *Betula pubescens* modificada termicamente com temperaturas entre 160°C e 200°C, durante 1 a 4 horas, apresenta sua máxima concentração de ácidos acético e fórmico na ordem de 7,2% e 1,1%, com base em massa seca do material, no tratamento à 180°C durante 4 horas. O declínio dos teores dos ácidos nas madeiras tratadas à 200°C indica que eles já catalisaram as reações antes da temperatura máxima adotada neste experimento (SUNDQVIST et al., 2006).

Tjeerdsma e Militz (2005) verificaram o efeito de várias temperaturas de modificação térmica sobre a desacetilação da madeira de *Fagus sylvatica* e concluíram que a ausência dos ácidos carbônicos no espectro da madeira tratada termicamente ocorre em temperaturas próximas à 185°C.

Repellin e Guyonnet (2005) mostraram que, durante a modificação térmica ocorre hidrólise ácida que despolimeriza as hemiceluloses através da diminuição do teor de xilose e de ácidos glucorônicos, respectivamente, de 20,6% e 12,1% presentes na madeira controle de *Fagus sylvatica* para 18,5% e 11,3% presentes na madeira modificada termicamente à 200°C durante 1 hora e/ou para 11,2% e 7,9% presentes na madeira modificada à mesma temperatura durante 3 horas.

Ishiguri et al. (2005) constataram que o aquecimento de toras à 75°C durante 200 horas provocou aumento no grau de cristalização da celulose e decréscimo significativo no teor das hemiceluloses. Os teores de hemiceluloses das toras controle e das tratadas termicamente foram 31,1% e 26,5% para *Cryptomeria japonica*, 29,1% e 24,6% para *Larix kaempferi*, 28,0% e 23,7% para *Chamaecyparis obtusa*, 31,5% e 23,9% para *Pinus densiflora*, 29,7% e 25,6% para *Picea glehnii* e 33,1% e 26,6% para *Abies sachaliensis*.

Em estudo sobre o efeito do tratamento térmico, entre 120°C e 180°C, nas propriedades químicas das madeiras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus saligna* constata-se que o incremento na temperatura ocasionou maiores modificações nas madeiras. A folhosa apresentou reduções de até 53,2%, 62,8%, 33,8% e 35,1% nos respectivos teores de arabinose, galactose, manose e xilose. Na conífera estudada, as respectivas variáveis foram reduzidas em cerca de até 58,2%,

20,4%, 25,9% e 40,9%. Devido à degradação das hemiceluloses houve um incremento proporcional nos teores da lignina de até 25,8% e 32,5%, respectivamente, para as madeiras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus saligna*. Contudo, com o incremento da temperatura, o teor de extrativos totais na conífera foi reduzido em até 37,6% e na folhosa aumentou em até 110,4%. Os altos teores desse composto na madeira original da conífera foram volatilizados durante o início do tratamento térmico e, conseqüentemente, foram reduzidos com a modificação térmica. Já, na folhosa a degradação das hemiceluloses em compostos monoméricos promoveu o aumento dos teores de extrativos com o aumento das temperaturas dos tratamentos (BRITO et al., 2008).

Mburu et al. (2007) caracterizaram quimicamente a madeira sem tratamento de *Grevillea robusta* e as modificadas termicamente a 250°C, durante 1 h, 5 h, 7h e 15 h, e concluíram que: os teores de glicose foram 53,20%, 59,11%, 51,57%, 48,20% e 50,29%, os de xilose foram 12,89%, 2,74%, 2,00%, 2,71% e 0,00%, os de galactose apresentaram-se na ordem de 2,40%, 0,94%, 0,00%, 0,00% e 0,00%, enquanto que os de ramanose foram 0,77%, 0,17%, 0,00%, 0,00% e 0,00%. Os autores também verificaram que a degradação térmica das hemiceluloses promoveu aumento proporcional no teor de lignina de 24,17% para até 47,86%, na condição mais severa do tratamento aplicado na madeira.

Verifica-se com a diminuição de 9,26%, 7,69%, 7,69% e 4,84% nos teores de arabinose, galactose, ramanose e manose que houve degradação das hemiceluloses com a vaporização de tábuas de *Fagus orientalis* à 80°C, por 100 horas. Assim, o tratamento gerou um incremento proporcional de 22,97% para 23,90% no teor de lignina da madeira (YILGOR et al., 2001).

Devido à degradação das hemiceluloses, há um incremento proporcional no teor de lignina na ordem de 26,0% para 28,0%, de 20,5% para 26,6% e de 25,3% para 29,9%, respectivamente, nas madeiras de *Pinus pinaster*, *Fagus sylvatica* e *Picea abies* modificadas termicamente com temperaturas próximas à 200°C (KAMDEM et al., 2002).

Entretanto, não há informação sobre o efeito dos tratamentos térmicos nas características tecnológicas da madeira de *S. parahyba*, sendo que no Brasil ainda não foram realizados estudos específicos com a madeira modificada termicamente dessa espécie. Assim, estudos sobre a influência da modificação térmica nas propriedades dessa madeira devem ser realizados.

2.9 Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas das madeiras

O aquecimento da madeira em altas temperaturas provoca a degradação térmica das hemiceluloses e da região amorfa da celulose, contribuindo para o aumento do grau de cristalinidade desse polímero. Concomitantemente, a reticulação entre a lignina e os polímeros resultantes da degradação térmica da madeira é responsável pela redução da higroscopicidade e melhora da sua estabilidade dimensional (BHUIYAN et al., 2000, 2001; MILLITZ e TJEERDSMA, 2001; BEKHTA e NIEMZ, 2003; WASKETT e SELMES, 2001; WEILAND e GUYONNET, 2003; WIKBERG e MAUNU, 2004; METSÄ-KORTELAJINEN et al., 2005; REPELLIN e GUYONNET, 2005; BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006; CALONEGO et al., 2012, 2014; SEVERO et al., 2012).

De acordo com Vernois (2001), quando as madeiras, em geral, são modificadas termicamente a 200°C apresentam uma menor higroscopicidade do que a madeira sem tratamento e estabilizam em torno de 4% a 5% de umidade de equilíbrio, em vez de 10% a 12%. Arnold (2010) concluiu que as madeiras de *Fagus sylvatica* e de *Picea abies* apresentaram reduções de 40% e 60% no teor de umidade de equilíbrio, quando modificadas termicamente com 180°C e 220°C, durante 4 horas.

Militz e Tjeerdsma (2001) estudando o efeito do tratamento térmico “Plato-Process[®]”, com hidrotermólise a 165°C e cura a 180°C, concluíram que o tratamento reduziu em 45% a higroscopicidade da madeira de *Fagus sylvatica* e que houve redução no inchamento tangencial e radial da madeira de *Pinus sylvestris*, respectivamente, na ordem de 33% e 41%.

Rapp e Sailer (2001) verificaram que as madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* tratadas durante 4 horas, com temperatura de 220°C pelo processo “Oil-Heat-Treatment[®]”, apresentaram uma redução do PSF inicial de 29% para 14% e uma melhora em torno de 40% nas suas estabilidades dimensionais.

Weiland e Guyonnet (2003) mostraram que, o tratamento térmico “Retification[®]” com temperaturas entre 230°C e 260°C modificou o inchamento volumétrico máximo da madeira de *Pinus pinaster* de 13,22% para 9,90% e na de *Fagus sylvatica* de 22,89% para 14,56%.

Bekhta e Niemz (2003) verificaram o efeito do aquecimento a 200°C durante um período de 2 a 24 horas, em madeira de *Picea abies*, e concluíram que a madeira não tratada e as tratadas por 2, 4, 8 e 24 horas quando expostas em 65% de

umidade relativa, apresentaram, respectivamente, teores de umidade de 12,2%, 9,2%, 8,8%, 8,2%, e 7,5% e que as suas contrações lineares tangenciais máximas foram 2,8%, 3,0%, 3,2%, 2,9%, e 2,2%. Foi constatado que a madeira tratada por 24 horas é dimensionalmente mais estável do que as demais.

Brito et al. (2006) estudaram o efeito da modificação térmica entre 120°C e 200°C na madeira de *Eucalyptus grandis* e concluíram que o material tratado na condição mais severa apresentou contração volumétrica máxima 25% significativamente menor do que no material sem tratamento, e que nas demais temperaturas não houve melhora na estabilidade dimensional da madeira.

Já, a madeira de *Eucalyptus globulus* que foi modificada termicamente entre 190 e 210°C apresentou uma melhora no teor de umidade de equilíbrio e na estabilidade dimensional de até 61,0% e 90,0%, respectivamente (Esteves et al., 2007). Calonego et al. (2012) mostraram que a madeira de *Eucalyptus grandis* tratada termicamente com até 220°C apresentou um decréscimo de até 10,5%, 12,2%, 53,3%, 57,0%, 39,7% e 77,4% no teor de umidade de equilíbrio, na massa específica a 12% e nos inchamentos volumétricos e lineares tangencial, radial e longitudinal máximos.

Em trabalho realizado com madeira de *Eucalyptus grandis* tratada termicamente com 180°C foi constatado que as propriedades físicas do lenho juvenil sofrem menos influência que as do lenho adulto. O tratamento térmico ocasionou decréscimo de 21,3%, 6,8% e 35,6%, no teor de umidade de equilíbrio, na massa específica a 0% e no inchamento volumétrico máximo do lenho adulto. Já, o lenho juvenil não apresentou redução na massa específica a 0% e teve reduções de 13,7% e 14,7% na umidade de equilíbrio e no inchamento volumétrico (CALONEGO et al., 2014).

Em estudo semelhante, Severo et al. (2016) concluíram que os lenhos juvenil e adulto de *Hevea brasiliensis* apresentaram reduções de até 26,8% e 29,9% nos teores de umidade de equilíbrio, quando modificados termicamente com temperatura de até 220°C. Segundo os autores, o lenho juvenil retirado das madeiras controle e das modificadas termicamente a 180°C, 200°C e 220°C apresentaram teores de umidade de equilíbrio de 8,56%, 7,93%, 7,35% e 6,27% quando aclimatizados a 21°C e 65% de umidade relativa. Nessas condições, o lenho adulto desse material entrou em equilíbrio higroscópico ao 9,00%, 7,82%, 7,75% e 6,35% de umidade, respectivamente.

Severo et al. (2012) verificaram o efeito da modificação térmica a 200°C durante um período de 4 horas, em madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, e concluíram que o tratamento reduziu significativamente em até 22,9% o teor de umidade de equilíbrio do material. Os autores concluíram que a madeira modificada termicamente é dimensionalmente mais estável do que as demais, sendo que no lenho juvenil os respectivos inchamentos volumétrico, tangencial, radial e longitudinal máximos apresentaram reduções de 14,8%, 12,6%, 12,1% e 44,0%, quando comparado com a madeira não tratada, enquanto que no lenho adulto as respectivas reduções foram 16,1%, 15,1%, 15,6% e 30,4%.

A melhora da estabilidade dimensional da madeira modificada termicamente foi explicada por Bhuiyan et al. (2000, 2001) e Wikberg e Maunu (2004) como resultado do aumento do grau de cristalinidade e da espessura dos cristalitos de celulose durante os tratamentos térmicos. Mburu et al. (2007) mostrou pela caracterização química por NMR (ressonância magnética nuclear) da madeira de *Grevilea robusta* que o sinal 89 ppm referente ao C-4 da celulose cristalina aumentou consideravelmente com a modificação térmica, enquanto que o sinal 82 ppm do C-4 da celulose amorfa não teve variação com o referido tratamento.

Wikberg e Maunu (2004) caracterizaram o alburno das madeiras de uma conífera e de quatro folhosas com um espectrofotômetro, e, concluíram que o tratamento térmico entre 160°C e 195°C pelo processo “ThermoWood®”, durante 2 a 3 horas, promoveu um aumento na região cristalina da celulose de 54% para 65% na conífera *Picea abies* e de, respectivamente, 41% para 52%, de 48% para 54% e de 54% para 65% nas folhosas *Betula pendula*, *Populus tremula* e *Quercus robur*.

Bhuiyan et al. (2000) afirmam que o aumento da cristalização da celulose e da espessura da região cristalina desse polímero aumenta a elasticidade da madeira e diminui a sua instabilidade dimensional. Segundo os autores, a xilose e a manose que não foram degradadas com a modificação térmica são capazes de aumentar a cristalização da celulose, devido ao aumento da cristalinidade e da espessura da região cristalina do polímero.

Mburu et al. (2007) concluíram que após a primeira das 7 horas do tratamento à 250°C ocorreu a máxima cristalização da celulose da madeira de *Grevilea robusta*. Conclusão semelhante foi encontrada por Bhuiyan et al. (2001), que ao modificarem termicamente a madeira de *Fagus crenata* verificaram que após a primeira das 8 horas com 200°C é que ocorreu a máxima cristalização da celulose. Em tratamentos

intermitentes, a celulose não atingiu a sua máxima cristalinidade, pois nesse tipo de aquecimento há uma interrupção temporária nas reações térmicas devido ao fornecimento insuficiente de energia, o que dificulta a modificação deste polímero.

Mburu et al. (2007), no estudo sobre o efeito do tratamento de modificação térmica, com temperaturas entre 240 e 260 °C durante 0,5 h a 30 h, verificaram que a perda de massa (10 a 18%) com a degradação térmica da madeira de *Grevillea robusta* foi mais intensa nas primeiras 2 h de tratamento. Somente após 30 h de tratamento a 240 e 260°C ocorreram perdas de massa na ordem de 25% e 45%, respectivamente. Assim, para os autores, a temperatura é mais importante que o tempo para a modificação térmica da madeira.

Segundo Unsal e Ayrilmis (2005), após o aquecimento da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* houve um decréscimo na sua massa específica a 12% de umidade com o aumento da temperatura (120°C e 180°C) e do tempo (2 a 10 horas) de exposição ao tratamento. A madeira tratada por 10 horas com 180°C apresentou redução de 10,0% na propriedade física estudada.

Madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* submetidas ao processo “ThermoWood®” com 170°C, 190°C, 210°C e 230°C, por 3 horas, apresentaram relação direta entre a perda de massa e o aumento da temperatura. O alburno de *Pinus* quando submetido a tais temperaturas, apresentou, respectivamente, perda de massa na ordem 1,8%, 4,1%, 6,7% e 11,8% e o cerne reduções equivalentes a 5,4%, 5,9%, 6,9% e 11,0%. Para o alburno de *Picea*, as perdas de massa foram de 1,8%, 3,3%, 6,6% e 10% quando submetidas a 170°C, 190°C, 210°C e 230°C e, no cerne, as respectivas reduções apresentaram-se em torno de 3,6%, 5,3%, 6,9% e 11,4% (METSÄ-KORTELAJINEN et al., 2005).

As madeiras de *Picea abies* modificadas termicamente por 4 horas, com temperaturas de 180°C e 225°C, apresentaram perda de massa de 1,5% e 10,8%; enquanto que as tratadas com as mesmas temperaturas, durante 6 horas, apresentaram perda de massa de 1,7% e 12,5% (ALÉN et al., 2002). As madeiras de *Betula pubescens* tratadas por 2,5 horas, com temperaturas de 160°C e 200°C, apresentaram perda de massa de 20% e 48% (SUNDQVIST et al., 2006).

Para Hakkou et al. (2005b) a madeira de *Fagus sylvatica* tratada durante 8 horas, sob temperatura de 180°C, apresentou perda de massa em torno de 7%. Com o aumento da temperatura, houve um aumento progressivo da perda de massa até um valor máximo de 35% na madeira tratada à 260°C.

Arnold (2010) estudou o efeito da modificação térmica à 180°C e 220°C nas madeiras de *Picea abies* e de *Fagus sylvatica* e concluiu que a condição mais suave do tratamento provocou redução de 5,0% na massa específica a 0% de umidade. O tratamento térmico, com a maior temperatura, reduziu essa propriedade física das madeiras da conífera e da folhosa em 13,0% e 12,0%.

Contudo, não há estudos sobre o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas da madeira de Guapuruvu. Um estudo foi encontrado na literatura sobre a carbonização da madeira de *S. amazonicum* (Paricá). Segundo Vidaurre et al. (2012) essa madeira apresenta perdas de massa de 1,16% quando modificada termicamente com 100 a 200°C e, de 14,89% quando tratada de 200 a 300°C. Assim, o presente estudo é importante para fornecer informações para permitir o uso adequado de madeira modificada termicamente de *S. parahyba*.

2.10 Efeito do tratamento térmico na cor da madeira

Quanto mais intensa é a condição do tratamento térmico, a que a madeira é exposta, maior é a sua degradação química e mais pronunciada é a mudança na sua cor (BEKHTA e NIEMZ, 2003; CHARRIER et al., 2002; MITSUI et al., 2004).

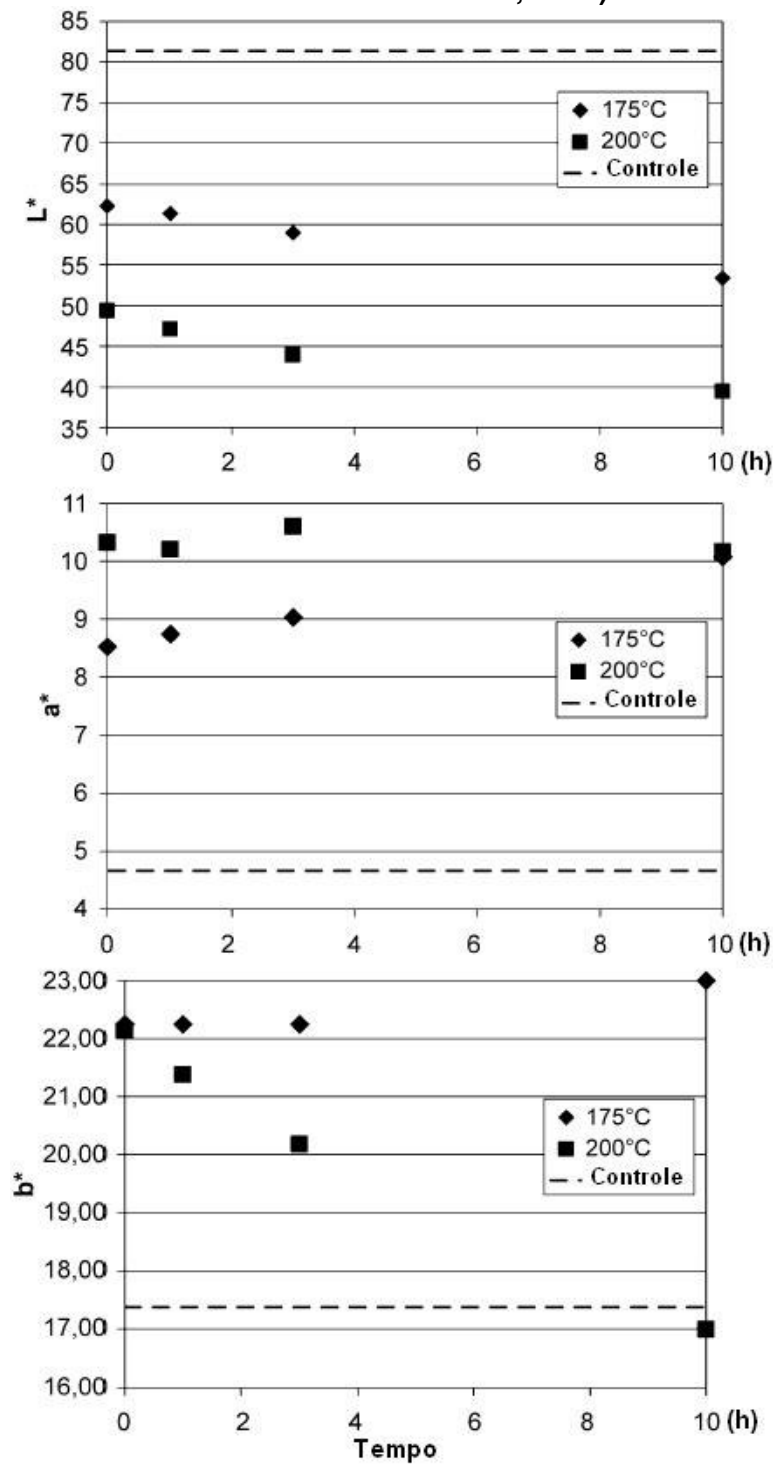
Mitsui et al. (2004) verificaram a variação do brilho (ΔL^*) da madeira de *Cryptomeria japonica* após o tratamento com 90°C e umidade relativa do ar de 0%, 30%, 60% e 90%, durante até 150 horas, e concluíram que foi reduzido significativamente quando tratadas termicamente, principalmente, nas atmosferas com os maiores teores de umidade.

Charrier et al. (2002) verificaram o efeito do tratamento de toras, em água aquecida a 95°C, na cor da madeira de *Juglans* sp. A variação da cor (ΔE^*) do cerne foi de 21,0 após o tratamento térmico com 51 horas, e no alburno foi de 16,0. A mudança de cor se deve ao escurecimento da madeira, sendo que o brilho (L^*) do cerne variou de 79 ± 2 para 60 ± 2 e o do alburno de 58 ± 1 para 43 ± 3 . A vaporização não modificou a tonalidade (h^a) e a saturação (C^*) da cor da madeira.

Johansson e Morén (2006) avaliaram, como mostra a Figura 6, o efeito da modificação térmica entre 175°C e 200°C, por 2 a 10 horas, na cor da madeira de *Betula pendula*. O aumento da temperatura e do tempo de exposição ao tratamento promoveu mudança na cor da madeira, ocasionado pela diminuição nos parâmetros

L* (ficou mais escura) e b* (ficou mais azul) e pelo aumento do a* (ficou mais vermelha). Foi constatado que a temperatura é mais importante que o tempo do tratamento, sendo que a variação de 1 °C corresponde a 50 minutos de tratamento.

Figura 6 – Valor médio das três coordenadas de cor da madeira de *Betula pendula* em diferentes condições de tratamentos térmicos (adaptado de JOHANSSON e MORÉN, 2006).



Sundqvist e Morén (2002) avaliaram o efeito do tratamento hidrotérmico à 95°C, por 3 dias, na cor da madeira de *Betula pubescens* e nos cerne e alburno de *Pinus sylvestris*. Eles concluíram que as madeiras escurecem e avermelham, sendo que as suas respectivas variações de cor (ΔE^*) apresentam-se na ordem de 3,0, 6,5 e 11,0.

Bekhta e Niemz (2003) avaliaram o efeito da modificação térmica entre 20°C e 200°C, por 0 a 24 horas, na cor da madeira de *Picea abies*. Os autores salientaram que o aumento da temperatura diminuiu o brilho da madeira (L^*) de 77,24 para em torno de 21,00, e, aumentou drasticamente em até 53 vezes o seu avermelhamento (a^*). O parâmetro b^* aumentou entre 6 e 7 vezes até 150°C (a madeira ficou mais amarelada) e foi diminuído com a temperatura de 200°C (ficou mais azulada). Segundo os autores, na condição extrema de tratamento, a variação da cor da madeira (ΔE^*) foi de 55,0.

2.11 Efeito da modificação térmica na durabilidade natural da madeira aos fungos xilófagos

O tratamento térmico altera a composição química da madeira e promove a indisponibilidade de alimentos (hemiceluloses) aos fungos, reduz o teor de umidade de equilíbrio, promove a criação de novas moléculas livres que atuam como fungicidas, além de reticular a rede de lignina dificultando o reconhecimento do substrato pelos organismos xilófagos (VERNOIS, 2001; WEILAND e GUYONNET, 2003; MBURU et al., 2007; CALONEGO et al., 2010; OLIVER-VILLANUEVA et al., 2013).

Hakkou et al. (2006) verificaram quais dessas hipóteses são significativas para aumentar a durabilidade da madeira modificada termicamente. Para tanto, estudaram o efeito do tratamento “Retification[®]” com temperaturas de 20°C a 280°C, durante 8 horas, na madeira de *Fagus sylvatica* e, concluíram que o tratamento térmico aumenta a durabilidade da madeira quando exposta ao fungo *Coriolus versicolor* devido à degradação das hemiceluloses e a reticulação das ligações da lignina.

Madeiras de *Pinus pinaster* sem tratamento e quando submetidas ao processo “Retification[®]” entre 230°C e 260°C e, posteriormente, expostas ao fungo *Poria*

placenta por 16 semanas em teste de laboratório apresentaram, respectivamente, perda de massa de 17,13% e 9,76%; enquanto que as de *Fagus sylvatica* apresentaram perda de massa de 22,92% e 5,94% (WEILAND e GUYONNET, 2003).

Militz e Tjeerdsma (2001) verificaram que as madeiras de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* e *Picea abies* quando expostas aos fungos *Coriolus versicolor* e *Coniophora puteana* apresentaram, respectivamente, perda de massa na ordem de 9% e 26%, de 4% e 12%, de 1% e 9%, e de 12% e 19%. Quando modificadas termicamente pelo “Plato-Process[®]” e expostas aos mesmos agentes xilófagos apresentaram perda de massa sempre inferior a 4%.

Rapp e Sailer (2001) verificaram que as madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* depois de expostas ao fungo *Coniophora puteana* apresentaram, respectivamente, perda de massa de 48,0% e 40,0%. Madeiras das mesmas espécies quando aquecidas com temperaturas entre 180°C e 220°C, durante 4,5 horas, e, ao serem expostas aos mesmos agentes xilófagos apresentaram perdas de massa de 11,0% e 5,5%. Já, as tratadas pelo “Oil-Heat-Treatment[®]”, nas mesmas temperaturas e durante o mesmo tempo, apresentaram 2,0% e 0,0% de perda de massa devido à degradação causada por esses fungos.

Shi et al. (2007) verificaram que as madeiras de *Populus tremuloides*, de *Liriodendron tulipifera*, de *Pinus banksiana* e de *Pinus sylvestris* depois de expostas ao fungo *G. trabeum* apresentaram, respectivamente, perda de massa de 72,80%, 68,50%, 65,00% e 11,60%. Madeiras das mesmas espécies quando modificadas termicamente a 210°C, durante 15 minutos, ao serem expostas ao mesmo agente xilófago apresentaram perdas de massa significativamente menores e na ordem de 40,70%, 17,80%, 9,53% e 8,68%.

Calonego et al. (2010) verificaram que a madeira de *Eucalyptus grandis* depois de expostas ao fungo de podridão branca *P. sanguineus* apresentou perda de massa de 34,32%. A modificação térmica dessa madeira com temperaturas entre 180°C e 220°C promoveu redução da perda de massa de 15,7% a 82,4%, após ensaio de apodrecimento acelerado.

Em outro estudo foi possível concluir que houve um decréscimo entre 28,2 % e 70,0 % na perda de massa da madeira de *E. grandis* exposta ao fungo de podridão parda *G. trabeum* quando modificada termicamente entre 180°C e 220°C (CALONEGO et al., 2013).

Severo et al. (2016) verificaram que os lenhos juvenil e adulto de *Hevea brasiliensis* depois de expostos ao fungo *G. trabeum* apresentaram, respectivamente, perda de massa de 29,26% e 27,56%. Os mesmos lenhos quando submetidos ao fungo *P. sanguineus* apresentaram perda de massa de 37,24% e 40,78%. A modificação térmica entre 180°C e 220°C reduziu a perda da massa dos lenhos juvenil e adulto após a degradação por *G. trabeum* em até 68,5% e 58,8%. Quando esse material foi exposto ao fungo *P. sanguineus* houve reduções de até 36,4% e 12,1% na perda de massa.

Contudo, a literatura não mostra o efeito dos tratamentos de modificação térmica na resistência natural da madeira de guapuruvu. Assim, os trabalhos apresentados evidenciam a necessidade de estudos sobre os referidos tratamentos na resistência natural da madeira dessa espécie.

2.12 Efeito da modificação térmica na durabilidade das madeiras aos térmitas

Conforme apresentado anteriormente (item 2.6.2), não existe uma característica única que possa ser empregada para explicar a durabilidade natural da madeira aos cupins. A literatura mostra que as madeiras com maiores massa específicas aparentes (EVANS et al., 2005; GONÇALVES e OLIVEIRA, 2006; GONÇALVES et al., 2013), com maiores teores de extrativos (EVANS et al., 2005; RIBEIRO et al., 2014; GONÇALVES et al., 2013; PAES et al., 2015) e/ou com presença acentuada de cinzas (OLIVEIRA et al., 1986; GONÇALVES et al., 2013) e sílica (KARTAL et al., 2009) apresentam maior resistência a esses insetos xilófagos.

Contudo, vários procedimentos, dentre eles as modificações químicas permanentes da madeira podem atenuar o reconhecimento do substrato pelos agentes xilófagos (OLIVEIRA et al., 1986).

Oliver-Villanueva et al. (2013) concluíram que o efeito do tratamento de modificação térmica na resistência aos cupins depende da espécie de madeira. Os autores verificaram que as madeiras de *Fraxinus excelsior* e de *Fagus sylvatica* depois de expostas aos cupins subterrâneos *Reticulitermes banyulensis* apresentaram, respectivamente, nota de ataque de 1,6 e 1,7 – sendo que nota 0 representa madeira sem ataque e, 4 altamente atacada. Essas madeiras quando modificadas termicamente a 200°C, e, ao serem expostas aos mesmos insetos

xilófagos apresentaram respectivas nota de ataque de 3,5 e 1,8. Consta-se que o tratamento não modificou a resistência da madeira de *Fagus sylvatica* aos cupins subterrâneos, mas reduziu significativamente a resistência da madeira de *Fraxinus excelsior*, pois a degradação térmica dos polissacarídeos desta espécie produziu substâncias polares atrativas aos térmitas.

Em estudo sobre a avaliação da resistência natural das madeiras de *Populus tremuloides*, de *Liriodendron tulipifera*, de *Pinus banksiana* e de *Pinus sylvestris* ao cupim subterrâneo *Reticulitermes flavipes* foi mostrado que as respectivas madeiras apresentaram nota de ataque de 7,33, 6,17, 9,00 e 9,50 – sendo que nota 0 representa madeira totalmente degradada, 7 moderadamente atacada e 10 sadia. Nas madeiras das mesmas espécies, as perdas de massa provocadas pelos cupins foram 17,8%, 24,7%, 13,4% e 10,3%. As respectivas madeiras modificadas termicamente a 210°C, durante 15 minutos, apresentaram notas de ataque 7,67, 6,17, 8,33 e 4,00 e perdas de massa na ordem de 14,1%, 21,5%, 16,9% e 33,6%. Ficou constatado que o tratamento de modificação térmica não modificou a resistência natural das madeiras de *Populus tremuloides*, *Liriodendron tulipifera* e *Pinus banksiana* aos cupins subterrâneos, mas reduziu significativamente a resistência da madeira de *Pinus sylvestris*, pois essa conífera teve compostos inibidores aos térmitas degradados durante o tratamento térmico (SHI et al., 2007).

Contudo, resultados diferentes foram apresentados por Mburu et al. (2007) no estudo sobre o efeito do tratamento de modificação térmica na resistência da madeira de *Grevillea robusta* aos cupins subterrâneos *Macrotermes natalensis*. Os autores verificaram que a madeira sem tratamento e a modificada termicamente a 250°C por 7 horas apresentaram, respectivamente, perda de massa de 14% e 1% depois de expostas aos cupins subterrâneos por 28 dias em teste de laboratório e, de aproximadamente 34% e 1% após 16 semanas em teste de campo. Os autores atribuem essa melhora na durabilidade da madeira estudada devido à formação de compostos termitocidas durante o tratamento térmico.

Batista et al. (2016) avaliaram o efeito do tratamento térmico “Vap HolzSysteme®” na resistência da madeira de *Eucalyptus grandis* ao cupim de madeira seca *C. brevis*. Foi constatado que a madeira sem tratamento e as modificadas com 140°C, 160°C e 180°C apresentaram perda de massa na ordem de 0,82%, 0,58%, 0,94% e 1,05%, respectivamente. Os respectivos tratamentos apresentaram os seguintes números de furos provocados pelos cupins: 6, 2, 7 e 10.

