

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

Walmir Marques de Menezes

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM ESCALA INDUSTRIAL
NA QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* Linn. F.**

Santa Maria, RS, Brasil
2017

Walmir Marques de Menezes

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM ESCALA INDUSTRIAL NA
QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* Linn. F.**

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

Orientador Prof. Dr. Elio José Santini

Santa Maria, RS
2017

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

Marques de Menezes, Walmir
EFEITO DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM ESCALA INDUSTRIAL NA
QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* Linn. F / Walmir
Marques de Menezes.- 2017.
131 p.; 30 cm

Coorientadores: , , Elio José Santini
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2017

1. Composição química 2. Propriedades físicas e mecânicas
3. Fungos xilófagos I. , II. , III. , IV. , Elio José
Santini V. Título.

2017

Todos os direitos autorais reservados a **Walmir Marques de Menezes**.

A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante citação da fonte.

Walmir Marques de Menezes

Efeito da modificação térmica em escala industrial na qualidade da madeira de *Tectona grandis* Linn. F.

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

Aprovado em 23 de fevereiro de 2017:

Elio José Santini, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Cristiane Pedrazzi, Dr^a. (UFSM)

Karina Soares Modes, Dr^a. (UFSC)

Magnos Alan Vivian, Dr. (UFSC)

Rafael Beltrame, Dr. (UFPel)

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma contribuíram para a conclusão desta pesquisa, e de maneira especial agradeço:

- Há Deus por me conceber conhecimento, caráter, sabedoria e força nesta trajetória;
- A minha esposa pela compreensão e carinho, aos meus pais e irmãs pela amizade, forças, afeto e apoio, demonstrando a verdadeira base familiar;
- Ao meu Orientador professor Dr. Elio José Santini, pela confiança, amizade, conhecimento, aprendizado e orientação nesse tempo de convívio;
- Ao professor Dr. Djeison Cesar Batista da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), que dispôs do seu tempo para me auxiliar nessa pesquisa;
- A todos os funcionários da Empresa *TWBrazil*, e em especial ao seu Leonardo Puppi Bernardi que abriu as portas para que essa pesquisa pudesse ser concluída;
- Ao professor Dr. Rafael Beltrame e ao curso de Eng. Industrial Madeireira da UFPel pelo auxílio nos ensaios mecânicos e de fungos decompositores;
- A professora Dr^a. Cristiane Pedrazzi pela disponibilidade do laboratório de químicas da madeira (LAQUIM) da Universidade federal de Santa Maria (UFSM), e aos colegas Rodrigo Coldebella e Bruna Mohr pelo auxílio nas análises químicas;
- A colega Sabrina Finatto pela amizade e ajuda durante os ensaios de apodrecimento acelerado no laboratório do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPel;
- Aos professores doutores membros da banca de defesa da tese, por aceitar fazer parte desse momento de grande importância e, ainda pela disponibilidade e correções desse trabalho;
- Aos funcionários do Laboratório de Produtos Florestais da UFSM Nelson, Tarso e Fabiana por toda ajuda no decorrer deste estudo;
- A Rone Maria que auxiliou na abertura do doutorado na Tecnologia de Produtos Florestais da UFSM.
- Aos colegas do Laboratório de Produtos Florestais da UFSM pelas horas de descontração, amizade, troca de conhecimento e ajuda principalmente nas horas difíceis, em especial a Maiara Talgatti e Roger Ravazzi;
- Ao meu grande amigo e colega Joel Telles de Souza, pela amizade, força e ajuda, que iniciou na graduação e se estende até hoje;
- À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Departamento de Ciências Florestais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF-UFSM), pela oportunidade de realização do curso de doutorado;
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio da bolsa de estudo.

RESUMO

EFEITO DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM ESCALA INDUSTRIAL NA QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* Linn. F.

AUTOR: WALMIR MARQUES DE MENEZES
ORIENTADOR: DR. ELIO JOSÉ SANTINI

O processo da modificação térmica da madeira é a aplicação de calor a fim de melhorar a sua qualidade. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o efeito da modificação térmica em escala industrial na qualidade da madeira de *Tectona grandis* Linn. F. Para isso, foram utilizadas tábuas de aproximadamente 35 x 100 x 2200 mm (espessura, largura e comprimento), separadas e numeradas em classes de qualidade. As tábuas de primeira classe foram aquelas com a maior presença de cerne e livres de defeitos, tais como rachaduras, nós, empenamentos, dentre outros, ao passo que as de segunda classe apresentaram porções maiores de alburno e os defeitos citados anteriormente. Desta forma, foram separados quatro lotes de madeira, em quatro tratamentos sendo o T1 e T2 para a madeira natural de primeira e segunda qualidade respectivamente e, na mesma ordem de qualidade, entretanto modificadas termicamente os tratamentos T3 e T4. As peças originalmente de 2200 mm de comprimento dividiram-se em duas peças de iguais dimensões (1100 mm), sendo uma delas correspondendo à madeira testemunha (T1 e T2), ou seja, a não modificada termicamente, para posterior comparação com a tratada (T3 e T4). A modificação térmica VAP HolzSysteme® foi conduzida de acordo com o programa utilizado pela empresa, em que a temperatura final foi de 160°C. Posteriormente ao tratamento térmico, a madeira foi testada pelo efeito na composição química; nas propriedades físicas e mecânicas e, por fim, na resistência aos fungos xilófagos. As análises químicas seguiram as metodologias descritas nas normas Technical Association of pulp and Paper Industry - TAPPI (Tappi, 1999), onde foi determinado os teores de extrativos totais, de lignina Klason, de holocelulose, de hemicelulose e de alfa celulose. Para a realização dos ensaios físicos (teor de umidade de equilíbrio, massa específica aparente, inchamento total e anisotropia de inchamento) foram utilizados os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2000). A colorimetria seguiu a norma ASTM D 2244-09a (ASTM, 2009). O teste de flexão estática e compressão paralela as fibras seguiram a norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2000). O teste de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola foi conforme a norma ASTM D - 905 (ASTM, 2008a) e o percentual de falhas dos corpos de prova, seguiu a norma ASTM D - 3110 (ASTM, 2008 b). A montagem das análises biológicas seguiu a recomendação da norma Europeia EN 113 (1996). O fungo utilizado foi o *Ganoderma applanatum* (podridão-branca) e a resistência foi avaliada pela norma ASTM D 2017. O teor de extrativos e alfa celulose aumentaram significativamente com a modificação térmica, em contrapartida, a holocelulose e hemicelulose reduziram, e ainda, para esse último, a qualidade da madeira pode ter influenciado. O teor de lignina Klason não foi alterado significativamente pela temperatura e pela qualidade da madeira. O teor de umidade de equilíbrio, a massa específica aparente, o inchamento total e anisotropia de inchamento da madeira diminuíram após o tratamento térmico, devido à perda de massa da hemicelulose e aumento dos extrativos totais. Por conseguinte, elevou-se a estabilidade dimensional da madeira. A colorimetria foi influenciada pela modificação térmica da madeira, por meio do escurecimento e aumento da tonalidade avermelhada. A qualidade da madeira não influenciou nas propriedades físicas, exceto a colorimetria, que foi alterada pela diferença de proporção do alburno e cerne dos corpos de prova. As falhas na madeira causada na resistência do cisalhamento na linha de cola foram satisfatórias. A resistência mecânica de todos os testes foi reduzida pela qualidade da madeira e a modificação térmica, que neste último caso, causou a degradação da hemicelulose. A madeira foi considerada muito resistente, apesar da perda de massa em contato com o fungo ter aumentado na madeira tratada termicamente. Os resultados podem ter sido influenciados pela qualidade da madeira e a degradação da hemicelulose. Conclui-se que de maneira geral, o efeito da modificação térmica na qualidade da madeira foi significativo em todas as propriedades avaliadas (químicas, físicas, mecânicas e biológicas), sendo que, a presença de cerne, alburno tiveram pouca influência. A principal responsável pelas mudanças na madeira após a modificação térmica foi a degradação da hemicelulose.

Palavras-chave: Composição química. Propriedades físicas e mecânicas. Fungos xilófagos.

ABSTRACT

THE EFFECT OF THERMAL MODIFICATION IN INDUSTRIAL SCALE ON WOOD QUALITY OF *Tectona grandis* Linn. F.

AUTHOR: WALMIR MARQUES DE MENEZES

ADVISOR: DR. ELIO JOSÉ SANTINI

The process of the thermal modification on wood is the application of heat in order to improve its quality. The objective of this research was to evaluate the effect of the thermal modification in industrial scale on the wood quality of *Tectona grandis* Linn. F. To this end, boards of approximately 35 x 100 x 2200 mm (thickness, width and length), separated and numbered in quality classes. First-class boards were with the highest presence of core and free of defects, such as cracks, knots, warps, among others, while the second class boards presented larger portions of sapwood and defects mentioned above. In this way, four batches of wood were separated into four treatments, with T1 and T2 being the natural wood of the first and second quality respectively, and in the same order of quality, however, the T3 and T4 treatments were thermally modified. The original pieces of 2200 mm length were divided into two pieces of equal size (1100 mm), one of them corresponding to the wood control (T1 and T2), that is, the non-thermally modified, for later comparison with the treated wood (T3 and T4). The VAP HolzSysteme® thermal modification was conducted according to the program used by the company, where the final temperature was 160 ° C. After the heat treatment, the wood was tested by the quantification of defects; Effect on chemical composition; In the physical and mechanical properties, and, finally, of the resistance to xylophagous fungi. The defects were analyzed by the standard NBR 9487 (ABNT, 1986) through cracks (top and surface) and warping (bending, bending and recessing). In addition, the moisture content was also measured. The chemical analyzes followed the methodologies described in the Technical Association of Pulp and Paper Industry - TAPPI (Tappi, 1999), through the analysis of total extractives, lignin Klason, holocellulose, hemicellulose and alpha cellulose. For the physical tests (equilibrium moisture content, apparent specific mass, total swelling and swelling anisotropy), the procedures established in ASTM D 143-94 (ASTM, 2000) were used. Colorimetry followed ASTM D 2244-09a (ASTM, 2009). The test of static flexion and parallel compression of the fibers followed the standard ASTM D 143-94 (ASTM, 2000). The test of shear strength in parallel compression to the fibers in the glue line was according to ASTM D - 905 (ASTM, 2008a) and the percentage of failure of the specimens, followed the standard ASTM D - 3110 (ASTM, 2008 b). The assembly of the biological analyzes followed the recommendation of the European norm EN 113 (1996). The fungus used was *Ganoderma applanatum* (white rot) and the resistance was evaluated by the ASTM D 2017 standard. The heat treatment influenced the increase of the moisture content, but this did not interfere with the quality of the wood. The quality of the thermal modification was satisfactory, if evaluated by the defects of cracks and warpage. In addition, the quality of the wood was paramount for the lowest defect rate. The content of extractive and alpha cellulose increased significantly with thermal modification, in contrast, holocellulose and hemicellulose reduced, and still, for the latter, the quality of the wood may have influenced. The Klason lignin content was not significantly altered by temperature or by the quality of the wood. The equilibrium moisture content, apparent specific mass of the wood, total swelling and anisotropy of wood swelling decreased after heat treatment, due to loss of hemicellulose mass and increase of total extractives. Therefore, the dimensional stability of the wood has been increased. The colorimetry was influenced by the thermal modification of the wood, through the darkening and increase of the reddish hue. The quality of the wood did not influence the physical properties, except the colorimetry, which was altered by the difference in the proportion of the sapwood and core of the specimens. The failures in the wood caused by the shear strength in the glue line were satisfactory. The mechanical strength of all tests was reduced by the quality of the wood and the thermal modification, which in the latter case caused hemicellulose degradation. The wood was considered very resistant, although the loss of mass in contact with the fungus increased in the thermally treated wood. The results may have been influenced by the quality of the wood and the degradation of the hemicellulose. It was concluded that, in general, the effect of the thermal modification on the quality of the wood was significant in all evaluated properties (chemical, physical, mechanical and biological), and the presence of heartwood, sapwood had little influence. The main responsible for the changes in the wood after the thermal modification was the degradation of hemicellulose.

Key words: Chemical composition. Physical and mechanical properties. Fungi xylophagous.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição natural da teca no continente asiático	13
Figura 1.2 - Equipamento utilizado nos processos patenteados da modificação térmica	19
Figura 1.3 - Vista geral do equipamento (A) e equipamento carregado de madeira (B).....	21
Figura 1.4 - Mudanças dos componentes químicos da madeira causadas pela ação da temperatura	25
Figura 1.5 - Mecanismos de reação da madeira modificada termicamente.....	27
Figura 1.6 - Relação sob adsorção e duas condições de dessorção	32
Figura 1.7 - Sistema de coordenadas de cores cielab 1976	35
Figura 1.8 - Representação dos esforços mecânicos	38
Figura 1.9 - Diagrama de tensão pela deformação específica	39
Figura 1.10 - Esquema do corte das tábuas para a amostragem	44
Figura 1.11 - Componentes do equipamento utilizado no processo de modificação térmica .	45
Figura 1.12 - Visão geral do cilindro utilizado no processo de modificação térmica	46
Figura 1.13 - Programa do processo de modificação térmica VAP HolzSysteme®	46
Figura 1.14 - Esquema da pilha de madeira utilizada na modificação térmica	47
Figura 1.15 - Gráfico tempo x temperatura do processo de modificação térmica.....	48
Figura 1.16 - Tábuas tratadas e não tratadas (testemunhas) gradeadas para a secagem.....	50
Figura 2.1 - Amostras de madeira em palito (A), moinho de facas do tipo Willey (B), agitador eletromagnético de peneiras acopladas (C), amostras classificadas (D)	63
Figura 2.2 - Comportamento dos extrativos totais e hemicelulose em relação aos tratamentos da madeira de <i>Tectona grandis</i>	67
Figura 2.3 - Comportamento da holocelulose e hemicelulose na madeira de <i>Tectona grandis</i>	69
Figura 2.4 - Comportamento da holocelulose, hemicelulose e alfa celulose na madeira de <i>Tectona grandis</i>	70
Figura 2.5 - Comportamento da lignina Klason, hemicelulose e extrativos totais na madeira de <i>Tectona grandis</i>	72
Figura 3.1 - Colorímetro portátil Konica Minolta, modelo CR-400 (A) e aplicação do teste no corpo de prova (B)	80
Figura 3.2 - Máquina universal de ensaios mecânicos submetendo a madeira ao teste de flexão estática (A) e compressão paralela as fibras (B).....	82
Figura 3.3 - Esquema do corpo de prova para o teste de resistência de cisalhamento na linha de cola	83
Figura 3.4 - Máquina universal de ensaios mecânicos aplicando o teste de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola...	83