As respectivas percentagens de cupins mortos foram 77,25%, 76,75%, 83,25% e 80,50%. O estudo mostrou que a modificação térmica não foi eficaz para melhorar a resistência da madeira aos cupins de madeira seca.

No estudo sobre a avaliação da resistência da madeira sem tratamento de *Eucalyptus grandis* e das modificadas termicamente a 120°C, 140°C, 160°C, 180°C e 200°C ao cupim *C. brevis* foi constatado que os respectivos materiais apresentaram nota de ataque de 2,70, 2,44, 2,40, 2,60, 2,20 e 2,10 – sendo que nota 0 representa madeira sem ataque e 4, ataque profundo. As respectivas percentagens de cupins mortos foram 5,33%, 14,67%, 10,80%, 7,50%, 10,83% e 28,17%. O estudo mostrou que a modificação térmica não foi capaz de proteger totalmente a madeira contra o ataque dos cupins, mas houve uma tendência não significativa da redução do grau de ataque com o aumento da temperatura. A madeira tratada a 200°C proporcionou um aumento significativo de cupins mortos, devido ao surgimento de compostos orgânicos durante a degradação térmica, os quais podem ser nocivos aos térmitas (PESSOA et al., 2006).

Como os tratamentos de modificação térmica alteram, de maneira diferenciada, as propriedades que caracterizam a madeira, tais como: umidade de equilíbrio (BEKHTA e NIEMZ, 2003; BRITO, 2006; CALONEGO et al., 2012, 2014; SEVERO et al., 2012, 2016), durabilidade biológica (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; CALONEGO et al., 2010; SEVERO et al., 2016), propriedades mecânicas (BEKHTA e NIEMZ, 2003; JOHANSSON e MORÉN, 2006; MBURU et al., 2008; CALONEGO et al., 2012) e propriedades químicas (STAMM, 1956; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; BRITO, 2008; MBURU et al., 2007, 2008; ARNOLD, 2010; SEVERO et al., 2012, 2016; CALONEGO et al., 2016) e, a literatura, não é conclusiva sobre a influência desses tratamentos na durabilidade da madeira aos cupins xilófagos (OLIVER-VILLANUEVA et al., 2013), evidencia-se a necessidade de estudos para caracterizar a resistência natural da madeira de *S. parahyba* modificada termicamente.

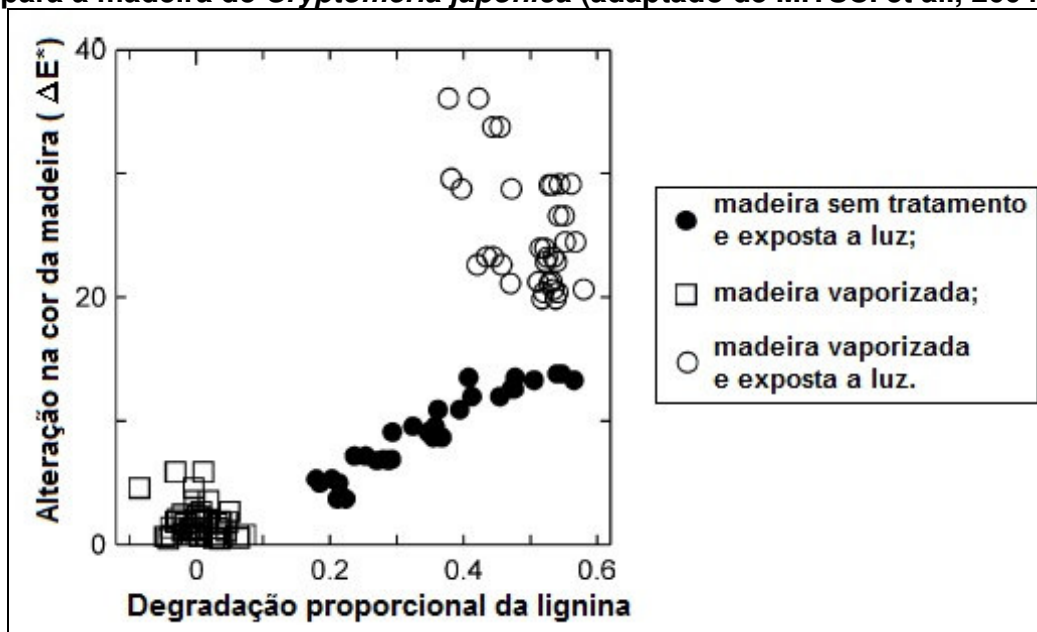
2.13 Efeito da modificação térmica na resistência da madeira ao intemperismo

O aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos e a reticulação dos polímeros resultantes do tratamento (HOMAN et al., 2000; WASKETT e SELMES, 2001; SUNDQVIST e

MORÉN, 2002; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; JOHANSON e MORÉN, 2006) e a condensação ou reticulação da lignina confere uma melhor estabilidade mediante as reações fotoquímicas, e uma menor taxa de fotodecomposição da madeira (AYADI et al., 2003).

Mitsui et al. (2004) estudaram, como mostra a Figura 7, a influência da foto-exposição na alteração da cor e da composição química da madeira de *Cryptomeria japonica*, e verificaram que a madeira exposta à irradiação de luz apresenta coeficiente de correlação entre a degradação da lignina e a mudança de cor de 0,95; que a madeira vaporizada a 90°C apresenta coeficiente de correlação entre a degradação da lignina e a mudança de cor de 0,28; e que a madeira vaporizada a 90°C quando exposta à irradiação de luz apresenta coeficiente de correlação entre a degradação da lignina e a mudança de cor de 0,51. Assim, os autores salientam que a mudança de cor da madeira exposta à luz está relacionada com a degradação da lignina, e, da madeira tratada termicamente com a degradação das hemiceluloses e dos extrativos totais.

Figura 7 – Relação entre a alteração da cor e a taxa de degradação da lignina para a madeira de *Cryptomeria japonica* (adaptado de MITSUI et al., 2004).

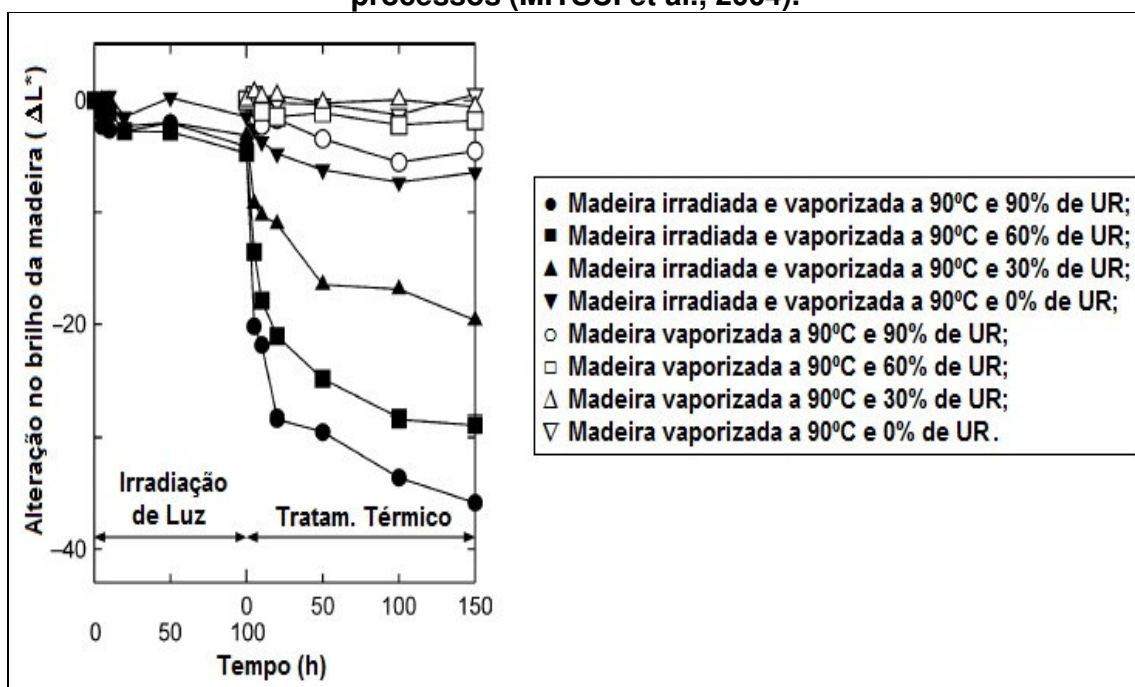


Contudo, Mitsui (2006) avaliou o efeito da exposição das madeiras controle de *Pinus sitchensis* e das vaporizadas à 90°C no ensaio de irradiação prolongada de luz e constataram que as respectivas variações de cor (ΔE^*) apresentaram-se na ordem

de 26,6 e 7,2. Os autores salientaram que a cor da madeira tratada termicamente é mais estável quando exposta ao intemperismo.

Mitsui et al. (2004) verificaram a variação do brilho (ΔL^*) da madeira de *Cryptomeria japonica* após 100 horas de irradiação de luz artificial e, também, a variação colorimétrica da madeira tratada termicamente com temperatura de 90°C e umidade relativa do ar de 0%, 30%, 60% e 90%, com e sem a influência do intemperismo. Segundo os autores, e como mostra a Figura 8, o brilho da madeira diminuiu após a exposição de luz e também após o tratamento térmico, mas reduziu significativamente quando a madeira intemperizada foi tratada termicamente. Para os autores, a degradação da lignina após o intemperismo facilita a degradação das hemiceluloses durante o tratamento térmico.

Figura 8 – Variação no brilho (ΔL^*) da madeira de *Cryptomeria japonica* pela irradiação de luz, pelo tratamento térmico e pela combinação dos dois processos (MITSUI et al., 2004).



Ayadi et al. (2003) avaliaram o efeito da exposição das madeiras de *Fraxinus* sp., *Fagus sylvatica*, *Pinus pinaster* e *Populus* sp. ao ensaio de artificial de intemperismo, e constataram que, as respectivas variações de cor (ΔE^*) apresentaram-se na ordem de 25,0, 18,0, 27,0 e 28,0. Os autores expuseram as madeiras das mesmas espécies, porém modificadas termicamente à 240°C durante

2 horas, nas mesmas condições e verificaram que as respectivas variações de cor (ΔE^*) apresentaram-se na ordem de 5,0, 8,0, 8,0 e 12,0. Os autores concluíram que as alterações na cor das madeiras modificadas termicamente quando comparadas com a madeira controle foram 5, 2, 3 e 2 vezes menores sob o ensaio de intemperismo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente estudo, foi utilizado madeira proveniente de árvores de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, com 15 anos de idade, retiradas de uma área de recuperação florestal da Fazenda Experimental Lageado, que apresenta posições geográficas de 22°50'S e 48°24'W, pertence à Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, e está localizada no município de Botucatu-SP.

O local apresenta altitude de 700 m, precipitação média anual de 1300 mm e temperatura média anual de 19,4°C. O solo foi classificado em Nitossolo Vermelho, com ótima fertilidade e tendência de compactação. O sistema de plantio utilizado foi o de semeadura direta e cultivo mínimo.

As seguintes espécies heliófilas de rápido crescimento foram semeadas na área: *Chorisia speciosa* St. Hil (Paineira), *Croton floribundus* Spreng (Capixingui), *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. (Timboril), *Mimosa scabrella* Benth. (Bracatinga) e *S. parahyba* (Guapuruvu). As sementes, de uma única espécie, foram semeadas em linhas que seguiam os contornos da inclinação do terreno. O espaçamento adotado foi de 1 m x 1 m entre os pontos de plantio e entre as linhas, e cada parcela incluiu a mesma sequência de espécies em linhas de plantios sucessivas. Contudo, somente o Timboril e o Guapuruvu tiveram bom desempenho para recuperar a área, sendo que esta tinha a maior área basal do povoamento florestal (ENGEL e PARROTTA, 2001).

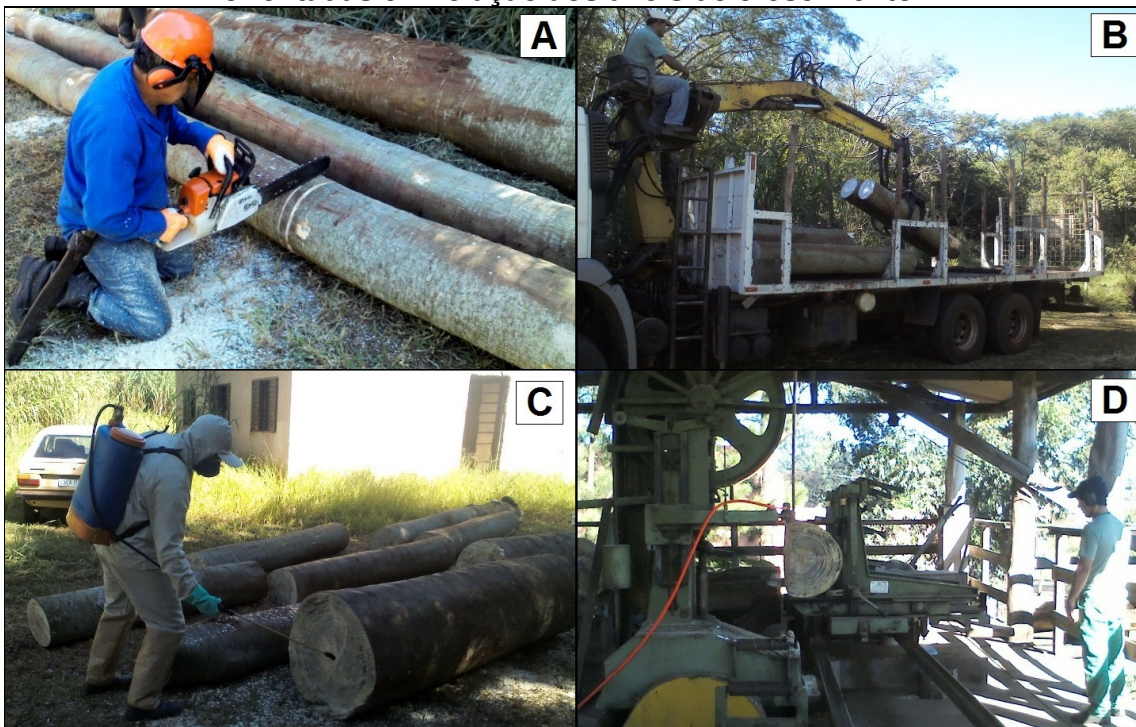
3.1 Coleta e preparo do material

Da área de recuperação florestal, foram selecionadas e derrubadas 4 (quatro) árvores de Guapuruvu. Para o presente estudo foram utilizadas as terceiras toras de cada árvore, com 2,5 (dois e meio) metros de comprimento e diâmetro entre 33 e 38 cm, conforme pode ser verificado na Figura 9A.

Após o traçamento do fuste, as toras foram transportadas até o pátio de toras da serraria (Figura 9B) e, como medida profilática, foram pulverizadas (Figura 9C) com inseticida Osmose CP50 (2,5%) e fungicida Osmotox Plus (4%), seguindo as recomendações dos produtos utilizados.

As toras com 2,5 (dois e meio) metros de comprimento foram processadas mecanicamente na serraria pertencente à empresa Caribeia Indústria Madeireira Ltda., localizada no município de São Manuel-SP. Durante o processamento da madeira (Figura 9D), cada tora foi desdobrada em uma serra de fita simples de maneira a obter as pranchas centrais, perfeitamente orientadas com relação aos anéis de crescimento e com espessura final de 80 mm. Posteriormente, as pranchas centrais tiveram a sua espessura reduzida para 34 mm com o auxílio de uma reserra de fita simples.

Figura 9 – Preparo do material: (A) traçamento do fuste de *S. parahyba*, (B) transporte das toras, (C) pulverização de inseticida nos topos das toras, e (D) processamento mecânico das toras para a obtenção de tábuas centrais e orientadas em relação aos anéis de crescimento.



Todas as tábuas foram transportadas ao Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras, pertencente à FCA-UNESP de Botucatu-SP e secas em estufa piloto de secagem convencional, com capacidade para aproximadamente 2,5m³ de madeira serrada.

A estufa possui um sistema de aquecimento através de resistência elétrica que permite o alcance de uma temperatura máxima de 130°C; um sistema de umidificação por vapor a baixa pressão (1 a 2 kgf/cm²) ou por pulverização; uma

caldeira elétrica da marca ETNA com capacidade de geração de vapor de 30 kgf/h e uma pressão máxima de trabalho de 8 kgf/cm²; um sistema de circulação de ar superior com 3 ventiladores de 3 cavalos vapor cada, controlado por inversor de frequência com capacidade de variação de velocidade do ar de 0,5 a 8 m/s; um sistema de ventilação através de chaminés, controladas por um sistema de válvulas proporcionais e um sistema de gerenciamento do processo de secagem composto por um microcomputador e um programa denominado LIGNOMAT.

As tábuas de *S. parahyba* com 34 mm x 0,33 a 0,38 m x 2,50 m de espessura, largura e comprimento, respectivamente, foram empilhadas de modo gradeado. O sistema de empilhamento foi realizado através de um carrinho transportador que permite a construção de uma pilha de madeira com largura máxima de 1,18 m. A largura da pilha foi determinada em função do número de tabuas a serem secas.

Na secagem, foi utilizado um programa de secagem, como mostra a Tabela 2, com temperatura inicial de 50°C e potencial de secagem (relação Umidade da madeira/Teor de umidade de equilíbrio) próximo a 3,5, com o intuito de minimizar o surgimento de defeitos e conforme descrito por REMADE (2013).

Após a secagem das tábuas, com teores de umidade médios de 10%, elas foram transportadas para a marcenaria da FCA-UNESP de Botucatu-SP e tiveram as suas espessuras aplainadas numa dimensão nominal de 32 mm.

Tabela 2 – Programa de secagem utilizado para a madeira de *S. parahyba*.

Umidade da Madeira (%)	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	TUE (%)	PS
Aquecimento	50,0	48,0	89,0	18,2	*
Até 50	50,0	47,0	84,0	15,8	3,8
50	50,0	45,5	76,0	13,1	3,8
40	50,0	43,5	67,0	11,0	3,6
30	55,0	45,5	56,0	8,5	3,5
25	65,0	52,5	52,0	7,2	3,5
20	75,0	58,0	44,0	5,8	3,5
15	75,0	51,0	30,0	4,2	3,5
10	75,0	44,0	18,0	2,8	3,5
Uniformização	75,0	64,0	60,0	8,0	*
Condicionamento	75,0	71,5	86,0	14,0	*

sendo: Ts - temperatura do bulbo seco; Tu - temperatura do bulbo úmido; UR - umidade relativa; TUE - teor de umidade de equilíbrio; PS - potencial de secagem.

3.2 Tratamentos de modificação térmica das tábuas de *S. parahyba*

As tábuas previamente secas foram cortadas em peças menores com 0,60 m de comprimento, sendo que foram descartadas as regiões com rachaduras e nós e o material contido até 30 cm das extremidades. Uma das peças de cada tábua foi mantida em seu estado original (madeira controle) e as demais foram destinadas para os tratamentos de modificação térmica (madeira modificada termicamente).

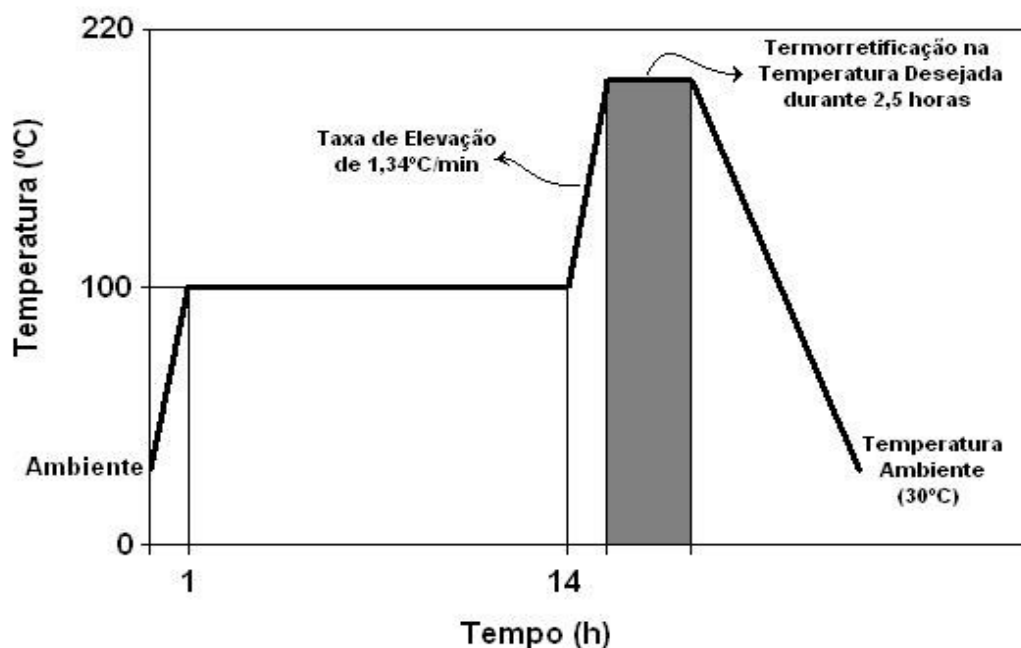
Cada peça, com teor de umidade de 10,0%, teve os seus topos selados com borracha de silicone vermelho (resistente a temperaturas de até 316°C) e foi empilhada de modo gradeado em uma estufa elétrica, através do uso de separadores vazados de aço.

A estufa elétrica utilizada como modificador térmico apresenta dimensões internas de 1,00 m x 0,70 m x 1,50 m para a largura, a profundidade e a altura, respectivamente. O equipamento é dotado de um sistema de aquecimento baseado em resistências elétricas, perfeitamente distribuídas nas paredes laterais, que permite o alcance de uma temperatura máxima de 300°C e de um sistema de gerenciamento do processo composto por um controlador programável de tempo e de temperatura. O transporte de calor das paredes da estufa para a superfície das tábuas ocorre via irradiação de calor.

O material foi previamente aquecido com uma temperatura de 100°C por 14 horas, com o intuito de diminuir o seu teor de umidade para cerca de 3% e evitar possíveis problemas de expansão de vapor de água e rompimento das paredes celulares. Após esse período, as cargas de madeira foram submetidas a uma taxa de elevação de temperatura de 1,34°C/min até um conjunto de temperaturas finais de 180°C, 200°C e 220°C, utilizando-se o programa de modificação térmica desenvolvido por Calonego (2009) e patenteado por Severo e Calonego (2011).

A carga de madeira permaneceu na temperatura final desejada durante um período de 2,5 horas, levando-se em consideração a afirmação dada por Bhuiyan et al. (2001), de que após a primeira hora do tratamento térmico é que ocorre a máxima cristalização da celulose, por Mburu et al. (2007), de que as mudanças mais intensas ocorrem nas primeiras duas horas de tratamento e, por Calonego e Severo (2010), que indicaram presença de rachaduras internas na madeira modificada termicamente após 3 horas de tratamento. O programa de modificação térmica adotado no estudo é mostrado no esquema da Figura 10.

Figura 10 – Programa de tempo-temperatura adotado para a modificação térmica da madeira de *S. parahyba*, patenteado por Severo e Calonego (2011).



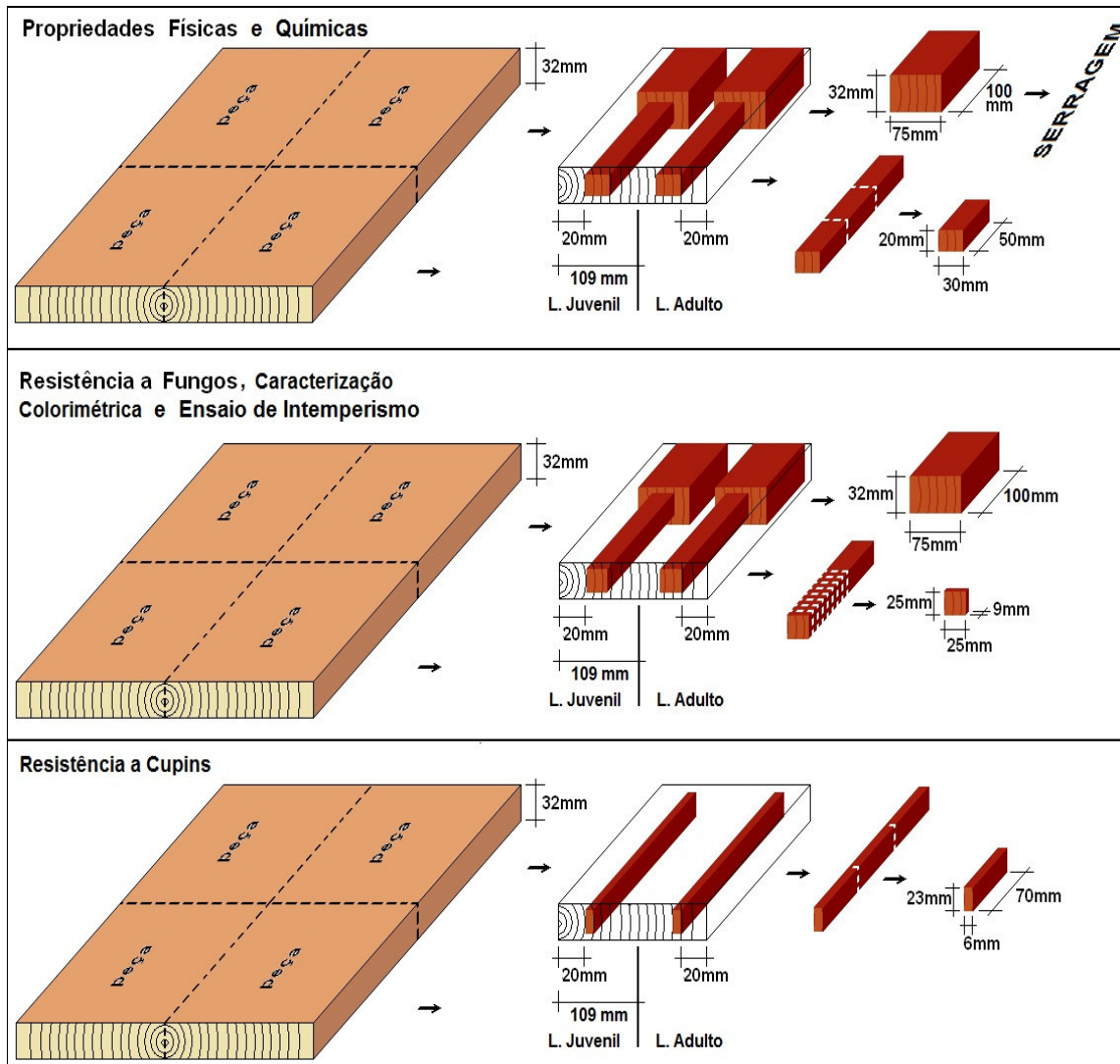
Após os tratamentos térmicos, a estufa foi desligada e as peças de madeira permaneceram no seu interior em resfriamento natural até atingirem a temperatura ambiente (aproximadamente 30°C).

3.3 Obtenção de corpos de prova e caracterização das propriedades da madeira modificada termicamente

Após os tratamentos de modificações térmicas da madeira de *S. parahyba*, os corpos de prova foram removidos de todas as tábuas (controle e modificadas termicamente) para a caracterização física, química, colorimétrica e da durabilidade natural aos fungos xilófagos e cupins de madeira seca e ao intemperismo, conforme é mostrado na Figura 11.

Os corpos de prova, perfeitamente orientados em relação às três direções estruturais (tangencial, radial e longitudinal) da madeira, foram retirados das regiões de madeira juvenil e adulta de acordo com Athanázio-Heliodoro (2015). Segundo a autora, a caracterização da mesma madeira utilizada nesse estudo mostrou que o lenho juvenil está confinado até 109 mm a partir da medula.

Figura 11 – Modelo de extração dos corpos de prova a partir de uma tábua central.



Assim, todas as peças foram demarcadas a cerca de 20 mm da medula, com o intuito de permitir a obtenção de corpos de prova perfeitamente orientados do lenho juvenil e a cerca de 20 mm da casca para a obtenção de corpos de prova perfeitamente orientados do lenho adulto. A partir desses pontos, o material foi subdividido em corpos de prova na marcenaria da Faculdade de Ciências Agrônômicas, da UNESP de Botucatu-SP.

Durante esta etapa, retirou-se uma subamostra do lenho juvenil e outra do adulto por peça de madeira a partir das regiões pré-determinadas, com uma serra circular. Em seguida, utilizou-se uma desempenadeira, para esquadrear as subamostras de

madeira e uma desengrossadeira, para padronizar as dimensões das espessuras radial e tangencial. Por fim, utilizou-se a serra circular para a padronização do comprimento dos corpos de prova na direção longitudinal.

3.4 Caracterização física da madeira de *S. parahyba*

O material preparado para a caracterização física da madeira de *S. parahyba* foi composto por 16 (dezesesseis) peças, com 0,60 m de comprimento, provenientes de tábuas centrais de 4 (quatro) árvores.

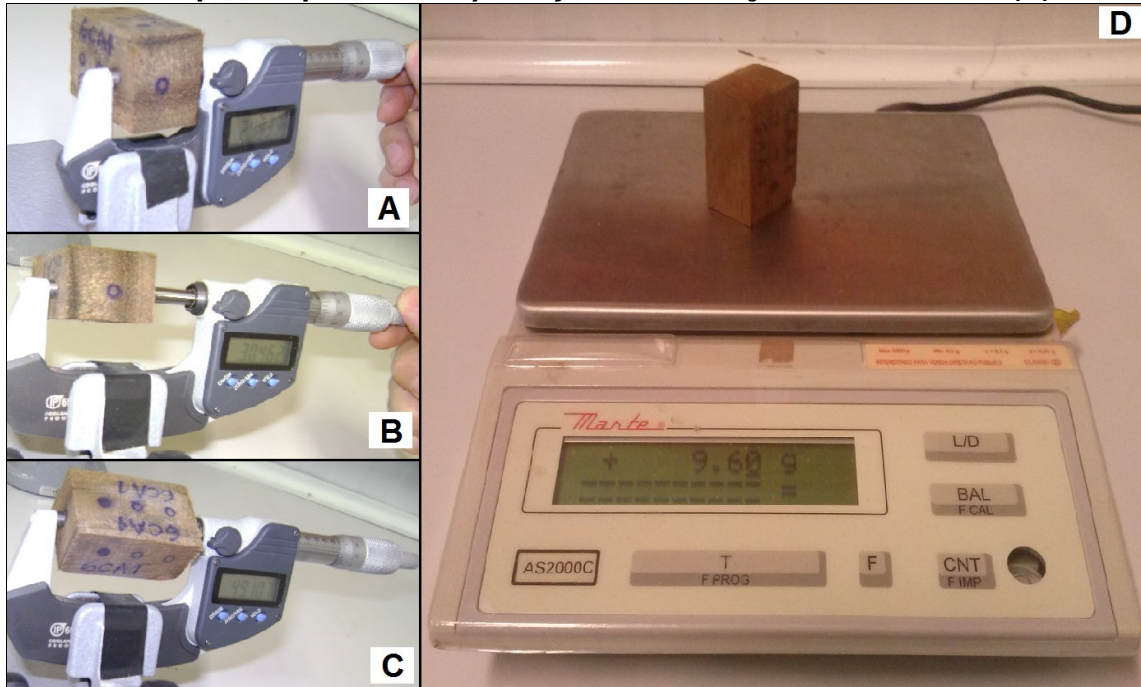
De cada uma das peças foram retirados corpos de prova perfeitamente orientados em função dos três planos anatômicos (tangencial, radial e longitudinal), tanto do lenho juvenil quanto do adulto e com dimensões de 20,0 mm x 30,0 mm x 50,0 mm, sendo a maior aresta lateral orientada na direção longitudinal e a menor na direção tangencial, conforme a norma ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997).

Os corpos de prova de cada um dos tratamentos foram colocados em estufa elétrica pré-regulada com temperatura inicial de 35°C. A temperatura foi gradativamente aumentada até atingir 103±2°C e, os corpos de prova mantidos nesta condição até que atingissem peso constante.

Em seguida, todos os corpos de prova foram colocados na câmara climática do Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras do Departamento de Ciência Florestal da FCA-UNESP de Botucatu-SP, regulada com 21°C de temperatura e 65% de umidade relativa do ar, até que atingissem a umidade de equilíbrio higroscópico correspondente. Logo após, todo o material foi submerso em água até que ocorresse a completa saturação das fibras da madeira.

Os corpos de prova foram submetidos a sucessivas sessões de pesagens com balança de precisão de 0,01g e as suas dimensões foram mensuradas com micrômetros com 0,001mm de precisão, na condição seca e após cada mudança nas condições de umidade de equilíbrio higroscópico, conforme pode ser verificado na Figura 12.

Figura 12 – Medição das dimensões tangencial (A), radial (B) e longitudinal (C) dos corpos de prova de *S. parahyba* e verificação da sua massa (D).



Com estes valores, foram determinados os inchamentos lineares e o volumétrico, os respectivos coeficientes de retratibilidades, e o fator de anisotropia da madeira controle e das modificadas termicamente entre 180°C e 220°C, através da aplicação das equações (1), (2), (3) e (4).

$$\alpha_L = \frac{D_{\text{Sat.}} - D_0}{D_0} * 100 \quad (1)$$

$$\alpha_V = \frac{V_{\text{Sat.}} - V_0}{V_0} * 100 \quad (2)$$

$$Q = \frac{\Delta\alpha_L}{\Delta U} = \frac{(D_U - D_0) * M_0}{D_0 * (M_U - M_0)} \quad (3)$$

$$Fa = \frac{\alpha_{L_{\text{Tangencial}}}}{\alpha_{L_{\text{Radial}}}} \quad (4)$$

sendo:

α_L - inchamento linear da madeira, %;

α_V - inchamento volumétrico da madeira, %;

Q - coeficiente de retratibilidade da madeira, adimensional;

Fa - fator anisotrópico, adimensional;

D_{Sat} - dimensão linear na condição saturada, cm;

D_0 - dimensão linear na condição seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$, cm;

V_{Sat} - volume na condição saturada, cm^3 ;

V_0 - volume na condição seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$, cm^3 ;

D_U - dimensão linear na condição aclimatizada, cm;

M_U - massa na condição aclimatizada, g;

M_0 - massa na condição seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$, g.

Através das equações (5), (6), (7), (8) e (9) foi possível determinar o rendimento, as massas específicas aparentes e os teores de umidade com base em massa seca dos corpos de prova.

$$R = \frac{M_{0_{\text{Madeira Modificada}}}}{M_{0_{\text{Madeira Controle}}}} * 100 \quad (5)$$

$$\rho_b = \frac{M_0}{V_{Sat}} \quad (6)$$

$$\rho_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad (7)$$

$$\rho_U = \frac{M_U}{V_U} \quad (8)$$

$$U\% = \frac{M_U - M_0}{M_0} * 100 \quad (9)$$

sendo:

R - rendimento da modificação térmica, %;

ρ_b - massa específica básica, g/cm^3 ;

ρ_0 - massa específica aparente a 0% de umidade, g/cm^3 ;

ρ_U - massa específica aparente na condição aclimatizada, g/cm^3 ;

U% - teor de umidade da madeira com base em massa seca, %;

M_0 - massa seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$ dos corpos de prova, g;

M_U - massa úmida dos corpos de prova, g;

V_{Sat} - volume saturado dos corpos de prova, cm^3 ;

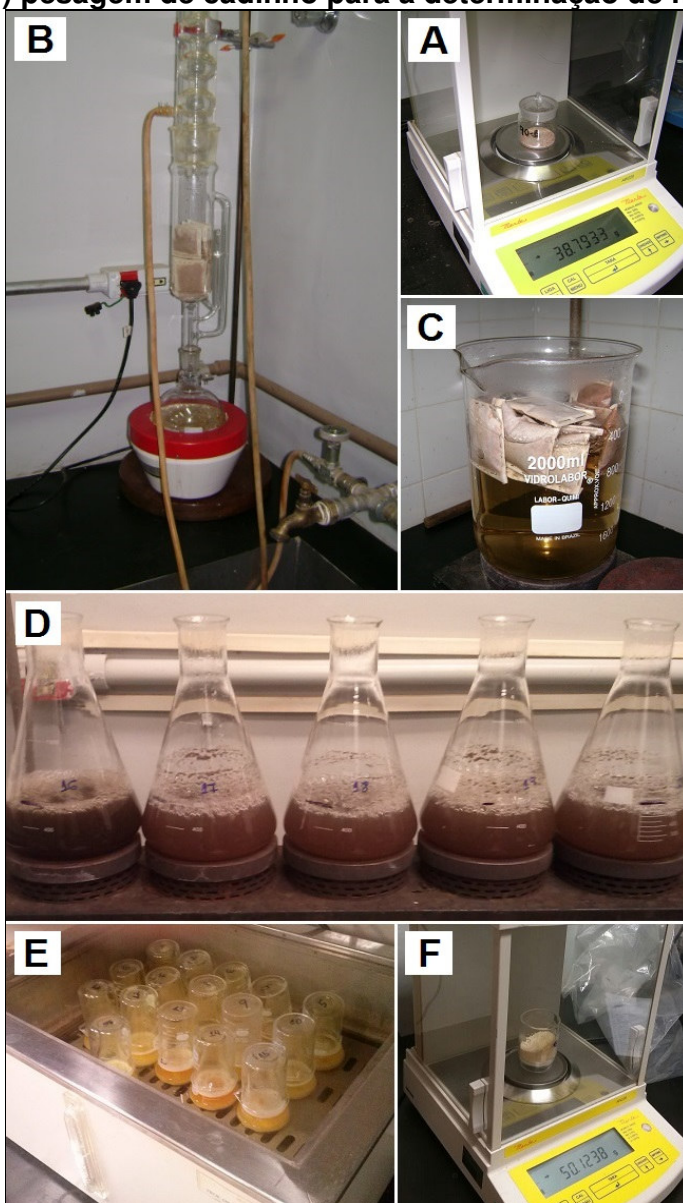
V_0 - volume dos corpos de prova a 0% de umidade, cm^3 ;

V_U - volume dos corpos de prova na condição aclimatizada, cm^3 .

3.5 Caracterização química da madeira de *S. parahyba*

As análises químicas da madeira de *S. parahyba* foram realizadas no Laboratório de Química da Madeira da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, de Botucatu, SP. As etapas realizadas para a caracterização química do material estão mostradas na Figura 13.

Figura 13 – Determinação dos compostos químicos da madeira de *S. parahyba*: (A) determinação do teor de secos da madeira; (B) extração dos extrativos da madeira em etanol e etanol/tolueno 1/2 (v/v); (C) extração dos extrativos da madeira em água quente; (D) fervura em ácido sulfúrico para a determinação de lignina; (E) solução de NaClO₂ (20%) + ácido acético (1:5) em banho maria a 70-80°C e (F) pesagem de cadinho para a determinação de holocelulose.



A caracterização química, dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* de todos os tratamentos (controle e modificadas termicamente), foi realizada em amostras com dimensões de 100 x 75 mm obtidas de 16 (dezesesseis) peças, provenientes de tábuas centrais de 4 (quatro) árvores. Todo o material foi manualmente transformado em cavacos por meio de um facão. Todos os cavacos foram transformados em serragem por meio de um moinho de facas tipo Wiley. Posteriormente, as serragens foram classificadas através de um sistema de classificação por peneiras. A serragem utilizada para as análises químicas foi aquela que passou pela peneira de malha 40 *mesh* e ficou retida na malha de 60 *mesh*.

Os teores de extrativos totais (TAPPI T 12 wd-82, 1999) foram determinados após extrações subseqüentes em etanol, etanol/tolueno 1/2 (v/v) e água quente. Posteriormente, foram determinados os teores de lignina Klason (TAPPI T 222 om-98, 1999) após fervura com ácido sulfúrico a 72% e, os teores de holocelulose (ASTM D-1104, 1978) após a deslignificação com clorito de sódio.

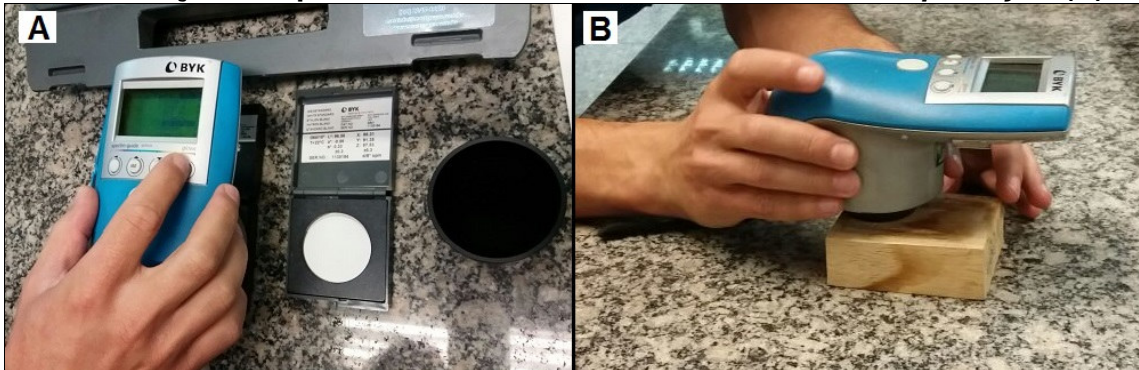
3.6 Determinação da cor da madeira de *S. parahyba*

A análise colorimétrica, dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* de todos os tratamentos (controle e modificadas termicamente), foi realizada em pontos distintos da superfície de amostras com dimensões de 100 x 75 mm obtidas de 16 (dezesesseis) peças, provenientes de tábuas centrais de 4 (quatro) árvores.

Como está mostrado na Figura 14, foi utilizado um espectrofotômetro de Reflectância Portátil da marca BYK Gardner, modelo CD-6834, com diâmetro da área de medição de cor de 11 mm e ângulo de geometria óptica de 8°. O equipamento foi calibrado para fazer leituras com iluminante D65 (luz do dia) e grau do observador de 10°.

Conforme preconiza o sistema colorimétrico CIE $L^*a^*b^*$ de 1976, foram determinados os seguintes parâmetros colorimétricos: L^* (brilho), a^* (coordenada do eixo verde-vermelho) e b^* (coordenada do eixo azul-amarelo). De posse desses dados, foi possível calcular todos os demais parâmetros colorimétricos, conforme ASTM E-308 (1999) e Brainard (2003).

Figura 14 – Calibração do espectrofotômetro de Reflectância Portátil (A) e determinação dos parâmetros coloriméricos da madeira de *S. parahyba* (B).



Assim, as diferenças (ΔL^* , Δa^* e Δb^*) existentes entre a madeira controle (testemunha) e as tratadas termicamente foram determinadas com os parâmetros L^* , a^* e b^* , utilizando-se as equações (10), (11) e (12). Esses valores foram empregados para determinar as mudanças na cor (ΔE^*), na saturação (ΔC^*) e na tonalidade (Δh°), conforme mostram as equações (13), (14) e (15).

$$\Delta L^* = L_F^* - L_I^* \quad (10)$$

$$\Delta a^* = a_F^* - a_I^* \quad (11)$$

$$\Delta b^* = b_F^* - b_I^* \quad (12)$$

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

$$\Delta C^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (14)$$

$$\Delta h^\circ = \arctan (b^* / a^*) \quad (15)$$

sendo:

ΔL^* - alteração no brilho das tábuas com o tratamento térmico;

Δa^* - alteração no eixo vermelho-verde da cor das tábuas com o tratamento térmico;

Δb^* - alteração no eixo amarelo-azul da cor das tábuas com o tratamento térmico;

ΔE^* - alteração na cor das tábuas com o tratamento térmico;

ΔC^* - alteração da saturação da cor das tábuas com o tratamento térmico;

Δh° - alteração da tonalidade das tábuas com o tratamento térmico;

L_I^* , a_I^* , b_I^* - parâmetros colorimétricos da madeira sem tratamento térmico;

L_F^* , a_F^* , b_F^* - parâmetros colorimétricos da madeira tratada termicamente.

3.7 Durabilidade natural da madeira de *S. parahyba* aos fungos deterioradores

3.7.1 Preparo dos corpos de prova de madeira e das culturas fúngicas

O material usado nos ensaios de apodrecimento acelerado da madeira foi composto de um lote com 16 (dezesesseis) peças de *S. parahyba*, com 0,60 m de comprimento, provenientes de tábuas centrais de 4 (quatro) árvores.

De cada peça, foram retirados corpos de prova perfeitamente orientados em função das três direções estruturais (tangencial, radial e longitudinal), tanto do lenho juvenil quanto do adulto. As suas dimensões apresentavam-se em torno de 25,0 mm x 25,0 mm x 9,0 mm, sendo a menor na direção longitudinal, conforme preconiza a norma técnica ASTM D-2017 (2005).

Todos os corpos de prova foram lixados e secos em estufa elétrica, com ventilação forçada e pré-regulada a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingirem peso constante. Posteriormente, foram pesados em balança com precisão de 0,01g para a determinação de sua massa inicial (M_i), conforme a norma ASTM D-1413 (2007).

Para proporcionar a deterioração da madeira, foram empregadas culturas puras dos fungos *Gloeophyllum trabeum* (coletado da micoteca do INPA, Manaus, AM, e identificado por ID 408) causador de podridão parda e *Pycnoporus sanguineus* (coletado da micoteca do Laboratório de Patologia Florestal do Departamento de Produção Vegetal da FCA-UNESP de Botucatu-SP) causador de podridão branca.

Os fungos foram isolados e preservados em matrizes primárias, placas de Petri com meio de cultura composto por batata-dextrose-agar (2% de malte Agar e 1% de peptose), e acondicionados em câmara escura pré-regulada com temperatura de 25°C , no Laboratório de Patologia Florestal do Departamento de Produção Vegetal da FCA-UNESP de Botucatu-SP.

Embora a norma ASTM D-2017 (2005) estabeleça um total de 6 (seis) corpos de prova para caracterizar a resistência biológica da madeira, foram utilizados 12 (doze) corpos de prova para caracterizar o lenho juvenil e outros 12 (doze) do adulto de cada um dos tratamentos (sendo um controle e os outros três modificados termicamente), totalizando 96 (noventa e seis) corpos de prova por tipo de fungo.

3.7.2 Ensaio de apodrecimento acelerado da madeira de *S. parahyba*

O teste de apodrecimento do tipo “soil-block” foi executado segundo a norma ASTM D-2017 (2005), com algumas adaptações. Para cada tipo de fungo, foram utilizados 32 (trinta e dois) frascos de vidro com tampa rosqueável e capacidade de 725 mL de volume interno. Dentro de cada frasco, foram colocados: o solo argiloso, a água e a lâmina alimentadora de *Pinus* sp., como descrito na norma técnica.

O solo utilizado como substrato foi o latossolo roxo, coletado de horizonte B, com textura argilosa e capacidade de retenção de água de 29%, proveniente da Fazenda Experimental Edgárdia, pertencente à FCA-UNESP de Botucatu-SP.

Ele foi analisado no Laboratório de Física do Solo da FCA da UNESP de Botucatu-SP e o seu pH foi corrigido para 6,31, utilizando-se calcário dolomítico com PRNT 91,5%, na proporção de 400 g para 100 kg de solo. O solo foi peneirado com peneira de 4 mm de abertura para a eliminação de impurezas e a quebra de torrões.

A quantidade de água adicionada nos frascos foi obtida pela equação (16).

$$Q_{H_2O} = [1,30 * (A - B)] * [M_{SOLO} / (100 + B)] \quad (16)$$

sendo:

Q_{H_2O} - quantidade de água a ser adicionada, g;

A - capacidade de retenção de água do solo, %;

B - teor de umidade do solo seco ao ar (estocado), %;

M_{SOLO} - massa de solo seco ao ar a ser adicionada no frasco, g.

O teor de umidade do solo foi obtido por meio da porcentagem de massa perdida após a secagem em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Foram secas três porções de 50 g do solo a ser utilizado no teste acelerado, obtendo-se um teor de umidade médio de 13,0%.

Em cada frasco, foram adicionados 300 g de solo e 55 mL de água destilada. Sobre o solo no interior do frasco, foi colocada uma placa suporte de madeira de alburno de *Pinus* sp., com maior proporção de lenho inicial, nas dimensões de 0,3 x 5,0 x 5,0 cm, denominada alimentador.

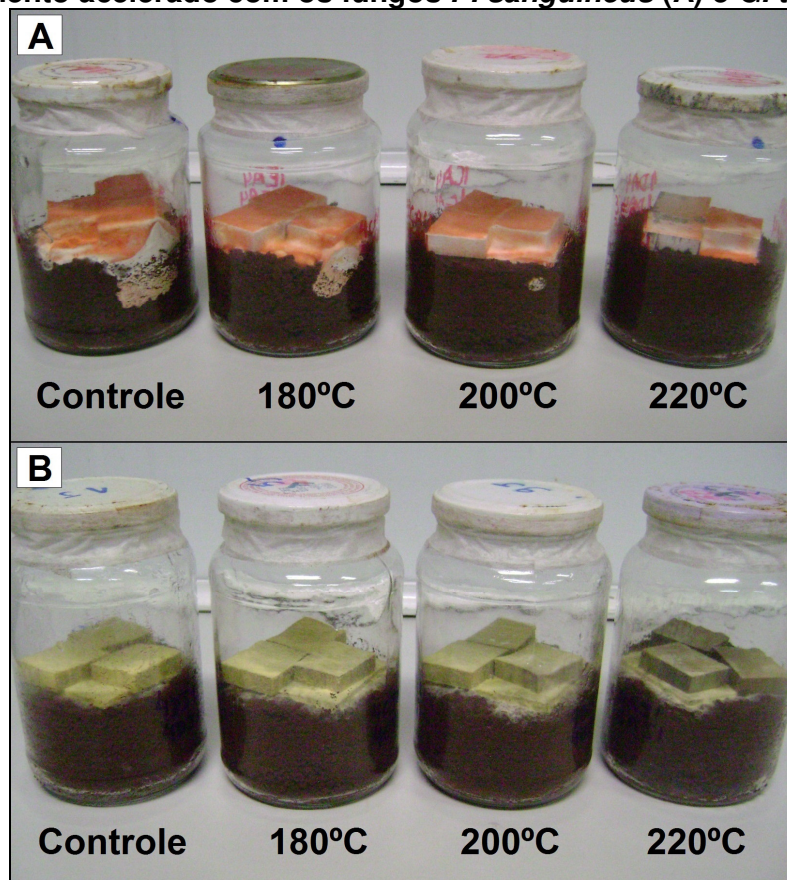
Após o preparo dos frascos, estes foram autoclavados a $121 \pm 1^\circ\text{C}$ e pressão de uma atmosfera durante uma hora, com o objetivo de evitar a contaminação por fungos indesejáveis. O alimentador de cada um dos 32 (trinta e dois) frascos

recebeu 1 (um) inóculo central com 1cm² da cultura pura do fungo deteriorador *G. trabeum*. Os outros 32 (trinta e dois) frascos restantes receberam um inóculo central da cultura pura do fungo deteriorador *P. sanguineus*. Os procedimentos foram realizados em uma câmara de fluxo laminar para evitar a contaminação do material.

Após 14 (quatorze) dias da inoculação dos frascos é que os fungos incubados em estufa B.O.D. (demanda bioquímica de oxigênio), com temperatura de 26,7±1°C, 70±4% de umidade relativa e no escuro, conforme preconiza a norma ASTM D-2017 (2005), colonizaram toda a superfície de cada alimentador. Posteriormente, 3 (três) corpos de prova do mesmo tratamento, previamente identificados e esterilizados foram colocados no interior de cada frasco, sobre o alimentador.

Os frascos foram novamente incubados em estufa B.O.D., por um período de 12 (doze) semanas, conforme sugerido pela norma ASTM D-1413 (2007) e apresentaram o aspecto mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Aspecto da madeira de *S. parahyba* após 12 semanas de ensaio de apodrecimento acelerado com os fungos *P. sanguineus* (A) e *G. trabeum* (B).



3.7.3 Avaliação da perda de massa no ensaio de apodrecimento acelerado

Passado os períodos de incubação, os corpos de prova dos ensaios “soil-block” foram removidos dos frascos e limpos com água corrente, com o auxílio de uma escova para a remoção dos micélios do fungo.

Em seguida, os corpos de prova foram novamente acondicionados em estufa elétrica, com ventilação forçada e pré-regulada a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingirem as suas novas massas completamente seca. Posteriormente, foram pesados em balança com precisão de 0,01g para a determinação de sua massa final (M_F), conforme preconiza a norma ASTM D-1413 (2007).

Para cada corpo de prova, a avaliação da perda de massa foi calculada pela diferença entre a sua massa inicial (M_I) e a sua massa final (M_F), antes e após a exposição ao fungo deteriorador e pela aplicação da equação (17).

$$\text{PM}\% = \frac{M_I - M_F}{M_I} * 100 \quad (17)$$

sendo:

PM - perda de massa dos corpos de prova após os ensaios de apodrecimento, %;

M_I - massa inicial dos corpos de prova, g;

M_F - massa dos corpos de prova após a sua deterioração, g.

Os valores de perda de massa estabeleceram uma medida de susceptibilidade relativa ao apodrecimento ou, inversamente, da resistência ao apodrecimento das amostras dos lenhos juvenil e adulto tanto da madeira controle quanto das modificadas termicamente de *S. parahyba*.

3.8 Durabilidade da madeira de *S. parahyba* ao cupim de madeira seca

3.8.1 Preparo dos corpos de prova de madeira e dos cupins de madeira seca

O material usado no ensaio de resistência da madeira aos cupins xilófagos foi composto de um lote com 16 (dezesesseis) peças de *Schizolobium parahyba*, com 0,60 m de comprimento, provenientes de tábuas centrais de 4 (quatro) árvores.

De cada uma das peças, foram retirados corpos de prova perfeitamente orientados em função das três direções estruturais (tangencial, radial e longitudinal), tanto do lenho juvenil quanto do adulto. As respectivas dimensões dos corpos de prova apresentavam-se em torno de 23,0 mm x 6,0 mm x 70,0 mm, conforme preconiza a norma IPT-1157 (1980).

Todos os corpos de prova foram lixados e secos em estufa elétrica, com ventilação forçada e pré-regulada a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingirem peso constante. Posteriormente, os corpos de prova foram pesados em balança com precisão de 0,01g para a determinação de sua massa inicial.

Para proporcionar a deterioração da madeira, foram utilizados indivíduos de cupins de madeira seca *C. brevis* (coletados de uma colônia presente em uma porta de madeira de *Pinus* sp. retirada do Setor de Manutenção da FCA-UNESP de Botucatu-SP).

Para caracterizar a resistência biológica da madeira de Guapuruvu, foram utilizados 8 (oito) corpos de prova obtidos do lenho juvenil e outros 8 (oito) do adulto, de cada um dos tratamentos (sendo um controle e os outros três modificados termicamente), totalizando 32 (trinta e dois) corpos de prova por tipo de lenho.

Simultaneamente, 8 (oito) corpos de prova com as mesmas dimensões descritas anteriormente foram retirados da região do lenho inicial de *Pinus* sp. e utilizados como padrão de degradação (testemunha), conforme o preconizado pela norma técnica.

3.8.2 Ensaio de resistência da madeira de *S. parahyba* ao cupim *C. brevis*

Para avaliar o efeito do tratamento térmico sobre a durabilidade natural da madeira de Guapuruvu aos cupins de madeira seca foram realizados procedimentos conforme a norma IPT-1157 (1980).

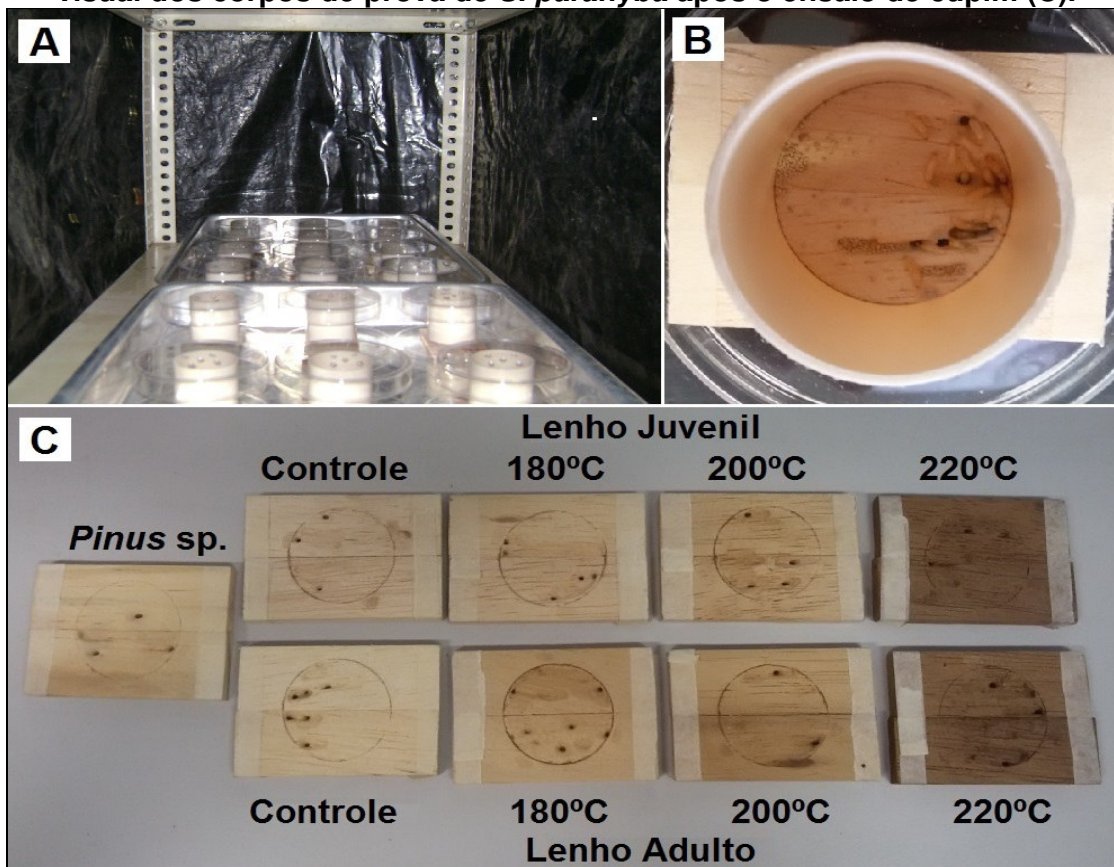
Os corpos de prova de cada tratamento (controle e modificados termicamente) foram unidos aos pares pelas arestas laterais (70,0 mm) com o auxílio de fita adesiva e colocados em placas de Petri.

Sobre cada par de corpos de prova (com superfície de $32,2\text{ cm}^2$) foi colocada uma manga de PVC de $1\frac{1}{2}$ " de diâmetro, restringindo a área de ataque a $11,4\text{ cm}^2$,

conforme mostra a Figura 16B. Em cada um dos conjuntos, foram colocados 40 cupins de madeira seca *C. brevis*, sendo 39 operários e 1 soldado.

As placas com os cupins foram mantidas em câmara climatizada durante 45 (quarenta e cinco) dias, no escuro, com temperatura de $27 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $70 \pm 4\%$, conforme ilustra Figura 16A.

Figura 16 – Ensaio de resistência da madeira de *S. parahyba* ao cupim de madeira seca *C. brevis* (A), área de ataque no corpo de prova (B) e aspecto visual dos corpos de prova de *S. parahyba* após o ensaio de cupim (C).



Após o término do ensaio de resistência biológica da madeira de Guapuruvu, os corpos de prova foram novamente secos em estufa elétrica a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até alcançarem novo peso constante. A massa seca final de cada corpo de prova foi determinada em balança com precisão de 0,01g.

A perda de massa provocada pelo cupim de madeira seca foi calculada, conforme mostra a equação (18).

$$PM\% = \frac{M_I - M_F}{M_I} * 100 \quad (18)$$

sendo:

PM - perda de massa dos corpos de prova após o ensaio de resistência natural ao cupim de madeira seca, %;

M_I - massa inicial dos corpos de prova, g;

M_F - massa dos corpos de prova após a sua deterioração, g.

Posteriormente, foi avaliado o número de furos ocasionados pelos cupins em cada corpo de prova, os desgastes provocados por eles em todos os corpos de prova e a taxa de mortalidade dos cupins após os ensaios.

A taxa de mortalidade dos cupins foi calculada pela diferença entre o número de cupins no início (N_I) e ao final (N_F) do experimento, conforme a equação (19).

$$CM\% = \frac{N_I - N_F}{N_I} * 100 \quad (19)$$

sendo:

CM - taxa de mortalidade dos cupins após o ensaio de resistência natural, %;

N_I - número de cupins no início do ensaio de resistência natural, 40;

N_F - número de cupins após o ensaio de resistência natural.

Para avaliar o desgaste, três pessoas qualificaram subjetivamente cada corpo de prova por meio de notas de 0 a 4. Essa avaliação subjetiva foi feita comparativamente às amostras da madeira testemunha (*Pinus* sp.), as quais pressupunham um dano caracterizado como profundo.

Salienta-se que: 0 corresponde a nenhum dano, 1 ao dano superficial, 2 ao dano moderado, 3 ao dano acentuado, e 4 ao dano profundo (semelhante à testemunha). Após o término do ensaio de resistência natural, os corpos de prova da madeira controle de *S. parahyba* e das modificadas termicamente quando submetidos aos cupins *C. brevis* apresentaram os aspectos conforme ilustra a Figura 16C.

3.9 Ensaio de resistência da madeira de *S. parahyba* ao intemperismo

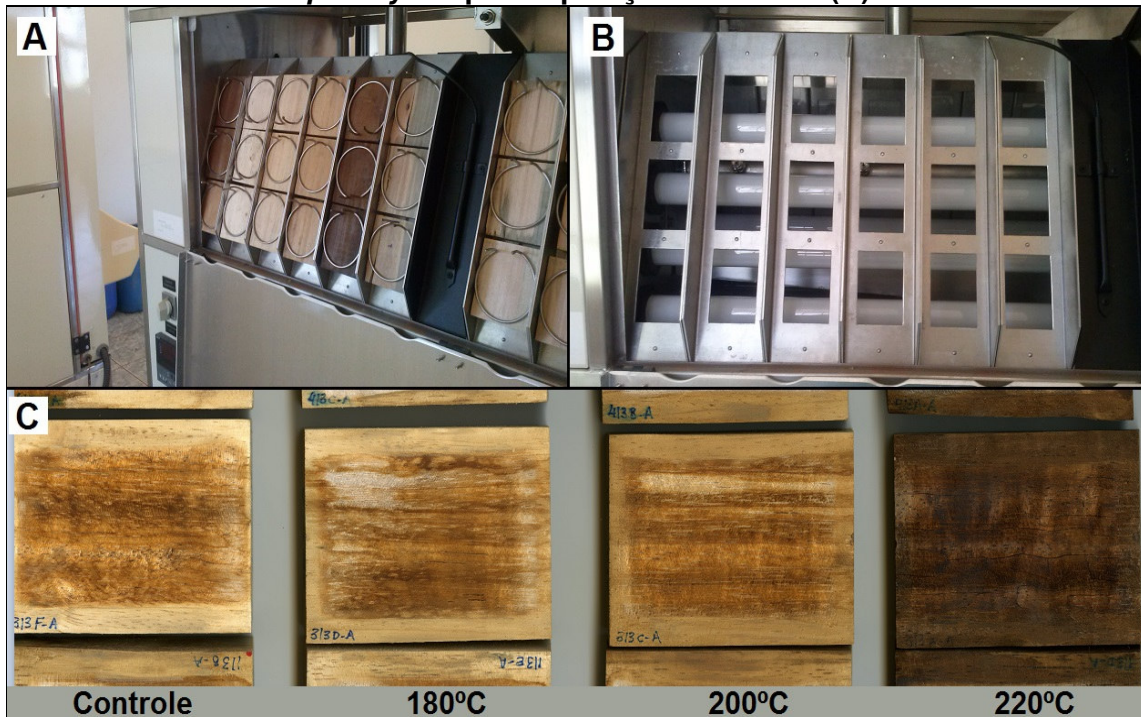
O material usado no ensaio de resistência da madeira ao intemperismo foi composto de um lote com 16 (dezesseis) peças de *S. parahyba*, com 0,60 m de comprimento, provenientes de tábuas centrais de 4 (quatro) árvores.