Figura 3.5 - Comportamento da umidade de equilíbrio em função da alteração dos componentes químicos dos tratamentos na madeira de <i>Tectona grandis</i>	86
Figura 3.6 - Comportamento da massa específica aparente e a hemicelulose em função dos tratamentos na madeira de <i>Tectona grandis</i>	89
Figura 3.7 - Comportamento do o inchamento volumétrico total, umidade de equilíbrio e a hemicelulose em função dos tratamentos na madeira de <i>Tectona grandis</i>	92
Figura 3.8 - Grau de claridade do parâmetro colorimétrico da madeira de <i>Tectona grandis</i> de acordo com os tratamentos	95
Figura 3.9 - Coordenada cromática vermelha (a*) do parâmetro colorimétrico da madeira de <i>Tectona grandis</i> de acordo com os tratamentos	96
Figura 3.10 - Aspecto visual da madeira de <i>Tectona grandis</i> avaliados na colorimetria	97
Figura 3.11 - Comportamento dos parâmetros colorimétricos em função dos tratamentos na madeira de <i>Tectona grandis</i>	98
Figura 3.12 - Ângulo de tinta do parâmetro colorimétrico da madeira de <i>Tectona grandis</i> de acordo com os tratamentos	99
Figura 3.13 - Comportamento dos parâmetros colorimétricos e os constituintes químicos em função dos tratamentos na madeira de <i>Tectona grandis</i>	100
Figura 3.14 - Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras da madeira de <i>Tectona grandis</i> de acordo com os tratamentos	104
Figura 3.15 - Comportamento da resistência a flexão estática, compressão paralela às fibras e os constituintes químicos em função dos tratamentos na madeira de <i>Tectona grandis</i>	105
Figura 3.16 - Comportamento da resistência ao cisalhamento e falha na madeira e a hemicelulose em função dos tratamentos na madeira de <i>Tectona grandis</i>	108
Figura 4.1 - Placas de petri com o fungo <i>Gonoderma applanatum</i> em contato com a madeira de <i>Tectona grandis</i>	118
Figura 4.2 - Comportamento da perda de massa da madeira de <i>Tectona grandis</i> sobre a ação do fungo <i>Gonoderma applanatum</i>	122
Figura 4.3 - Aspecto visual dos corpos de prova mais degradados pela ação fúngica	124
Figura 4.4 - Comportamento da perda de massa média causada pela ação fúngica com a química da madeira	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Estimativa da produção madeireira potencial de Eucalyptus, Pinus e Teca	15
Tabela 1.2 - Composição química de madeiras de coníferas e folhosas	22
Tabela 1.3 - Tratamentos utilizados no experimento	44
Tabela 1.4 - Variáveis do processo de modificação térmica	49
Tabela 2.1 - Tratamentos utilizados nas análises químicas	64
Tabela 2.2 - Normas e análise para a determinação dos constituintes químicos da madeira ...	64
Tabela 2.3 - Resultados das análises químicas das madeiras de acordo com cada tratamento	65
Tabela 2.4 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a composição química da madeira de <i>Tectona grandis</i>	73
Tabela 3.1 - Avaliação e equações utilizadas para a determinação das propriedades físicas...	79
Tabela 3.2 - Ensaio, dimensões dos corpos de prova e velocidade na determinação das propriedades mecânicas	81
Tabela 3.3 - Médias da umidade de equilíbrio da madeira de <i>Tectona grandis</i> de acordo com os tratamentos	85
Tabela 3.4 - Médias da massa específica aparente da madeira de <i>Tectona grandis</i> de acordo com os tratamentos	87
Tabela 3.5 - Médias do inchamento total e anisotropia de inchamento da madeira de <i>Tectona grandis</i> de acordo com os tratamentos	90
Tabela 3.6 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as propriedades avaliadas da madeira de <i>Tectona grandis</i>	93
Tabela 3.7 - Médias dos parâmetros colorimétricos avaliados de acordo com cada tratamento	94
Tabela 3.8 - Médias dos módulos ruptura e elasticidade do teste de flexão estática por tratamento	101
Tabela 3.9 - Médias dos módulos de ruptura e elasticidade do teste de compressão paralela às fibras por tratamento	103
Tabela 3.10 - Médias da resistência ao cisalhamento na linha de cola de acordo com cada tratamento	107
Tabela 4.1 - Relação dos tratamentos da madeira de <i>Tectona grandis</i> submetidas ao fungo <i>Ganoderma applanatum</i>	118
Tabela 4.2 - Classes de resistência a fungos xilófagos	119
Tabela 4.3 - Perda de massa do período da exposição da madeira de <i>Tectona grandis</i> com o fungo <i>Ganoderma applanatum</i>	120

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	11
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO	13
1.1.1 Informações da espécie estudada	13
1.1.1.1 Ocorrência natural e descrição da espécie <i>Tectona grandis</i> Linn. F.	13
1.1.1.2 Ocorrência no Brasil, características e usos da madeira de teca.....	14
1.1.2 Processo de modificação térmica	17
1.1.2.1 O processo de modificação térmica no mundo	17
1.1.2.2 Processo de modificação térmica no Brasil	20
1.1.2.3 Processo VAP HolzSysteme®.....	20
1.1.3 Constituintes químicos da madeira	21
1.1.3.1 Componentes químicos fundamentais e acidentais da madeira.....	21
1.1.3.2 Efeito da modificação térmica nos componentes químicos da madeira	25
1.1.4 Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas e mecânicas da madeira ..	28
1.1.4.1 Propriedades físicas	28
1.1.4.2 Colorimetria	34
1.1.4.3 Propriedades mecânicas.....	37
1.1.5 Degradação da madeira por fungos xilófagos	41
1.2 MATERIAL E MÉTODOS GERAIS	43
1.2.1 Origem do material	43
1.2.2 Amostragem e tratamentos	43
1.2.3 Processo de modificação térmica	44
1.2.4 Modificação térmica da madeira de <i>Tectona grandis</i> pelo processo VAP HolzSysteme®	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
2 CAPÍTULO I - ALTERAÇÕES DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> LINN. F. MODIFICADA TERMICAMENTE	61
2.1 INTRODUÇÃO.....	61
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	62
2.2.1 Amostragem	63
2.2.2 Análises químicas	64
2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	64
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
2.5 CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
3 CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> LINN. F. MODIFICADA TERMICAMENTE	77
3.1 INTRODUÇÃO.....	78
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	79
3.2.1 Propriedades físicas	79
3.2.1.1 Determinação da umidade de equilíbrio, massa específica aparente e coeficiente de inchamento total	79
3.2.1.2 Colorimetria	80
3.2.2 Propriedades mecânicas	81
3.2.2.1 Flexão estática e compressão paralela as fibras	81
3.2.2.2 Resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola	82
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	84
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
3.4.1 Propriedades físicas	84

3.4.1.1 Umidade de equilíbrio	84
3.4.1.2 <i>Massa específica aparente</i>	87
3.4.1.3 <i>Inchamento total e anisotropia de inchamento</i>	90
3.4.1.4 <i>Avaliação Colorimétrica</i>	94
3.4.2 Propriedades mecânicas	101
3.4.2.1 <i>Flexão estática</i>	101
3.4.2.2 <i>Compressão paralela às fibras</i>	103
3.4.2.3 - <i>Resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola</i> ..	107
3.5 CONCLUSÕES	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
4 CAPÍTULO III - CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA A FUNGOS XILÓFAGOS DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> LINN F. MODIFICADA TERMICAMENTE	116
4.1 INTRODUÇÃO	116
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	117
4.2.1 O ensaio de apodrecimento acelerado	117
4.2.2 Avaliação da perda de massa	118
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	119
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	120
4.5 CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
5.1 CONCLUSÕES GERAIS	131
5.2 RECOMENDAÇÕES	131

1 APRESENTAÇÃO

Popularmente conhecida por teak, teakholz, teck, ou teca, nome comercial em inglês, alemão, francês e português, respectivamente, a *Tectona grandis* Linn. F., tem se destacado no setor florestal principalmente no mercado externo, em países como Alemanha, Emirados Árabes, Estados Unidos, Japão e Reino Unido, dentre outros (CÁCERES FLORESTAL, 2006). A teca é nativa das florestas tropicais asiática, ocorrendo principalmente na Índia, Burma, Tailândia, Laos, Camboja, Vietnã e Java.

A madeira de teca é utilizada mais frequentemente na indústria naval, por possuir uma boa resistência aos efeitos do intemperismo (umidade e calor) e ao ataque de organismos xilófagos (brocas marinhas), sendo importante na indústria moveleira para fabricação de assoalhos, decks, móveis de luxo, lâminas decorativas e construção civil (portas, janelas, lambris, painéis, forros) (PAES et al., 2015). Além disso, a madeira de teca possui boas características estéticas e de acabamento, o que facilita a trabalhabilidade e boa aceitação em marcenarias.

No Brasil a teca encontrou condições edafoclimáticas favoráveis para o seu desenvolvimento que, associada a tratamentos silviculturais adequados, contribuíram para reduzir o ciclo de produção de 80 anos, na região de origem, para 25, na região de Cáceres, por exemplo, onde ocorreram os primeiros plantios da espécie (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003).

De acordo com Tomazello Filho (1987) e Malan (1995), as espécies de rápido crescimento, como a *Tectona grandis* são formadas por grande proporção de lenho juvenil, o qual é considerado de qualidade inferior à madeira adulta. Além disso, esse volume aumenta consideravelmente nas árvores de desbaste, que muitas vezes são utilizadas em produtos de baixo valor agregado, tais como escoras para a construção civil, moirões e produção de energia (FIGUEIREDO et al., 2005).

O lenho juvenil é formado nos primeiros anos na região próxima a medula podendo conter 85% do tronco em uma árvore de 15 anos, e entorno de 10% aos 30 anos (KOGA, 1988). As dimensões celulares, a organização da parede celular e as características físico-químicas da madeira são algumas das variações que ocorrem durante o período juvenil. Outra implicação do lenho juvenil é a produção de madeira com maior proporção de alburno, as quais apresentam características bem diferentes em termos de cor e durabilidade, quando comparadas com peças de madeira de cerne (LOPES, 2014).

Para o melhor aproveitamento da madeira de teca busca-se melhorar as suas propriedades físicas (estabilidade dimensional), mecânicas, obter melhorias no tocante a baixa resistência da madeira de alburno ao ataque de organismos xilófagos (fungos).

Nesse cenário, a modificação térmica na madeira surge como uma opção de tratamento, pois utiliza altas temperaturas em meio a óleos vegetais, gases ou vapor d' água, sendo, este último, muitas vezes utilizado de forma conjunta ou isolado. A modificação térmica confere benefícios à madeira, aumentando a resistência contra biodegradadores, estabilidade dimensional e ainda alterando a cor da mesma.

Apesar de países da União Europeia, Finlândia, Japão e Estados Unidos, entre outros, comercializarem produtos de madeira modificados termicamente, e outros como França, Alemanha, Holanda, possuírem processos patenteados, o Brasil, ainda necessita estudos para que se possa evoluir nessa questão, principalmente em nível industrial (BATISTA, 2012). A maioria dos estudos tem sido realizada em escala laboratorial, que auxilia muito nas pesquisas, mas muitas vezes não condiz com a realidade de produção em grande escala de uma empresa.

Nesse contexto, objetiva-se avaliar o efeito da modificação térmica em escala industrial na qualidade da madeira de *Tectona grandis* Linn. F. No que se refere a analisar os efeitos na composição química; na resistência físico-mecânica e na resistência a decomposição por fungo na madeira.

O tratamento térmico empregado nesta pesquisa, é conhecido no Brasil como modificação térmica VAP HolzSysteme®, e já foi pesquisado por Rilling (2010) e Batista (2012) e utilizado pela empresa *TWBrazil*, a qual forneceu subsidio para este estudo, em escala industrial.

Para a melhor compreensão a pesquisa dividiu-se em três capítulos:

Capítulo I - Alterações da composição química da madeira de *Tectona grandis* Linn. F. modificada termicamente;

Capítulo II - Avaliação das propriedades físicas e mecânica da madeira de *Tectona grandis* Linn. F. modificada termicamente;

Capítulo III - Caracterização da resistência a fungos xilófagos da madeira de *Tectona grandis* Linn. F. modificada termicamente.

1.1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.1 Informações da espécie estudada

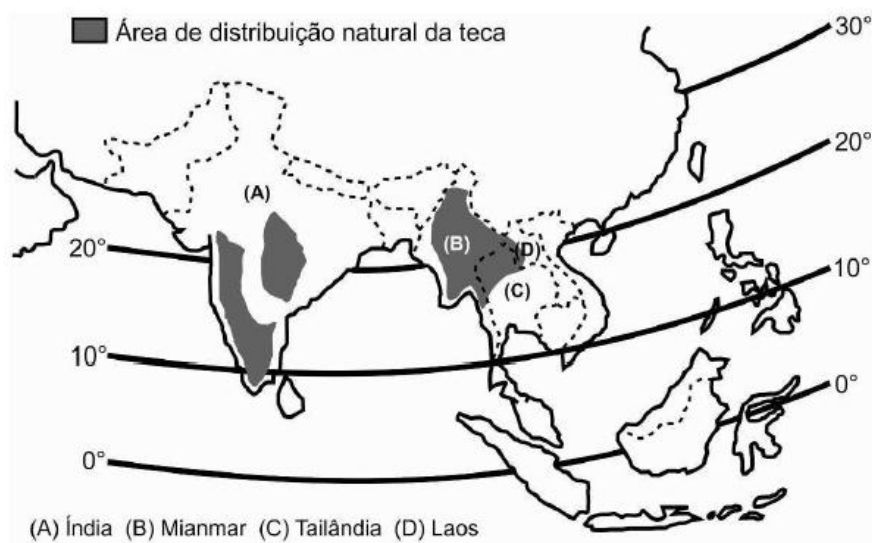
1.1.1.1 Ocorrência natural e descrição da espécie *Tectona grandis* Linn. F.

A teca pertence à família *Lamiaceae*, que é composta pelas espécies *Tectona grandis* L. f.; *Tectona hamiltoniana* Wall.; *Tectona theka* Lour; *Tectona ternifolia* Buch. - Ham. ex Wall.; e *Tectona philippinensis* Benth. & Hook. (TROPICOS, 2013). De todas as espécies a única que se destacou no cenário mundial foi a *Tectona grandis*, principalmente para fins nobres, devido as boas características físico-mecânicas de sua madeira (CRUZ, 2005; COSTA et al., 2007).

De acordo com Tewari (1999), a espécie *Tectona grandis* Linn. F., deriva da união do grego e latim que significam carpinteiro e nobre, respectivamente, pois era muito utilizada pelos carpinteiros.

A *Tectona grandis* Linn. F., conhecida popularmente como teca, é uma árvore nativa das florestas tropicais do subcontinente Índico e no do Sudeste Asiático mais precisamente na Índia, Mianmar, Tailândia e Laos (Figura 1.1). Abrange os paralelos de 09°N e 25°N, compreendendo regiões posicionadas desde o nível do mar até acima de mil metros de altitude, sujeita a precipitações anuais entre 500 e 5000 mm e a temperaturas absolutas mínimas de 2°C e a máxima cerca de 48°C (CÁCERES FLORESTAL, 2006).

Figura 1.1 - Distribuição natural da teca no continente asiático



Fonte: adaptado de Kaosa-Ard (1981) e Tanaka et al. (1998).

Os solos mais indicados para o desenvolvimento da teca são preferencialmente os de textura francoarenosa a argilosos, profundos, de boa drenagem, com terrenos planos ou pouca inclinação, e férteis, apesar de se desenvolver em grande variedade de solos e formações rochosas (MONTERO et al., 2001; OMBINA, 2008; TONINI et al., 2009).

A teca é uma árvore de grande porte, podendo alcançar um metro de diâmetro a altura do peito (DAP) e mais de 35 metros de altura. Normalmente apresenta o tronco retilíneo, de seção circular e reduzida conicidade, com casca com pequenas fissuras, de cor cinza ou marrom, áspera, variando entre 12 e 15 mm de espessura, que se desprende em placas e possui boa resistência ao fogo (CHAVES; FONSECA, 1991; CÁCERES FLORESTAL, 2006; PELISSARI, 2012).

As folhas da teca possuem um alto grau de deciduidade, ou seja, caem por ocasião da estação seca. Além disso, são opostas, elípticas, coriáceas, pecíolos curtos ou ausentes, e ápice e bases agudas. De acordo com Figueiredo et al. (2005a); e Costa et al. (2007), as folhas nos indivíduos adultos podem chegar em média 30 a 40 cm de comprimento por 25 cm de largura, entretanto nos indivíduos mais jovens, com até três anos de idade, as folhas podem alcançar o dobro desses tamanhos.

O conjunto de flores da teca têm o formato de panícula, composta por cachos de flores pequenas na cor branca, podendo chegar aos milhares. Apesar da grande quantidade de flores, apenas 2% se desenvolve em frutos. Esse contém uma estrutura esférica de 5 a 20 mm de diâmetro, envolto por uma membrana fina, do tipo drupa subglobosa e tetralocular, podendo conter raramente até quatro sementes pequenas com 5 a 6 mm de comprimento e oleaginosas por lóculo (CALDEIRA et al., 2000; BEZERRA, 2009).

As raízes são compostas por raízes laterais e uma principal, pivotante, podendo esta penetrar verticalmente no solo mais de um metro de profundidade (CHAVES; FONSECA, 1991).

1.1.1.2 Ocorrência no Brasil, características e usos da madeira de teca

O primeiro experimento com *Tectona grandis* Linn. F. no Brasil foi realizado pelo pesquisador Helladio do Amaral Mello, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ, localizada no município de Piracicaba/SP (MELLO, 1963). Entretanto, existem relatos que os primeiros exemplares foram plantados no Jardim Botânico do Rio de Janeiro/RJ e no Horto de Rio Claro/SP (FERREIRA, 2008).

Os autores Tsukamoto Filho et al. (2003), relatam que a espécie de teca foi introduzida no Brasil por volta de 1960 em Cárceres - MT, local que possui características edafoclimáticas semelhantes ao país de origem, além disso estudos da silvicultura aliado aos solos de melhor qualidade, reduziu o ciclo natural de 80 para 25 anos. Atualmente o estado do Mato Grosso é o que possui a maior área plantada dessa espécie. Os espaçamentos mais utilizados no Brasil para a teca são, principalmente, 2 x 2,5 m, 3 x 2 m e 3 x 3 m, tem sido utilizados em sistemas agroflorestais a uma distância de 5 x 5 m (FIGUEIREDO, 2005; FLÓREZ, 2012).

O rápido crescimento da teca por meio do incremento médio anual (IMA), variável de acordo com as condições ambientais, têm sido em média, 9 a 10 m³ por hectare ao ano (CHAVES; FONSECA, 1991). No Brasil de acordo com a ABRAF (2013), a teca possui um IMA em média de 15m³/há/ano, com um ciclo da cultura entre 20 a 25 anos. Entretanto, segundo Bufulin (2001), o crescimento é maior, pois o IMA encontrado foi de 12 a 28 m³ e 24 m³ por hectare em Agudos-SP e Cárceres-MT, respectivamente. No estado do Acre os valores de IMA variam de 7,6 e 24,5 m³ por hectare (OLIVEIRA, 2003). A região Centro-Oeste, segundo a ABRAF (2013) produz 0,7 milhões de m³/ano, sendo 67,4% do total plantado, e o Norte (32,6%) produz o restante da teca no Brasil. Segundo o Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária (IMEA, 2013), o estado com a maior área de plantio é o Mato Grosso com área plantada de 64.828 ha, distribuída em 42 municípios. Isso ocorre pelo fato das condições do solo e clima favoráveis que a espécie encontra naquelas regiões.

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2016), a *Tectona grandis* é a sexta espécie arbórea com maior área plantada no Brasil (87.410 ha), ficando atrás das espécies de eucalipto, pinus, acácia, seringueira e paricá. Entretanto, segundo Figueiredo (2005), nesta mesma classificação é a terceira espécie de folhosa tropical no mundo, apenas atrás dos plantios de eucalipto e acácias (TABELA 1.1).

Tabela 1.1 - Estimativa da produção madeireira potencial de *Eucalyptus*, *Pinus* e Teca

Espécie	Área Plantada (ha)
<i>Eucalyptus</i>	5.600.000
<i>Pinus</i>	1.600.000
<i>Tectona grandis</i>	87.410
Total	7.287.410

Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2016).

A madeira da teca é muito valorizada no mercado internacional, podendo alcançar preços até três vezes mais alto que do mogno (*Swietenia macrophylla* King), cujo metro cúbico serrado, como produto final, pode ser comercializado por valores que chegam a US\$ 1500,00, já o produto do desbaste inicial é comercializado entre 60 e 80 dólares o metro cúbico (FIGUEREIDO et al., 2005).

Estes valores são devidos principalmente pelas suas boas características físicas e mecânicas (MACEDO et al, 2005; LEITE et al., 2006; MOTTA et al. 2013; ARRUDA, 2014). Além dessas características, a cor, o desenho, e a densidade são aspectos qualitativos importantes que tornam a teca uma das madeiras de folhosas mais valorizada no mundo (VIEIRA et al., 2002).

A teca, em relação ao mogno, por exemplo, leva vantagem pela rusticidade, rápido crescimento em altura, e excelente forma tronco, sendo este, retilíneo e pouco sujeito a bifurcação. Além do mais, segundo Fonseca (2004), a madeira é considerada de boa trabalhabilidade, fácil colagem, acabamento, furação e pregagem.

De acordo com Ângelo et al. (2009), a espécie tem uma ampla utilização: construção de móveis, barcos, molduras, etc. Além disso, a madeira possui boa resistência natural ao ataque de insetos, fungos, pragas e brocas; resistência mecânica; facilidade de secagem; e características de acabamento; o que a torna valorizada no mercado internacional (BERMEJO et al., 2004; MACEDO et al., 2005).

A madeira quando recém cortada possui uma cor verde oliva passando para marrom claro quando seca. O albúrnio e o cerne têm cores bem distintas, sendo o primeiro amarelo esbranquiçado (claro), enquanto segundo é marrom vivo e brilhante (FLÓREZ, 2012). O cerne e o albúrnio possuem uma substância semelhante a um látex, denominada caucho, que reduz a absorção de água, lubrifica a superfície, confere resistência à ácidos e protege pregos e parafusos de corrosão (ANGELI, 2003).

A madeira de teca seca rapidamente e de forma satisfatória naturalmente ao ar, seca em estufas elétricas, mas deve se procurar fazê-lo lentamente para evitar defeitos (WEAVER, 1993).

1.1.2 Processo de modificação térmica

1.1.2.1 O processo de modificação térmica no mundo

O processo de modificação térmica da madeira consiste na aplicação de calor a fim de acrescentar ou melhorar a qualidade da madeira, para tanto, altera a estrutura química da sua parede celular (celulose, hemicelulose e lignina), ou seja, os seus componentes fundamentais (HILL, 2006; IBACH, 2010). Os principais objetivos da modificação são a estabilidade dimensional, resistência à organismos xilófagos, aumento da resistência ao intemperismo e mudança de cor (HILL, 2006; BATISTA, 2012).

Segundo Brito (2006), o processo de tratamento térmico da madeira é realizado com altas temperaturas as quais provocam o início da degradação de seus constituintes químicos fundamentais, principalmente as hemiceluloses, que são mais sensíveis aos efeitos do calor, tais temperaturas estariam entre 100 e 250°C. O processo de modificação térmica é um dos métodos de alteração da madeira pelas altas temperaturas em atmosfera com nitrogênio, vapor e óleo quente (HOMAN et al., 2000).

A modificação térmica da madeira tem sido pesquisada desde o começo do século XX, e na Europa já são comercializados produtos de processos patenteados. Um dos primeiros estudos no mundo sobre o efeito da modificação térmica na madeira foi Tiemann em 1915. Naquela ocasião o autor estudou os efeitos do vapor superaquecido a 150°C durante 4 horas, na madeira, e obteve uma redução na variação de umidade entre 10 e 25%, com uma diminuição na resistência mecânica (BELLON, 2013). Mais adiante, mais precisamente entre as décadas de 30 e 40 os pesquisadores Stamm e Hansen, na Alemanha, e White nos Estados Unidos estudaram esse processo (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

Em seguida, na década de 50 os alemães Bavendam, Runkel e Buro continuaram investigando o assunto. Na década de 60 foi à vez de Kollman e Schneider e na década de 70 Rusche e Burmester. Já na década de 90, os trabalhos de pesquisa foram desempenhados na Finlândia, França e Holanda. Em 1996, a instituição, VTT Technical Research Centre of Finland, na Finlândia realizou um estudo mais completo sobre o assunto (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

Porém, somente a partir do ano 2000, com o avanço de tecnologias e maior controle do processo, iniciou-se na Europa a produção em escala industrial, por meio de processos patenteados, inclusive com patentes na Finlândia, França, Holanda e Alemanha. As principais diferenças entre estes tratamentos estão no teor de umidade inicial da madeira, nas temperaturas

e tempos em que as peças ficam expostas ao oxigênio ou nitrogênio, na presença ou ausência de vapor, no processo seco ou úmido e na utilização de óleos. Em seguida são apresentadas as etapas deste métodos, conforme Nunes, (2009):

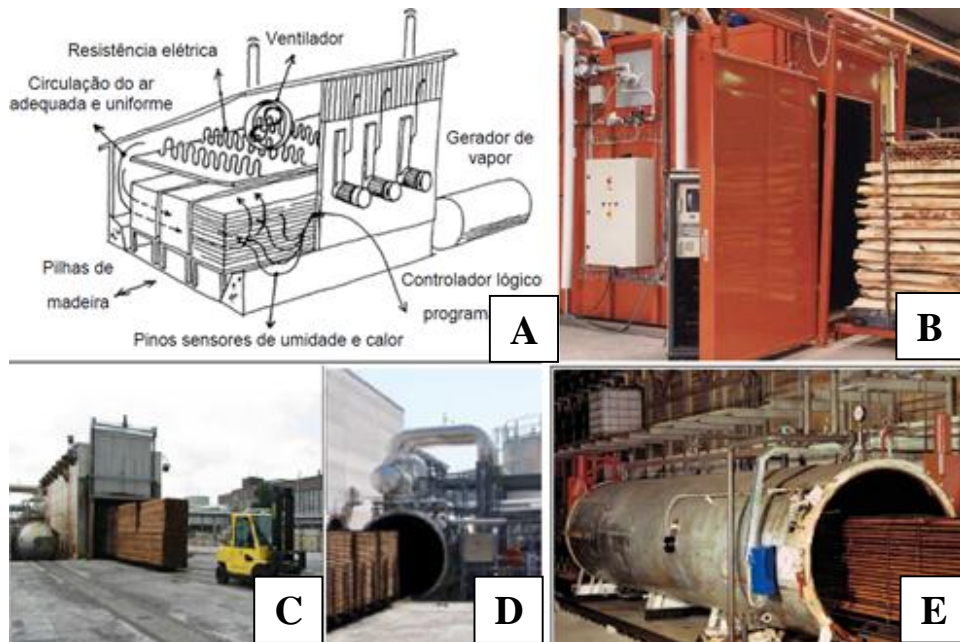
- **PLATO[®] WOOD**: Método Holandês o qual utiliza quatro fases no tratamento térmico da madeira. A primeira é a Hidrotermólise na qual se aplica temperaturas entre 150-180°C em condição aquosa sob pressão atmosférica entre 4-5 horas; a segunda fase corresponde a secagem convencional, que varia entre 3 e 5 dias; a terceira é a aplicação do tratamento térmico entre 150-190°C sob condições secas de 14-16 horas; e por último é feito o condicionamento que dura entre 2-3 dias.
- **Retifiction[®]** (bois retifié): Neste método, a madeira previamente seca (teor de umidade 12%), é submetida a temperaturas que variam entre 210 e 240°C em atmosfera de nitrogênio;
- **THERMOWOOD[®]**: Este processo apresenta três fases distintas: na primeira fase a madeira verde é seca a alta temperatura (100-130°C). Na segunda fase a madeira é exposta a 190 ± 2°C de temperatura (Madeira Thermo-S) ou 212 ± 2°C (Madeira Thermo-D) durante 2-4 horas em função da qualidade do produto final. Na última fase é realizado o resfriamento e reumidificação para 4-8%, para estabilização da madeira. A letra “S” no Thermo-S’ indica estabilidade, e a letra “D” no Thermo-D indica durabilidade, sendo estes referentes à propriedade utilizada na classificação dos produtos nesta classe de tratamento;
- **Oil Heat Treatment-OHT**: Processo desenvolvido na Alemanha, no qual a madeira é imersa em um tanque com óleo em temperaturas entre 180 e 220°C por 2-4 horas, sem considerar o tempo de aquecimento e resfriamento da madeira.
- **Bois Perdure**: Método Francês semelhante ao anterior, no qual a madeira verde é tratada (seca) a 230°C sob vapor gerado pela água contida na própria madeira;

Dentre os processos descritos acima o THERMOWOOD[®] criado pela VTT, é possivelmente o mais bem-sucedido da Europa, pois em aproximadamente 130. 800 m³ de madeira tratada termicamente em 2007, cerca de 50%, foi pelo método THERMOWOOD[®]. O maior consumidor desse tipo de madeira é a Europa, aonde foram compradas 92% de todo o material tratado termicamente (ESTEVEES e PEREIRA, 2009).

Essa técnica tem ganho muito interesse pelos pesquisadores no mundo inteiro, nos últimos anos. Visto que, já são conhecidos os seus benefícios para as propriedades da madeira, tais como redução da higroscopicidade, aumento da estabilidade dimensional e aumento da resistência à biodeterioração por organismos xilófagos, principalmente os fungos (BATISTA, 2012). Segundo o mesmo autor, o interesse científico está relacionado ao aumento do consumo

e preço da madeira modificada termicamente. Os equipamentos frequentemente utilizados na modificação térmica da madeira são estufas elétricas, muflas e autoclaves adaptadas para cada método. Na Figura 1.2 são demonstrados alguns dos equipamentos utilizados nos métodos patenteados.

Figura 1.2 - Equipamento utilizado nos processos patenteados da modificação térmica



Fonte: Adaptado de Batista, (2012).

De acordo com a Figura 1.2 pode-se identificar os equipamentos utilizados no processo ThermoWood[®] (A); modelo de câmara do processo Perdure[®] (B); câmara de secagem utilizada na etapa de “cura” da madeira do processo Plato[®] (C); reator utilizado para o estágio de termohidrolise do processo Plato[®] (D); e cilindro utilizado na modificação térmica pelo processo Menz OHT[®] (E). Esses processos patenteados, assim como qualquer modificação térmica da madeira, causa a redução da resistência mecânica e da higroscopicidade, logo a madeira fica mais estável (estabilidade dimensional), entretanto inviabiliza o uso estrutural do material. Outro aspecto importante é a cor que é alterada deixando a madeira mais escura, e mais resistente a fungos decompositores.

Todavia, a vantagem mais importante dos métodos é a sustentabilidade, pois não existe a impregnação de produtos químicos tóxicos (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003; ESTEVES; PEREIRA, 2009; HILL, 2006; MENZ HOLZ, 2012; PLATOWOOD, 2012; RETIWOOD, 2012; BELLON, 2013).

1.1.2.2 Processo de modificação térmica no Brasil

No Brasil o estudo deste tema é mais recente, tendo alguns resquícios na década de 80, por meio de congressos e revistas científicas, tendo recebido mais atenção nos últimos anos. Entretanto, a maioria dos trabalhos ainda tem sido realizado em caráter experimental, por meio de laboratório, que sem dúvida, auxilia muito nas pesquisas futuras, mas muitas vezes não demonstra a realidade do processo em nível industrial (BATISTA, 2012).

A modificação térmica da madeira, em escala laboratorial, é geralmente realizada pelos pesquisadores em estufa elétrica, aonde a madeira é exposta ao ar aquecido com temperaturas variando entre 100 a 200°C, em um período que varia de 2 a 24 horas, para que ocorra a degradação dos constituintes químicos da madeira principalmente da hemicelulose (CALONEGO, 2009).

Dentre as primeiras pesquisas a nível de pós-graduação no Brasil foram realizadas duas dissertações e uma tese. A primeira dissertação teve como objetivo avaliar as alterações nas propriedades da colagem, cor e envernizamento da madeira de uma folhosa (*Eucalyptus saligna*) e uma conífera (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) (PINCELLI, 1999).

Segunda dissertação foi avaliada a resistência da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* ao ataque de cupim de madeira seca *Cryptotermes brevis*. Para ambos os processos foram utilizados uma estufa dotada de aquecimento por resistência elétrica e temperatura entre 120 e 200°C (PESSOA, 2002).

Em seguida surgiu a primeira Tese no Brasil com o assunto, em que o objetivo da pesquisa foi homogeneizar a cor da superfície das espécies nativas *Simarouba amara*, *Sextonia rubra* e *Cariniana micranth*. Para isso, foi combinado duas temperaturas (150 e 200°C) e duas durações de ciclo (1 e 2 horas). A aplicação do processo foi por uma estufa com ventilação forçada (GOUVEIA, 2008).

No Brasil a primeira informação sobre modificação térmica em escala industrial foi uma monografia, publicada em 2010. O trabalho foi realizado na empresa *TWBrazil*, localizada em Ponta Grossa, Paraná. A madeira de *Tectona grandis* foi submetida às temperaturas de 140, 160 e 180°C, determinando-se algumas propriedades físicas e mecânicas (MIRANDA, 2010).

1.1.2.3 Processo VAP HolzSysteme®

O processo VAP HolzSysteme® aplica vapor saturado a altas temperaturas, na ausência de oxigênio para evitar a queima da madeira. Este processo é realizado no Brasil pela empresa

TWBrazil, a qual detém os direitos de uso (VAP HolzSysteme®) no país. A empresa utiliza a denominação de *Thermally Modified Timber* ou *TMT* para os seus produtos modificados termicamente.

O equipamento empregado pela empresa no processo de modificação térmica da madeira está ilustrado na Figura 1.3.

Figura 1.3 - Vista geral do equipamento (A) e equipamento carregado de madeira (B)



Fonte: Autor.