De cada uma das peças, foram retirados corpos de prova tanto do lenho juvenil quanto do adulto, com dimensões de 100 x 75 mm. As superfícies dos corpos de prova controle e dos modificados termicamente foram lixadas com lixas grão 220.

Para avaliar o efeito do tratamento térmico sobre a resistência ao intemperismo da madeira de Guapuruvu, foram realizados procedimentos conforme a norma ASTM G-154 (2006).

Cada corpo de prova foi acomodado em suportes dentro de uma câmara de intemperismo, conforme mostra as Figuras 17A e 17B, e as suas superfícies foram expostas a irradiação com luz UVA-340, através de lâmpadas que emitem irradiação com comprimento de onda de 340 nm e apresentam irradiância de $1,55\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$.

Figura 17 – Ensaio de resistência da madeira de *S. parahyba* ao intemperismo (A), suporte para corpos de prova (B) e aspecto visual dos corpos de prova de *S. parahyba* após exposição ao ensaio (C).



As lâmpadas, a temperatura média dentro da câmara durante as etapas de irradiação do espectro de luz, a pulverização de água e a condensação foram realizadas conforme o preconizado pelo ciclo 7 da referida norma técnica.

Assim, a madeira foi exposta a irradiação UV durante 8:00 h, seguido por 0:15 h de pulverização de água e 3:45 h de condensação, por ciclo de exposição.

Como não há um consenso na literatura sobre o número de ciclos de exposição, e diversos autores trabalharam com tempo mínimo de exposição variando de 600 h (KATAOKA e KIGUCHI, 2001; OLTEAN et al., 2008) a um máximo de 2400 h (SILVA et al., 2007), o ensaio foi realizado por um período total de 1200 h, totalizando 100 ciclos de intemperismo.

O aspecto dos corpos de prova após o ensaio de intemperismo pode ser visualizado na Figura 17C.

A quantificação do efeito do intemperismo na madeira controle e de cada um dos tratamentos térmicos foi realizada pela determinação dos parâmetros colorimétricos do sistema CIE L*a*b* de 1976, conforme foi explicado no item 3.6.

Assim, foram calculadas as mudanças provocadas pelo intemperismo nos seguintes parâmetros colorimétricos da madeira: brilho (ΔL^*), coordenadas verde-vermelho (Δa^*) e azul-amarelo (Δb^*), saturação (ΔC^*), tonalidade (Δh^0) e na cor (ΔE^*).

3.10 Análise estatística

Para todas as variáveis estudadas no presente trabalho, foram aplicados teste de normalidade do tipo Kolmogorov-Smirnov.

Para as variáveis das propriedades físicas, químicas, colorimétricas e para as de resistência natural da madeira aos fungos, cupins e ao intemperismo foram adotados métodos de análise paramétrica para análise de variância (ANOVA), com o delineamento do experimento em blocos ao acaso levando-se em consideração os tipos de lenho e os tratamentos de modificação térmica. Posteriormente foi aplicado o teste de Tukey para as comparações de médias.

Para a variável nota de ataque de cupins nos corpos de prova foi realizado o teste não paramétrico (Kruskal Wallis), levando em conta o tipo de lenho e o

tratamento de modificação térmica, e a aplicação do teste de Dunn para comparações múltiplas.

O nível de significância adotado em todos os testes empregados no estudo foi de 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física e química da madeira de *S. parahyba* modificada termicamente

4.1.1 Efeito da modificação térmica no rendimento do processo, nas massas específicas e no teor de umidade de equilíbrio da madeira de *S. parahyba*

Conforme metodologia citada anteriormente (item 3.4) determinou-se o efeito da modificação térmica sobre o rendimento após o processo, as massas específicas aparentes e os teores de umidade de equilíbrio higroscópico da madeira de *S. parahyba*.

Verifica-se, na Tabela 3, o rendimento da madeira modificada termicamente com base na massa seca da madeira sem tratamento. Também, podem ser verificadas as massas específicas básicas, a 0% de umidade e aquelas determinadas na condição climática de 21°C e 65% de umidade relativa dos lenhos juvenil e adulto, na madeira sem tratamento da espécie estudada.

Tabela 3 – Efeito da modificação térmica no rendimento, nas massas específicas e no teor de umidade de equilíbrio higroscópico dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

Tratamento	N	Rendimento (%)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Redução ou (Aumento) (%)
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
Controle	12	0,0	100,0 ab	-----	0,0	100,0 ab	-----	0,0 ^{NS}
180°C	12	7,3	104,3 a	(4,3)	10,8	105,0 a	(5,0)	(0,7) ^{NS}
200°C	12	12,1	99,7 b	0,3	8,8	93,2 b	6,8	6,5 ^{NS}
220°C	12	12,7	94,4 b	5,6	15,8	94,6 b	5,4	(0,2) ^{NS}

Tratamento	N	Massa Específica Básica (g/cm ³)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Redução ou (Aumento) (%)
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
Controle	12	9,6	0,235 ab	-----	12,0	0,246 ab	-----	(4,7) ^{NS}
180°C	12	4,5	0,246 a	(4,7)	7,1	0,259 a	(5,3)	(5,3) ^{NS}
200°C	12	10,9	0,239 b	(1,7)	6,5	0,234 b	4,9	2,1 ^{NS}
220°C	12	11,6	0,232 b	1,3	4,3	0,240 b	2,4	(3,4) ^{NS}

(continuação Tabela 3)

Tratamento	N	Massa Específica a 0% de umidade (g/cm ³)						Redução ou (Aumento) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
Controle	12	9,6	0,258 ab	-----	12,0	0,270 ab	-----	(4,7) ^{NS}
180°C	12	4,6	0,268 a	(3,9)	7,1	0,282 a	(4,4)	(5,2) ^{NS}
200°C	12	10,9	0,256 b	0,8	6,7	0,250 b	7,4	2,3 ^{NS}
220°C	12	11,7	0,243 b	4,2	4,4	0,252 b	6,7	(3,7) ^{NS}

Tratamento	N	Massa Específica a 9% de umidade – 21°C e 65% U.R. (g/cm ³)						Redução ou (Aumento) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
Controle	12	9,6	0,274 ab	-----	12,0	0,286 ab	-----	(4,4) ^{NS}
180°C	12	4,6	0,281 a	(2,6)	5,8	0,301 a	(5,2)	(7,1) ^{NS}
200°C	12	10,8	0,267 bc	2,6	6,6	0,262 bc	8,4	1,9 ^{NS}
220°C	12	11,7	0,250 c	8,8	4,5	0,260 c	9,1	(4,0) ^{NS}

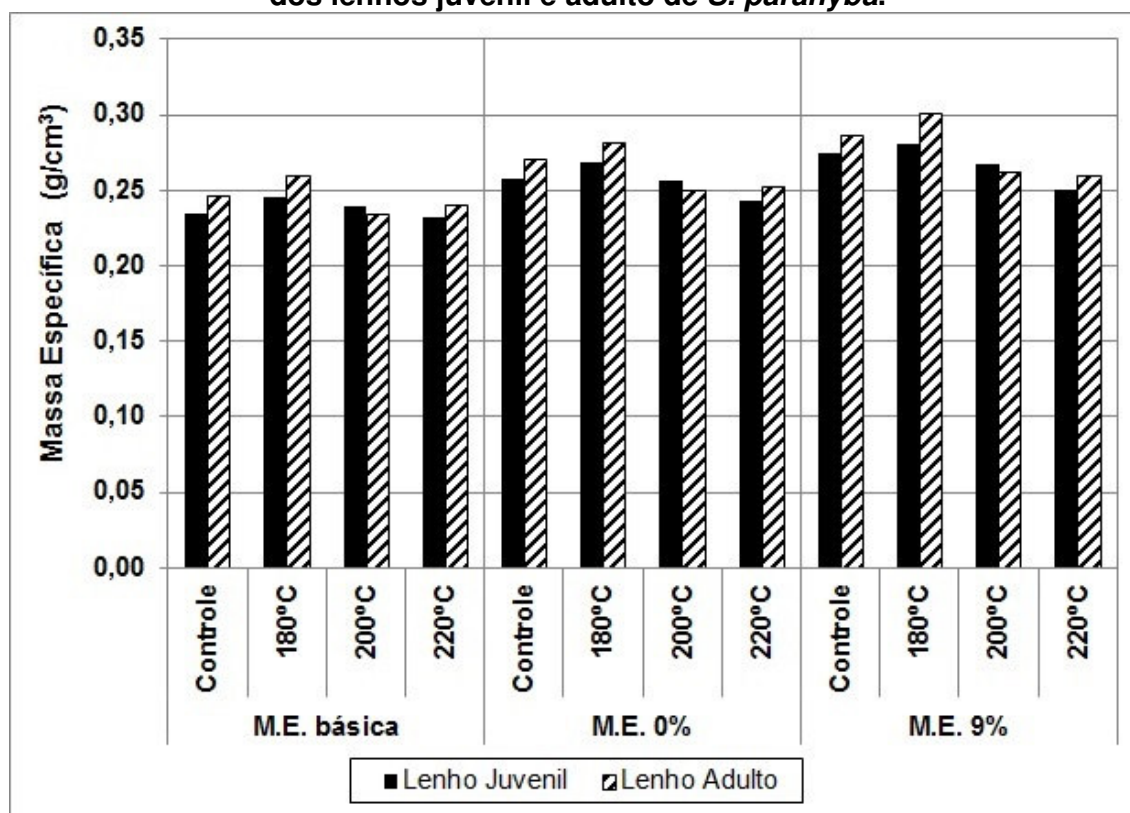
Tratamento	N	Teor de Umidade de Equilíbrio a 21°C e 65% U.R. (%)						Redução ou (Aumento) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	12	1,9	9,2 a	-----	1,3	8,9 a	-----	3,3 *
180°C	12	3,1	7,7 b	16,3	1,5	7,7 b	13,5	0,0 ^{NS}
200°C	12	4,7	6,6 c	28,3	5,6	6,7 c	24,7	(1,5) ^{NS}
220°C	12	3,8	4,5 d	51,1	7,7	5,1 d	42,7	(13,3) *

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra e ^{NS} denotam diferença não significativa.

Salienta-se que os resultados se enquadraram com os encontrados por Richter et al. (1974), Bortoletto Junior e Belini (2002) e Carvalho (2005) que classificaram a madeira de *S. parahyba* como de massa específica abaixo de 0,400 g/cm³, por Trianoski (2010) ao verificar que essa espécie apresenta baixa massa específica básica (0,264 g/cm³), e por Athanásio-Heliodoro (2015) que ao caracterizar os lenhos juvenil e adulto dessa espécie encontrou os valores de 0,289 e 0,375 g/cm³ para as massas específicas a 12% de umidade.

O efeito dos vários níveis de tratamentos térmicos no rendimento e nas massas específicas da madeira de *S. parahyba* foi mostrado na Tabela 3 e pode ser visualizado na Figura 18. O rendimento e a massa específica básica não sofreram variações significativas com a modificação térmica da madeira, embora o incremento da temperatura tenha diminuído a massa seca dos corpos de prova. Pela verificação das variáveis que determinam a massa específica da madeira foi constatado que o volume saturado dos corpos de prova apresentou uma diminuição de até 54,1% com o aumento da temperatura do tratamento. Brito (2006) explica que a modificação térmica tem maior influência na diminuição da higroscopicidade da madeira e na melhora da sua estabilidade dimensional do que na sua perda de massa. Assim, constata-se que a massa específica básica não é um bom parâmetro para avaliar a madeira modificada termicamente de *S. parahyba*. Conclusões semelhantes foram apresentadas por Severo et al. (2012) e Calonego et al (2012, 2014) para madeiras de coníferas e folhosas de outras espécies.

Figura 18 – Efeito da modificação térmica nas massas específicas aparentes dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.



Os tratamentos de modificações térmicas com as maiores temperaturas promoveram decréscimos na magnitude de 4,2% e 6,7% nas massas específicas a 0% dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*. O mesmo tratamento térmico proporcionou reduções significativas de até 8,8% e 9,1% nas massas específicas a 9% de TUE dos respectivos tipos de lenhos da espécie estudada. As madeiras modificadas termicamente com 220°C foram as que apresentaram maiores reduções nessa propriedade física.

Esses resultados são semelhantes ao encontrado por Unsal e Ayrilmis (2005), que ao modificarem termicamente a madeira de *Eucalyptus camaldulensis* com 150°C e 180°C por 10 horas, obtiveram, respectivamente, reduções de 7,1% e 10,0% nas suas massas específicas a 12% de umidade. Também corroboram com os encontrados por Calonego et al. (2012), que ao tratarem termicamente a madeira de *E. grandis* a 220°C verificaram reduções de 10,5% na sua massa específica a 0%. Também se assemelham com as reduções de 1,5% e 10,8% na massa específica a 12% da madeira de *Picea abies* modificada termicamente sob 180°C e 225°C por 4 horas, conforme estudo realizado por Alén et al. (2002). Resultados similares foram encontrados por Severo et al. (2012) e Calonego et al (2014), segundo os quais o lenho adulto das madeiras de *Pinus elliotii* var *elliotii* e de *E. grandis* termicamente modificadas apresentaram reduções de 4,4% e 6,8% nas suas respectivas massas específicas a 0% de TUE.

Esses resultados são explicados, conforme mostrado anteriormente por Stamm (1956), Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999), Homan et al. (2000), Waskett e Selmes (2001), Brito (2008), Mburu et al. (2007) e Severo et al. (2012, 2016), dentre outros autores, pois o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos, o que, conseqüentemente, provoca a perda de massa e a diminuição das massas específicas aparentes.

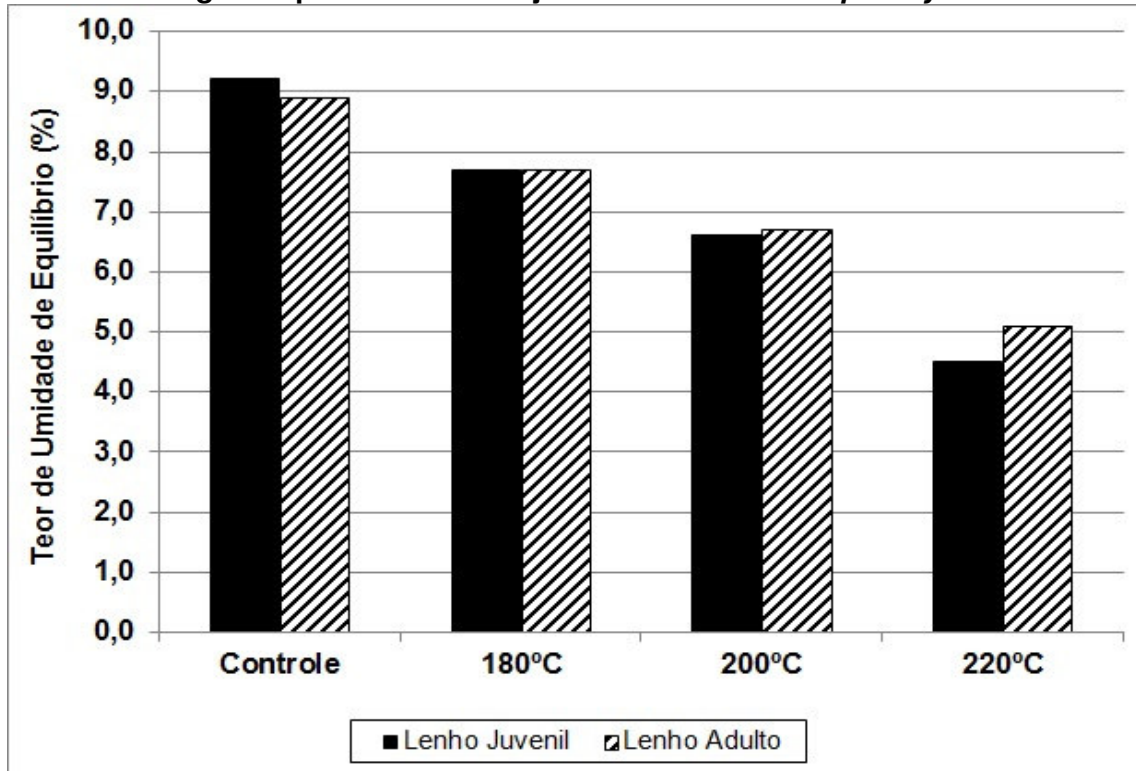
Na Tabela 3, é mostrado que os lenhos juvenil e adulto da madeira controle de *S. parahyba* ao adsorver umidade alcançaram, respectivamente, 9,2% e 8,9% de teores de umidade de equilíbrio higroscópico quando aclimatizadas a 21°C e 65% de umidade relativa. Se no estudo fosse verificada a dessorção de umidade da madeira nas condições climáticas de 12,0% de TUE, ela, provavelmente, apresentaria teor de umidade de equilíbrio aproximado de 12,0%. Entretanto, os resultados encontrados no presente estudo estão coerentes com a literatura, pois Galvão e Jankowsky

(1988), Skaar (1988), Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999) e Chauhan e Aggarwal (2004) mostraram que devido ao fenômeno de histerese a curva de adsorção permanece sempre abaixo da de dessorção.

Também é possível verificar que o teor de umidade de equilíbrio do lenho juvenil da madeira controle de *S. parahyba* foi 3,3% significativamente superior ao do lenho adulto. Assim, de acordo com Zobel e Van Buijtenen (1989), Bao et al. (2001), Calonego et al. (2005, 2014) e Severo et al. (2012) esse resultado pode ser explicado pelas menores espessuras das paredes celulares das fibras do lenho juvenil, as quais, segundo Galvão e Jankowsky (1988), Skaar (1988), Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999) facilitam a difusão de umidade na madeira.

O efeito dos vários níveis de tratamentos térmicos nos teores de umidade de equilíbrio higroscópico da madeira de *S. parahyba* foi mostrado na Tabela 3 e pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 – Efeito da modificação térmica no teor de umidade de equilíbrio higroscópico dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.



O aumento da temperatura de modificação térmica de 180°C para 220°C provocou reduções crescentes entre 16,3% e 51,1% nos teores de umidade de equilíbrio obtidos pelo lenho juvenil e, entre 13,5% e 42,7% nos do lenho adulto. Os resultados do presente estudo são coerentes com a afirmação dada por Vernois (2001) de que as madeiras tratadas termicamente, em torno de 200°C, apresentam higroscopicidade menor do que as não tratadas e se estabilizam em torno de 4% a 5% de umidade de equilíbrio, em vez de 10% a 12%.

Melhoras semelhantes, nos teores de umidade de equilíbrio, também foram encontradas por Juodeikienė e Minelga (2003) para a madeira de *Pinus* sp. tratada termicamente a 120°C ou, ainda, por Bekhta e Niemz (2003), que no estudo com madeiras de *Picea abies* constataram que as sem tratamento e as modificadas termicamente com 200°C durante 2, 4, 8 e 24 horas, apresentaram respectivos teores de umidade de equilíbrio de 12,2%, 9,2%, 8,8%, 8,2% e 7,5%.

Os resultados apresentados no presente estudo são semelhantes aos relatados por Jämsä e Viitaniemi (2001), que afirmam que madeiras em geral quando submetidas ao tratamento térmico apresentam reduções de até 50,0% do teor de umidade de equilíbrio higroscópico ou por Arnold (2010) que, ao modificarem termicamente as madeiras de *Fagus sylvatica* e de *Picea abies* com temperaturas de 180°C e 220°C, verificaram reduções de 40% e 60% nos teores de umidade de equilíbrio devido à diminuição dos sítios de adsorção (região amorfa) e à degradação parcial das hemiceluloses nas madeiras estudadas.

Esses resultados corroboram com as reduções de 26,8% e 29,9% nos teores de umidade de equilíbrio dos lenhos juvenil e adulto de *Hevea brasiliensis* quando modificada termicamente sob 220°C por 2,5 horas, conforme estudo realizado por Severo et al. (2016). Resultados similares foram encontrados por Severo et al. (2012), os quais concluíram que a modificação térmica a 200°C durante um período de 4 horas reduziu significativamente em até 22,9% o teor de umidade de equilíbrio da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. E, por Calonego et al (2014), segundo os quais os lenhos juvenil e adulto de *E. grandis* apresentaram reduções de 13,7% e 21,3% nos teores de umidade de equilíbrio com a modificação térmica a 180°C. Também se assemelham aos encontrados por Esteves et al. (2007), que ao tratarem a madeira de *Eucalyptus globulus*, com temperatura de até 210°C, verificaram melhora no teor de umidade de equilíbrio de até 61,0%.

A diminuição no teor de umidade de equilíbrio da madeira está relacionada com a sua higroscopicidade. Sabe-se que a higroscopicidade da madeira está relacionada com a sua composição química, sendo que as hemiceluloses são os constituintes químicos que mais contribuem com a adsorção de água pelo material (SKAAR, 1972; GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; OLIVEIRA, 1997; SEVERO et al, 2012, 2016) e que durante a elevação na temperatura dos tratamentos térmicos ocorre a reação de despolimerização das hemiceluloses, a degradação da região amorfa da celulose e, conseqüentemente, o aumento da cristalinidade desse polímero com a diminuição dos grupos hidroxilas livres; concomitantemente, ocorrem as reações de condensação e reticulação da lignina com os produtos resultantes da degradação térmica, as quais são responsáveis pela redução da higroscopicidade da madeira. Assim, a redução do teor de umidade de equilíbrio higroscópico é uma propriedade importante da madeira modificada termicamente, pois diminui a retração e o inchamento do material e, conseqüentemente, é responsável pela melhora da sua estabilidade dimensional (STAMM, 1956; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; BHUIYAN et al., 2001; JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; RAPP e SAILER, 2001; SYRJÄNEN, 2001; VERNOS, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; YILGOR et al., 2001; WEILAND e GUYONNET, 2003; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; ALÉN et al., 2002; REPELLIN e GUYONNET, 2005; TJEERDSMA e MILITZ, 2005; BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006; ARNOLD, 2010; BÄCHLE, 2010).

Através dos resultados apresentados e discutidos, constata-se que há uma relação direta entre a redução da higroscopicidade da madeira de *S. parahyba* e o aumento da temperatura do tratamento térmico. A madeira modificada termicamente com 220°C apresenta-se como um produto adequado para o uso em ambientes que apresentam altos teores de umidade relativa.

4.1.2 Efeito da modificação térmica na instabilidade dimensional da madeira de *S. parahyba*

Conforme metodologia citada anteriormente (item 3.4) determinou-se o efeito da modificação térmica sobre a instabilidade dimensional dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

A influência dos tipos de lenho e da modificação térmica na instabilidade dimensional da madeira de *S. parahyba* pode ser constatada nas Tabelas 4 e 5. As variáveis estudadas foram os inchamentos volumétricos, os lineares tangencial, radial e longitudinal máximos e os coeficientes de retratibilidade tangencial, radial e longitudinal dos lenhos juvenil e adulto da espécie estudada.

Os resultados, da madeira sem tratamento de *S. parahyba*, se enquadram com os valores estipulados por Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999), Bao et al. (2001) e Chauhan e Aggarwal (2004) para os quais os inchamentos lineares tangencial, radial e longitudinal das madeiras em geral variam entre 3,5 e 15,0%, entre 1,9 e 11,0% e entre 0,1 e 1,0%, respectivamente.

Tabela 4 – Efeito do tratamento de modificação térmica nos inchamentos volumétricos e lineares e no fator anisotrópico dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

Tratamento		Inchamento Volumétrico Máximo (%)							Redução ou (Aumento) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto				
		CV (%)	Média	Redução (%)	CV (%)	Média	Redução (%)		
Controle	12	15,0	9,67 a	-----	14,0	10,26 a	-----	(6,1) ^{NS}	
180°C	12	3,5	9,07 b	6,2	4,6	9,11 b	11,2	(0,4) ^{NS}	
200°C	12	4,7	7,34 c	24,1	5,6	7,08 c	31,0	3,5 ^{NS}	
220°C	12	3,8	4,44 d	54,1	13,5	4,99 d	51,4	(12,4) ^{NS}	

Tratamento		Inchamento Tangencial Máximo (%)							Redução ou (Aumento) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto				
		CV (%)	Média	Redução (%)	CV (%)	Média	Redução (%)		
Controle	12	18,3	6,63 a	-----	19,4	7,26 a	-----	(9,5) ^{NS}	
180°C	12	8,4	6,05 b	8,8	7,0	6,31 b	13,1	(4,3) ^{NS}	
200°C	12	5,7	5,26 c	20,7	9,7	5,05 c	30,4	4,0 ^{NS}	
220°C	12	8,0	2,97 d	55,2	16,4	3,30 d	54,5	(11,1) ^{NS}	

Tratamento		Inchamento Radial Máximo (%)							Redução ou (Aumento) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto				
		CV (%)	Média	Redução (%)	CV (%)	Média	Redução (%)		
Controle	12	55,5	2,45 a	-----	12,0	2,49 a	-----	(1,6) ^{NS}	
180°C	12	19,9	2,54 a	(3,7)	7,9	2,34 a	6,0	7,9 ^{NS}	
200°C	12	7,2	1,77 b	27,8	10,9	1,82 b	26,9	(2,8) ^{NS}	
220°C	12	12,4	1,30 c	46,9	9,1	1,50 c	39,8	(15,4) ^{NS}	

(continuação Tabela 4)

Tratamento		Inchamento Longitudinal Máximo (%)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Redução ou (Aumento) (%)
		CV (%)	Média	Redução (%)	CV (%)	Média	Redução (%)	
Controle	12	20,2	0,397 a	-----	13,8	0,301 a	-----	24,2 *
180°C	12	33,0	0,309 b	22,2	32,7	0,295 a	2,0	4,5 ^{NS}
200°C	12	27,6	0,199 c	49,9	27,7	0,108 b	64,1	47,5 *
220°C	12	32,7	0,127 d	68,0	33,2	0,125 b	58,5	1,6 ^{NS}

Tratamento		Fator Anisotrópico						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Redução ou (Aumento) (%)
		CV (%)	Média	Redução ou (Aumento) (%)	CV (%)	Média	Redução (%)	
Controle	12	17,3	2,74 a	-----	24,8	2,98 a	-----	(8,8) ^{NS}
180°C	12	22,1	2,48 a	9,5	12,0	2,72 a	8,7	(9,7) ^{NS}
200°C	12	8,8	2,99 a	(9,1)	18,9	2,82 a	5,4	5,7 ^{NS}
220°C	12	19,6	2,34 b	14,6	12,0	2,19 b	26,5	6,4 ^{NS}

sendo: CV - coeficiente de variação; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra e ^{NS} denotam diferença não significativa.

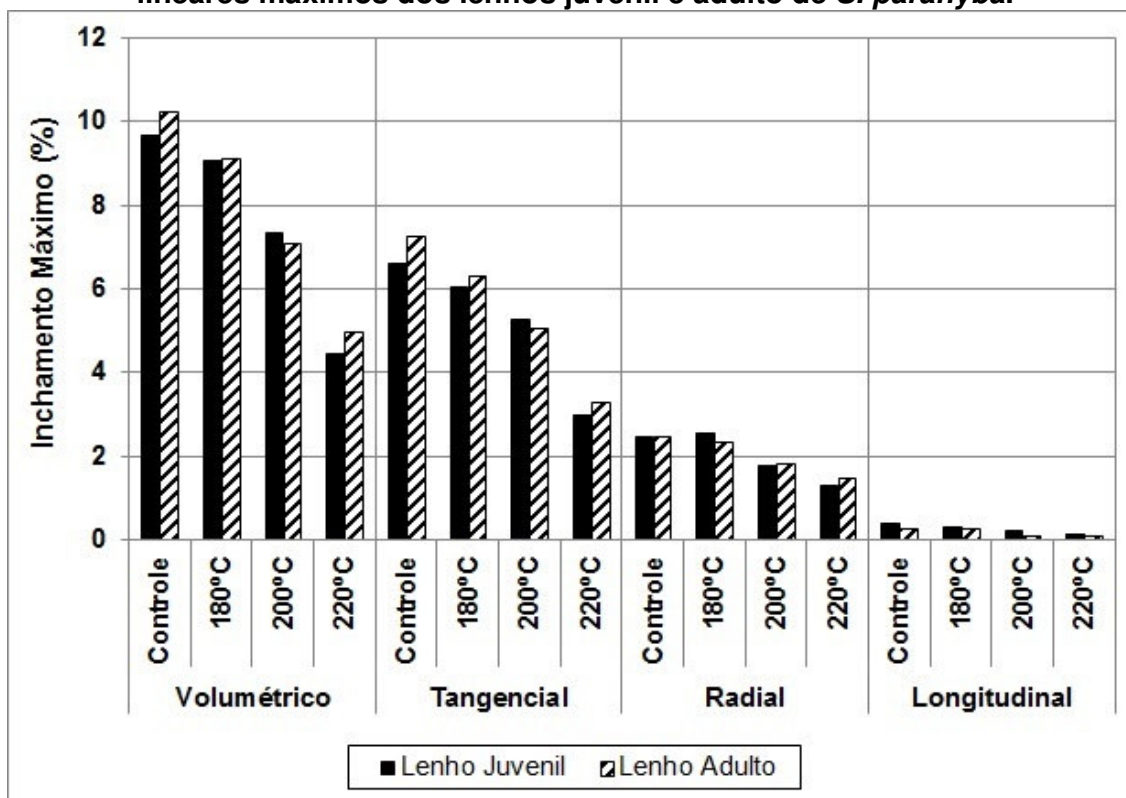
Os valores do presente estudo são coerentes com os encontrados por Melo et al. (2013), que ao caracterizarem a madeira de *S. amazonicum* verificaram que os inchamentos volumétrico, tangencial, radial e longitudinal máximos são 10,55%, 7,24%, 3,17% e 0,42%, respectivamente; e também com os mostrados por Bortoletto Junior e Belini (2002), que no estudo com madeira de *S. parahyba* constataram que os respectivos inchamentos volumétrico, tangencial e radial máximos foram de 10,03%, 8,31% e 1,72%.

Os resultados se enquadraram com os apresentados por Athanásio-Heliodoro (2015) que, ao caracterizar o lenho juvenil dessa espécie, obteve 10,66%, 6,86%, 2,50% e 0,36% de inchamentos volumétrico, tangencial, radial e longitudinal máximos, enquanto que no lenho adulto esses inchamentos foram 12,32%, 7,43%, 2,88% e 0,36%. Salienta-se que o trabalho classificou a madeira dessa espécie como de alta homogeneidade, pois não houve diferença significativa nas propriedades físicas dos diversos tipos de lenho de *S. parahyba*.

Somente o inchamento longitudinal máximo do lenho juvenil dessa espécie foi maior do que o do lenho adulto. Esse resultado corrobora com a explicação dada por vários autores de que essa propriedade física pode ser até 9% maior no lenho juvenil devido ao seu maior ângulo de microfibrilas quando comparado com os do lenho adulto (Zobel e Van Buijtenen, 1989; Bao et al., 2001).

Contudo, quando se verifica o efeito da modificação térmica nos inchamentos da madeira constata-se, pela Tabela 4 e fica evidenciado na Figura 20, que o aumento da temperatura dos tratamentos promove a redução significativa nos inchamentos máximos dos corpos de prova dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

Figura 20 – Efeito da modificação térmica nos inchamentos volumétricos e lineares máximos dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.



Esses resultados são semelhantes com os encontrados por Rapp e Sailer (2001), para as madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* modificada termicamente durante 4 horas a 220°C, com melhora de até 40% na retratibilidade, ou ainda, por Militz e Tjeerdsma (2001) para a madeira de *Pinus sylvestris*, com reduções de 33% e de 44% nos respectivos inchamentos tangencial e radial, quando modificada termicamente a 180°C. Também, se assemelham com os resultados de

Brito (2006), para a madeira de *Eucalyptus grandis* tratada a 200°C, com redução de 25% na sua contração volumétrica máxima e, com os encontrados por Esteves et al. (2007), que ao tratarem o *Eucalyptus globulus* entre 190 e 210°C verificaram redução de até 90,0% nas contrações da madeira.

Também corroboram com as reduções de até 53,3%, 57,0%, 39,7% e 77,4% nos inchamentos volumétricos, tangencial, radial e longitudinal máximos da madeira de *Eucalyptus grandis* quando modificada termicamente sob 220°C por 2,5 horas, conforme estudo realizado por Calonego et al. (2012). Resultados similares foram encontrados por Severo et al. (2012), os quais concluíram que a madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* modificada a 200°C é dimensionalmente mais estável do que as demais, sendo que no lenho juvenil os respectivos inchamentos volumétrico, tangencial, radial e longitudinal máximos apresentaram reduções de 14,8%, 12,6%, 12,1% e 44,0% com o tratamento térmico, enquanto que no lenho adulto as respectivas reduções foram 16,1%, 15,1%, 15,6% e 30,4%. E, por Calonego et al. (2014), segundo os quais os lenhos juvenil e adulto de *E. grandis* apresentaram reduções de 14,7% e 35,6% nos inchamentos volumétricos máximo com a modificação térmica a 180°C.

Os resultados da Tabela 4 mostram que a temperatura de modificação térmica de 220°C diminuiu significativamente o fator anisotrópico (relação T/R) dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*. O fator anisotrópico dos lenhos juvenil e adulto proveniente da madeira não tratada foram 2,74 e 2,98, enquanto que nos respectivos tipos de lenho do material tratado com a maior temperatura foram 2,34 e 2,19. Não houve diferença significativa entre os tipos de lenho e apenas a temperatura de 220°C foi capaz de reduzir essa propriedade física da madeira. Contudo, como os inchamentos apresentam-se diferenciados nos três planos anatômicos da madeira, quando há uma diminuição na relação entre os valores encontrados para a direção tangencial e a radial há uma redução na instabilidade dimensional das madeiras (HAYGREEN e BOWYER, 1996; OLIVEIRA, 1997; BAO et al., 2001; CHAUHAN e AGGARWAL, 2004).

Pela Tabela 5, podem ser verificados os coeficientes de retratibilidade tangencial, radial e longitudinal dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*. O presente estudo mostra que os diversos níveis de modificação térmica não são capazes de modificar os coeficientes de retratibilidade da madeira estudada.

Tabela 5 – Efeito do tratamento de modificação térmica nos coeficientes de retratibilidade dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

Tratamento		Q Tangencial						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
Controle	12	9,0	0,183 a	-----	10,4	0,205 a	-----	(12,1) *
180°C	12	7,8	0,188 a	(2,7)	8,1	0,201 a	2,0	(6,9) *
200°C	12	8,2	0,188 a	(2,7)	8,3	0,186 a	9,3	1,1 *
220°C	12	8,9	0,184 a	(0,6)	10,1	0,193 a	5,9	(4,9) *

Tratamento		Q Radial						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
Controle	12	15,1	0,097 ab	-----	9,2	0,108 ab	-----	(11,4) *
180°C	12	9,9	0,115 b	(18,5)	9,1	0,108 b	0,0	6,1 ^{NS}
200°C	12	7,5	0,103 a	(6,2)	5,4	0,101 a	6,5	1,9 ^{NS}
220°C	12	7,9	0,117 b	(20,6)	9,4	0,123 b	(13,9)	(5,1) ^{NS}

Tratamento		Q Longitudinal						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
Controle	12	11,8	0,022 a	-----	38,2	0,018 a	-----	18,2 ^{NS}
180°C	12	15,4	0,022 a	0,0	22,3	0,020 a	(11,1)	9,1 ^{NS}
200°C	12	18,8	0,019 a	13,6	97,4	0,016 a	11,1	15,8 ^{NS}
220°C	12	25,8	0,016 a	27,3	98,0	0,023 a	(27,8)	(43,8) ^{NS}

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra e ^{NS} denotam diferença não significativa.

A não variação dessas propriedades com o incremento da temperatura do tratamento pode ser explicada. O coeficiente de retratibilidade dimensional da madeira é a relação entre o inchamento linear dimensional, desde a condição seca até a climatizada a 21°C e 65% de umidade relativa, e o seu respectivo teor de umidade de equilíbrio (TUE). A modificação térmica da madeira diminui o seu TUE e melhora a sua estabilidade dimensional; entretanto, para que os coeficientes de retratibilidade sejam reduzidos com o aumento da temperatura, a redução do

inchamento da madeira, até a condição climatizada, deve ser superior à redução do seu TUE. Como as reduções dos inchamentos lineares tangencial, radial e longitudinal, desde a condição seca até o TUE, com os tratamentos térmicos foram semelhantes com as reduções nos respectivos TUE, os coeficiente de retratibilidade não mudaram com o tratamento térmico. Assim, constata-se que os coeficientes de retratibilidade não são bons parâmetros para avaliar a melhora na instabilidade dimensional da madeira modificada termicamente de *S. parahyba*.

Entretanto, sobre o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* conclui-se, através dos resultados apresentados e discutidos anteriormente, que o aumento da temperatura do tratamento térmico melhora a estabilidade dimensional da madeira estudada. Salienta-se que os resultados são coerentes com aqueles encontrados na modificação térmica realizada por Homan et al. (2000), Bhuiyan et al. (2001), Jämsä e Viitaniemi (2001), Militz e Tjeerdsma (2001), Rapp e Sailer (2001), Syrjänen (2001), Vernois (2001), Waskett e Selmes (2001), Alén (2002), Bekhta e Niemz (2003), Juodeikienė e Minelga (2003), Weiland e Guyonnet (2003), Rousset et al. (2004), Wikberg e Maunu (2004) e Metsä-Kortelainen et al. (2005), Arnold (2010), Bächle et al. (2010), Calonego et al. (2012, 2014) e Severo et al. (2012, 2016) para as madeiras de outras espécies de coníferas e folhosas.

Essa melhora pode ser explicada por Stamm (1956), Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999), Homan et al. (2000), Waskett e Selmes (2001) e Mburu et al. (2007, 2008) ao afirmarem que o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação das hemiceluloses, além de promover a máxima cristalização da celulose (BHUIYAN et al., 2001; JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001; WIKBERG e MAUNU, 2004; ARNOLD, 2010) devido à destruição dos grupos hidroxilas livres na região amorfa da celulose e a reticulação dos polímeros que compõem a madeira durante o seu tratamento (WEILAND e GUYONNET, 2003; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; ESTEVES e PEREIRA, 2009), modificando o seu caráter hidrofílico (HAKKOU et al., 2005a, 2005b).

Assim, constata-se que o aumento de 180°C para 220°C na temperatura de modificação térmica proporciona aumento na estabilidade dimensional da madeira de *S. parahyba*. Porém, a escolha do nível de tratamento a ser empregado na madeira também deve ser realizada em função do ambiente de uso, da resistência aos organismos xilófagos e da variação colorimétrica comercialmente aceita.

4.1.3 Efeito da modificação térmica nas propriedades químicas da madeira de *S. parahyba*

Conforme a metodologia citada no item 3.5, análises químicas padrão foram realizadas para avaliar o efeito da modificação térmica nos teores de extrativos totais, de lignina insolúvel e de holocelulose da madeira de *S. parahyba*. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Efeito do tratamento de modificação térmica na composição química padrão dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

Tratamento		N		Teor de Extrativos Totais								
				Lenho Juvenil				Lenho Adulto				Red. ou (Aum.) (%)
				CV (%)	Média	(Aum.) (%)		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)		
Controle	4	24,8	1,78 a	-----		37,4	3,25 a	-----		(82,6) ^{NS}		
180°C	4	29,2	2,79 ab	(56,7)		41,8	3,66 ab	(12,6)		(31,2) ^{NS}		
200°C	4	12,3	3,61 b	(102,8)		24,1	4,24 b	(30,5)		(17,5) ^{NS}		
220°C	4	5,9	6,88 c	(286,5)		20,0	5,06 c	(55,7)		26,5 ^{NS}		

Tratamento		N		Teor de Lignina Klason								
				Lenho Juvenil				Lenho Adulto				Red. ou (Aum.) (%)
				CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)		
Controle	4	3,0	25,32 a	-----		5,3	22,58 a	-----		10,8 *		
180°C	4	3,5	24,47 a	3,4		10,9	21,97 a	2,7		10,2 *		
200°C	4	2,9	24,45 a	3,4		3,9	23,93 a	(6,0)		2,1 *		
220°C	4	3,6	31,21 b	(23,3)		6,9	32,00 b	(41,7)		(2,5) *		

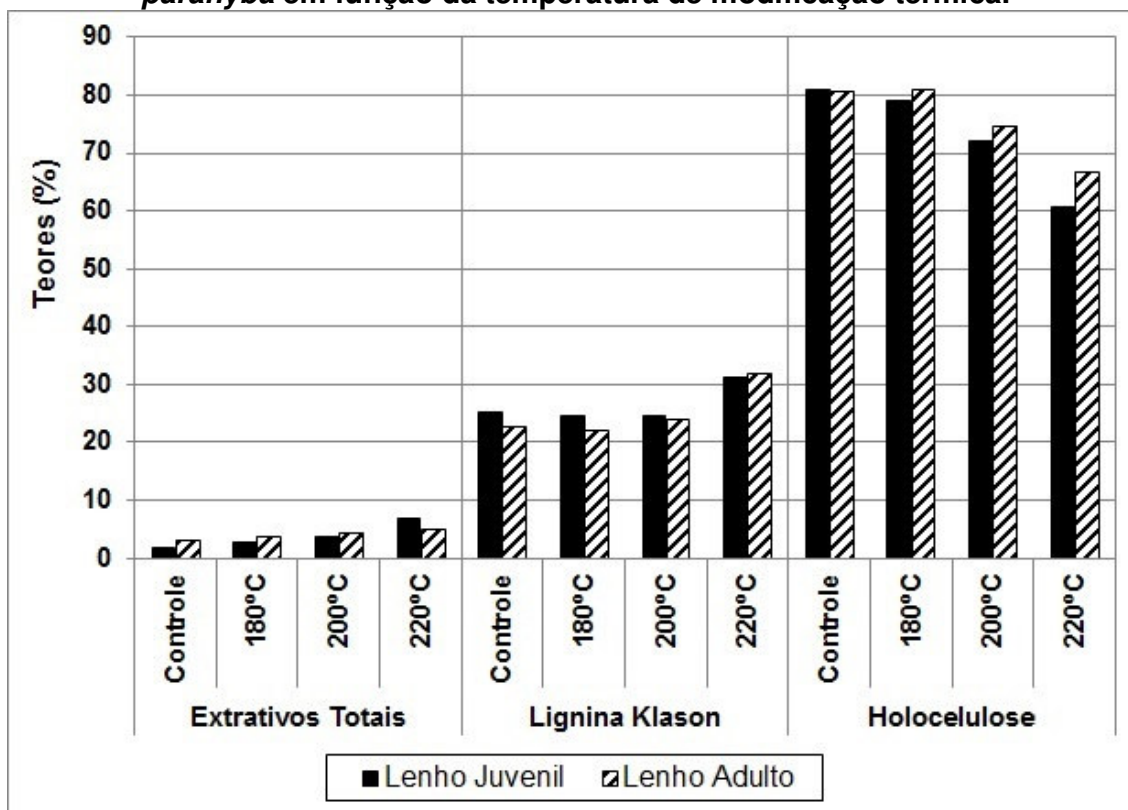
Tratamento		N		Teor de Holocelulose								
				Lenho Juvenil				Lenho Adulto				Red. ou (Aum.) (%)
				CV (%)	Média	Red. (%)		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)		
Controle	4	2,2	80,81 a	-----		3,2	80,59 a	-----		0,3 *		
180°C	4	1,4	78,95 a	2,3		2,1	80,95 a	(0,5)		(2,5) *		
200°C	4	5,7	72,00 b	10,9		4,1	74,62 b	7,4		(3,6) *		
220°C	4	4,5	60,63 c	25,0		4,9	66,63 c	17,3		(9,9) *		

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra na coluna e ^{NS} na linha denotam diferença não significativa.

Verifica-se que os teores de extrativos totais, de lignina insolúvel e de holocelulose dos lenhos juvenil e adulto da madeira controle de *S. parahyba* apresentaram valores médios que se enquadram com os encontrados por Foelkel (1977), Lepage (1986a), Fengel e Wegener (1989) e Haygreen e Bowyer (1996) para as madeiras de folhosas em geral. Resultados semelhantes foram encontrados por Trianoski (2010) que ao caracterizar a madeira de *S. parahyba* quanto aos teores de extrativos totais, de lignina Klason e de holocelulose obtiveram valores de 8,65%, 21,01% e 69,39%, respectivamente.

O efeito dos vários níveis de tratamentos térmicos sobre a composição química padrão da madeira de *S. parahyba* foi mostrado na Tabela 6 e pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21 – Composição química padrão dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* em função da temperatura de modificação térmica.



O aumento da temperatura de modificação térmica de 180°C para 220°C promoveu incrementos significativos de 56,7% a 286,5% nos teores de extrativos totais do lenho juvenil de *S. parahyba*, enquanto que no lenho adulto houve aumento de 12,6% a 55,7% com o tratamento térmico. Os lenhos juvenil e adulto do material

tratado com a maior temperatura empregada no estudo (220°C) apresentaram aumentos significativos de 23,3% e 41,7% nos seus respectivos teores de lignina. Os teores de holocelulose dos lenhos juvenil e adulto apresentaram reduções significativas de 10,9% e 7,4%, com o tratamento a 200°C; e foram respectivamente reduzidas em 25,0% e 17,3% quando a madeira foi modificada termicamente com temperatura de 220°C. Salienta-se que, se a influência do tratamento térmico nas reduções dos teores de holocelulose for considerada com base na madeira controle, ela será mais pronunciada, devido aos rendimentos da madeira modificada termicamente com base na madeira controle.

Esses resultados são semelhantes aos apresentados por Kamdem et al. (2002), que verificaram um incremento no teor de lignina de 26 para 28%, de 20,5 para 26,6% e de 25,3 para 29,9% nas respectivas madeiras de *Pinus pinaster*, *Fagus sylvatica* e *Picea abies* modificadas termicamente a 200°C. Os resultados corroboram com aqueles apresentados por Reppelin e Guyonet (2005) ao mostrarem que a madeira de *Fagus sylvatica* tratada à 220°C por 180 minutos apresentava teor de lignina de 29,7%, enquanto que a madeira sem tratamento térmico tinha 24,3%. Assemelham-se com a informação de Yilgor et al. (2001), de que o tratamento térmico gera um incremento proporcional de 22,97% para 23,90% no teor de lignina da madeira de *Fagus orientalis*, e com Brito et al. (2008), de que a tratamento a 180°C ocasiona um incremento de até 25,8% e 32,5% nos respectivos teores da lignina de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus saligna*.

Resultados similares foram encontrados por Mburu et al. (2007) que ao caracterizarem quimicamente a madeira sem tratamento de *Grevillea robusta* e as modificadas termicamente a 250°C por 15 h, concluíram que houve um aumento proporcional no teor de lignina de 24,17% para 47,86%, devido à degradação térmica das hemiceluloses. Também corroboram com os mostrados por Severo et al. (2016), que ao tratarem a madeira de *Hevea brasiliensis* com temperatura de 220°C, durante 2,5 horas, observaram que houve um aumento proporcional de até 21,8% nos teores da lignina dos lenhos juvenil e adulto e que os respectivos teores de extrativos totais foram aumentados em 98,7% e 63,8%.

O aumento dos teores de extrativos totais também foi encontrado por Hakkou et al. (2005a) que ao estudaram a madeira de *Fagus sylvatica* observaram um aumento desses compostos em madeiras tratadas a 200°C e, por Brito et al. (2008) que ao modificarem a madeira de *Eucalyptus saligna* com temperatura de 180°C verificaram

um aumento de 110,4% no teor desses compostos químicos, devido à degradação das hemiceluloses em compostos monoméricos.

A influência da modificação térmica de *S. parahyba* mostra que o incremento da temperatura do tratamento altera os teores dos compostos químicos da madeira estudada. Durante o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocorre a degradação da holocelulose e o incremento proporcional dos extrativos totais e da lignina. Essas reações foram apresentadas no capítulo 2.8 do presente estudo.

4.2 Efeito da modificação térmica na caracterização colorimétrica da madeira de *S. parahyba*

Conforme metodologia citada no item 3.6, determinou-se o efeito da modificação térmica nos parâmetros colorimétricos dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*, no espaço de cores CIE L*a*b*. Os resultados estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Efeito do tratamento de modificação térmica nos parâmetros colorimétricos CIE L*a*b* dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.

Tratamento	N	Brilho (L*)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (ΔL^*)
		CV (%)	Média	Red. (ΔL^*)	CV (%)	Média	Red. (ΔL^*)	
Controle	4	2,4	80,41 a	-----	4,1	80,85 a	-----	(0,44) ^{NS}
180°C	4	0,4	74,44 b	5,97	1,7	75,65 b	5,20	(1,21) ^{NS}
200°C	4	2,2	66,27 c	14,14	3,2	64,72 c	16,13	1,55 ^{NS}
220°C	4	4,2	39,91 d	40,50	11,5	36,95 d	43,90	2,96 ^{NS}

Tratamento	N	Coordenada verde-vermelho (a*)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (Δa^*)
		CV (%)	Média	(Aum.) (Δa^*)	CV (%)	Média	(Aum.) (Δa^*)	
Controle	4	16,7	5,68 a	-----	16,2	4,46 a	-----	1,22 ^{NS}
180°C	4	6,6	7,05 b	(1,37)	7,9	6,38 b	(1,92)	0,67 ^{NS}
200°C	4	2,6	9,20 c	(3,52)	5,7	9,27 c	(4,81)	(0,07) ^{NS}
220°C	4	3,9	10,09 c	(4,41)	16,3	9,26 c	(4,80)	0,83 ^{NS}

(continuação Tabela 7)

		Coordenada azul-amarelo (b*)						
Tratamento	N	Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (Δb^*)
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (Δb^*)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (Δb^*)	
Controle	4	2,0	19,06 a	-----	2,0	20,07 a	-----	(1,01) *
180°C	4	1,3	21,52 b	(2,46)	3,3	23,73 b	(3,66)	(2,21) *
200°C	4	2,1	26,53 c	(7,47)	1,5	27,02 c	(6,95)	(0,49) *
220°C	4	6,4	18,83 a	0,23	25,2	16,49 a	3,58	2,34 *

		Cor (E*)						
Tratamento	N	Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (ΔE^*)
		CV (%)	Média	Red. (ΔE^*)	CV (%)	Média	Red. (ΔE^*)	
Controle	4	2,1	82,84 a	-----	3,7	83,43 a	-----	(0,59) ^{NS}
180°C	4	0,4	77,81 b	5,03	1,2	79,55 b	3,88	(1,74) ^{NS}
200°C	4	1,8	71,98 c	10,86	2,5	70,75 c	12,68	1,23 ^{NS}
220°C	4	4,6	45,27 d	37,57	13,8	41,55 d	41,88	3,82 ^{NS}

		Tonalidade (h°)						
Tratamento	N	Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (Δh°)
		CV (%)	Média	Red. (Δh°)	CV (%)	Média	Red. (Δh°)	
Controle	4	3,3	73,46 a	-----	2,3	75,50 a	-----	(2,04) *
180°C	4	1,9	71,85 a	1,61	0,9	74,96 a	0,54	(3,11) *
200°C	4	0,7	70,84 a	2,62	1,3	71,08 b	4,42	(0,24) ^{NS}
220°C	4	1,1	61,76 b	11,70	3,8	60,31 c	15,19	1,45 ^{NS}

		Saturação (C*)						
Tratamento	N	Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (ΔC^*)
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (ΔC^*)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (ΔC^*)	
Controle	4	2,9	19,90 a	-----	2,5	20,57 a	-----	(0,67) ^{NS}
180°C	4	0,7	22,65 b	(2,75)	3,6	24,57 b	(4,00)	(1,92) ^{NS}
200°C	4	2,0	28,08 c	(8,18)	1,7	28,56 c	(7,99)	(0,48) ^{NS}
220°C	4	5,9	21,36 a	(1,46)	23,1	18,92 a	1,65	2,44 ^{NS}

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra na coluna e ^{NS} na linha denotam diferença não significativa.

Verifica-se que o lenho juvenil, da madeira controle de *S. parahyba*, apresenta valores do brilho (L*) de 80,41 (madeira de cor branca), dos parâmetros a* e b* de

5,68 e 19,06, da saturação de cor (C^*) de 19,90 e da tonalidade (h°) na ordem de $73,46^\circ$ (madeira correspondente ao amarelo) e, que aos respectivos valores no lenho adulto foram 80,85, 4,46, 20,07, 20,57 e $75,46^\circ$. Todos os parâmetros colorimétricos dos dois tipos de lenho foram iguais estatisticamente, com exceção dos parâmetros b^* e h° , os quais foram superiores no lenho adulto, indicando que esse tipo de lenho é ligeiramente mais amarelo que o juvenil.

Esses resultados se enquadram com os valores encontrados por Camargos e Gonzalez (2001), que ao estudarem as cores das madeiras de 350 espécies tropicais brasileiras concluíram que as tonalidades (h°) de todas as cores dessas madeiras se enquadraram entre 0° e 90° (primeiro quadrante) e, portanto, variaram entre o vermelho e o amarelo. Os parâmetros colorimétricos da madeira de *S. parahyba* são coerentes com a classificação visual feita por Trianoski (2010), que a caracterizou como de cor branco palha com nuances amareladas e por Athanázio-Heliodoro (2015), que a caracterizou como uma madeira branco-amarelada.

Salienta-se que os valores apresentados no presente estudo são coerentes com os encontrados por Melo et al. (2013), que ao caracterizarem a madeira de *S. amazonicum* verificaram que o brilho (L^*), os parâmetros a^* e b^* , a saturação (C^*) e tonalidade (h°) foram 87,51, -0,30, 27,56, 27,57 e $90,68^\circ$. Os autores classificaram a madeira dessa espécie como branco-acinzentada devido a sua alta claridade (L^*) e com presença marcante o pigmento amarelo, devido ao alto valor de b^* e h° próximo a 90° .

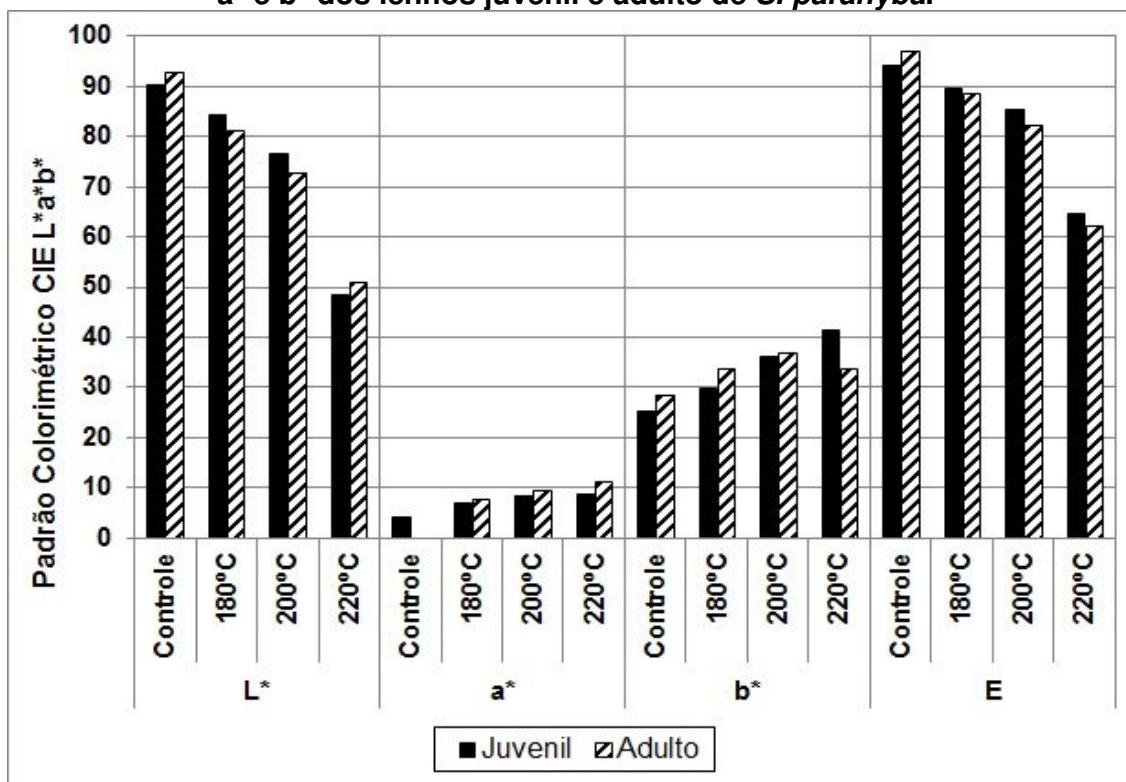
Contudo, quando se verifica o efeito da modificação térmica na variação colorimétrica da madeira de *S. parahyba* constata-se, pela Tabela 7 e fica evidenciado na Figura 22, que o incremento da temperatura tem relação direta com o seu escurecimento (ΔL^* de até -43,90) e avermelhamento (Δa^* de até +4,81). O aumento da saturação de cor ocorreu até tratamentos com 200°C (ΔC^* de até +8,18) e, conforme a madeira foi tratada com temperaturas de 220°C essa variável colorimétrica voltou ao nível original (ΔC^* de +1,65). A tonalidade (h°) da madeira continua no quadrante vermelho-amarelo mesmo com os tratamentos de modificação térmica.

Ficou evidenciado que os diversos níveis de tratamento térmico influenciaram de modo similar tanto as cores do lenho juvenil quanto do adulto da madeira de *S.*

parahyba, pois as variações colorimétricas foram iguais estatisticamente em ambos os lenhos.

Esses resultados são coerentes com os encontrados por Sundqvist e Morén (2002), que ao modificarem termicamente a madeira de *Betula pubescens* concluíram que a intensidade das condições do tratamento térmico tem relação direta com a mudança na cor, sendo que as madeiras escurecem e avermelham. Resultados semelhantes foram encontrados por Charrier et al. (2002), os quais trataram termicamente a madeira de *Juglans* sp. com 95°C por 51 horas e encontraram variações de -19,0 no brilho (ΔL^*). Também se assemelham com os encontrados por Mitsui et al. (2004), que ao tratarem termicamente a madeira de *Cryptomeria japonica* a 90°C por 100 h verificaram reduções no brilho (ΔL^*) de -35.

Figura 22 – Efeito da modificação térmica nos padrões colorimétricos CIE L^* , a^* e b^* dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.



Esses resultados corroboram com os mostrados por Johansson e Morén (2006), que ao modificarem termicamente a madeira de *Betula pendula*, com temperatura de 200°C por 3 h, concluíram que houve escurecimento da madeira ($\Delta L^* = -37,1$) e

mudança nos parâmetros cromáticos a^* e b^* na ordem de +5,9 e +2,8, respectivamente.

Resultados similares foram encontrados por Bekhta e Niemz (2003), segundo os quais a madeira de *Picea abies* apresentou brilho (L^*) igual a 96,0, enquanto que o material modificado termicamente a 150°C e 200°C teve o seu brilho em torno de 83,0 e 41,0. A madeira sem tratamento e as tratadas nas condições discriminadas apresentaram respectivos parâmetros cromático a^* de 0,0, +2,5 e +7,0 e o b^* de +2,0, +14,0 e +1,1, demonstrando que a madeira tratada a 150°C ficou mais amarelada e tratada com 200°C ficou mais azulada que a original.

As variações cromáticas são explicadas por Mitsui et al. (2004) quando afirmam que o escurecimento da madeira modificada termicamente, com altas temperaturas, não possui correlação com os teores de lignina e apresenta relação direta com a degradação das hemiceluloses. Assim, essas mudanças corroboram com as variações químicas apresentadas pela madeira modificada termicamente, conforme foi apresentado no item 2.8 e demonstraram vários autores, dentre os quais Stamm (1956), Bhuiyan et al. (2000), Militz e Tjeerdsma (2001), Waskett e Selmes (2001), Tjeerdsma e Militz (2005), Sundqvist et al. (2006), Brito et al. (2006, 2008), Mburu et al. (2007, 2008), Korošec et al. (2009), Arnold (2010), Bächle et al., (2010), Severo et al. (2013, 2016).

Através dos resultados apresentados e discutidos, constata-se que o aumento gradativo de 180°C para 220°C na temperatura de modificação térmica proporciona variações colorimétricas da madeira de *S. parahyba*. Assim, a escolha do nível de tratamento a ser empregado na madeira pode ser realizada em função da importância do seu aspecto e sua aparência, uma vez que, segundo Camargos e Gonzalez (2001) e Gonzalez et al. (2001) o preço da madeira pode variar em até cinco vezes em função da cor.

4.3 Efeito da modificação térmica na resistência a fungos deterioradores da madeira de *S. parahyba*

Conforme metodologia citada anteriormente (item 3.7), as resistências dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* à deterioração provocada pelos fungos de

podridão parda *G. trabeum* e de podridão branca *P. sanguineus* foram determinadas após 12 semanas em testes acelerados de laboratório, do tipo “soil-block”.

Verifica-se, na Tabela 8, que as respectivas perdas de massas dos lenhos juvenil e adulto, da madeira sem tratamento de *S. parahyba*, apresentaram-se na ordem de 46,8% e 53,5%, após o ensaio com o fungo *G. trabeum*. Quando os mesmos tipos de lenho foram submetidos ao fungo *P. sanguineus* apresentaram perda de massa de 29,3% e de 37,1%, conforme pode ser visualizado na Tabela 9.

Tabela 8 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao fungo deteriorador *G. trabeum*.

Tratamento	N	Perda de massa (%)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	12	7,3	46,8 a	-----	8,4	53,5 a	-----	(14,3) *
180°C	12	9,3	43,1 b	7,9	17,5	45,4 b	15,1	(5,3) *
200°C	12	12,9	40,8 b	12,8	17,7	41,2 b	23,0	(1,0) *
220°C	12	23,7	4,4 c	90,6	76,4	9,9 c	81,5	(125,0) *

Tratamento	N	Teor de umidade após o ensaio (%)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	12	10,5	550,0 a	-----	18,9	566,8 a	-----	(3,0) ^{NS}
180°C	12	9,8	497,3 b	9,6	12,0	483,1 b	14,8	2,9 ^{NS}
200°C	12	11,4	485,1 b	11,8	14,2	505,1 b	10,9	(4,1) ^{NS}
220°C	12	20,8	284,4 c	48,3	11,8	352,2 c	37,8	(23,9) ^{NS}

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra na coluna e ^{NS} na linha denotam diferença não significativa.

Com base nos resultados apresentados no ensaio com o fungo de podridão branca *P. sanguineus*, podemos classificar a madeira de *S. parahyba*, segundo a norma ASTM D-2017 (2005), como de resistência moderada, pois apresenta perda de massa entre 25% e 44%. Contudo, após verificarmos os resultados do ensaio com o fungo de podridão parda *G. trabeum*, a madeira pode ser classificada pela referida norma técnica como não resistente ou ligeiramente resistente, pois sua perda de massa é maior que 45%.

Tais variações são explicadas por Oliveira et al. (1986) e Paes et al. (2004), ao comentarem que as madeiras por ser um material de durabilidade natural relativa podem apresentar, com frequência, diferenças nas suas resistências quanto aos fungos deterioradores, e pela norma ASTM D-2017 (2005) ao reportar que a mesma espécie de madeira não ocupa necessariamente uma mesma posição de resistência à deterioração, devido às diferentes espécies de fungos existentes.