O equipamento é constituído por: cilindro de 125 cm de diâmetro, 850 cm de comprimento, com capacidade nominal de 6 m³ de madeira por ciclo; gerador instantâneo de vapor classe B com capacidade de 216 Kgv/h (caldeira); reservatório de água, controlador lógico programável (CLP), que controla as variáveis do processo; trilhos e vagonete, para abastecimento e descarregamento da madeira. O equipamento é muito semelhante a uma autoclave de preservação da madeira.

Atualmente a *TWBrazil* processa e comercializa madeiras das espécies de *Pinus* sp., *Eucalyptus* sp. e *Tectona grandis*. Além do processo já citado, a empresa preserva a madeira com a aplicação do produto químico Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), por meio de autoclaves, no processo de vácuo-pressão. Toda a madeira tratada pela empresa é destinada para a construção civil, linha rural, jardinagem e decoração.

1.1.3 Constituintes químicos da madeira

1.1.3.1 Componentes químicos fundamentais e acidentais da madeira

A madeira é composta por elementos tais como carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N) que não diferem significativamente entre espécies. A análise química dos elementos de várias espécies de folhosas e coníferas, é quantificada em relação a massa seca em 6, 44-45, 49-50 e 0,1-1%, H, O, C e N, respectivamente. Além destes, a madeira contém uma pequena quantidade de elementos minerais (cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (K)) que são encontrados nas cinzas da madeira com teores de 0,2 a 1,0% da massa seca (TSOUMIS, 1991).

O conhecimento das propriedades químicas de uma madeira é de fundamental importância, pois a quantidade e a variação dos compostos químicos podem influenciar na utilização industrial das espécies. Os constituintes químicos da madeira estão relacionados com suas propriedades física, mecânica e de resistência aos organismos xilófagos. Segundo SEVERO, et al. (2010), o conhecimento da composição química da madeira é importante para definição do uso final deste material.

A madeira é formada basicamente por componentes macromoleculares fundamentais (celulose, hemicelulose e lignina) que formam a parede celular, e os componentes estranhos (extrativos e cinzas) ou acidentais. Estes componentes são encontrados em menor quantidade e peso molecular do que os componentes fundamentais (FENGEL; WEGENER, 1989).

As substâncias que constituem a parede celular de todas as madeiras, e sua remoção implica a utilização de processos químicos ou mecânicos que alteram as propriedades das células e conseqüentemente da madeira.

Os dois grandes grupos de conífera e folhosas diferem quanto a composição química de quantidade da lignina e hemicelulose, entretanto os constituintes da celulose e extrativos são praticamente a mesma na madeira de ambas as espécies (TABELA 1.2).

Tabela 1.2 - Composição química de madeiras de coníferas e folhosas

CONSTITUINTE	CONÍFERAS (%)	FOLHOSAS (%)
Celulose	40 - 50	40 - 50
Hemicelulose	20 - 30	25 - 40
Lignina	25 - 35	20 - 25
Extrativos	0 - 25	0 - 25

Fonte: adaptado de Siau, (1995).

A celulose é o constituinte químico mais abundante na madeira, formada por polissacarídeo que se apresenta como um polímero de cadeia linear composta única e exclusivamente de unidades de β -D-anidroglicopiranosose, que se ligam entre si através dos carbonos 1-4, formando microfibrilas, na qual regiões altamente ordenadas (cristalinas) que se alternam com regiões menos ordenadas (amorfas) (TSOUMIS, 1991; SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1999). A proporção de regiões amorfas e cristalinas varia consideravelmente de acordo com a origem (espécie, posição na árvore) da amostra de celulose (SJÖSTRÖM, 1993).

As microfibrilas constroem fibrilas e estas constroem as fibras celulósicas. Como consequência dessa estrutura fibrosa a celulose possui alta resistência à tração e é insolúvel na maioria dos solventes (SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1999).

Segundo Sjöström e Westermarck, (1999), a concentração de celulose em coníferas é maior nas camadas S1 e S2 da parede celular, enquanto para folhosas (com base em *Betula* spp.) está na parte mais interna das camadas S2 e S3

A hemicelulose juntamente com a celulose é conhecida pelo termo holocelulose, com a finalidade de diferenciação dos polissacarídeos da madeira. Estes carboidratos podem ser separados por hidrólise alcalina (hidróxido de sódio a 17,5%), enquanto que a celulose nada sofre (insolúvel), a hemicelulose é extraída (solúvel) (TSOUMIS, 1991).

A hemicelulose é um componente químico não definido, pois é formado por polissacarídeos de baixo grau de polimerização médio (200-300), constituídos por diferentes açúcares e ácidos: D-glucose, D-manose, D-galactose, D-xilose, L-arabinose, L-fucose - Ácidos 4-O-metilglucurônico, D-galacturônico e D-glucurônico. (SJÖSTRÖM, 1993; SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1999). Além disso, segundo os mesmos autores, é disposta em cadeias ramificadas e constituem de 20 a 30% da massa seca da madeira e possuem função estrutural na parede celular.

Os grupos de conífera e folhosas são formadas por diferentes composição e estrutura das hemiceluloses. Nas coníferas o monossacarídeo em maior concentração é a manose (hexose) e nas folhosas é a xilose (pentose). Além destas, existem diferenças entre as hemiceluloses do tronco, galhos, raízes e casca (TSOUMIS, 1991; SJÖSTRÖM, 1993).

A cadeia principal é formada por unidades de β -D-xilopiranosose unidas por ligações 1 \rightarrow 4 e a maior concentração de xilana encontra-se na camada S1 e na porção mais externa da camada S2 da parede celular. Além da xilana, as folhosas contêm de 2-5% da massa seca de glucomanana, que é composta de unidades de β -D-glucopiranosose e β -D-manopiranosose unidas por ligações 1 \rightarrow 4 (SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1999).

A lignina não é um carboidrato, sendo de natureza predominantemente aromática (TSOUMIS, 1991). Da mesma forma que os polissacarídeos (celulose e hemicelulose) a lignina é um componente da parede celular que diferencia a madeira dos demais materiais celulósicos produzidos na natureza.

A base estrutural da lignina é o fenilpropano, tendo ligado ao anel benzênico um número variável de grupos hidroxílicos e metoxílicos. Esses grupos fazem com que o fenilpropano tome a forma de radicais químicos bem definidos. As principais unidades de fenilpropano que compõem a lignina, a saber são: guaiacilpropano, siringilpropano e p-hidroxifenilpropano. Destas as madeiras de gimnospermas predominam radicais de guaiacilpropano nas angiospermas predominam radicais de siringilpropano (BRUNOW et al.,1998).

A determinação da lignina é realizada pelo método gravimétrico. Para isto, a extração utiliza o método clássico de Klason, por meio de amostras de madeira livre de extrativos e tratada inicialmente com solução concentrada de ácido sulfúrico (72%), que posteriormente é diluída e aquecida até ebulição. Dessa forma, a celulose e hemicelulose (polissacarídeos) são hidrolisados e dissolvidos, enquanto a maior porção de lignina permanece na forma de resíduo sólido (SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1999). A quantidade de lignina na madeira varia entre 20 e 33%, de acordo com a espécie.

A maior concentração da lignina nas células, devido a sua maior espessura, é encontrada na camada S2 da parede celular secundária, sendo por volta de 70-75% para coníferas e 80% para folhosas (SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1998).

O grupo de constituintes da madeira de pequena massa molecular pode ser dividido em substâncias inorgânicas e substâncias orgânicas (FENGEL; WEGENER,1989).

Os extrativos são compostos químicos orgânicos formados a partir de graxas, ácidos graxos, álcoois graxos, fenóis, terpenos, esteroides, resinas ácidas, resinas, ceras, e alguns outros tipos de compostos orgânicos. Estes compostos existem na forma de monômeros, dímeros e polímeros. Os extrativos são encontrados no cerne e alguns são responsáveis pelo cheiro, cor, durabilidade natural, diminuição da permeabilidade e higroscopicidade da madeira (WINANDY; ROWELL, 2005).

A parede celular não contém extrativos, já que são substâncias predominantemente extracelulares, de baixo peso molecular e que dificilmente atingem 10% da massa seca da madeira (SJÖSTRÖM, 1993). Em situações extremas, podem chegar a 40% da massa seca. Segundo alguns autores, Fengel e Wegener (1989), classificam os extrativos orgânicos em carboidratos, terpenos, esteroides, glicosídeos e substâncias aromáticas, alifáticas e nitrogenadas.

Os extrativos são substâncias que podem ser extraídas em solventes orgânicos neutros, tais como: água, álcool, tolueno, éter e clorofórmio, ou ainda pela volatilização com vapor (SILVÉRIO, 2008).

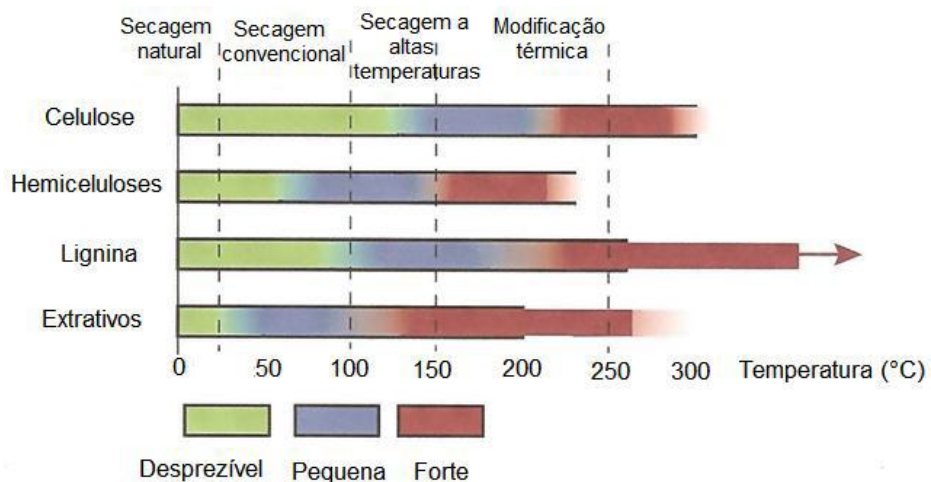
Os minerais formam o grupo das substâncias inorgânicas da madeira e são constituídos por potássio, cálcio, magnésio e silício, por exemplo (FENGEL; WEGENER, 1989). O teor de cinzas, genericamente classificados por causa da sua forma de determinação, raramente é menor que 0,2% ou maior que 1% da massa seca da madeira (TSOUMIS, 1991).

1.1.3.2 Efeito da modificação térmica nos componentes químicos da madeira

A madeira quando aquecida passa por transformações químicas e físicas. Essas alterações estão ligadas diretamente a mudanças dos principais constituintes químicos da madeira: celulose, hemiceluloses e lignina, que se decompõem em diferentes temperaturas e formas.

O diagrama de Sundqvist (2004), exposto na Figura 1.4, possibilita observar a degradação dos principais componentes químicos da madeira úmida pela ação da temperatura.

Figura 1.4 - Mudanças dos componentes químicos da madeira causadas pela ação da temperatura



Fonte: Adaptado de Sundqvist, (2004).

De acordo com, a Figura 1.4 os constituintes químicos da madeira apresentam boa estabilidade quando submetidos a temperatura que não excedam os 100°C. Entretanto, quando a madeira ultrapassa esta temperatura os extrativos são os primeiros a sofrerem “forte”

degradação. Em segundo momento a hemicelulose é o primeiro carboidrato a sentir os efeitos das altas temperaturas, sofrendo “forte” degradação em cerca de 150°C, sendo completamente destruída próximo de 225°C. A lignina embora comece a degradar antes da celulose, é a mais que mais suporta as altas temperaturas, sendo a última a ser consumida completamente. A celulose degrada completamente em torno de 300°C.

Concomitante à diminuição do teor da hemicelulose a madeira perde extrativos e outras substâncias secundárias, de baixo peso molecular, solúveis em água, oriundas dos outros componentes da madeira. A quantidade destes compostos é dependente da espécie, da temperatura, da taxa de aquecimento e do tempo de exposição da madeira no tratamento (PONCSÁK et al., 2006).

A taxa de degradação térmica dos compostos da madeira, considerados isoladamente, varia consideravelmente. Primeiramente degrada as hemiceluloses, seguidas por alfa celulose, e, por último, lignina (STAMM, 1964; ESTEVES et al., 2011, BATISTA 2012).

A elevação da temperatura aumenta o teor de lignina de Klason, ou seja, a lignina insolúvel em ácido, foi o que concluíram Repellin e Guyonnet (2005), em estudo utilizando temperaturas de 220°C por 60 minutos, entretanto para o tempo de 60 e 180 minutos com a temperatura menor (200°C), o teor de lignina diminuiu, retornando a aumentar em 600 minutos.

Os autores Esteves et al. (2008) e Mohareb et al. (2012) com base em seus estudos concluíram que a madeira modificada termicamente possui mais extrativos, mais lignina aparente e menos polissacarídeos do que a original. Entretanto, Mburu et al. (2007), em estudos com a madeira de *Grevillea*, modificada termicamente entre 240 e 260°C, encontraram uma redução no teor de extrativos de 5,2 para 1,6%. Além disso, os extrativos foram modificados completamente quanto a sua natureza, ou seja, ocorreram a formação de novos compostos químicos.

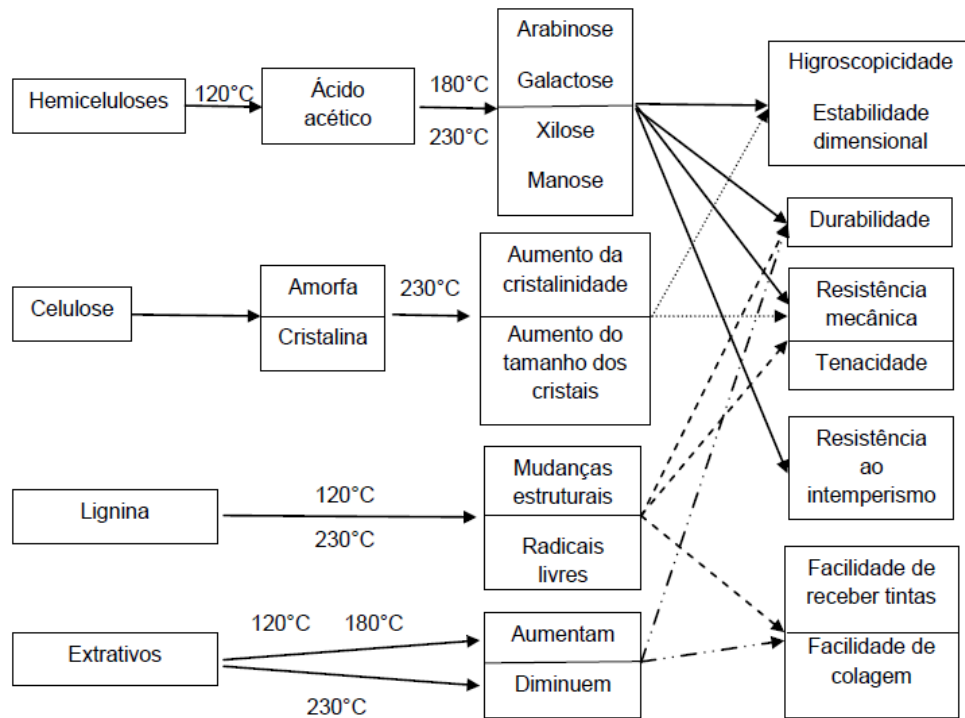
Segundo Esteves et al. (2011) este aumento seguido de decréscimo, sugere que existe um equilíbrio entre a degradação (compostos originais) e o surgimento (compostos novos) provenientes da degradação da holocelulose e lignina. Dessa forma, o aumento na temperatura do processo de modificação térmica, formará novos compostos que irão degradar-se e volatilizar-se da madeira, levando ao aumento e a diminuição.

A confirmação da variação do teor de extrativos é elucidada pelo estudo de modificação térmica da madeira de *Eucalyptus globulus*, em que no decorrer do processo ocorre a formação de novos extrativos principalmente derivados da degradação das hemiceluloses e lignina (BATISTA, 2012). A obtenção dos extrativos com os solventes etanol e água aumentaram

significativamente com os processos de modificação térmica, tanto se utilizando calor seco quanto calor úmido (ESTEVEES et al., 2008).

As degradações térmicas da madeira causam modificações químicas alterando as propriedades físicas, mecânicas, durabilidade natural, cor, odor, dentre outras (FIGURA 1.5).