Tabela 9 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao fungo deteriorador *P. sanguineus*.

Tratamento		Perda de massa (%)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	12	15,5	29,3 a	-----	20,6	37,1 a	-----	(26,5) *
180°C	12	17,0	31,9 a	(8,7)	15,7	34,5 ab	7,0	(8,2) ^{NS}
200°C	12	17,2	32,6 a	(11,3)	20,5	28,7 b	22,6	11,9 ^{NS}
220°C	12	56,2	5,1 b	82,7	72,0	9,9 c	73,3	(95,5) *

Tratamento		Teor de umidade após o ensaio (%)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	12	14,9	501,0 a	-----	24,4	553,7 a	-----	(10,5) ^{NS}
180°C	12	16,4	477,9 a	4,7	8,5	470,7 a	15,0	1,5 ^{NS}
200°C	12	13,4	489,8 a	2,2	14,1	481,5 a	13,0	1,7 ^{NS}
220°C	12	19,9	314,8 b	37,2	17,8	344,5 b	37,8	(9,5) ^{NS}

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra na coluna e ^{NS} na linha denotam diferença não significativa.

A resistência da madeira de *S. parahyba* ao fungo de podridão parda *G. trabeum* foi menor do que ao fungo de podridão branca *P. sanguineus*. Estas variações eram esperadas, pois, de acordo com Dutton et al. (1993), o fungo de podridão parda secreta grande quantidade de ácido oxálico (H₂C₂O₂) no meio de cultura o que reduz o pH do substrato durante o seu crescimento, e a quantidade de oxalato produzida pelos fungos de podridão branca não são suficientes para reduzir o pH do meio.

Vários autores, dentre os quais: Goodell et al. (1997), Xu e Goodell (2001), Arantes e Milagres (2009), Watanabe et al. (2010), Aguiar e Ferraz (2011) mostraram que o fungo *G. trabeum* produz peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e ácido oxálico, que reagem com os íons de ferro presentes em materiais lignocelulósicos por reação de Fenton, o que ocasiona a clivagem das moléculas da cadeia de celulose em pequenos fragmentos. Assim, há um aumento da porosidade da parede celular permitindo a penetração das enzimas celulolíticas que aumentam a deterioração causada pelo fungo de podridão parda na madeira.

Estas explicações estão de acordo com Alves et al. (2006) e Calonego et al. (2013), os quais avaliaram, respectivamente, a resistência natural de várias madeiras tropicais e de *E. grandis* aos fungos de podridão parda *G. trabeum* e de podridão branca *P. sanguineus* e concluíram que as deteriorações causadas pelo fungo de podridão parda foram maiores.

Verifica-se, nas Tabelas 8 e 9, que as perdas de massa provocadas pelos fungos de podridão parda *G. trabeum* e de podridão branca *P. sanguineus* no lenho juvenil da madeira controle de *S. parahyba* apresentaram valores significativamente inferiores aos encontrados para o lenho adulto.

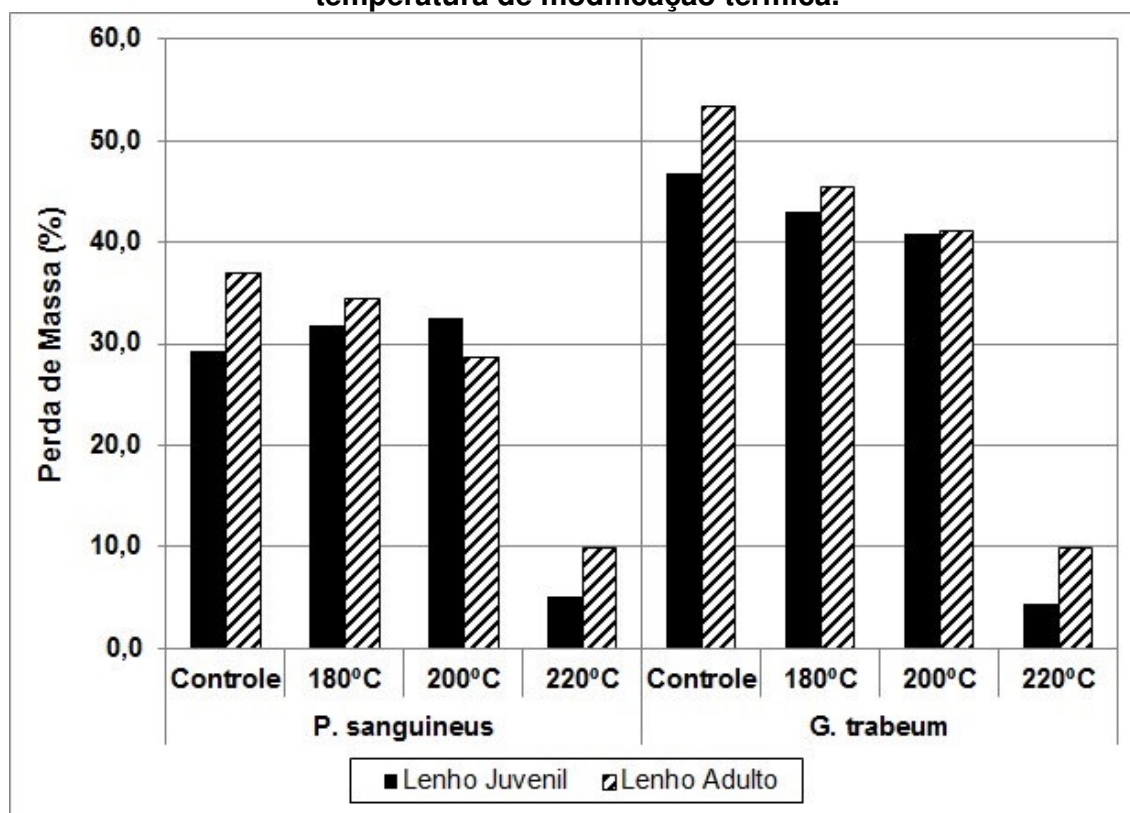
Resultados semelhantes foram encontrados por Severo et al. (2016) que submeteram a madeira de *Hevea brasiliensis* nas mesmas condições do presente estudo e concluíram que o lenho adulto foi significativamente mais susceptível à degradação do que o lenho juvenil, tanto mediante o fungo de podridão parda *G. trabeum* quanto ao de podridão branca *P. sanguineus*.

Essa variação significativa entre as resistências naturais do lenho juvenil e do adulto aos fungos xilófagos é coerente com as afirmações dadas por Guilley et al. (2004) de que em geral há uma variação de 10,5% na resistência da madeira no sentido da medula à casca. Segundo esses autores e Oliveira et al. (1986), Haupt et al. (2003), Paes (2004) e Latorraca et al. (2011) essa diferença é atribuída a não distribuição homogênea dos extrativos pelo fuste, sendo que a sua maior concentração e, conseqüentemente, a maior resistência natural ocorre nos lenhos do cerne. Os corpos de prova do lenho juvenil de *S. parahyba* correspondem à região do cerne, pois a madeira juvenil ocorre na região central da árvore e apresenta a forma de um cilindro (ZOBEL e VAN BUIJTENEN 1989; BAO et al. 2001; CALONEGO et al. 2005; FERREIRA et al. 2011; LOBÃO et al. 2012; ATHANÁSIO-HELIODORO, 2015), enquanto que os do lenho adulto são da região

de transição cerne-alburno ou do alburno, pois foram retirados a 20 mm da periferia do fuste e a espessura do alburno dessa espécie varia de 16 mm a 67,5 mm (ATHANÁSIO-HELIDORO, 2015).

No entanto, o efeito dos vários níveis de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* aos fungos de podridão parda e branca foi mostrado nas Tabelas 8 e 9, e podem ser melhores visualizados na Figura 23.

Figura 23 – Perda de massa dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* mediante aos fungos deterioradores *P. sanguineus* e *G. trabeum*, em função da temperatura de modificação térmica.



O presente estudo mostra que os respectivos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*, quando modificados termicamente com temperaturas de 180°C a 220°C, apresentaram reduções crescentes e estatisticamente significativas de 7,9% a 90,6% e de 15,1% a 81,5% nas perdas de massa causada pelo *G. trabeum*. Somente a temperatura de 220°C foi suficiente para reduzir significativamente (82,7%) a perda de massa causada pelo *P. sanguineus* no lenho juvenil da espécie estudada. Já, o lenho adulto apresentou redução significativa de 7,0% a 73,3%, na referida propriedade, quando submetido a 200°C e 220°C.

Houve uma redução da perda de massa no material tratado com as maiores temperaturas, pois a maior resistência ao apodrecimento da madeira ocorreu a 220°C. Os resultados encontrados são coerentes com as afirmações dadas por Homan et al. (2000), Waskett e Selmes (2001), Alén et al. (2002), Rousset et al. (2004), Metsä-Kortelainen et al. (2005) e Shi et al. (2007) de que os tratamentos térmicos têm como um dos objetivos aumentar a resistência biológica da madeira de coníferas e folhosas perante aos agentes xilófagos.

Esses resultados se assemelham ao encontrado por Militz e Tjeerdsma (2001) que ao modificarem termicamente as madeiras de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* e *Picea abies* com 220°C, obtiveram perda de massa inferior a 4% mediante aos fungos *Coriolus versicolor* e *Coniophora puteana*. Corroboram, também, com os encontrados por Weiland e Guyonnet (2003), que ao exporem as madeiras de *Fagus sylvatica* sem tratamento e as tratadas termicamente com 230-260°C ao fungo *Poria placenta* encontraram perda de massa de 22,92% e 5,94%, respectivamente. Também se assemelham com os encontrados por Rapp e Sailer (2001), no qual a madeira controle de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* depois de expostas ao fungo *Coniophora puteana* apresentaram perda de massa de 48,0% e 40,0%, respectivamente, e de 11,0% e 5,5% quando modificadas termicamente com 180-220°C.

Resultados similares foram encontrados por Shi et al. (2007), que ao modificarem termicamente as madeiras de *Populus tremuloides*, de *Liriodendron tulipifera*, de *Pinus banksiana* e de *Pinus sylvestris* a 210°C, durante 15 minutos, verificaram reduções nas perdas de massa causadas pelo fungo *G. trabeum* na ordem de 44,1%, 74,0%, 85,3% e 25,2%. Também se assemelham com os encontrados por Calonego et al. (2010), ao mostrarem que o aumento de 180°C para 220°C na temperatura de modificação térmica proporcionou reduções de 15,7% a 82,4% na perda de massa da madeira de *E. grandis* incubada com *P. sanguineus*; e, também por Calonego et al. (2013), segundo os quais os referidos tratamentos térmicos foram responsáveis por reduções de 28,2% a 70,0% na perda de massa da madeira de *E. grandis* incubada com *G. trabeum*.

Os resultados encontrados para a madeira do presente estudo se assemelham com os encontrados por Severo et al. (2016), que ao tratarem termicamente a madeira de *Hevea brasiliensis* concluíram que os respectivos lenhos juvenil e adulto apresentaram reduções de até 68,5% e 58,8% nas perdas de massa causada pelo

G. trabeum e, de 36,4% e 12,1% nas perdas de massa causada pelo *P. sanguineus*, quando o material foi modificado termicamente com até 220°C.

Foi mostrado, nas Tabelas 8 e 9, que a redução da perda de massa ocasionada pelos fungos xilófagos na madeira modificada termicamente pôde alcançar até 90,6%, em relação à madeira controle. Vários autores, dentre eles Oliveira et al. (1986), Vernois (2001), Weiland e Guyonnet (2003), Mburu et al. (2007), Oliver-Villanueva et al. (2013) e Severo et al. (2016) explicaram que a modificação térmica altera a composição química da madeira e promove a indisponibilidade de alimentos (hemiceluloses) aos fungos, reduz o teor de umidade de equilíbrio, promove a criação de novas moléculas livres as quais atuam como fungicidas, além de reticular a rede de lignina dificultando o reconhecimento do substrato pelo fungo.

Constata-se, também pelas Tabelas 8 e 9, que os corpos de prova dos dois tipos de lenhos e de todos os tratamentos apresentaram teores de umidade elevados após o período de incubação com ambos os fungos deterioradores. Assim, como salientado por Hakkou et al. (2006), Calonego et al. (2010) e Severo et al. (2012, 2016) isso mostra que o aumento da durabilidade da madeira modificada termicamente pode ser explicado pela degradação das hemiceluloses e a reticulação das ligações da lignina e não por falta de umidade.

As alterações nas propriedades químicas provocadas pelas modificações térmicas da madeira de *S. parahyba*, conforme foi discutido no item 4.1.3, mostra que a melhora da resistência natural das madeiras modificadas termicamente quando expostas aos seus fungos deterioradores pode estar relacionada com a redução significativa nos teores de holocelulose da madeira tratada, a 200°C e principalmente a 220°C. Assim, constata-se que a madeira de *S. parahyba* tratada termicamente com 220°C apresenta-se como um produto adequado para o uso em ambientes que apresentam condições ótimas para o desenvolvimento de fungos.

4.4 Efeito da modificação térmica na resistência da madeira de *S. parahyba* ao cupim *C. brevis*

Conforme metodologia citada anteriormente (item 3.8), as resistências dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* à deterioração provocada pelos cupins de madeira seca *C. brevis* foram determinadas após 45 dias em teste de laboratório.

Conforme pode ser constatado, na Tabela 10, as perdas de massas ocasionadas pelo inseto xilófago não variaram significativamente entre os lenhos juvenil e adulto e apresentaram-se na ordem de 2,8% e 2,9%. As perdas de massa apresentadas pela madeira estudada podem parecer pequenas em função da capacidade de degradação dos cupins de madeira seca, contudo, salienta-se que embora cada par de corpos de prova tenha uma superfície de 32,2 cm², a área de ataque foi restringida para 11,4 cm² devido à colocação de uma manga de PVC de 1½” sobre o material a ser testado.

Além disso, em estudo realizado por Paes et al. (2015), verifica-se que as perdas de massa provocadas pelos cupins, durante os ensaios realizados pela norma IPT-1157 (1980), apresentam correlações com as notas de desgaste. Assim, tanto a perda de massa quanto a nota de desgaste representam os danos causados nas amostras de madeira.

Tabela 10 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao cupim de madeira seca *C. brevis*.

Tratamento	N	Perda de Massa (%)						Red. ou (Aum.) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
<i>Pinus sp.</i>	8	80,6	1,5	-----	-----	-----	-----	-----
Controle	8	43,0	2,8 a	-----	42,5	2,9 a	-----	(3,6) ^{NS}
180°C	8	85,6	2,7 a	3,6	59,3	2,8 a	3,6	(3,7) ^{NS}
200°C	8	71,0	2,2 a	21,4	67,7	3,2 a	(10,3)	(45,5) ^{NS}
220°C	8	53,2	2,3 a	17,9	68,6	2,4 a	17,2	(4,3) ^{NS}

Tratamento	N	Número de Furos no corpo de prova						Red. ou (Aum.) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
<i>Pinus sp.</i>	8	102,5	1,3	-----	-----	-----	-----	-----
Controle	8	50,7	1,8 a	-----	39,3	2,1 a	-----	(16,7) ^{NS}
180°C	8	52,9	1,9 a	(5,6)	66,6	1,8 a	14,3	5,3 ^{NS}
200°C	8	66,6	1,8 a	0,0	37,6	1,4 a	33,3	22,2 ^{NS}
220°C	8	37,0	1,3 a	27,8	82,8	1,3 a	38,1	0,0 ^{NS}

(continuação Tabela 10)

Tratamento	N	Nota de Desgaste (Ataque)						Red. ou (Aum.) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
<i>Pinus sp.</i>	8	0,0	4,00	-----	-----	-----	-----	-----
Controle	8	0,0	4,00 a	-----	0,0	4,00 a	-----	0,0 ^{NS}
180°C	8	8,1	3,83 a	4,3	7,5	3,71 a	7,3	3,1 ^{NS}
200°C	8	6,5	3,79 ab	5,3	4,1	3,75 ab	6,3	1,1 ^{NS}
220°C	8	7,2	3,46 b	13,5	8,8	3,50 b	12,5	(1,2) ^{NS}

Tratamento	N	Cupins Mortos (%)						Red. ou (Aum.) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	CV (%)	Média	Red. ou (Aum.) (%)	
<i>Pinus sp.</i>	8	79,3	16,3	-----	-----	-----	-----	-----
Controle	8	78,9	21,9 a	-----	76,6	15,0 a	-----	31,5 ^{NS}
180°C	8	73,6	11,9 a	45,7	96,9	14,4 a	4,0	(21,0) ^{NS}
200°C	8	72,9	16,9 a	22,8	44,2	15,6 a	(4,0)	7,7 ^{NS}
220°C	8	75,8	16,3 a	25,6	116,2	15,0 a	0,0	8,0 ^{NS}

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; medianas e médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelos testes de Dunn e Tukey a 5% de significância, para a nota de ataque e todas as outras variáveis, respectivamente; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste de Kruskal Wallis e F a 5% de significância, para a nota de ataque e todas as outras variáveis, respectivamente; mesma letra na coluna e ^{NS} na linha denotam diferença não significativa.

O número médio de furos produzidos nos corpos de prova, dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*, pelos cupins de madeira seca foram 1,8 e 2,1. A percentagem de cupins mortos após os ensaios foram 21,9% e 15,0%, para os respectivos tipos de lenho. As notas de desgaste tanto no lenho juvenil quanto no adulto, da madeira sem tratamento, foram 4,0 (máximo desgaste). Assim, podemos classificar a madeira de *S. parahyba* como sendo de desgaste profundo, pois apresenta nota de desgaste semelhante à madeira de *Pinus sp.*, segundo a norma IPT-1157 (1980).

Os resultados apresentados no presente estudo corroboram com os encontrados por Gonçalves e Oliveira (2006), que na avaliação da resistência natural das madeiras de *Pinus sp.*, *S. parahyba* (Guapuruvu), *Toona ciliata* (Cedro-australiano), *Tachigalia myrmecophylla* (Cacunda), *Goupia glabra* (Cupiúba), *Cedrela fissilis* (Cedro-rosa) e *Caryocar brasiliense* (Pequi), concluíram que as madeiras de *Pinus* e

de Guapuruvu foram as únicas que apresentaram furos (2 e 6, respectivamente) causados pelo cupim *C. brevis*, foram as menos resistentes a esses insetos, pois apresentaram como respectivas notas de ataque 4 (maior desgaste) e 2,78, e apresentaram as menores percentagens de mortalidade dos insetos (17,5% e 21,67%) dentre as espécies estudadas.

Resultados diferentes foram encontrados por Gonçalves et al. (2013), que submeteram as madeiras de *Hymenolobium petracum* (Angelim pedra), *Caesalpiniae chinata* (Pau Brasil), *Eucalyptus cloeziana*, *Anadenanthera peregrina* (Angico verdadeiro), *Eucalyptus toreliana*, *Peltogine nitens* (Roxinho), *Chlorophora tinctoria* (Amoreira), *Manilkara longifolia* (Parajú) e *Anadenanthera columbrina* var. *cebil* (Angico vermelho) aos cupins *C. brevis* e concluíram que elas foram pouco deterioradas pelos referidos insetos, pois apresentaram notas de desgaste de 1,87, 1,73, 1,73, 1,40, 1,07, 1,00, 1,00, 0,53 e 0,27, respectivamente.

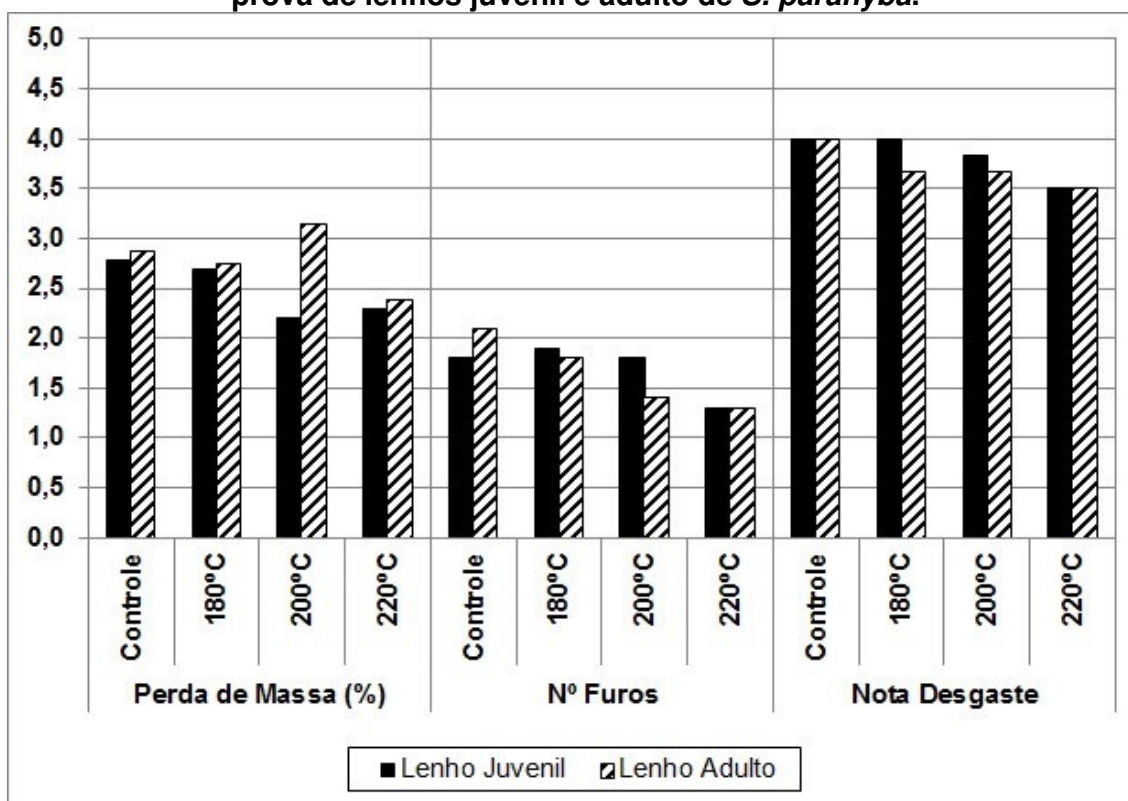
Os resultados apresentados também diferem dos mostrados por Ribeiro et al. (2014), que ao expor a madeira de *Toona ciliata* aos cupins *C. brevis* observaram perda de massa na ordem 1,74%. Segundo os autores, a resistência natural dessa espécie pode ser explicada pelo alto teor de extrativos (13,0%) e pela presença de substâncias nocivas, principalmente limonóides. Também diferem dos mostrados por Paes et al. (2015), que ao submeteram as madeiras de cerne e alburno de *Tectona grandis* aos cupins *C. brevis* concluíram que as respectivas perdas de massa provocadas pelos insetos xilófagos foram 0,24% e 0,93% o que, conseqüentemente, classifica a madeira de Teca como de moderada resistência aos cupins.

Tais variações foram explicadas por Oliveira et al. (1986), Gonçalves e Oliveira (2006), Gonçalves et al. (2013) e Paes et al. (2015), ao comentarem que as madeiras por ser um material de durabilidade natural relativa, podem apresentar, com frequência, diferenças nas suas resistências quanto aos cupins. Entretanto, não existe uma característica única que possa ser empregada para relacionar o ataque provocado por esses insetos nas diversas espécies de madeiras, mas que as maiores resistências aos cupins ocorrem em madeiras com maiores massa específicas aparentes (EVANS et al., 2005; GONÇALVES e OLIVEIRA, 2006; GONÇALVES et al., 2013), maiores teores de extrativos (EVANS et al., 2005; GONÇALVES e OLIVEIRA, 2006; GONÇALVES et al., 2013; RIBEIRO et al., 2014; PAES et al., 2015) e naquelas que apresentam compostos inertes, tais como sílica (KARTAL et al., 2009) e cinzas (OLIVEIRA et al., 1986; GONÇALVES et al., 2013).

Assim, com base nos resultados apresentados no presente estudo e nos apresentados pela literatura, constata-se que a madeira sem tratamento de *S. parahyba* pode ser classificada como de baixa resistência ao cupim de madeira seca *C. brevis*.

O efeito da modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao cupim de madeira seca *C. brevis* também se encontra na Tabela 10, e pode ser visualizado nas Figuras 24 e 25.

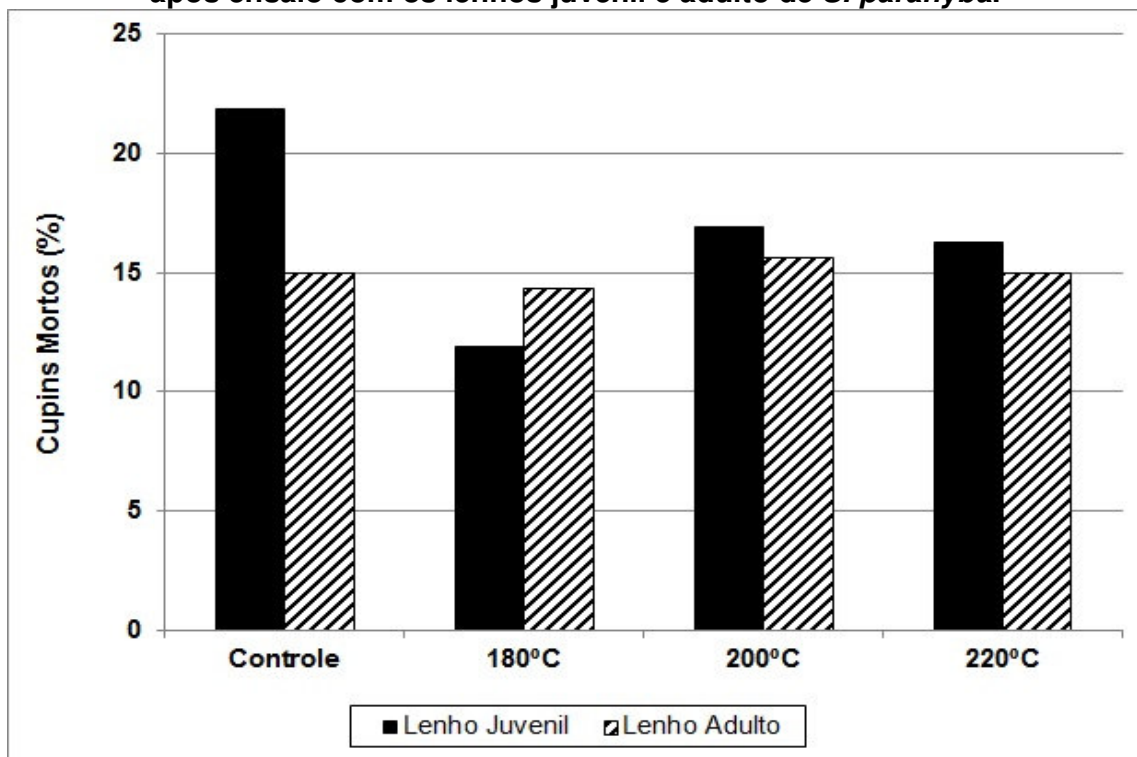
Figura 24 – Efeito da modificação térmica na perda de massa, número de furos e desgastes ocasionados pelo cupim de madeira seca *C. brevis* em corpos de prova de lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.



O lenho juvenil da madeira sem tratamento e das modificadas termicamente quando submetidas ao cupim *C. brevis* apresentaram perdas de massa estatisticamente iguais e na ordem de 2,0% a 2,8%, enquanto que no lenho adulto o inseto xilófago ocasionou perda de massa na ordem de 2,4% a 3,2%. O número médio de furos ocasionados pelos cupins nos corpos de prova do lenho juvenil foi significativamente igual em todos os tratamentos e variou de 1,3 a 1,9, enquanto que no lenho adulto foi de 1,3 a 2,1.

Somente a temperatura de 220°C foi suficiente para reduzir significativamente, e na ordem de 13,5% e 12,5%, a nota de desgaste causado pelo *C. brevis* nos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*. A perda de massa causada pelo inseto xilófago nos lenhos juvenil e adulto da madeira modificada termicamente a 220°C foi reduzida na magnitude de 17,9 e 17,2%, respectivamente, enquanto que o mesmo tratamento ocasionou reduções na magnitude de 27,8% e 38,1% no número de furos dos corpos de prova dos respectivos tipos de lenho de *S. parahyba*. As reduções nessas duas variáveis não foram estatisticamente significativas. Uma possível explicação para isso é que os coeficientes de variação dessas variáveis foram de até 82,8%, enquanto que na variável nota de desgaste foi de no máximo de 8,8%.

Figura 25 – Efeito da modificação térmica na percentagem de cupins mortos após ensaio com os lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba*.



O lenho juvenil da madeira sem tratamento e das modificadas termicamente quando submetidas ao cupim *C. brevis* apresentaram percentagem de cupins mortos estatisticamente iguais e na ordem de 11,9% a 21,9%, enquanto que no lenho adulto variou de 14,4% a 15,0%. O presente estudo mostra que os tratamentos de modificação térmica não proporcionaram reduções estatisticamente significativas na percentagem de cupins mortos na madeira de *S. parahyba*. Isso pode ser explicado

devido às altas notas de desgaste (próximas a 4), mesmo na madeira tratada a 220°C, o que denota que o *S. parahyba* modificado termicamente nas condições do estudo apresenta desgaste acentuado e baixa resistência ao inseto xilófago.

Resultados semelhantes foram apresentados por Shi et al. (2007) que, ao modificarem termicamente as madeiras de *Populus tremuloides*, *Liriodendron tulipifera* e *Pinus banksiana* com temperatura de 210°C, concluíram que o tratamento não foi capaz de reduzir significativamente as perdas de massa provocadas pelos cupins subterrâneos *Reticulitermes flavipes*. Corroboram também com os encontrados por Oliver-Villanueva et al. (2013), os quais expuseram as madeiras sem tratamento de *Fagus sylvatica* e as tratadas termicamente com 200°C aos cupins subterrâneos *Reticulitermes banyulensis*, e concluíram que o tratamento não mudou a nota de desgaste provocada pelos insetos na madeira. Resultado similar foi encontrado por Batista et al. (2016), que no estudo sobre o efeito do tratamento “Vap HolzSysteme®” na madeira de *Eucalyptus grandis* concluíram que a modificação térmica não foi eficaz para melhorar a resistência da madeira ao cupim de madeira seca *C. brevis*.

Assim, mesmo com uma tendência de redução da nota de ataque com o aumento da temperatura do tratamento térmico, constata-se que a modificação térmica de 180°C a 220°C não foi capaz de proteger totalmente a madeira de *S. parahyba* contra os cupins. Contudo, Pessoa et al. (2006) e Mburu et al. (2007) mostraram que as condições mais intensas de tempo e temperaturas do tratamento térmico, 200°C por 24 h e 250°C por 7 horas, melhoraram a durabilidade das respectivas madeiras de *Eucalyptus grandis* e de *Grevillea robusta* aos cupins subterrâneos *Macrotermes natalensis* e aos cupins de madeira seca *C. brevis*, devido à formação de compostos termitocidas durante esses tratamentos térmicos.

Conforme apresentado no presente estudo, os tratamentos de modificação térmica alteram, de maneira diferenciada, as propriedades que caracterizam a madeira, tais como: as massas específicas aparentes (BEKHTA e NIEMZ, 2003; BRITO, 2006; CALONEGO et al., 2012, 2014; SEVERO et al., 2012, 2016), as resistências mecânicas (BEKHTA e NIEMZ, 2003; JOHANSSON e MORÉN, 2006; MBURU et al., 2008; CALONEGO et al., 2012) e as propriedades químicas (STAMM, 1956; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; BRITO, 2008; MBURU et al., 2007, 2008; ARNOLD, 2010; SEVERO et al., 2012, 2016) e, a literatura mostra que as madeiras com maiores massa específicas aparentes (EVANS et al., 2005; GONÇALVES e

OLIVEIRA, 2006; GONÇALVES et al., 2013; OLIVER-VILLANUEVA et al., 2013), com maiores teores de extrativos (EVANS et al., 2005; RIBEIRO et al., 2014; GONÇALVES et al., 2013; PAES et al., 2015; OLIVER-VILLANUEVA et al., 2013) e/ou com presença acentuada de cinzas (OLIVEIRA et al., 1986; GONÇALVES et al., 2013) e sílica (KARTAL et al., 2009) apresentam maior resistência aos cupins. A modificação térmica nas condições empregadas no estudo não foi capaz de melhorar a classificação da durabilidade dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao cupim de madeira seca *C. brevis*.

4.5 Efeito da modificação térmica na resistência da madeira de *S. parahyba* ao intemperismo

O efeito da modificação térmica sobre a resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao intemperismo foi determinado, conforme metodologia citada no item 3.9, através da variação colorimétrica do material. As mudanças nos parâmetros colorimétricos (ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔE^* , Δh^9 e ΔC^*) da madeira, após 1200 h de ensaio de intemperismo, podem ser verificadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Efeito do tratamento de modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao intemperismo.

Tratamento	N	Variação no brilho (ΔL^*)						Red. ou (Aum.) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	4	-61,0	-15,68 a	-----	-21,9	-22,81 a	-----	(45,5) ^{NS}
180°C	4	-163,4	-7,19 a	54,1	-23,8	-12,87 a	43,6	(79,0) ^{NS}
200°C	4	-210,3	-6,68 a	57,4	-86,0	-6,91 a	69,7	(3,4) ^{NS}
220°C	4	143,7	+6,97 b	144,6	129,6	+8,14 b	135,7	(16,8) ^{NS}

Tratamento	N	Variação na coordenada verde-vermelho (Δa^*)						Red. ou (Aum.) (%)
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	4	59,8	+5,34 a	-----	27,9	+8,15 a	-----	(52,6) ^{NS}
180°C	4	196,8	+2,46 ab	53,9	16,6	+3,26 ab	60,0	(32,5) ^{NS}
200°C	4	520,9	+0,94 b	82,4	153,0	+1,91 b	76,6	(103,2) ^{NS}
220°C	4	-100,7	-2,43 b	145,5	530,8	-0,55 b	106,8	77,4 ^{NS}

(continuação Tabela 11)

Tratamento	N	Variação na coordenada azul-amarelo (Δb^*)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	4	142,7	+4,36 a	-----	53,8	+6,46 a	-----	(48,2) ^{NS}
180°C	4	2866,6	+0,24 ab	94,5	-74,4	-1,80 ab	127,9	(850,0) ^{NS}
200°C	4	-113,9	-5,42 b	224,3	-116,3	-3,81 b	159,0	29,7 ^{NS}
220°C	4	-44,8	-4,64 b	205,7	-459,2	-0,71 b	111,0	84,7 ^{NS}

Tratamento	N	Variação na cor (ΔE^*)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	4	53,2	18,13 a	-----	24,3	25,14 a	-----	(38,7) ^{NS}
180°C	4	80,6	11,97 ab	34,0	23,6	13,43 ab	46,6	(12,2) ^{NS}
200°C	4	29,0	15,91 ab	12,2	23,1	10,44 ab	58,5	34,4 ^{NS}
220°C	4	28,8	12,23 b	32,5	74,2	10,80 b	57,0	11,7 ^{NS}

Tratamento	N	Variação na tonalidade (Δh^a)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	4	-14,4	-8,35 a	-----	-15,0	-12,83 a	-----	(53,7) ^{NS}
180°C	4	-98,9	-4,61 a	46,7	-28,1	-8,76 a	31,7	(90,0) ^{NS}
200°C	4	-97,5	-5,45 a	34,7	-27,8	-6,48 a	49,5	(18,9) ^{NS}
220°C	4	1492,5	+0,43 b	105,2	852,8	+0,67 b	105,2	(55,8) ^{NS}

Tratamento	N	Variação na saturação (ΔC^*)						
		Lenho Juvenil			Lenho Adulto			Red. ou (Aum.) (%)
		CV (%)	Média	Red. (%)	CV (%)	Média	Red. (%)	
Controle	4	52,3	8,35 a	-----	36,9	10,48 a	-----	(25,5) ^{NS}
180°C	4	53,2	6,90 ab	17,4	28,4	3,81 ab	63,6	44,8 ^{NS}
200°C	4	48,6	8,07 ab	3,4	42,8	5,87 ab	44,0	27,3 ^{NS}
220°C	4	40,8	5,59 b	33,1	77,4	3,22 b	69,3	42,4 ^{NS}

sendo: CV - coeficiente de variação; Red. - redução; Aum. - aumento; médias seguidas por letras diferentes na coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância; * na mesma linha denota diferença significativa entre os tipos de lenho pelo teste F a 5% de significância; mesma letra na coluna e ^{NS} na linha denotam diferença não significativa.

Verifica-se que o intemperismo ocasionou no lenho juvenil, da madeira controle de *S. parahyba*, variações de -15,68 no brilho (ΔL^*), de +5,34 e +4,36 nos parâmetros verde-vermelho (Δa^*) e azul-amarelo (Δb^*), de 8,35 na saturação de cor

(ΔC^*), de $-8,35^\circ$ na tonalidade (Δh°) e na ordem de 18,13 na cor (ΔE^*). Essas mudanças nos padrões colorimétricos foram estatisticamente iguais às do lenho adulto, e se apresentaram em $-22,81$, $+8,15$, $+6,46$, $10,48$, $-12,83^\circ$ e $25,14$, respectivamente. Esses valores mostram que a madeira de *S. parahyba* ficou mais escurecida, avermelhada e amarelada após o intemperismo.

Esses resultados são coerentes com os apresentados por Oltean et al. (2008), os quais concluíram que algumas das dezoito madeiras estudadas em seu trabalho se tornaram mais escurecidas (*Picea abies* com ΔL^* de $-11,3$ e *Robinia pseudoacacia* com ΔL^* de $-10,9$), outras mais avermelhadas (*Robinia pseudoacacia* com Δa^* de $+4,6$ e *Picea abies* com Δa^* de $+4,3$) ou amareladas (*Picea abies* com Δb^* de $+10,5$ e *Abies alba* com Δb^* de $+10,0$) após ensaio com 120 h de intemperismo.

Salienta-se, também, que as variações na cor (ΔE^*) provocadas pelo intemperismo da madeira utilizada no presente estudo são coerentes com os encontrados por Ayadi et al. (2003), que ao avaliarem o efeito da exposição das madeiras de *Fraxinus* sp., *Fagus sylvatica*, *Pinus pinaster* e *Populus* sp. ao intemperismo, constataram que, as respectivas variações de cor (ΔE^*) apresentaram-se na ordem de 25,0, 18,0, 27,0 e 28,0.

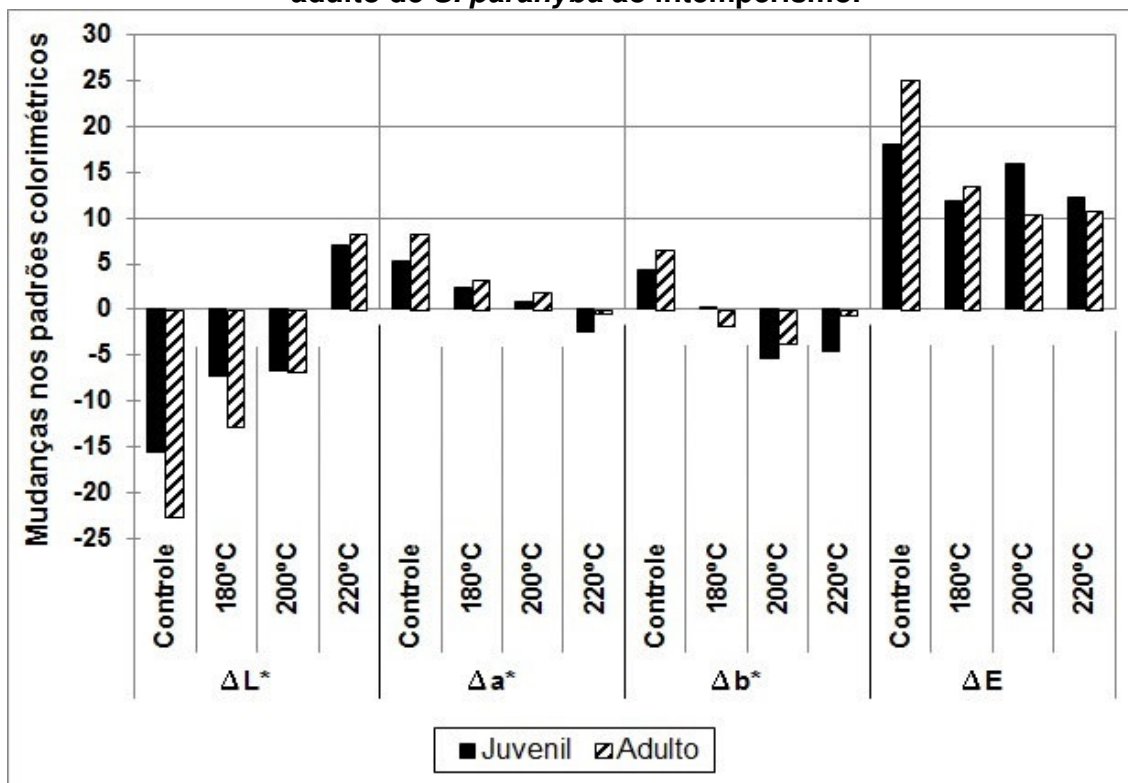
Resultados similares foram encontrados por Mitsui (2006), que ao expor a madeira de *Pinus sitchensis* em irradiação prolongada de luz constatou que o ΔE^* apresentou-se na ordem de 26,6. Esses resultados também corroboram com os valores encontrados por Oltean et al. (2008), que ao caracterizarem a cor da madeira de dezoito espécies europeias, concluíram que as espécies apresentaram ΔE^* de até 16 após as primeiras 120 horas de ensaio de intemperismo e de até 19 depois de 600 h de ensaio.

No entanto, o efeito da modificação térmica na resistência ao intemperismo dos lenhos juvenil e adulto da madeira de *S. parahyba* encontra-se na Tabela 11 e as variações dos principais parâmetros colorimétricos (ΔL^* , Δa^* e Δb^*) e das cores (ΔE^*) da madeira podem ser melhores visualizados na Figura 26.

O ensaio de intemperismo provocou variações de $-15,68$, $-7,19$, $-6,68$ e $+6,97$ no brilho (ΔL^*) do lenho juvenil provenientes da madeira controle de *S. parahyba* e das modificadas termicamente com 180°C , 200°C e 220°C , enquanto que no lenho adulto essas variações foram $-22,81$, $-12,87$, $-6,91$ e $+8,14$. As mudanças na

coordenada verde-vermelho (Δa^*) do lenho juvenil, nos respectivos tratamentos, foram +5,34, +2,46, +0,94 e -2,43, enquanto que no lenho adulto apresentaram-se em +8,15, +3,26, +1,91 e -0,55. O parâmetro azul-amarelo (Δb^*) do lenho juvenil, proveniente da madeira controle e das tratadas a 180°C, 200°C e 220°C, variou em +4,36, +0,24, -5,42 e -4,64 com o intemperismo e, no lenho adulto, em +6,46, -1,80, -3,81 e -0,71.

Figura 26 – Efeito da modificação térmica na resistência dos lenhos juvenil e adulto de *S. parahyba* ao intemperismo.



O presente estudo mostra que a variação da tonalidade (Δh^*), em função do ensaio de intemperismo, foi significativamente reduzida de -8,35° para +0,43° no lenho juvenil de *S. parahyba* devido à modificação térmica com até 220°C. No lenho adulto, submetido às mesmas condições, o Δh^* apresentou redução de -12,83° para +0,67°. As variações da saturação da cor (ΔC^*) do lenho juvenil, provocadas pelo intemperismo, foram significativamente reduzidas de 8,35 para 5,59 com o incremento da temperatura do tratamento térmico, enquanto que no adulto houve redução de 10,48 para 3,22. A variação de cor (ΔE^*), em função do ensaio de intemperismo, foi significativamente reduzida de 18,13 para 12,23 no lenho juvenil

de *S. parahyba* devido ao tratamento com até 220°C, enquanto que no lenho adulto o ΔE^* foi reduzido de 25,14 para até 10,8, com o tratamento térmico.

Esses resultados mostram que a cor da madeira tratada termicamente é mais estável quando exposta ao intemperismo e corroboram com os encontrados por Mitsui (2006) que, ao vaporizar a madeira de *Pinus sitchensis* com 90°C, concluiu que o ΔE^* foi 7,2 em vez dos 26,6 da madeira sem tratamento. Resultados similares foram encontrados por Ayadi et al. (2003), segundo os quais as madeiras de *Fraxinus* sp., *Fagus sylvatica*, *Pinus pinaster* e *Populus* sp. apresentaram ΔE^* na ordem de 25,0, 18,0, 27,0 e 28, enquanto que a cor do respectivo material tratado a 240°C variou de 5,0, 8,0, 8,0 e 12,0 após o intemperismo.

A influência da modificação térmica de *S. parahyba* mostra que o incremento da temperatura do tratamento tem relação direta com o aumento da resistência ao intemperismo da madeira. Durante o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocorre a degradação de alguns de seus componentes químicos e a reticulação dos polímeros resultantes do tratamento (HOMAN et al., 2000; WASKETT e SELMES, 2001; SUNDQVIST e MORÉN, 2002; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; JOHANSON e MORÉN, 2006) e essa condensação ou reticulação da lignina confere uma melhor estabilidade mediante as reações fotoquímicas e uma menor taxa de fotodecomposição da madeira (AYADI et al., 2003; MITSUI, 2006).

5 CONCLUSÕES

Os estudos desenvolvidos, para avaliar o efeito da modificação térmica entre 180°C e 220°C na qualidade dos lenhos juvenil e adulto de *Schizolobium parahyba*, mostram que esta técnica melhora a estabilidade dimensional e a resistência natural aos fungos xilófagos e ao intemperismo, embora, modifique a sua cor e não altera a sua classe de resistência aos cupins de madeira seca.

Sobre o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas e químicas da madeira, pode-se concluir que:

- a) o aumento da temperatura do tratamento promove decréscimos significativos na massa específica aparente a 21°C e 65% de umidade relativa da madeira de *S. parahyba*, e reduz os seus teores de umidade de equilíbrio e inchamentos;
- b) a massa específica básica e os coeficientes de retratibilidades não variam com os tratamentos e não são indicados para avaliar a qualidade da madeira modificada termicamente;
- c) a modificação térmica provoca reduções significativas nos teores de holocelulose e um aumento proporcional nos teores de lignina e de extrativos totais da madeira.

Através da caracterização colorimétrica da madeira, conclui-se que:

- a) a cor da madeira de *S. parahyba* sem tratamento é classificada como branco amarelada, pois apresenta alta claridade e presença marcante do pigmento amarelo;
- b) o tratamento térmico provoca o seu escurecimento e avermelhamento.

Com referência à resistência da madeira de *S. parahyba* aos organismos xilófagos, conclui-se que:

- a) a madeira sem tratamento é classificada como não resistente ao cupim de madeira seca *Cryptotermes brevis* e ao fungo de podridão parda *Gloeophyllum trabeum*, e de resistência moderada ao fungo de podridão branca *Pycnoporus sanguineus*;
- b) o tratamento térmico à 200°C provocou reduções significativas de até 90,6% nas perdas de massa provocadas pelos fungos apodrecedores;
- c) a modificação térmica não mudou a classe de resistência da madeira aos cupins.

Com relação à resistência ao intemperismo da madeira estudada, pode-se concluir que:

- a) a madeira sem tratamento ficou mais escurecida, avermelhada e amarelada após o ensaio de intemperismo acelerado;
- b) o incremento na temperatura do tratamento térmico aumenta a sua resistência aos agentes de degradação abiótica.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A.; FERRAZ, A. Mecanismos envolvidos na biodegradação de materiais lignocelulósicos e aplicações tecnológicas correlatas. **Química Nova**, São Paulo, v.34, n.10, p.1729-1738, 2011.
- ALÉN, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.36, n.2, p.163-171, 2002.
- ALMEIDA, G.; HERNÁNDEZ, R. E. Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above fiber saturation point. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.40, p.599-613, 2006.
- ALMEIDA, D.H., SCALIANTE, R.M.; MACEDO, L.B.; MACÊDO, A.N.; DIAS, A.A.; CHRISTOFORO, A.L.; CALIL JUNIOR, C. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb.) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.6, p.1175-1181, 2013.
- ALVES, M.V.S.; COSTA, A.F.; ESPIG, D.S.; VALE, A.T. Resistência natural de seis espécies de madeiras da região amazônica a fungos apodrecedores, em ensaios de laboratório. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.1, p.17-26, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D-1104. **Standard method for holocellulose in wood**. West Conshohocken: ASTM International, 2p., 1978.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D-2017. **Standard method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of wood**. West Conshohocken: ASTM International, 5p., 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D-1413. **Standard test method for wood preservatives by laboratory soil-block cultures**. West Conshohocken: ASTM International, 8p., 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E-308. **Standard practice for computing the colors of objects by using the CIE system**. West Conshohocken: ASTM International, 32p., 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM G-154. **Standard practice of operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, 11p., 2006.
- ANDRADE, F.A.; CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D.; FURTADO, E.L. Selection of fungi for accelerated decay in stumps of *Eucalyptus* spp. **Bioresource Technology**, London, v.110, p.456-461, 2012.
- ARANTES, V.; MILAGRES, A.M.F. Relevância de compostos de baixa massa molar produzidos por fungos e envolvidos na biodegradação da madeira. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.6, p.1586-1595, 2009.

ARNOLD, M. Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce. **Journal of Materials Science**, v.45, p.669-680, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7190. **Ações nas estruturas, propriedades da madeira e dimensionamento nos estados limites de utilização**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ATHANÁZIO-HELIODORO, J.C. **Qualidade da madeira de árvores de Guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake) com 15 anos provenientes de área de recuperação florestal**. Botucatu, 2015. 151f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Estadual Paulista.

AYADI, N.; LEJEUNE, F.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.61, p.221-226, 2003.

BÄCHLE, H.; ZIMMER, B.; WINDEISEN, E.; WEGENER, G. Evaluation of thermally modified beech and spruce wood and their properties by FT-NIR spectroscopy. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.44, p.421-433, 2010.

BAO, F.C.; JIANG, Z.H.; JIANG, X.M.; LU, X.X.; LUO, X.Q. ZHANG, S.Y. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.35, p.363-375, 2001.

BARREAL, J.A.R. **Patologia de la madera**. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, 1998. 349p.

BATISTA, D.C.; NISGOSKI, S.; OLIVEIRA, J.T. da; BOLZÓN-MUÑIZ, G.I.; PAES, J.B. Resistance of thermally modified *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden wood to deterioration by dry-wood termites (*Cryptotermes* sp.). **Ciência Florestal**, Curitiba, v. 26, n.2, p.671-678, 2016.

BENDTSEN, B.A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v.28, p.61-72, 1978.

BHAT, K.M.; BHAT, K.V.; DHAMODARAM, T.K.; RUGMINI, P. Some wood and bark properties of *Hevea brasiliensis*. **Journal of Tree Sciences**, v.182, p.40-66, 1984.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. **Holzforschung**, Berlin, v.57, p.539-546, 2003.

BHUIYAN, T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.46, p.431-436, 2000.

BHUIYAN, T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.47, n.5, p.336-341, 2001.

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

BORTOLETTO JUNIOR, G., BELINI, U.L. Produção de lâminas e manufatura de compensados a partir da madeira de Guapuruvú (*Schizolobium parayba* Blake) proveniente de um plantio misto de espécies nativas. **Cerne**, Lavras, v.8, n.2, p.1-16, 2002.

BRAINARD, D. H. Color appearance and color difference specification. In: SHEVELL, S.K. **The science of color**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier B.V., 2003. cap. 5, p.191-216.

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

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

CALONEGO, F.W. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. Botucatu, 2009. 149f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista.

CALONEGO, F.W.; ANDRADE, M.C.N.; NEGRÃO, D.R.; ROCHA, C.D.; MINHONI, M.T.A.; LATORRACA, J.V.F.; SEVERO, E.T.D. Behavior of the brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum* on thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.20, n.3, p.417-423, 2013.

CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D. Variação dimensional das tábuas de *Eucalyptus grandis* durante alguns níveis de tempo e temperatura de termorreificação. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.25, n.3, p.58-67, 2010.

CALONEGO, F.W., SEVERO, E.T.D., ASSI, P.P. Mensuração do comprimento das fibras para a determinação da madeira juvenil em *Eucalyptus citriodora*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.68, p.113-121, 2005.

CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D.; BALLARIN, A.W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v.40, n.4, p.453-460, 2012.

CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D.; FURTADO, E.L. Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C. **Bioresource Technology**, London, v.101, n.23, p.9391-9394, 2010.

CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D.; LATORRACA, J.V.F. Effect of thermal modification on the physical properties of juvenile and mature woods of *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.21, n.1, p.108-113, 2014.

CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D.; SANSÍGOLO, C.A.; REZENDE, M.A.; BRUDER, E.M.; COSTA, V.E. Calorific value and chemical properties in juvenile and mature wood of thermally-modified *Eucalyptus grandis*. **Drvna Industrija**, Zagreb, v.67, n.3, p.207-214, 2016.

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

CARVALHO, P.E.R. Guapuruvu: taxonomia e nomenclatura. **Circular Técnica Embrapa**, n.104, 2005, 10p.

CHARRIER, B.; CHARRIER, F.; JANIN, G.; KAMDEM, D.P.; IRMOULI, M.; GONÇALEZ, J. Study of industrial boiling process on walnut colour: experimental study under industrial conditions. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 60, p. 259-264, 2002.

CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Effect of moisture sorption state on transverse dimensional changes in wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, n.1, p.50-55, 2004.

CLEAVELAND, L.R. Symbiosis between termites and their intestinal protozoa. **PNAS**, v. 9, n. 12, p. 424-428, 1923.

COWN, D.J. Corewood (Juvenile wood) in *Pinus radiata* – should we be concerned? **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v.22, p.87-95, 1992.

DONALDSON, L.A. Within- and between- tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata*. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v.22, n.1, p.77-86, 1992.

DUTTON, M.V.; EVANS, C.S.; ATKEY, P.T.; WOOD, D.A. Oxalate production by Basidiomycetes, including white-rot species *Coriolus versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v.39, p.5-10, 1993.

ENGEL, V.L.; PARROTTA, J.A. An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 152, n.1, p. 169-181, 2001.

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

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

EVANS, T.A.; LAI, J.C.S.; TOLEDANO, E.; McDOWALL, L.; RAKOTONARIVO, S.; LENZ, M. Termites assess wood size by using vibrations signals. **PNAS**, v. 102, n. 10, p. 3732-3737, 2005.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. New York, Gruyter, 1989. 613p.

FERREIRA, A.L.; SEVERO, E.T.D.; CALONEGO, F.W. Determination of fiber length and juvenile and mature wood zones from *Hevea brasiliensis* trees grown in Brazil. **European Journal of Wood and Wood Products / Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.69, p.659-662, 2011.

FOELKEL, C.E.B. **Qualidade da madeira**. Viçosa, CENIBRA, 1977. 60pp.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Washington: US Department of Agriculture, 1999, 463p.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1988. 111p.

GOMES, J.F.S. **Padronização de metodologia para caracterização de cor por imagem aplicada à seleção de frutas**. Niterói, 2013. 256f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica). Universidade Federal Fluminense.

GONÇALEZ, J.C.; JANIN, G.; SANTORO, A.C.S.; COSTA, A.F. da; VALLE, A.T. do. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, n.72, p.47-58, 2001.

GONÇALVES, F.G.; OLIVEIRA, J.T. da S. Resistência ao ataque de cupim-de-madeira seca (*Cryptotermes brevis*) em seis espécies florestais. **Cerne**, Lavras, 12, n. 1, p. 80-83, 2006.

GONÇALVES, F.G.; PINHEIRO, D.T.C.; PAES, J.B.; CARVALHO, A.G. de; OLIVEIRA, G.L. Durabilidade natural de espécies florestais madeireiras ao ataque de cupim de madeira seca. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 1, p. 110-116, 2013.

GOODELL, B.; JELLISON, J.; LIU, J.; DANIEL, G.; PASZCZYNSKI, A.; FEKETE, F.; KRISHNAMURTHY, S.; JUN, L.; XU, G. Low molecular weight chelator and phenolic compounds isolated from wood decay fungi and their role in the fungal biodegradation of wood. **Journal of Biotechnology**, Berlin, v.53, p133-162, 1997.

GUILLEY, E.; CHARPENTIER, J. P.; AYADI, N. SNAKKERS, G.; NEPVEU, G.; CHARRIER, B. Decay resistance against *Coriolus versicolor* in Tensile oak (*Quercus petraea* Liebl.): analysis of the between-tree variability and correlation with extractives, tree growth and other basic wood properties. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.38, p.539-554, 2004.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; EL BAKALI, I.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v.91, n.2, p.393-397, 2006.

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

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

HAUPT, M.; LEITHOFF, H.; MEIER, D.; RICHTER, H.G.; FAIX, O. Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L.) – a case study. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.61, p.473-474, 2003.

HAYGREEN, J.G.; BOWYER, J.L. **Forest products and wood science: an introduction**. Iowa State University Press/AMES, 1996. 484p.

HOMAN, W.; TJEERDSMA, B.; BECKERS, E.; JORISSEN, A. Structural and other properties of modified wood. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2000. British Columbia, Canada. **Proceedings...** British Columbia, Canada, 2000, 8p.

IBÁ. **Indústria Brasileira de Árvores**. Brasília/São Paulo: Pöyry Consultoria em Gestão e Negócios Ltda., 2016. 77p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT 1157. **Ensaio acelerado da resistência natural ou de madeira preservada ao ataque de térmitas do gênero *Cryptotermes* (Fam. Kalotermitidae)**. São Paulo: IPT, 1980.

ISHIGURI, F.; MARUYAMA, S.; TAKAHASHI, K.; ABE, Z.; YOKOTA, S.; ANDOH, M.; YOSHIZAWA, M. Extractives relating to heartwood color changes in Sugi (*Cryptomeria japonica*) by a combination of smoke-heating and UV radiation exposure. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.49, p.135-139, 2003.

ISHIGURI, F.; MATSUI, M.; YOKOTA, S.; YOSHIZAWA, M. Changes in the physical and chemical properties of six Japanese softwoods caused by lengthy smoke-heating treatments. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.51, n.2, p.161-166, 2005.

JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. Heat treatment of wood: better durability with out chemicals. In: RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.21-26.

JANKOWSKY, I.P., LEPAGE, E.S. O creosoto de *Eucalyptus* spp como preservativos para madeiras. **IPEF**, Piracicaba, n.33, p.47-57, 1986.

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

JUODEIKIENE, I.; MINELGA, D. The influence of heating on wood hygroscopicity and dimensional stability. **Materials Science (Medziagotyra)**, v.9, n.2, p.209-212, 2003.

KADIR, A.A.; SUDIN, R. Carbohydrates in rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell.). **Holzforschung**, Berlin, v. 43, n.3, p.173-178, 1989.

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

KARTAL, S.M.; YOSHIMURA, T.; IMAMURA, Y. Modification of wood with Si compounds to limit boron leaching from treated wood and to increase termite and decay resistance. **International Biodeterioration & Biodegradation**, London, v.63, p.187-190, 2009.

KOROŠEC, R.C.; LAVRIČ, B.; REP, G.; POHLEVEN, F.; BUKOVEC, P. Thermogravimetry as a possible tool for determining modification degree of thermally treated Norway spruce wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v.98, p.189-195, 2009.

KATAOKA, Y.; KIGUCHI, M. Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.47, p.325-327, 2001.

LARA PALMA, H. A.; BALLARIN, A. W. Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L.. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.64, p.13-22, 2003.

LATORRACA, J.V.; DÜNISCH, O.; KOCH, G. Chemical composition and natural durability of juvenile and mature heartwood of *Robinia pseudoacacia* L. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v.83, n.3, p.1059-1068, 2011.

LELIS, A. T. de; BRAZOLIN, S.; FERNANDES, J. L. G.; LOPEZ, G. A. C.; MONTEIRO, M. B. B.; ZENID, G. J. **Biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2001. 54p.

LEPAGE, E. S. Química da madeira. In: LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986a. cap. 4, p.69-98.

LEPAGE, E. S. "Weathering". In: LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986b. cap. 6, p.193-207.

LOBÃO, M.S., COSTA, D.P.; ALMONACID, M.A.A.; TOMAZELLO FILHO, M. Qualidade do lenho de árvores de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.19, n.3, p.374-384, 2012.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J.P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT: São Paulo, 1989. 418p.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; HUBER, F.; PETRISSANS, M.; GERARDIN, P. Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevillea robusta* wood. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v.93, p.401-405, 2008.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; HUBER, F.; PETRISSANS, M.; GERARDIN, P. Evaluation of thermally modified *Grevillea robusta* heartwood as an alternative to shortage of wood resource in Kenya: characterization of physicochemical properties and improvement of bio-resistance. **Bioresource Technology**, London, v.98, p.3478-3486, 2007.

MELO, R.R., DEL MENEZZI, C.H.S.; SOUZA, M.R.; STANGERLIN, D.M. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.20, n.2, p.238-249, 2013.

MENDOZA, F.; DEJMEK, P.; AGUILERA, J.M. Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. **Postharvest Biology and Technology**, v.41, p.285-295, 2006.

METSÄ-KORTELAINEN, S.; ANITIKAINEN, T.; VIITANIEMI, P. The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pines and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.64, n.3, p.192-197, 2005.

MILLITZ, H.; TJEERDSMA, B. Heat treatment of wood by the PLATO-process. In: RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.27-38.

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- und Werkstoff**, Berlin, v.62, p.23-30, 2004.

MITSUMI, K.; MURATA, A.; TOLVAJ, L. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 3. Monitoring by DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, p.164-168, 2004.

MITSUMI, K. Changes in color of spruce by repetitive treatment of light-irradiation and heat treatment. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.64, p.243-244, 2006.

MORI, C.L.S. de O.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; TRUGILHO, P.F.; GONÇALEZ, J.C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v.11, n. 1, p.137-146, 2005.

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

OLIVER-VILLANUEVA, J.V.; GASCÓN-GARRIDO, P.; IBIZA-PALACIOS, M. de S. Evaluation of thermally-treated wood of beech (*Fagus sylvatica* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) against Mediterranean termites (*Reticulitermes* spp.). **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v.71, p.391-393, 2013.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para construção civil**. São Paulo, 1997. 429f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, A. M. F.; LELIS, A.T. de; LEPAGE, E.S.; LOPEZ, G.A.C.; OLIVEIRA, L.C. de S.; CAÑEDO, M.D.; MILANO, S. Agentes destruidores da madeira. In: LEPAGE, E.S. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. cap. 5, p.99-256.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Wood surface discoloration due to simulated indoor sunlight exposure. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.66, p.51-56, 2008.

PAES, J. B.; MORAIS, V. de M.; LIMA, C. R. de. Resistência natural de nove madeiras do semi-árido brasileiro a fungos xilófagos em condições de laboratório. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.2, p.275-282, 2004.

PAES, J.B.; SANTOS, L.L. dos; SILVA, L.F. da; MOTTA, J.P.; BRAZ, R.L.; LOMBARDI, L.R. Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectona grandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 3, p. 437-442, 2015.

PALERMO, G.P.M.; LATORRACA, J.V.F.; SEVERO, E.T.D.; REZENDE, M.A.; NASCIMENTO, A.M. Transição entre o lenho juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. a partir de propriedades físicas e anatômicas. In: CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DE LA MADERA EN LA CONSTRUCCIÓN, Coimbra, Portugal. Proceedings... Coimbra: CIMAD, 2011, v.11, 9p.

PESSOA, A.M. das C., BERTI FILHO, E.B., BRITO, J.O. Avaliação da madeira termorretrificada da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida ao ataque de cupim de madeira seca, *Cryptotermes brevis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.72, p.11-16, 2006.