Figura 1.5 - Mecanismos de reação da madeira modificada termicamente



Fonte: Adaptado de Batista, (2012).

Segundo Tsoumis (1991) a temperatura atua na madeira, inicialmente, para evaporação da umidade (acima de 100°C), após ocorre a evaporação de substâncias voláteis entre 95 a 150°C, a partir desta até próximo dos 200°C sucede a carbonização superficial e lenta liberação de gases inflamáveis. Acima de 200°C até 370°C inicia-se a liberação rápida de gases inflamáveis, seguida de ignição. A ignição completa dos gases inflamáveis e a carbonização da madeira (formação de carvão) ocorre entre 370 e 500°C.

Durante a decomposição térmica da madeira podem se formar produtos tais como ácido acético, metano, alcatrão, ácido fórmico e monóxido de carbono. Além disso, ao variar a intensidade da temperatura e o tempo de exposição, a madeira pode apresentar as seguintes modificações: perda de massa; alterações da estrutura microscópica, redução da higroscopicidade, aumento da contração e redução da resistência mecânica (TSOUMIS, 1991).

Em estudo realizado por Bellon (2013), na modificação térmica realizada a duas temperaturas (140°C e 160°C), na madeira de *Tectona grandis*, pelo processo industrial VAP HolzSysteme®, o teor de holocelulose reduziu 24,01% e o teor de extrativos totais aumentou (158,67%), no tratamento de maior temperatura (160°C).

Segundo Bourgeois et al. (1989); Sundqvist (2004), e comprovada no estudo pela autora, estes comportamentos ocorreram provavelmente pela degradação das hemiceluloses que acabaram contribuindo para a redução da holocelulose e aumento no teor de extrativos totais. A celulose dificilmente é danificada as temperaturas de tratamento. No mesmo estudo os valores das testemunhas da holocelulose, lignina e extrativos totais foram 59,4%, 32,1% e 7,5%, respectivamente.

Lengowski (2011), em estudo da modificação térmica à 160°C de *Tectona grandis*, encontrou um teor médio de holocelulose, lignina e extrativos totais de 49,07% e, 32,56% e 3,54% respectivamente, e verificou redução no teor de hemicelulose em relação a madeira natural.

1.1.4 Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas e mecânicas da madeira

1.1.4.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas avaliam características intrínsecas da madeira (como teor de umidade, cor, massa específica básica e aparente) ou alterações dimensionais nas trocas de água com o meio, na reação à eletricidade e reação ao calor.

A massa específica reflete o volume de espaços vazios em uma dada madeira, ou quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume na mesma (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; VALE et al., 1992; MARQUES et al. 2012). É uma das mais importantes propriedades da madeira, pois a sua variação altera o seu dimensionamento e sua resistência mecânica, sendo utilizada como parâmetro para diversos fins.

A massa específica expressa no Sistema Internacional de Unidades (SI) em quilograma por metro cúbico (kg.m^{-3}). No sistema CGS (centímetro, grama, segundo) a densidade é expressa em grama por centímetro cúbico (g.cm^{-3}) (GLASS; ZELINKA, 2010).

A qualidade da madeira é caracterizada pela massa específica, principalmente para o seu uso e transformação industrial (CALONEGO, 2009). Além do mais esta propriedade é de fácil determinação apresentando boa correlação com as propriedades mecânicas. A sua variação

afeta a resistência e a estabilidade dimensional da madeira, portanto é uma importante caracterização tecnológica da madeira (SCANAVACA JUNIOR; GARCIA, 2004).

A variação da massa específica na madeira ocorre por uma série de fatores intrínsecos como a espécie, estrutura celular (lenho inicial e tardio, lenho adulto e juvenil, cerne e alburno, e lenho de reação), composição química e anatômica (TSOUMIS, 1991).

Além desses, ainda temos os fatores extrínsecos (relações entre suas propriedades e o meio) como os tratamentos culturais e silviculturais, tais como poda, desbaste, espaçamento, material genético, fertilização; fatores do clima (temperatura, umidade relativa, estações do ano, regime de chuvas, geadas e neve), ou seja, qualquer fator que altere o crescimento das árvores modifica a massa específica da madeira (BATISTA, 2012).

Dentre as propriedades citadas anteriormente, se destacam a variação de massa específica dentro do tronco de uma mesma árvore, entre árvores de uma mesma espécie e entre espécies. As principais variações dentro de uma mesma árvore ocorrem nos sentidos base-topo e medula-casca (TSOUMIS, 1991).

Além desta, pode-se descrever a umidade, pois a mesma não afeta somente a massa específica, mas as físicas e mecânicas, térmicas, acústicas e elétricas. Deste modo, para fins de comparação entre amostras, é importante que as condições de umidade sejam semelhantes. De maneira geral, quanto maior a umidade, maior será a densidade da madeira (KOLLMANN; CÔTÉ JUNIOR, 1968).

O processo de modificação térmica leva a madeira a perda de massa, devido ao aumento da temperatura, resultando na degradação dos constituintes fundamentais da parede celular (celulose, hemicelulose, lignina) e os extrativos. Com isso, ocorrem alterações na massa específica, higroscopicidade, resistência mecânica e durabilidade natural da madeira (HILL, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009; BATISTA 2012).

Dentre os constituintes químicos da madeira o teor de extrativo voláteis e a hemicelulose são os principais responsáveis pela redução da massa específica durante o processo de modificação térmica. Esta redução é mais observada à medida que se utilizam maiores temperaturas no processo (TSOUMIS, 1991; PINHEIRO et al., 2008).

A massa específica da madeira de teca pode apresentar grande amplitude de variação, entre 0,44 e 0,82 g/cm³, podendo variar em função da idade, do material genético e posição no tronco (RICHTER et al., 2009). Em madeira adulta, a madeira de teca apresenta um valor médio de densidade próximo a 0,650 g/cm³ (LINCOLN, 1986).

Os autores Chagas et al. (2014), avaliaram algumas propriedades da madeira oriunda de árvores de teca (*Tectona grandis* L. f.) de plantios comerciais com quatro, seis e doze anos para

uma classe diamétrica entre 9 e 13 cm. Eles encontraram massa específica aparente 0,527 g/cm³, 0,514 g/cm³ e 0,522 g/cm³, para as idades quatro, seis e doze anos respectivamente.

Entre as três idades estudadas, não foram observadas diferenças estatísticas da massa específica aparente a 12% de umidade. Entretanto os valores reais diferentes encontrados ocorreram, provavelmente devido as amostras terem sido retiradas de toras com diâmetro semelhante e com maior porcentagem de madeira juvenil.

Em estudos, Lopes et al. (2014), determinaram o efeito de tratamentos termorretrificadores nas propriedades físicas (massa específica aparente) da madeira (alburno e cerne) de *Tectona grandis* L. f., proveniente de plantios de diferentes espaçamentos. Eles concluíram que a massa específica na madeira de cerne não diferenciou significativamente nos diferentes espaçamentos, em contrapartida o alburno apresentou diferença estatística significativa para o espaçamento mais adensado (4x2 m). Os maiores valores médios de massas específicas foram de 0,663 g/cm³ para o alburno e 0,616 g/cm³ para o cerne nos espaçamentos 4x2 m e 6x2 m respectivamente.

Na pesquisa de Pinto (2007), avaliando as propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis*, encontrou um valor médio da massa específica aparente de 0,53 g/cm³. Já Flórez (2012), caracterizando a madeira de Teca, obteve massa específica aparente de 0,540 g/cm³.

Para Bellon (2013), a modificação térmica realizada a duas temperaturas (140°C e 160°C), na madeira de *Tectona grandis*, pelo processo industrial VAP HolzSysteme®, nos tratamentos (Testemunha, 140 e 160°C), e nas condições (anindra, 12% e 17,10%), para cada tratamento, encontrou-se valores superiores na massa específica, para a temperatura de 140°C, sendo o maior valor de 17,10% (0,59 g/cm³).

A água é fundamental para a sobrevivência de uma árvore, quando recém abatidas apresenta uma grande quantidade de água no seu interior, chegando muitas vezes superior a 100% do seu peso seco (COSTA et al., 2001). Entretanto, quando a madeira é serrada e expostas ao ambiente, a mesma começa a perder umidade para a atmosfera circundante (GLASS; ZELINKA, 2010; BATISTA, 2012).

De acordo com Hill (2006), a madeira é um material higroscópico, ou seja, sendo capaz de absorver ou perder água para o meio ambiente. Esta característica é explicada pela constituição química da madeira, composta pelos polímeros de celulose, hemiceluloses e lignina. Dentre esses polímeros a hemicelulose é a mais hidrófila, favorecendo a troca de água com o meio, que contribui para a variação dimensional da madeira (BORGES; QUIRINO, 2004).

Dessa maneira, por exemplo, quando a madeira é exposta em um ambiente com umidade superior a ela, irá absorver a umidade (inchamento), até que atinja o equilíbrio com o meio circundante, o contrário é verdadeiro, ou seja, com o aumento do teor de umidade, aumentam as dimensões da madeira (inchamento) (HILL, 2006; LOGSDON, 2008).

O teor de umidade, assim como a massa específica, é uma propriedade física muito importante para ser definido na madeira. Segundo Borges e Quirino (2004), o teor de umidade causa mudanças nos tratamentos como curvamento, preservação, secagem, colagem, fabricação de compensados e aglomerados, produção de carvão vegetal, processamentos mecânicos, entre outros. Logo essas mudanças, principalmente o comportamento das variações dimensionais da madeira são importantes para a utilização das indústrias.

A água está na madeira na forma livre (capilaridade) localizadas nos vasos, canais e lúmen das células, ou de água higroscópica (adesão) aderido por ligações de pontes de hidrogênio aos grupos hidroxílicos nas cadeias da celulose, hemicelulose e em menor extensão na lignina, sendo esta mais difícil de ser retirada da madeira (SKAAR, 1972; SIAU, 1995).

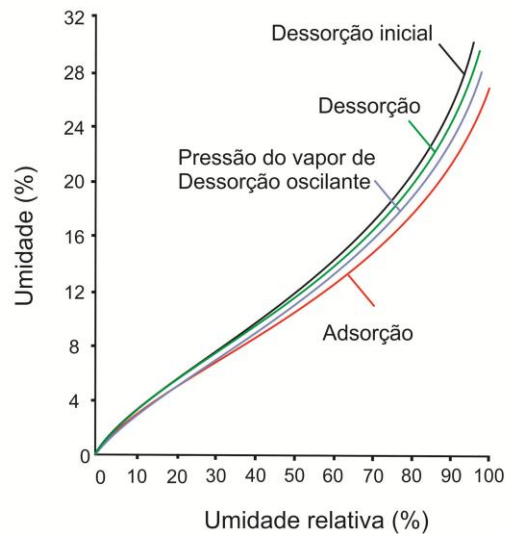
A madeira perde primeiramente toda a água livre até o ponto de saturação das fibras (PSF), variando entre 28 e 30%, dependendo da espécie, e após começa a perder a água higroscópica até entrar em equilíbrio com o meio circundantes, período denominado de umidade de equilíbrio da madeira (TUE) (HAYGREEN; BOWYER, 1996). Entretanto este fato é difícil de ocorrer pois a temperatura e umidade relativa do ar estão sempre variando no meio ambiente (GLASS; ZELINKA, 2010).

Além da temperatura do ar e umidade relativa do ar, outro fator como massa específica, teor de extrativos e histórico de exposição, ou seja, os locais que a madeira ficou exposta são importantes e devem ser considerados para atingir a umidade de equilíbrio (SIAU, 1995).

A madeira devido a sua característica higroscópica quando exposta em ambientes com pouca umidade perde água gerando uma curva de dessorção inicial. O contrário é verdadeiro, e desta vez obtém uma curva de adsorção (FIGURA 1.6).

A diferença de umidade de equilíbrio entre essas curvas, para uma mesma condição de umidade relativa, é conhecida como histerese (SIAU, 1995; GLASS; ZELINKA, 2010). Quando a madeira é exposta novamente a um novo ciclo de dessorção, a curva de dessorção inicial não é reproduzível, devido à redução da higroscopicidade.

Figura 1.6 - Relação sob adsorção e duas condições de dessorção



Fonte: Adaptado de Batista, (2012).

Esse fenômeno causa efeitos irreversíveis na redução da umidade de equilíbrio da madeira, causado pela reidratação incompleta dos sítios higroscópicos durante o ciclo de adsorção subsequente, e aos estresses de compressão causados pela contração ocorrida na dessorção inicial (SIAU, 1995; BATISTA, 2012).

As propriedades mais importantes da madeira modificada termicamente é o menor teor de umidade de equilíbrio higroscópico, o que, por conseguinte, reduz as variações dimensionais (contração e inchamento) do material, quando comparada com a madeira natural (SYRJANEN, 2001)

Segundo Poncsák et al. (2006), no decorrer do processo da modificação térmica os grupos hidrofílicos de hidroxila (OH), ou seja, que são os pontos de adsorção das moléculas de água, diminuí e são substituídos por grupos hidrofóbicos *O*-acetil (substâncias insolúveis em água), que geram ligações cruzadas entre fibras da madeira, reduzindo significativamente a capacidade da água em penetrar nessa estrutura. Dessa forma, a eliminação das hidroxilas torna a madeira dimensionalmente mais estável.

A modificação térmica reduz a higroscopicidade da madeira devido a alterações na parede celular que é composta de microfibrilas de celulose envoltas por uma matriz hidroreativa, formada por hemicelulose e lignina. Esta matriz possui grande capacidade em absorver água, por essa razão, tem importância fundamental no processo de expansão dimensional da madeira (REPELLIN; GUYONNET, 2005).

A madeira modificada termicamente apresenta uma maior estabilidade dimensional devido a redução da higroscopicidade, causada pela degradação das hemiceluloses, em razão do baixo peso molecular e estrutura ramificada. Dessa forma, ocorre a ruptura dos grupos hidroxílicos livres da região amorfa da celulose e a reticulação dos polímeros que compõem a madeira (STAMM, 1964; WEILAND; GUYONNET, 2003; ROUSSET et al., 2004).

De acordo com o IPT (1985) e Oliveira (1998), a retratibilidade é definida como um fenômeno da variação dimensional da madeira quando ocorrem alterações no seu teor de umidade, resultando em inchamento e contração pela perda de água abaixo do ponto de saturação das fibras.

O principal problema da madeira, para uso estrutural, é a característica da variação dimensional. Além do mais, estas mudanças ocorrem de maneira desigual na madeira, devido a sua propriedade anisotrópica (movimentação desigual conforme seu plano de orientação). Por estes motivos, ocorrem empenamentos, encanoamento, rachaduras internas e superficiais (STAMM, 1964). Segundo diversos autores, Stamm, (1964); Kollmann e Côté Junior, (1968), a madeira deve tornar-se menos higroscópica, para diminuir as suas contrações, e dessa forma, oportunizar seu uso como madeira maciça em todos os segmentos.

A anisotropia de contração e inchamento é caracterizada pela estrutura anatômica da madeira, na qual a direção tangencial aos anéis de crescimento sofre a maior variação dimensional. Fato este, que a contração tangencial possui valores de 3,5 a 15%, enquanto que a contração radial se encontra entre 2,4 a 11%, sendo a contração longitudinal (0,1 a 0,6%) quase que negligenciada (KOLLMANN; CÔTÉ JUNIOR, 1968). Entretanto, podem-se encontrar valores mais elevados em madeira anormal, como por exemplo, lenho juvenil, lenho de reação e de grã reversa (COSTA, 2001).

A massa específica é um dos principais fatores que intervêm na variação dimensional da madeira, pois quanto maior a sua massa específica maior a movimentação dimensional. Este fato ocorre devido a maior concentração de células de parede mais espessas, resultando em um maior número de sítios de sorção da água, o que resulta em maior modificação das dimensões celulares durante as trocas de umidade com o meio (TSOUMIS, 1991).

Outro fator, mas em menor grau de interferência na redução da contração e do inchamento da madeira, é o teor de extrativos. Esta influência ocorre proporcionalmente ao espaço ocupado por eles na parede celular, ou seja, quanto maior a degradação do extrativo maior será a contração e inchamento da madeira (JANKOWSKY; GALVÃO, 1979; TSOUMIS, 1991).

A influência da composição química das paredes celulares é pequena na variação dimensional da madeira, pois entre espécies, de maneira geral, não possuem grandes diferenças (BATISTA, 2012). Apesar disso, Skaar (1972) e Tsoumis (1991), observam que a lignina exerce um efeito que limita a movimentação dimensional, principalmente por causa da sua menor higroscopicidade em relação aos demais constituintes primários da parede celular. Segundo Batista (2012), as inter-relações da estrutura anatômica, composição química, teor de extrativos e massa específica respondem pelas diferenças de contração e inchamento entre espécies.

De acordo com Durlo e Marchiori (1992), o mais importante índice para se avaliar a estabilidade dimensional da madeira é o coeficiente ou fator anisotrópico que é a relação entre a contração no sentido tangencial e radial da madeira, quantificado pelo valor igual a 1, sendo este considerado o ideal, pois as tensões nos dois sentidos se anulariam. Isso representa que a madeira mais distante de 1 estará mais propensa a empenar e rachar, durante as alterações provocadas pela variação higroscópica.

Os mesmos autores estabeleceram a seguinte classificação da madeira em função dos seus coeficientes de anisotropia: 1,2 a 1,5 - considerada excelente; 1,5 a 2,0 - considerada normal; maior que 2,0 - considerada como ruim. Segundo Oliveira (1988), os valores obtidos para o fator de anisotropia podem variar de 1,3 para madeira de elevada estabilidade dimensional até para valores superiores a 3,0, comumente encontrados em algumas espécies.

No estudo das propriedades físicas de Teca, aos 5 anos de idade, Pinto (2007), encontrou um valor médio de retração radial, tangencial e volumétrica foi de 2,56%, 3,26% e 5,65%, respectivamente. Enquanto os valores de coeficiente de anisotropia foram de 1,38 para a retração e 1,34 para o inchamento.

A teca apresenta valores de densidade aparente de $0,66 \text{ g/cm}^3$, e contrações tangenciais de 4,66% e radial de 2,10% (IPT, 1997). Em estudo caracterizando a madeira de teca, Flórez (2012) obteve valores de retração tangencial (4,21%), radial (2,40%), volumétrica (6,84%) e coeficiente de anisotropia igual a 1,82, para a densidade aparente (teor de umidade 10%) de $0,540 \text{ g/cm}^3$ e básica de $0,527 \text{ g/cm}^3$.

1.1.4.2 Colorimetria

A medição da cor é o ramo da ciência conhecido como colorimetria. A quantificação é realizada por variáveis numéricas as interações provocadas pela luz em uma superfície qualquer.

O objetivo principal da colorimetria é evitar conflitos ocasionados pela dificuldade que a visão humana “olho nu” tem em diferenciar cores muito semelhantes (GONÇALEZ, 1993). A colorimetria é um método quantitativo que descreve numericamente cada elemento da composição de uma cor por meio de aparelhos apropriados (MORI et al., 2004).

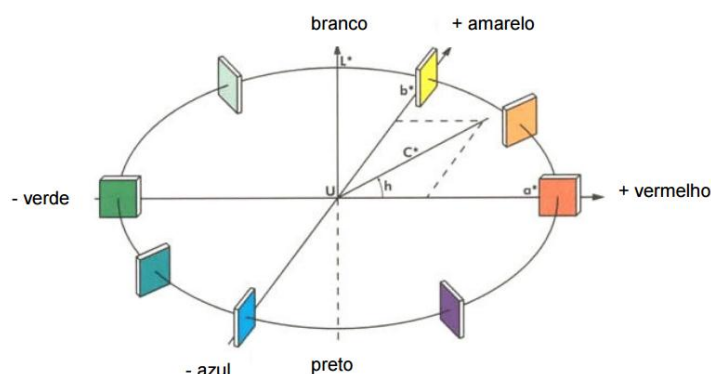
Segundo Araújo (2002), Autran e Gonzalez (2006), a cor da madeira é uma das propriedades organoléptica, ou seja, aquelas compreendidas pelos sentidos humanos, mais importante para a identificação de madeiras. Além disso, considera-se recentemente, a cor como um indicador de qualidade da madeira juntamente com as propriedades físicas e mecânicas.

Por esta razão, Mori et al. (2005), entendem que a análise da cor deve ser incorporada, na avaliação e planejamento da madeira, visando a sua caracterização tecnológica a fim de atender aos usos mais exigentes do mercado. Segundo diversos autores (JANIN et al., 2001; MÖTTÖNEN et al., 2002; MORI et al., 2005, LOPES 2012), as características estéticas da madeira (superfície e desenho) e a homogeneidade da cor tem desempenhado um papel importante para estabelecer os preços da madeira serrada e a comercialização de diversos produtos tais como móveis e laminados decorativos, por exemplo.

O colorímetro e espectrofotômetro são os dois instrumentos utilizados para analisar dados de cor em superfícies. O primeiro por meio de uma série de filtros e fotodetectores quantifica a cor dos objetos expostos a luz. O segundo ilumina a superfície do objeto a ser medido e calcula o comprimento de onda e a quantidade de luz por ela refletida (RAPPOLD; SMITH, 2004).

O método quantitativo é baseado na medição de cores é o CIE-L*a*b*, de acordo com a norma francesa CIE «Commission Internationale de L'Éclairage» (1976), em que se trabalha com coordenadas cromáticas L*, a*, b*, C e h* em um espaço de cor tridimensional tal como ilustrado na Figura 1.7.

Figura 1.7 - Sistema de coordenadas de cores cielab 1976



Fonte: Adaptado de Griebeler, (2013).

Este sistema é baseado em três elementos: a luminosidade ou claridade, a tonalidade ou matiz e a saturação ou cromaticidade (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001). O L^* representa a luminosidade que varia de zero a 100, indicando o primeiro absolutamente preto e o segundo totalmente branco. As coordenadas cromáticas a^* e b^* indicam as tonalidades que podem variar entre 0 e 60. De acordo com o diagrama de cromaticidade, as coordenadas a^* e b^* assumem os sinais de positivos e negativos que indicam a variação das cores vermelho, verde, amarelo e azul, em que $+ a^*$ (acréscimo na cor vermelha), $- a^*$ (acréscimo na cor verde), $+ b^*$ (acréscimo na amarela) e $- b^*$ (acréscimo na cor azul).

O ângulo de tinta (h^*) é o ângulo do círculo, que pode expressar a tonalidade, e pode variar entre 0 e 60 nas madeiras. A saturação ou cromaticidade (C) seria o raio do círculo de tonalidade, partindo do ponto cinza do eixo de luminosidade até a cor pura espectral localizada na extremidade do círculo. Quanto mais distante do eixo, mais saturada será a cor. A variável de saturação (C) pode ir de 0 a 60 (sem unidade de medida). Estes dois parâmetros são derivados dos valores de a^* e b^* (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

A cor natural da madeira pode sofrer alterações por fatores genéticos e ambientais. A variação da cor ocorre entre espécies, e ainda é influenciada pelas condições do clima e solo, características físicas (massa específica e teor de umidade), estrutura anatômica (vasos, raios e tipo de parênquima axial), teor de extrativos, tratamentos silviculturais, taxa de crescimento, altura, diâmetro e idade da árvore (RINK, 1987; GONÇALEZ, 1993).

O tratamento da modificação térmica, na Europa, é utilizado para escurecimento de madeiras claras. Este processo é conhecido como “tropicalização” (LOPES et al., 2014 b). Dessa forma, segundo os mesmos autores, a cor se aproxima das madeiras tropicais, as quais possuem uma coloração mais escura e de alto valor comercial. Análise final da cor de qualquer produto lhe garante um padrão de qualidade de mercado exigido mundialmente (LOPES, 2012).

No Brasil, a empresa *TWBrazil* utiliza o processo de modificação térmica para basicamente uniformizar a cor da madeira (cerne e alburno) da madeira de teca (*Tectona grandis*). Já que esta espécie, segundo Rilling (2009) e Flórez (2012), possui uma coloração para marrom-caramelo, e bem distinta entre cerne (marrom vivo e brilhante) e alburno (amarelo esbranquiçado).

A madeira modificada termicamente apresenta, além da maior estabilidade dimensional, a mudança na sua cor original. Dessa maneira, em estudos com a madeira de *Tectona grandis* Lopes (2012) concluiu que a modificação térmica uniformizou a cor da madeira, agregando valor no produto final. Ainda segundo Mottonen et al. (2002), a madeira de cor uniforme é um atributo estético importante pois altera o preço final do produto.

No estudo, Lopes et al. (2014b), com objetivo de avaliarem a uniformidade da cor da madeira de teca aos 12 anos (peças contendo cerne e alburno) após a aplicação de tratamentos termorretilificadores (180 e 200°C), encontraram valores de ΔE^*_{ab} no tratamento a 200°C (entre 3,43 e 5,21) que foram significativamente inferiores aos encontrados no tratamento a 180°C (entre 10,12 e 15,45), em todos os espaçamentos. Os mesmos autores concluíram que os tratamentos termorretilificados a 200°C proporcionaram maior uniformidade às peças de madeira contendo cerne e alburno, e com isso foi mais efetivo.

Os extrativos fenólicos (quinonas, flavonóides, lignanas e taninos) e suas enzimas são as principais interações químicas na madeira responsáveis pela sua mudança de cor (RAPPOLD; SMITH, 2004).

Embora os principais efeitos da modificação térmica seja a melhoria da estabilidade dimensional e a resistência ao ataque de organismos xilófagos, o processo possibilita a alteração da cor da madeira, a qual pode ser uniformizada, criando-se novos padrões (LOPES et al., 2014b).

Segundo alguns autores Sundqvist e Moren, (2002); Esteves et al. (2008); Lopes et al. (2014b), a alteração da cor original da madeira após a modificação térmica pode ser causada por formação de produtos oxidativos (por exemplo, quinonas) e produtos da degradação das hemiceluloses e da lignina, os quais migram às superfícies da madeira. Ainda podem ocorrer pela remoção ou migração dos extrativos e compostos nutritivos, tais como açúcares de baixo peso molecular e aminoácidos, em direção às superfícies da madeira.

1.1.4.3 Propriedades mecânicas

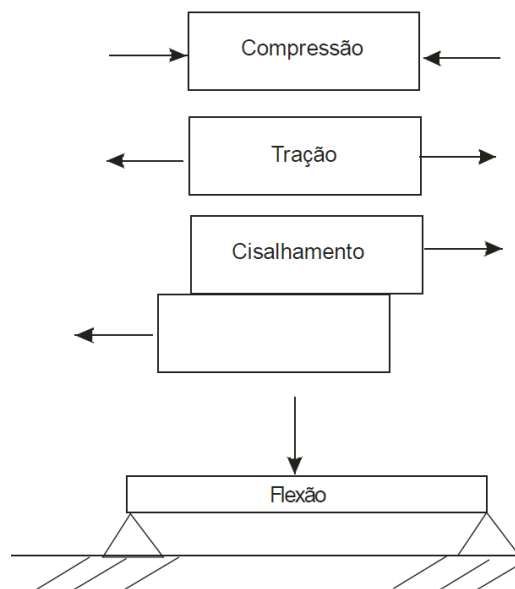
As propriedades mecânicas são de grande importância para estudos sobre a qualidade tecnológica da madeira e conseqüente condição de uso. Para isto é definida pelo comportamento da madeira submetida a esforços de natureza mecânica, ou seja, é a capacidade de resistir às forças externas que tendem a causar deformação na mesma, sendo estimada por valores de resistência mecânica (WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991).

Dois conceitos, esforço (σ) e deformação (ϵ) são de grande importância para o entendimento da resistência mecânica da madeira. O primeiro é a medida das forças internas ocorridas por um material, em retorno a aplicação de carga externo. O segundo é a medida da capacidade do material em mudar de forma em resposta aos esforços externos, ou seja, alongar ou comprimir, quando submetido a esforço (WINANDY; ROWELL, 1984). Segundo os

mesmos autores os valores de resistência mecânica são estimativas numéricas da capacidade de um material em resistir às forças externas que tendem a causar deformação no mesmo.

Os principais ensaios mecânicos empregados na caracterização da madeira são por meio dos esforços de tração, compressão e cisalhamento (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; VIEIRA, 2009; WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991). Na Figura 1.8, a representação dos esforços, ilustra a combinação dos três esforços anteriores caracterizando a flexão do corpo.

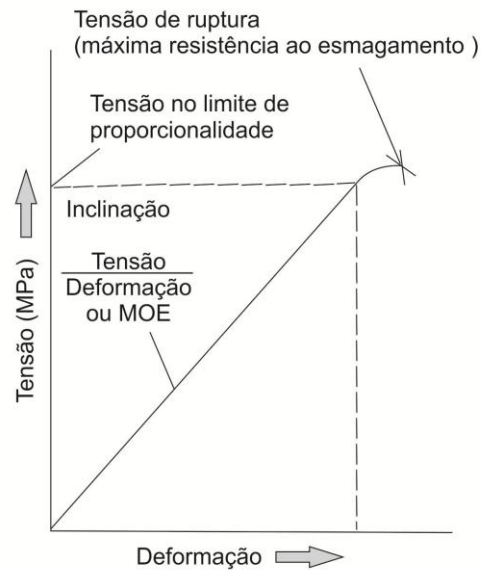
Figura 1.8 - Representação dos esforços mecânicos



Fonte: Adaptado de Batista, (2012).

As deformações ocasionadas na madeira pela tensão da carga podem ocorrer até o ponto conhecido como limite de proporcionalidade (elástico), em que, acima dele, o aumento da carga causa deformação maior e não proporcional (plástica), até a ruptura do material (WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991). Logo, abaixo do limite de proporcionalidade, a razão entre tensão e deformação é dada pela inclinação da reta e demonstra-se, como um valor constante chamado de módulo de elasticidade (MOE) (FIGURA 1.9).

Figura 1.9 - Diagrama de tensão pela deformação específica



Fonte: Adaptado de Winandy e Rowell, (1984).

Este módulo é determinado na região em que a madeira se comporta como um material elástico e dessa forma, é usada para determinar os ensaios de flexão, compressão e tração (HAYGREEN; BOWYER, et al. 1996).

A flexão estática da madeira é realizada por ensaio mecânico que demonstra a sua máxima capacidade de carga antes da ruptura, e geralmente é explicada pelo termo de módulo de ruptura (MOR) e varia entre 55 e 160 MPa (WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991; KRETSCHMANN, 2010). Com estes valores, segundo os mesmos autores, obtêm-se as tensões aceitáveis para as várias formas de utilização da madeira

Além deste o módulo de elasticidade (MOE), que demonstra quanto pode resistir um material a grandes cargas sem apresentar deformação permanente, varia entre 3500 MPa e 19300 Mpa (HAYGREEN; BOWYER, 1996). Entretanto, para Tsoumis (1991), após o estudo de muitas madeiras de coníferas e folhosas, foi encontrado valores de MOE (12% de umidade) que variam entre 6.600 (*Triplochiton Scleroxylone*) e 16.170 MPa (*Betula* sp). Ainda segundo o mesmo autor, os valores do MOE e do MOR variam em função da espécie, do teor de umidade em que se encontra a madeira e da massa específica do material.

Outro fator importante é a compressão paralela às fibras que auxilia no dimensionamento de estruturas de madeira, em especial colunas (WINANDY; ROWELL, 1984). Os valores de compressão paralela podem alcançar até 15 vezes mais que a compressão

perpendicular às fibras, chegando, de acordo com a espécie, entre 25 e 95 MPa (TSOUMIS, 1991; KRETSCHMANN, 2010).

A resistência mecânica da madeira pode ser alterada por muitos fatores internos (anatômica da madeira, grã, nós, orientação dos anéis de crescimento, tipos de lenho, idade, dentre outros), externos (umidade relativa, temperatura, pH, fogo, precipitação e radiações), antrópicos (impregnação com produtos químicos preservativos, adubação, manejo, dentre outros) e ainda por biodeterioração (WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991; KRETSCHMANN, 2010).