RAPP, A. O.; SAILER, M. Oil heat treatment of wood in Germany: state of the art. In: RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.47-64.

REMADE. Madeiras brasileiras e exóticas. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/172/madeiras-brasileiras-e-exoticas/guapuruvu>>. Acesso em: 06 maio 2013.

REPELLIN, V.; GUYONNET, R. Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition. **Holzforschung**, Berlin, v.59, p.28-34, 2005.

RIBEIRO, M.X.; BUFALINO, L.; MENDES, L.M.; SÁ, V.A. de; SANTOS, A. dos; TONOLI, G.H.D. Resistência das madeiras de Pinus, cedro australiano e seus produtos derivados ao ataque de *Cryptotermes brevis*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 3, p. 433-439, 2014.

RICHTER, H.G.; TOMASELLI, I; MORESCHI, J.C. Estudo tecnológico do Guapuruvu (*Schizolobium parahybum*) - 1ª parte: informe geral sobre as características importantes da espécie. **Floresta**, Curitiba, v.5, n.1, p.26-30, 1974.

ROUSSET, P.; PERRÉ, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, p.113-119, 2004.

SCHWANNINGER, M.; HINTERSTOISSER, B.; GIERLINGER, N.; WIMMER, R.; HANGER, J. Application of Fourier Transform Near Infrared Spectroscopy (FT-NIR) to thermally modified wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, n.6, p.483-485, 2004.

SEVERO, E.T.D.; CALONEGO, F.W. Processo de modificação térmica, por irradiação de calor, para a melhora da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica de madeira sólida. INPI: PI 0902/38-8A2., 2011.

SEVERO, E.T.D.; CALONEGO, F.W.; SANSÍGOLO, C.A. Physical and chemical changes in juvenile and mature woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v.70, p.741-747, 2012.

SEVERO, E.T.D.; CALONEGO, F.W.; SANSÍGOLO, C.A.; BOND, B. Changes in the chemical composition and decay resistance of thermally-modified *Hevea brasiliensis* wood. **Plos One**, San Francisco, v.11, n.3, e0151353, 2016.

SEVERO, E.T.D.; OLIVEIRA JR, E.F.; SANSÍGOLO, C.A.; ROCHA, C.D.; CALONEGO, F.W. Properties of juvenile and mature woods of *Hevea brasiliensis* untapped and with tapping panels. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v.71, p.815-818, 2013.

SHANKS, R.A.; GUNARATNE, L.M.W.K. Gelatinization and retrogradation of thermoplastic starch characterized using modulated temperature differential scanning calorimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v.106, p.93-99, 2011.

SHI, J.L.; KOCAEFE, D.; AMBURGEY, T.; ZHANG, J. A comparative study on brown-rot fungus decay and subterranean termite resistance of thermally modified and ACQ-C treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.65, p.353-358, 2007.

SILVA, J.O.; PASTORE, T.C.M. Fotodecomposição e proteção de madeiras tropicais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.11, n.2, p.07-13, 2004.

- SILVA, J.O.; PASTORE, T.C.M.; PASTORE JR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, Curitiba, v.17, n.1, p.17-23, 2007.
- SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274p.
- SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p.
- SKAAR, C. **Wood-water relations**. New York: Springer-Verlag, 1988. 283p.
- SMITH, V. C.; POKORNY, J. Color matching and color discrimination. In: SHEVELL, S.K. **The science of color**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier B.V., 2003. cap. 3, p.103-148.
- STAMM, A.J. Thermal degradation of wood and cellulose. **Industrial & Engineering Chemistry**, Washington, v.48, n.3, p.413-416, 1956.
- SUNDQVIST, B.; MORÉN, T. The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.60, p.375-376, 2002.
- SUNDQVIST, B.; KARLSSON, O.; WESTERMARK, U. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.40, n.7, p.549-561, 2006.
- SYRJÄNEN, T. Production and classification of heat treated wood in Finland. In: RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.11-20.
- TJEERDSMA, B.F. Heat treatment of wood: thermal modification. In: SEMINAR WOOD MODIFICATION, 2006. Limerick, Ireland. **Proceedings...** Limerick, Ireland. COFORD, 2006, s.p.
- TJEERDSMA, B.F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.63, n.2, p.102-111, 2005.
- TRIANOSK, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. Curitiba, 2010. 260f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná.
- TURKULIN, H.; SELL, J. Investigations into the photodegradation of wood using microtensile testing. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.60, p.96-105, 2002.

UNSAI, O.; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Journal Wood Science**, Tóquio, v.51, n.4, p.405-409, 2005.

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France: state of the art. In: RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.39-46.

VIDAURRE, G.B., CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; SANTOS, R.C.; VALLE, M.L.A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, Viçosa, v.36, n.2, p.365-371, 2012.

WATANABE, T.; SHITAN, N.; SUZUKI, S.; UMEZAWA, T.; SHIMADA, M.; YAZAKI, K.; HATTORI, T. Oxalate efflux transporter from the brown rot fungus *Fomitopsis palustris*. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v.76, n.23, p.7683-7690, 2010.

WASKETT, P.; SELMES, R. E. Opportunities for UK grown timber: wood modification state of the art review. **Building Research Establishment LTD**, proj. nº 203-343. 2001, 83p.

WEILAND, J.J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.61, n.2, p.216-220, 2003.

WIKBERG, H.; MAUNU, S.L. Characterization of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, v.58, p.461-466, 2004.

XU, G.; GOODELL, B. Mechanisms of wood degradation by brown-rot fungi: chelator-mediated cellulose degradation and binding of iron by cellulose. **Journal of Biotechnology**, Berlin, v.87, p.43-47, 2001.

YILGOR, N.; UNSAI, O.; KARTAL, S. N. Physical, mechanical, and chemical properties of steamed beech wood. **Forest Products Journal**, Madison, v.51, n.11/12, p.89-93, 2001.

ZAMAN, A.; ALÉN, R.; KOTILAINEN, R. Thermal behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and silver birch (*Betula pendula*) at 200-230°C. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.32, n.2, p.138-143, 2000.

ZOBEL, B.J. Inherent differences affecting wood quality in fast-grown plantations. In: IUFRO CONFERENCE, Oxford. **Proceedings...** Oxford: IUFRO, 1980. p.169-188.

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

APÊNDICE A – Análise exploratória dos dados para as variáveis das propriedades físicas, químicas, colorimétricas e nas resistências da madeira de *S. parahyba* aos fungos, cupins e intemperismo.

Tabela A-1: Estatística básica das propriedades físicas da madeira de *S. parahyba*.

Propriedade Física da Madeira	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Kolmogorov -Smirnov (p valor)
Rendimento no processo	96	98,9	100,0	10,3	>0,150
ρ básica	96	0,241	0,244	0,022	>0,150
ρ 0%	96	0,260	0,262	0,025	>0,150
ρ 9% (21°C-65%UR)	96	0,273	0,274	0,027	>0,150
TUE 9% (21°C-65%UR)	96	7,0	7,3	1,6	>0,150
Incha. Volum. Máximo	96	7,7	7,7	2,2	<0,001
Incha. Long. Máximo	96	0,23	0,21	0,12	>0,150
Incha. Radial Máximo	96	2,02	2,01	0,53	0,071
Incha. Tangen. Máximo	96	5,35	5,44	1,62	<0,001
Fator anisotrópico	96	2,66	2,66	0,53	>0,150
Q Longitudinal	96	0,0194	0,0188	0,010	<0,001
Q Radial	96	0,109	0,108	0,013	<0,001
Q Tangencial	96	0,191	0,189	0,018	>0,150

Tabela A-2: Estatística básica das propriedades químicas da madeira de *S. parahyba*.

Propriedades Químicas da Madeira	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Kolmogorov -Smirnov (p valor)
Teor de Extrativos Totais	32	3,91	3,79	1,68	0,138
Teor de Lignina Klason	32	25,74	24,77	3,80	0,121
Teor de Holocelulose	32	74,40	77,06	7,56	>0,150

Tabela A-3: Estatística básica das propriedades colorimétricas da madeira de *S. parahyba*.

Propriedades Colorimétricas da Madeira	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Kolmogorov -Smirnov (p valor)
L*	32	64,90	71,02	16,62	>0,150
a*	32	7,67	7,52	2,07	>0,150
b*	32	21,66	20,89	3,87	<0,001
C*	32	23,08	22,56	3,79	<0,001
E	32	69,15	75,52	15,90	>0,150
h	32	70,22	71,04	5,94	>0,150

Tabela A-4: Estatística básica das variáveis de resistência da madeira de *S. parahyba* aos fungos *P. sanguineus* e *G. trabeum*

Resistência da Madeira aos Fungos Xilófagos	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Kolmogorov-Smirnov (p valor)
TUE após o <i>P. sanguineus</i>	96	454,3	451,2	107,0	0,108
Perda de Massa com <i>P. sanguineus</i>	96	26,1	29,3	12,4	<0,001
TUE após o <i>G. trabeum</i>	96	465,5	488,4	111,0	0,050
Perda de Massa com <i>G. trabeum</i>	96	35,6	42,6	17,8	>0,150

Tabela A-5: Estatística básica das variáveis de resistência da madeira de *S. parahyba* ao cupim *C. brevis*.

Resistência da Madeira ao Cupim	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Kolmogorov-Smirnov (p valor)
Perda de Massa	64	2,64	2,35	1,59	<0,001
Cupins mortos	64	15,9	15,0	12,6	<0,001
Número de furos	64	1,6	2,0	0,9	>0,150
Nota de ataque	72	3,8	4,0	0,3	<0,001

Tabela A-6: Estatística básica das variáveis de resistência da madeira ao intemperismo.

Propriedades Colorimétricas da Madeira	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Kolmogorov-Smirnov (p valor)
ΔL^*	32	-7,13	-8,74	13,03	>0,150
Δa^*	32	2,38	2,27	4,27	>0,150
Δb^*	32	-0,66	-1,17	5,73	>0,150
ΔC^*	32	6,54	5,46	3,64	0,107
ΔE	32	14,76	13,70	7,39	>0,150
Δh	32	-5,67	-7,44	5,68	>0,150

As variáveis tiveram distribuição normal, exceto os inchamentos volumétrico e tangencial máximos, os coeficientes de retratibilidade longitudinal e radial, os padrões colorimétricos 'b*' e 'C*', as perdas de massa para o *P. sanguineus* e para o *C. brevis* e as percentagens de cupins mortos. A normalização dessas respectivas variáveis foi realizada elevando-as a 0,5, 0,5, 0,26, 0,5, 4, 4, 0,71, 0,5 e 0,75, como recomendado pela conversão de Box Cox. Para todas as variáveis, foi realizado o teste paramétrico em blocos ao acaso (ANOVA), levando em conta o tipo de lenho e o tratamento térmico, e o teste de médias de Tukey. Para a nota de ataque de cupins foi realizado o teste não paramétrico Kruskal Wallis e o teste de medianas de Dunn. Todos os testes foram realizados com 5% de significância.

APÊNDICE B – Análise de variância das propriedades físicas, químicas e colorimétricas e das resistências da madeira de *S. parahyba* aos fungos, cupins e intemperismo.

Tabela B-1: Análise de variância para o rendimento no processo, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	1432,708	477,569	5,002	0,003
Lenho	1	51,042	51,042	0,535	0,467
Tratamento x Lenho	3	204,542	68,181	0,714	0,546
Resíduo	88	8401,333	95,470		
Total	95	10089,625			

Tabela B-2: Análise de variância para a variável massa específica básica, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,00426	0,00142	3,187	0,028
Lenho	1	0,00109	0,00109	2,457	0,121
Tratamento x Lenho	3	0,00121	0,000404	0,907	0,441
Resíduo	88	0,0392	0,000445		
Total	95	0,0457			

Tabela B-3: Análise de variância para a variável massa específica a 0%, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,0105	0,00350	6,695	<0,001
Lenho	1	0,00123	0,00123	2,361	0,128
Tratamento x Lenho	3	0,00136	0,000454	0,869	0,460
Resíduo	88	0,0459	0,000522		
Total	95	0,0590			

Tabela B-4: Análise de variância para a variável massa específica na condição de 21°C-65%UR, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,0185	0,00617	11,054	<0,001
Lenho	1	0,00194	0,00194	3,468	0,066
Tratamento x Lenho	3	0,00206	0,000686	1,230	0,304
Resíduo	88	0,0491	0,000558		
Total	95	0,0716			

Tabela B-5: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	233,390	77,797	1164,801	<0,001
Lenho	1	0,187	0,187	2,804	0,098
Tratamento x Lenho	3	2,296	0,765	11,457	<0,001
Resíduo	88	5,877	0,0668		
Total	95	241,750			

Tabela B-6: Análise de variância para a variável inchamento volumétrico máximo^{0,5}, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	13,732	4,577	238,338	<0,001
Lenho	1	0,0457	0,0457	2,379	0,127
Tratamento x Lenho	3	0,110	0,0366	1,906	0,134
Resíduo	88	1,690	0,0192		
Total	95	15,578			

Tabela B-7: Análise de variância para a variável inchamento linear longitudinal máximo, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,863	0,288	63,953	<0,001
Lenho	1	0,0615	0,0615	13,668	<0,001
Tratamento x Lenho	3	0,0457	0,0152	3,388	0,022
Resíduo	88	0,396	0,00450		
Total	95	1,367			

Tabela B-8: Análise de variância para a variável inchamento linear radial máximo, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	19,354	6,451	82,988	<0,001
Lenho	1	0,0160	0,0160	0,206	0,651
Tratamento x Lenho	3	0,517	0,172	2,215	0,092
Resíduo	88	6,841	0,0777		
Total	95	26,727			

Tabela B-9: Análise de variância para a variável inchamento linear tangencial máximo^{0,5}, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	10,122	3,374	134,152	<0,001
Lenho	1	0,0670	0,0670	2,663	0,106
Tratamento x Lenho	3	0,0943	0,0314	1,250	0,297
Resíduo	88	2,213	0,0252		
Total	95	12,497			

Tabela B-10: Análise de variância para a variável fator anisotrópico, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	6,202	2,067	9,136	<0,001
Lenho	1	0,0357	0,0357	0,158	0,692
Tratamento x Lenho	3	0,952	0,317	1,402	0,248
Resíduo	88	19,913	0,226		
Total	95	27,102			

Tabela B-11: Análise de variância para a variável coeficiente de retratibilidade longitudinal^{0,26}, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,0116	0,00386	2,372	0,076
Lenho	1	0,00482	0,00482	2,958	0,089
Tratamento x Lenho	3	0,00977	0,000326	2,001	0,120
Resíduo	88	0,143	0,000163		
Total	95	0,169			

Tabela B-12: Análise de variância para a variável coeficiente de retratibilidade radial^{0,5}, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,0133	0,00444	17,532	<0,001
Lenho	1	0,000168	0,000168	0,665	0,417
Tratamento x Lenho	3	0,00286	0,000952	3,759	0,014
Resíduo	88	0,0223	0,000253		
Total	95	0,0386			

Tabela B-13: Análise de variância para a variável coeficiente de retratibilidade tangencial, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,00109	0,000363	1,179	0,322
Lenho	1	0,00260	0,00260	8,472	0,005
Tratamento x Lenho	3	0,00185	0,000618	2,011	0,118
Resíduo	88	0,0270	0,000307		
Total	95	0,0362			

Tabela B-14: Análise de variância para a variável teor de extrativos totais, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	53,217	17,739	19,995	<0,001
Lenho	1	0,641	0,641	0,723	0,404
Tratamento x Lenho	3	12,662	4,221	4,758	0,010
Resíduo	24	21,292	0,887		
Total	31	87,813			

Tabela B-15: Análise de variância para a variável teor de lignina Klason, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	371,316	123,772	62,072	<0,001
Lenho	1	12,326	12,326	6,181	0,020
Tratamento x Lenho	3	16,988	5,663	2,84	0,059
Resíduo	24	47,856	1,994		
Total	31	448,485			

Tabela B-16: Análise de variância para a variável teor de holocelulose, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	1502,054	500,685	68,676	<0,001
Lenho	1	54,067	54,067	7,416	0,012
Tratamento x Lenho	3	39,776	13,259	1,819	0,171
Resíduo	24	174,974	7,291		
Total	31	1770,870			

Tabela B-17: Análise de variância para a variável L*, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	8409,610	2803,203	515,674	<0,001
Lenho	1	4,068	4,068	0,748	0,396
Tratamento x Lenho	3	21,576	7,192	1,323	0,290
Resíduo	24	130,464	5,436		
Total	31	8565,719			

Tabela B-18: Análise de variância para a variável a*, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	113,060	37,687	64,716	<0,001
Lenho	1	3,531	3,531	6,064	0,021
Tratamento x Lenho	3	1,721	0,574	0,985	0,416
Resíduo	24	13,976	0,582		
Total	31	132,289			

Tabela B-19: Análise de variância para a variável b*⁴, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	797301006358,994	265767002119,665	183,996	<0,001
Lenho	1	9588155443,641	9588155443,641	6,638	0,017
Tratamento x Lenho	3	18747727028,389	6249242342,796	4,326	0,014
Resíduo	24	34665995074,208	1444416461,425		
Total	31	860302883905,232			

Tabela B-20: Análise de variância para a variável E, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	7628,813	2542,938	366,154	<0,001
Lenho	1	3,406	3,406	0,490	0,490
Tratamento x Lenho	3	33,992	11,331	1,631	0,208
Resíduo	24	166,680	6,945		
Total	31	7832,891			

Tabela B-21: Análise de variância para a variável h, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	981,954	327,318	143,484	<0,001
Lenho	1	17,627	17,627	7,727	0,010
Tratamento x Lenho	3	38,622	12,874	5,643	0,005
Resíduo	24	54,749	2,281		
Total	31	1092,952			

Tabela B-22: Análise de variância para a C⁴, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	117000000000,000	390124649916,072	127,865	<0,001
Lenho	1	6793069301,883	6793069301,883	2,226	0,149
Tratamento x Lenho	3	24958829698,034	8319609899,345	2,727	0,066
Resíduo	24	73225585908,796	3051066079,533		
Total	31	127500000000,000			

Tabela B-23: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio após o ensaio de degradação com o fungo *P. sanguineus*, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	534263,928	178087,976	29,590	<0,001
Lenho	1	6742,230	6742,230	1,120	0,293
Tratamento x Lenho	3	16019,764	5339,921	0,887	0,451
Resíduo	88	529636,039	6018,591		
Total	95	1086661,960			

Tabela B-24: Análise de variância para a variável perda de massa dos corpos de prova no ensaio de degradação com o fungo *P. sanguineus*^{0,71}, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	1101,154	367,051	134,767	<0,001
Lenho	1	17,340	17,340	6,367	0,013
Tratamento x Lenho	3	34,219	11,406	4,188	0,008
Resíduo	88	239,677	2,724		
Total	95	1392,390			

Tabela B-25: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio após o ensaio de degradação com o fungo *G. trabeum*, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	762637,332	254212,444	59,834	<0,001
Lenho	1	12259,054	12259,054	2,885	0,093
Tratamento x Lenho	3	20660,394	6886,798	1,621	0,190
Resíduo	88	373881,391	4248,652		
Total	95	1169438,170			

Tabela B-26: Análise de variância para a variável perda de massa dos corpos de prova no ensaio de degradação com o fungo *G. trabeum*, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	26989,415	8996,472	288,278	<0,001
Lenho	1	331,516	331,516	10,623	0,002
Tratamento x Lenho	3	151,993	50,664	1,623	0,190
Resíduo	88	2746,275	31,208		
Total	95	30219,199			

Tabela B-27: Análise de variância para a variável perda de massa dos corpos de prova no ensaio resistência ao cupim *C. brevis*^{0,5}, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	0,301	0,100	0,395	0,757
Lenho	1	0,140	0,140	0,551	0,461
Tratamento x Lenho	3	0,234	0,0781	0,307	0,820
Resíduo	56	14,262	0,255		
Total	63	14,938			

Tabela B-28: Análise de variância para a variável percentagem de cupins mortos^{0,75} no ensaio de resistência ao cupim *C. brevis*, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	34,645	11,548	0,427	0,735
Lenho	1	4,145	4,145	0,153	0,697
Tratamento x Lenho	3	17,582	5,861	0,217	0,885
Resíduo	56	1515,651	27,065		
Total	63	1572,024			

Tabela B-29: Análise de variância para a variável número de furos nos corpos de prova após o ensaio de resistência ao cupim *C. brevis*, segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	4,422	1,474	1,752	0,167
Lenho	1	0,0156	0,0156	0,0186	0,892
Tratamento x Lenho	3	1,172	0,391	0,464	0,708
Resíduo	56	47,125	0,842		
Total	63	52,734			

Tabela B-30a: Análise de Kruskal-Wallis para nota de ataque no ensaio de resistência ao cupim *C. brevis*, segundo os tratamentos de modificação térmica.

Tratamento	N	Média	Mediana	Z	p-valor
Pinus	8	4	4	2,29	<0,001
Lenho Juvenil	16	3,771	4	-0,14	
Lenho Adulto	16	3,740	3,667	-1,31	

Tabela B-30b: Análise de Kruskal-Wallis para a variável nota de ataque no ensaio de resistência ao cupim *C. brevis*, segundo os tipos de lenho de *Schizolobium parahyba*.

Tratamento	N	Média	Mediana	Z	p-valor
Pinus	8	4	4	2,29	<0,001
Controle	16	4	4	3,47	
180°C	16	3,771	4	-0,14	
200°C	16	3,771	3,667	-0,73	
220°C	16	3,479	3,5	-4,33	

Tabela B-31: Análise de variância para a variável ΔL^* , segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	2966,734	988,911	11,177	<0,001
Lenho	1	70,389	70,389	0,796	0,381
Tratamento x Lenho	3	98,609	32,870	0,372	0,774
Resíduo	24	2123,424	88,476		
Total	31	5259,156			

Tabela B-32: Análise de variância para a variável Δa^* , segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	280,914	93,638	8,712	<0,001
Lenho	1	20,834	20,834	1,938	0,177
Tratamento x Lenho	3	5,170	1,723	0,160	0,922
Resíduo	24	257,956	10,748		
Total	31	564,874			

Tabela B-33: Análise de variância para a variável Δb^* , segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	452,136	150,712	7,075	0,001
Lenho	1	15,694	15,694	0,737	0,399
Tratamento x Lenho	3	37,471	12,490	0,586	0,630
Resíduo	24	511,278	21,303		
Total	31	1016,580			

Tabela B-34: Análise de variância para a variável ΔE , segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	515,912	171,971	4,084	0,018
Lenho	1	1,229	1,229	0,0292	0,866
Tratamento x Lenho	3	165,344	55,115	1,309	0,294
Resíduo	24	1010,575	42,107		
Total	31	1693,059			

Tabela B-35: Análise de variância para a variável Δh° , segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	511,920	170,640	9,923	<0,001
Lenho	1	44,345	44,345	2,576	0,121
Tratamento x Lenho	3	32,578	10,859	0,631	0,602
Resíduo	24	412,712	17,196		
Total	31	1001,554			

Tabela B-36: Análise de variância para a ΔC^* , segundo os tipos de lenho de *S. parahyba* e os tratamentos de modificação térmica.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	3	116,688	38,896	3,806	0,023
Lenho	1	15,263	15,263	1,494	0,234
Tratamento x Lenho	3	33,193	11,064	1,083	0,375
Resíduo	24	245,247	10,219		
Total	31	410,392			

APÊNDICE C – Teste de Tukey e de Dunn para comparações múltiplas das variáveis classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica.

Tabela C-1a: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de propriedades físicas classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho juvenil de *S. parahyba*.

Propriedade Física da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
Rendimento	100,0	AB	104,3	A	99,7	B	94,4	B
ρ básica	0,235	AB	0,246	A	0,239	B	0,232	B
ρ 0%	0,258	AB	0,268	A	0,256	B	0,243	B
ρ 9% (21°C-65%UR)	0,274	AB	0,281	A	0,267	BC	0,250	C
TUE 9% (21°C-65%UR)	9,2	A	7,7	B	6,6	C	4,5	D
Inch. Volum. Máximo	9,67	A	9,07	B	7,34	C	4,44	D
Inch. Tangen. Máximo	6,63	A	6,05	B	5,26	C	2,97	D
Inch. Radial Máximo	2,45	A	2,54	A	1,77	B	1,30	C
Inch. Long. Máximo	0,397	A	0,309	B	0,199	C	0,127	D
Fator anisotrópico	2,74	A	2,48	A	2,99	A	2,34	B
Q Tangencial	0,183	A	0,188	A	0,188	A	0,184	A
Q Radial	0,097	AB	0,115	B	0,103	A	0,117	B
Q Longitudinal	0,022	A	0,022	A	0,019	A	0,016	A

Tabela C-1b: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de propriedades físicas classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho adulto de *S. parahyba*.

Propriedade Física da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
Rendimento	100,0	AB	105,0	A	93,2	B	94,6	B
ρ básica	0,246	AB	0,256	A	0,234	B	0,240	B
ρ 0%	0,270	AB	0,282	A	0,250	B	0,252	B
ρ 9% (21°C-65%UR)	0,286	AB	0,301	A	0,262	BC	0,260	C
TUE 9% (21°C-65%UR)	8,9	A	7,7	B	6,7	C	5,1	D
Inch. Volum. Máximo	10,26	A	9,11	B	7,08	C	4,99	D
Inch. Tangen. Máximo	7,26	A	6,31	B	5,05	C	3,30	D
Inch. Radial Máximo	2,49	A	2,34	A	1,82	B	1,50	C
Inch. Long. Máximo	0,301	A	0,295	A	0,108	B	0,125	B
Fator anisotrópico	2,98	A	2,72	A	2,82	A	2,19	B
Q Tangencial	0,205	A	0,201	A	0,186	A	0,193	A
Q Radial	0,108	AB	0,108	B	0,101	A	0,123	B
Q Longitudinal	0,018	A	0,020	A	0,016	A	0,023	A

Tabela C-2a: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis das propriedades químicas classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho juvenil de *S. parahyba*.

Propriedade colorimétrica da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
Teor de Extrativos Totais	1,78	A	2,79	AB	3,61	B	6,88	C
Teor de Lignina Klason	25,32	A	24,47	A	24,45	A	31,21	B
Teor de Holocelulose	80,81	A	78,95	A	72,00	B	60,63	C

Tabela C-2b: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis das propriedades químicas classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho adulto de *S. parahyba*.

Propriedade Colorimétrica da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
Teor de Extrativos Totais	3,25	A	3,66	A	4,24	A	5,06	B
Teor de Lignina Klason	22,58	A	21,97	A	23,93	A	32,00	B
Teor de Holocelulose	80,59	A	80,95	A	74,62	B	66,63	C

Tabela C-3a: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de propriedades colorimétricas classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho juvenil de *S. parahyba*.

Propriedade colorimétrica da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
L*	80,41	A	74,44	B	66,27	C	39,91	D
a*	5,68	A	7,05	B	9,20	C	10,09	C
b*	19,06	A	21,52	B	26,53	C	18,83	A
E	82,84	A	77,81	B	71,98	C	45,27	D
h	73,46	A	71,85	A	70,84	A	61,76	B
C*	19,90	A	22,65	B	28,08	C	21,36	A

Tabela C-3b: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de propriedades colorimétricas classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho adulto de *S. parahyba*.

Propriedade Colorimétrica da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
L*	80,85	A	75,65	B	64,72	C	36,95	D
a*	4,46	A	6,38	B	9,27	C	9,26	C
b*	20,07	A	23,73	B	27,02	C	16,49	A
E	83,43	A	79,55	B	70,75	C	41,55	D
h	75,50	A	74,96	A	71,09	B	60,31	C
C*	20,57	A	24,58	B	28,56	C	18,92	A

Tabela C-4a: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de resistência da madeira aos fungos *P. sanguineus* e *G. trabeum* segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho juvenil de *S. parahyba*.

Resistência da Madeira aos Fungos Xilófagos	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
TUE dos c.p. após o ensaio com <i>P. sanguineus</i>	501,0	A	477,9	A	489,8	A	314,8	B
Perda de Massa pelo <i>P. sanguineus</i>	29,3	A	31,9	A	32,6	A	5,1	B
TUE dos c.p. após o ensaio com <i>G. trabeum</i>	550,0	A	497,3	B	485,1	B	284,4	C
Perda de Massa pelo <i>G. trabeum</i>	46,8	A	43,1	B	40,8	B	4,4	C

Tabela C-4b: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de resistência da madeira aos fungos *P. sanguineus* e *G. trabeum* segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho adulto de *S. parahyba*.

Resistência da Madeira aos Fungos Xilófagos	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
TUE dos c.p. após o ensaio com <i>P. sanguineus</i>	553,7	A	470,7	A	481,5	A	344,5	B
Perda de Massa pelo <i>P. sanguineus</i>	37,1	A	34,5	AB	28,7	B	9,9	C
TUE dos c.p. após o ensaio com <i>G. trabeum</i>	566,8	A	483,1	B	505,1	B	352,2	C
Perda de Massa pelo <i>G. trabeum</i>	53,5	A	45,4	B	41,2	B	9,9	C

Tabela C-5a: Teste de comparações de médias de Tukey e de mediana de Dunn para as variáveis de resistência das madeiras de *S. parahyba* ao cupim *C. brevis* segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho juvenil de *S. parahyba*.

Resistência da Madeira ao Cupim de Madeira Seca	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
Perda de Massa no ensaio com <i>C. brevis</i>	2,8	A	2,7	A	2,2	A	2,3	A
Percentagem de cupins mortos	21,9	A	11,9	A	16,9	A	16,3	A
Número de furos nos corpos de prova	1,8	A	1,9	A	1,8	A	1,3	A
	Mediana	Dunn	Mediana	Dunn	Mediana	Dunn	Mediana	Dunn
Nota de ataque	4,00	A	3,83	A	3,79	AB	3,46	B

Tabela C-5b: Teste de comparações de médias de Tukey e de mediana de Dunn para as variáveis de resistência das madeiras de *S. parahyba* ao cupim *C. brevis* segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho adulto de *S. parahyba*.

Resistência da Madeira ao Cupim de Madeira Seca	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
Perda de Massa no ensaio com <i>C. brevis</i>	2,9	A	2,8	A	3,2	A	2,4	A
Percentagem de cupins mortos	15,0	A	14,4	A	15,6	A	15,0	A
Número de furos nos corpos de prova	2,1	A	1,8	A	1,4	A	1,3	A
	Mediana	Dunn	Mediana	Dunn	Mediana	Dunn	Mediana	Dunn
Nota de ataque	4,00	A	3,71	A	3,75	AB	3,50	B

Tabela C-6a: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de resistência ao intemperismo classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho juvenil de *S. parahyba*.

Propriedade colorimétrica da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
ΔL^*	-15,68	A	-7,19	A	-6,68	A	6,97	B
Δa^*	5,34	A	2,46	AB	0,94	B	-2,43	B
Δb^*	4,36	A	0,24	AB	-5,42	B	-4,64	B
ΔE	18,13	A	11,97	AB	15,91	B	12,23	B
Δh^9	-8,35	A	-4,61	A	-5,45	A	+0,43	B
ΔC^*	8,35	A	6,90	AB	8,07	B	5,59	B

Tabela C-6b: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de resistência ao intemperismo classificadas segundo os tratamentos de modificação térmica, para o lenho adulto de *S. parahyba*.

Propriedade Colorimétrica da Madeira	TRATAMENTO							
	Controle		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
ΔL^*	-22,81	A	-12,87	A	-6,91	A	8,14	B
Δa^*	8,15	A	3,26	AB	1,91	B	-0,55	B
Δb^*	6,46	A	-1,80	AB	-3,81	B	-0,71	B
ΔE	25,14	A	13,43	AB	10,44	B	10,80	B
Δh^9	-12,83	A	-8,76	A	-6,48	A	+0,67	B
ΔC^*	10,48	A	3,81	AB	8,87	B	3,22	B