A modificação térmica altera a resistência mecânica da madeira pois ocorrem mudanças químicas permanentes que reduz a higroscopicidade em relação a original, principalmente pela perda de massa de hemicelulose. Por um lado, é favorável pois reduz a umidade de equilíbrio, o qual aumenta a resistência mecânica, entretanto, pode reduzir a resistência (STAMM, 1964; WINANDY; ROWELL, 1984; FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003; BORREGA; KÄRENLAMPI, 2008)

Durante a modificação térmica a madeira perde resistência mecânica devido a degradação dos componentes da hemicelulose como a xilose, a galactose e a arabinose (WINANDY; ROWELL, 2005). Poncsák et al. (2006), avaliou a resistência da madeira de *Betula papyrifera* pelo módulo de ruptura após o efeito da temperatura, e constataram que ocorreu uma diminuição com o aumento da taxa de aquecimento. Segundo os mesmos autores, ocorreu provavelmente pela quebra das moléculas de celulose e principalmente hemicelulose. Para Yildiz et al. (2006), estudando a madeira de spruce, somente ocorreram alterações na resistência à compressão quando submetida a temperaturas superiores a 180°C. Já para Shi et al. (2007), encontrou redução no módulo de elasticidade menor que o módulo de ruptura, na madeira, no tratamento com temperaturas acima de 200°C, e concluí que existe casos de folhosas em que o módulo de elasticidade pode aumentar em até 30% em relação à madeira não tratada.

No entanto, as avaliações das propriedades mecânicas geram divergências pois as vezes se tem um acréscimo da resistência e em outras um decréscimo. Dessa forma, pode-se destacar que as mudanças dependem da espécie, do tratamento térmico e do tempo de exposição ao calor.

1.1.5 Degradação da madeira por fungos xilófagos

A madeira é um material orgânico, por isso sofre degradação por agentes abióticos (climáticos, mecânicos, químicos e térmicos) e bióticos (algas, fungos, bactérias, insetos, moluscos e crustáceos), comprometendo todas as partes da sua estrutura afetando a sua aparência, estrutura anatômica e composição química (BATISTA, 2012).

Segundo Cavalcante (1982) e Clausen (2010), os agentes bióticos são os principais deterioradores da madeira, sendo conhecidos como organismos xilófagos, em que podem causar ataque desde simples perda de cor superficial, até destruição completa da madeira.

De maneira geral os organismos xilófagos buscam na madeira alimentação, proteção (abrigo) e reprodução, que aliado as condições climáticas favoráveis, promove com facilidade o seu desenvolvimento e degradação da madeira (TSOUMIS, 1991). Outro fator preponderante é a resistência natural da madeira que é compreendida pelo uso sem proteção especial como, por exemplo, o uso de preservante. Esta resistência varia entre espécie, dentro da mesma árvore, em condições de uso e do tipo de organismo xilófago (EATON; HALE, 1993).

A resistência natural a agentes biodeterioradores é maior no cerne do que no alburno. Este fato é explicado pelos teores de extrativos que existem no cerne tais como fenóis, terpenos, alcaloides, dentre outros. Um exemplo é o extrativo pertencente à classe das antraquinonas e tectoquinonas que são os principais responsáveis pela resistência natural do cerne da madeira de *Tectona grandis*. Por isto, esta possui boas propriedades antifúngicas, bactericidas e repelentes a ataques de alguns insetos (FERREIRA et al., 2015). Ao contrário disso, o alburno é mais suscetível porque é encontrado menor teor de extrativos, além de maior umidade e substâncias nutritivas (açúcares e amido) (KIRK; COWLING, 1984; TSOUMIS, 1991).

Além dos extrativos, a lignina previne a degradação dos polissacarídeos (celulose e hemicelulose) da parede celular. Dessa forma, a biodeterioração dos materiais lignocelulósicos, incluindo a madeira, depende do teor de lignina (KIRK; COWLING, 1984).

Os fungos decompositores são divididos em dois grupos principais: fungos de podridão parda e de podridão branca, em que a nomenclatura está relacionada com a aparência da madeira deteriorada. Os fungos de podridão branca degradam todos os constituintes fundamentais da madeira (celulose, hemicelulose e lignina), ao passo que a hemicelulose é mais afetada (BLANCHETTE, 2000; BATISTA, 2012). Dessa maneira, a madeira fica com a aparência mais clara que o normal, e independente da intensidade do ataque, mantém as suas dimensões externas, sem defeitos aparentes tais como rachaduras e colapso, mas algumas vezes adquire aspecto esponjosa (TSOUMIS, 1991; BARREAL, 1998; CLAUSEN, 2010).

Ao contrário do fungo de podridão branca, o fungo de podridão parda ataca principalmente os carboidratos (celulose e hemicelulose), e pouco a lignina. Dessa forma, a madeira adquire coloração escura, podendo apresentar rachaduras perpendiculares e ao longo da direção das fibras, contrações, colapso ou ainda ser desagregada e reduzida a pó (TSOUMIS, 1991; BARREAL, 1998; CLAUSEN, 2010). Além do mais, segundo Blanchette (2000) e Raymundo (2010), o ataque do fungo de podridão pode chegar até 65% de perda de massa, ocorrendo tanto da celulose quanto da hemicelulose da madeira.

Segundo Pala (2012) e Costa et al. (2011) os fungos da podridão são provavelmente um dos mais comuns destruidores da madeira, que resulta na degradação acentuada do material, alterando sua característica química, modificação da cor natural, redução da resistência mecânica, diminuição de massa, aumento da permeabilidade, redução da capacidade acústica, aumento da inflamabilidade, diminuição do poder calorífico e maior propensão ao ataque de insetos. Ainda, segundo os mesmos autores, o material que tem suas propriedades alteradas por causa dos fungos compromete a sua qualidade e inviabilizando sua utilização para fins tecnológicos.

De acordo com Rayner e Boddy (1988), as avaliações causadas pela degradação dos fungos decompositores é estimada de forma direta, por meio da perda de massa de matéria seca da madeira, a qual é inoculado o fungo a ser testado. Outra forma, segundo os mesmos autores, é a correlação com a quantidade e tipo de enzimas produzidas pelo fungo.

A modificação térmica é uma alternativa para aumentar a resistência natural da madeira contra os organismos xilófagos, em especial os fungos decompositores. Além disso, substitui, de forma satisfatória, o uso de produtos químicos (preservantes) nocivos ao meio ambiente, e utilizados em embalagens de alimentos e armazenamento de líquidos (BRITO et al., 2006).

O aumento da resistência à biodeterioração conferido à madeira pelos processos de modificação térmica tem sido comumente explicado por quatro hipóteses: a redução da higroscopicidade; a geração de novos extrativos tóxicos pela formação de novos compostos como o furfural, por exemplo, que se une às cadeias aromáticas da lignina; a modificação dos polímeros da parede celular como pela esterificação da celulose pelo ácido acético, liberado pela quebra das hemiceluloses; e a redução do teor de hemiceluloses como as pentosanas, que constituem uma das principais fontes de nutrientes para os fungos (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003; WEILAND; GUYONNET, 2003; HAKKOU et al., 2008; LEKOUNOUGOU et al., 2009).

As modificações químicas na parede celular da madeira, causadas pela modificação térmica, ocorrem em determinadas temperaturas, geralmente acima de 150°C, gerando aumento da resistência da madeira ao ataque de agentes xilófagos (BOONSTRA et al., 2007).

A madeira de *Tectona grandis* possui alta durabilidade natural e apresenta alta resistência à ação de fungos decompositores (MOTTA et al., 2013). Bellon (2013), em estudos da modificação térmica da madeira de três espécies (*Pinus Taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*) de florestas plantadas pelo processo VAP HolzSysteme®, constatou que a madeira de *Tectona grandis* foi a menos biodeteriorada em comparação as demais madeiras. Motta et al. (2013) ao ensaiar o apodrecimento acelerado de *Tectona grandis* natural com o fungo *Polyporus fumosus*, causador de podridão branca, por 13 semanas, classificam-na como de resistência moderada.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS GERAIS

1.2.1 Origem do material

A madeira utilizada teve origem de um plantio comercial de *Tectona grandis*, com árvores de aproximadamente 15 anos, pertencente a empresa Berneck, localizado no município de Brasnorte, Mato Grosso, Brasil. A madeira coletada pertence ao último desbaste, sendo esta intervenção anterior ao corte raso.

As árvores depois de abatidas foram transformadas em toras, as quais foram desdobradas na empresa Berneck em tábuas de aproximadamente 35 x 100 x 2200 mm (espessura, largura e comprimento), pelo método de desdobro tangencial, utilizando uma serra fita vertical. Posteriormente estas foram secas em estufa até a umidade média de 12% e em seguida encaminhadas para a empresa *TWBrazil* (Ponta Grossa, Paraná) para a realização da modificação térmica.

1.2.2 Amostragem e tratamentos

As tábuas foram separadas e numeradas em classes de qualidade, conforme a classificação adotada pela empresa. As tábuas de primeira classe foram aquelas com a maior presença de cerne e livres de defeitos, tais como rachaduras, nós, empenamentos, dentre outros, ao passo que, as de segunda classe, apresentavam porções maiores de alburno e os defeitos citados anteriormente. Os tratamentos foram a aplicação ou não do processo de modificação

térmica nas classes de qualidades (1ª ou 2ª). Desta forma, foram separados quatro lotes de madeira, em quatro tratamentos como demonstra a Tabela 1.3.

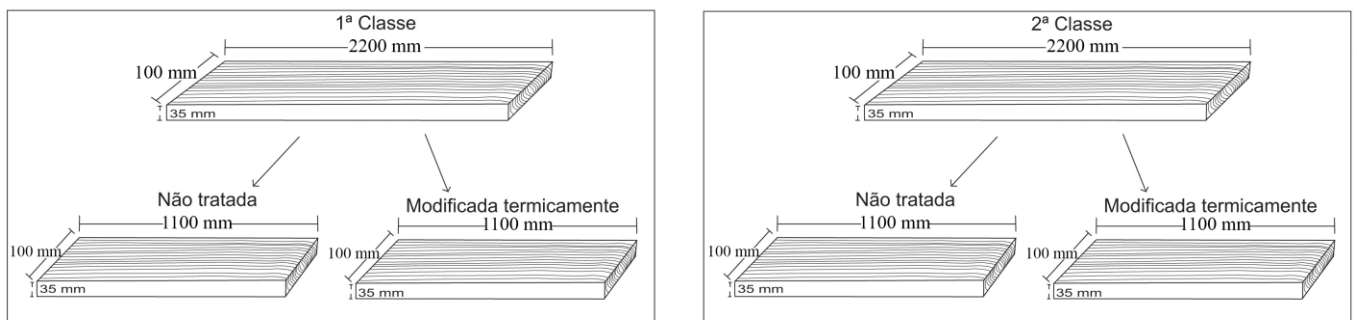
Tabela 1.3 - Tratamentos utilizados no experimento

Tratamentos	Avaliações
T1	Tábuas não tratadas de 1ª qualidade
T2	Tábuas não tratadas de 2ª qualidade
T3	Tábuas tratadas de 1ª qualidade
T4	Tábuas tratadas de 2ª qualidade

Fonte: Autor.

As peças originalmente de 2200 mm de comprimento foram divididas em duas peças de iguais dimensões (1100 mm), sendo uma delas correspondendo à madeira testemunha, ou seja, a não modificada termicamente, para posterior comparação com a tratada (FIGURA 1.10).

Figura 1.10 - Esquema do corte das tábuas para a amostragem



Fonte: Autor.

As tábuas foram identificadas com lápis cópia, para não perderem a identificação durante o processo de modificação térmica, por conta do escurecimento da madeira.

1.2.3 Processo de modificação térmica

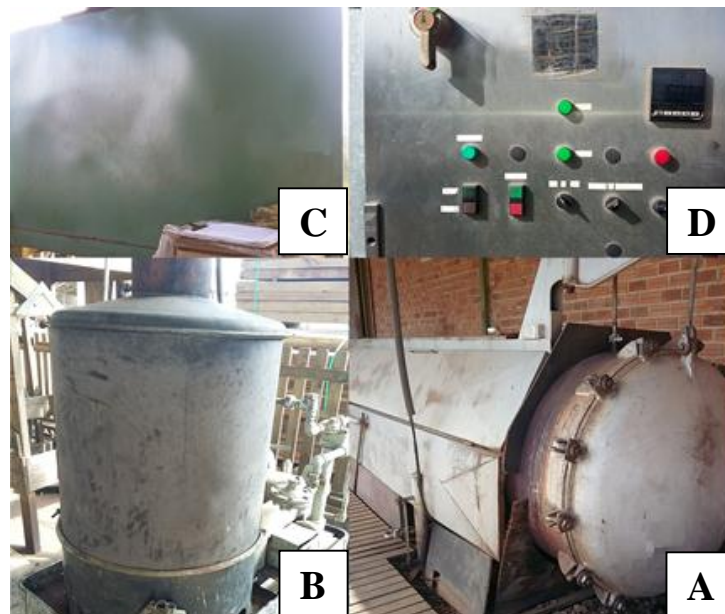
A modificação térmica foi realizada na empresa *TWBrazil*, a qual iniciou em 2006 o processo de aplicação de elevadas temperaturas (até 180°C) na madeira, por meio de vapor saturado e um sistema de eliminação do oxigênio (para evitar a combustão da mesma). A terminologia utilizada pela empresa para os produtos tratados por este sistema denomina-se

Thermally Modified Timber ou *TMT*, que tem o processo por eles patenteado e conhecido como VAP HolzSysteme®.

A empresa iniciou a modificação térmica com decks de madeira de *Tectona grandis*, já realizou diversos testes com diferentes espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, os mais recentes foram com as madeiras de *Toona ciliata* M. Roem (cedro australiano) e *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn (cedro indiano). Atualmente, a empresa produz e comercializa madeira modificada termicamente destinada a painéis de mosaico de *Tectona grandis*, presta serviço para outras empresas ou até mesmo a pessoas físicas. Além disso, a empresa realiza tratamento químico da madeira com o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), utilizando o processo vácuo-pressão, para produtos destinados principalmente ao paisagismo e jardinagem.

O equipamento empregado no processo de modificação térmica da madeira (Figura 1.11 e 1.12) é constituído por: um cilindro de 1,25 m de diâmetro (A), 8,50 m de comprimento, com capacidade nominal de 6 m³ de madeira por ciclo; um gerador de vapor (caldeira) (B); um reservatório de água (C), um controlador lógico programável (CLP) (D), que controla as variáveis do processo; trilhos e vagonete, que servem para o abastecimento e descarregamento da madeira.

Figura 1.11 - Componentes do equipamento utilizado no processo de modificação térmica



Fonte: Autor.

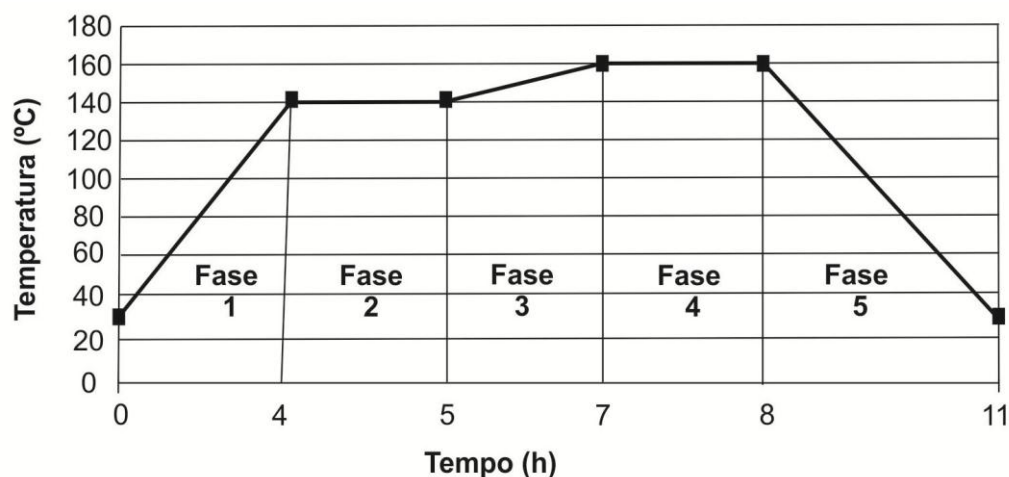
Figura 1.12 - Visão geral do cilindro utilizado no processo de modificação térmica



Fonte: Autor.

A modificação térmica foi conduzida de acordo com o programa utilizado pela empresa, em que a temperatura final foi de 160°C e o tempo de um ciclo completo durou cerca de oito horas, sendo necessário de três a quatro horas de resfriamento da madeira, antes da sua retirada do cilindro (FIGURA 1.13).

Figura 1.13 - Programa do processo de modificação térmica VAP HolzSysteme®



Fonte: Autor.

O processo da modificação térmica VAP HolzSysteme®, conforme descrito por Batista (2012), é realizado em cinco fases. A fase 1 corresponde ao aquecimento inicial da madeira, de

acordo com uma taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$). O tempo desta fase vai depender da taxa de aquecimento utilizada. A fase 2 é o momento em que a temperatura permanecerá constante pela primeira vez, conhecida como rampa de aquecimento. A temperatura nesta etapa se mantém em torno de 140°C , por 1 hora. A fase 3 é semelhante a fase 1, porém o aquecimento ocorre a maiores temperaturas. Na fase 4 a temperatura se mantém constante novamente, na sua máxima pré-determinada para o processo (160°C), por um período em torno de 1 hora. A fase 5 é a última etapa do processo, em que a madeira se mantém no interior do equipamento até o seu resfriamento natural, e a duração varia conforme as condições climáticas.

1.2.4 Modificação térmica da madeira de *Tectona grandis* pelo processo VAP HolzSysteme®

Na modificação térmica da madeira de *Tectona grandis* foram utilizados dois tratamentos (T3 e T4), ou seja, tábuas tratadas de 1ª e 2ª qualidade próximas a temperatura de 160°C . A madeira foi tratada na autoclave juntamente com lotes da empresa, para o melhor aproveitamento e o real processo. A madeira estudada manteve-se um pouco abaixo do topo da pilha, para que o peso das outras tábuas prevenisse possíveis defeitos gerados pela alta temperatura e a movimentação da água no interior da madeira (FIGURA 1.14).

Figura 1.14 - Esquema da pilha de madeira utilizada na modificação térmica



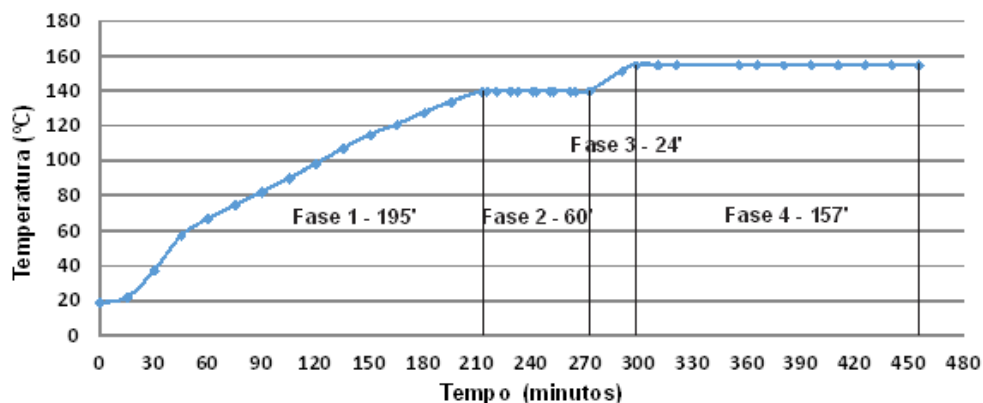
Fonte: Autor.

O processo é realizado automaticamente, entretanto devido a problemas no Controlador Lógico Programável (CLP), o experimento foi realizado manualmente. Com isso, a pressão no

interior do cilindro foi controlada pela liberação ou injeção de vapor aquecido, para manter a temperatura interna desejada.

O comportamento da modificação térmica, deste estudo, pelo processo VAP HolzSysteme® na madeira de *Tectona grandis*, pode ser observado na Figura 1.15.

Figura 1.15 - Gráfico tempo x temperatura do processo de modificação térmica



Fonte: Autor.

Pode-se notar que o gráfico da modificação térmica não apresenta o mesmo comportamento na prática, se comparado com o apresentado na Figura 1.13. Entretanto, consegue-se perceber que durante o processo, ocorreram as mudanças distintas de fases e dois momentos de temperatura constante (rampa) (Fase 2 e 4).

O processo da modificação térmica teve duração de 455 minutos, ou seja, pouco mais de 7,5 horas. A fase 5 do resfriamento não foi apresentada no gráfico, entretanto, a duração desta etapa foi em torno de 3 horas, tempo em que a madeira permaneceu no interior do cilindro, antes da abertura da tampa. Após a abertura, a madeira foi retirada do equipamento e permaneceu resfriando até o dia seguinte.

Os parâmetros que foram utilizados no processo de modificação térmica, tais como temperatura, pressão e taxa de aquecimento, são apresentados na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 - Variáveis do processo de modificação térmica

Parâmetros	Tratamento
Temperatura inicial (°C)	19
Pressão inicial (bar)	0,02
Duração da rampa de aquecimento inicial (minutos) - Fase 1	195
Média da taxa de aquecimento da rampa de aquecimento inicial (°C.min. ⁻¹) - Fase 1	0,88
Média da taxa de elevação da pressão da rampa de aquecimento inicial (bar.min ⁻¹) - Fase 1	0,01
Duração da primeira fase de temperatura constante (minutos) - Fase 2	60
Média da taxa de aquecimento até atingir a temperatura final (°C.min ⁻¹) - Fase 3	0,52
Média da taxa de elevação de pressão até atingir a temperatura final (bar.min ⁻¹) - Fase 3	0,02
Tempo entre a primeira fase de temperatura constante e a temperatura final (minutos)	24
Duração da segunda fase de temperatura constante - temperatura final (minutos) - Fase 4	157
Pressão média à temperatura final (bar)	5,95
Duração do ciclo (minutos) - sem o resfriamento	455

Fonte: Adaptado de Batista, (2012).

As tábuas modificadas termicamente (T3 e T4) foram retiradas da autoclave e armazenadas por um período de 10 dias juntamente com as testemunhas (T1 e T2) para a sua secagem (FIGURA 1.16).

Figura 1.16 - Tábuas tratadas e não tratadas (testemunhas) gradeadas para a secagem



Fonte: Autor.

Após as tábuas secas ao ar foram encaminhadas para o Laboratório de Produtos Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde foram dimensionadas e climatizadas (20C° de temperatura e 65% umidade relativa), para a estabilização do peso. Em seguida foram realizadas as avaliações das propriedades químicas, físicas, mecânicas e biológicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELI, A. *Tectona grandis*. (Supervisão e orientação do Prof. J. L. Stape, Departamento de Ciências Florestais-ESALQ/USP, 1 p., 2003.

ÂNGELO, H., SILVA, V. S. de M.; de SOUZA, A. N; GATTO, A. C. Aspectos financeiros da produção de teca no estado de mato grosso. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 39, n. 1, p. 23-32, jan./mar. 2009.

ARAÚJO, H. J. B. **Agrupamentos das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sobre manejo florestal do Projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas**. 2002. 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2002.

ARRUDA, T. P. M. **Secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2013. 102p. Tese Doutorado. <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/2457>>. 28 Jul. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 142 p, 2013.

AUTRAN, C. S.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização em interiores. **Ciência Florestal**, v.16, n. 4, p. 445-451. 2006.

BARREAL, J. A. R. **Patología de la madera**. Madrid: Fundación Conde Del Valle de Salazar, 1998.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme®**. 338f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BELLON, K. R. da R. **Qualidade da madeira das espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* modificadas termicamente**. 101 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BERMEJO, I.; CAÑELLAS, I.; MIGUEL, A.S. **Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica**. *Forest Ecology and Management*, v. 189, p.97-110, 2004.

BEZERRA, A. F. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

BLANCHETTE, R.A. A review of microbial deterioration found in archeological wood from different environments. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.46, p.189-204, 2000.

BOONSTRA, M. J.; ACKER, J.; KEGEL, E.; STEVENS, E. Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects. **Wood Science and Technology** 41(1): 31-57p. 2007.

BORGES, L. M; QUIRINO, W. F.; Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, Vol 1 Nº 2 de Abr-Jun de 2004 pag 173-182.

BOURGOIS, J. et al. Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product. **Wood Science and Technology**, Berlin e New York, v.23, n. 4, 303-310, 1989.

BRITO, J. O.; GARCIA, J.N.; BORTOLETTO JR, G. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termoretificação. **Cerne**, Lavras, v.12, n.2, p.181-188, 2006.

BRUNOW, G.; LUNDQUIST, K.; GELLERSTEDT, G. Lignin. In: SJÖSTRÖM, E.; ALÉN, R. (Ed.). **Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking**. Heidelberg: Springer, 1999. p. 77-120.

BUFULIN, L. J. **Avaliação Técnica e financeira da implantação de povoamento de teca (*Tectona grandis* L.f.)**. 2001. 43f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - FAMEV/Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2001.

CÁCERES FLORESTAL. **Manual do cultivo da teca**. 16 p. Versão eletrônica atualizada em janeiro de 2006.

CALDEIRA, S. F.; CALDEIRA, S. A. F.; MENDONÇA, E. A. F. de; DINIZ, N. N. Caracterização e avaliação da qualidade dos frutos de teca (*Tectona grandis* L. f.) produzidos no Mato Grosso. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 22, n. 1, p. 216-224, 2000.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2009.

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.

CAVALCANTE, M. S. Deterioração biológica e preservação de madeiras. **IPT**- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - Divisão de Madeiras. Pesquisa e Desenvolvimento - 8. São Paulo, 1982. 41p.

CHAGAS, S. F.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; CARVALHO, A. M. M. L. Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 138-150, 2014.

CHAVES, E.; FONSECA, W. **Teca (*Tectona grandis* L.f.) espécie de árbol de uso múltiple em América Central**. Turrialba. Informe Técnico. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. n. 179, 1991. 47 p.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of Wood. In: **Wood handbook**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

COSTA, A. **Coletâneas de Anatomia da Madeira: Anatomia da madeira**. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/index.php?pg=materiais>>. Acesso em: 30/09/2014. 2001.

COSTA, A. F. da; VALE, A. T. do ; GONÇALVEZ, J. C. Eficiência de um resíduo de origem petrolífera sobre a estabilidade dimensional da madeira de *Pinus* sp. (pinus) e *Mimosa scabrella* *Benth*am (bracatinga). **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v.11, n.2, p.59-70, 2001.

COSTA, M. A.; COSTA, A. F. DA; PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, 21: 567-577. 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.5902/198050983814>.

COSTA, R. B. da; RESENDE, M. D. V. de; SILVA, V. S. de M. e. Experimentação e seleção no melhoramento genético de TECA (*Tectona grandis* L.f.). **Floresta e Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 76-92, 2007.

CRUZ, J. P. da. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* na região de Tangará da Serra - Mato Grosso**. 2005. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. Tecnologia da madeira: retratibilidade. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992. 33p. (Série Técnica, 10).

EATON, R.A.; HALE, M.D.C. **Wood: decay, pests and protection**. London: Chapman & Hall, 1993. 546 p.

ESTEVES, B. M.; VIDEIRA, R.; PEREIRA, H. Chemistry and ecotoxicity of heat-treated pine wood extractives. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 45, n.4, p. 661-676, 2011.

ESTEVES, B., PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment: a review. **Bioresource Technology**, Lisboa, v. 4, n. 1, p.370-404. 2009.

ESTEVES, B.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, v. 62, n. 3, p. 2008.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DE MATO GROSSO (Famato). **Diagnóstico de Florestas Plantadas do Estado de Mato Grosso**. - Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (Imea) - Cuiabá: 2013.

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

FERREIRA, K. A. C., MENDOZA, Z. M. S. H. DE; RIBEIRO, E. S.; BATISTA, B. M. F.; SILVA, J. C. da. Análise dos compostos acidentais na madeira de *Tectona grandis* L. F. **Biodiversidade** - V.14, N1, 2015 - pág. 105.

FERREIRA, R. A.; TOSTA, W. F. G.; GIACOMETTI, V. G.; SOUZA, G. O.; SILVA, J. M. S. Revisão bibliográfica da entomofauna observada na cultura da teca (*Tectona grandis* L.f). **Revista científica eletrônica de Engenharia Florestal** - ISSN: 1678-3867, Ano VII, Número 12, Agosto de 2008, Periódicos Semestral.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA A. D.; SCOLFORO, J. R. S. Análise econômica de povoamentos não desbastados de *Tectona grandis* L.f., na microrregião do Baixo Rio Acre. **Cerne**, v.11, n.4, p.342-253, 2005.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood Handbook**. Helsinki: Finnish ThermoWood Association, 2003. 66p.

FLÓREZ, J. B., **Caracterização tecnológica da madeira jovem de Teca** (*Tectona grandis* L. f). 2012. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras: UFLA, 2012.

FONSECA, W. 2004. **Manual para produtores de Teca** (*Tectona grandis* L. F) en Costa Rica. Características y Propiedades de la madera.(en línea). Costa Rica. Consultado el 22 jul. 2016.Disponible en:http://www.fonafifo.com/text_files/proyectos/manualProductoresTeca.Pdf

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering Material**. Washington: US Department of Agriculture, 1999, 464p.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 4-1 - 4-19.

GONÇALEZ, J. C. **Caracterization technologique de quatre espèces peu connues de la forêt amazonienne: anatomie, chimie, couleur, propriétés physiques et mécaniques**. 1993. 446 p. Thèse de Doctorat - Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Nancy, France, 1993.

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**. Revista Brasil Florestal. n. 72. p. 47 - 48. 2001.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GRIEBELER, C. G. de O. **Colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden modificada termicamente**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná. 66 f.: il. Curitiba, 2013.

HAKKOU, M.; PTRISSANS, M; ZOULALLIAN, A; GÉRARDIN, P. Investigations of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v89, n1, p-1-5, 2005.

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

HILL, C. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

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.

IBACH, R. E. Specialty treatments. In: **Wood handbook**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Disponível em: < http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf > acesso em: 15/09/2016. Ano base 2015. 100 p. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Madeira: o que é e como pode ser processada e utilizada**. São Paulo: 1985. 189p. (Boletim ABPM, 36) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado De São Paulo - IPT/Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico - SCTDE **Madeiras: material para o design**. São Paulo: IPT, 1997. 73p

JANIN, G.; GONCALEZ J.; ANANIAS. R.; CHARRIER, B.; FERNANDES, G.; DILEM, A. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1: Colorimetry theory for the CIELab System. **Maderas: Ciencia y Tecnología**; 3(1-2): 3-13, 2001.

JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO, A. P. M. Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. **IPEF**, Piracicaba, n. 18, p. 1-33, 1979.

KAOSA-ARD, A. Teak (*Tectona grandis* Linn. F.) natural distribution and related factors. **Natural History Bulletin of the Siam Society**, v. 29, p. 55-74, 1981.

KIRK, T. K.; COWLING., E. B. Biological decomposition of solid wood. Chap 12, pp. 455-487 in R. M. Rowell, ed. **Chemistry of solid wood**. Advances in Chemistry Series 207, A.C.S., Washington, DC. 1984.

KOGA, M.E.T. Matérias-primas fibrosas. In: PHILIPP, P. & D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. IPT, São Paulo, 2ª ed., p. 15-44, 1988.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v1. 592p.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 5-1 - 5-46.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C.; TAKIZAWA, F. H.; RODRIGUES, F. L. Um modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.30, n.1, p.89-98, 2006.

LEKOUNOUGOU, S.; PÉTRISSANS, M.; JACQUOT, J. P.; GELHAYE, E.; GÉRARDIN, P. Effect of heat treatment on extracellular enzymatic activities involved in beech wood degradation. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 43, n. 3-4; p. 331-341, 2009.

LELLES, J. G.; SILVA, J. C. Problemas e soluções sobre rachaduras de topo de madeiras de *Eucalyptus* sp. nas fases de desdobro e de secagem. In: Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 18, n. 186, p. 62-69, 1997.

LENGOWSKI, E. C. **Efeito da termorreificação nas propriedades anatômicas, físico-mecânicas e químicas das madeiras de *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis***. 2011. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LOGSDON, N. B. Caracterização físico-mecânica da madeira de cedro marinho, *Guarea trichiliodes* L. (Meliaceae). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 43- 51, mar. 2008.

LOPES J. O.; GARCIA R. A.; LATORRACA J. V. F.; NASCIMENTO A. M. Alteração da Cor da Madeira de Teca por Tratamento Térmico. **Floresta e Ambiente**; 21 (4): 521-534. 2014b.

LOPES J. O.; GARCIA R. A.; NASCIMENTO A. M.; LATORRACA J. V. F. Propriedades físicas da Madeira de Teca Termorretrificada. **Floresta e Ambiente**; 21 (4): 521-534. 2014a. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.040213>.

LOPES, J. O. **Uniformidade e estabilidade da cor da madeira termorretrificada de *Tectona grandis* L. f.** [dissertação]. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; 2012.

LOPES, J. O.; GARCIA R. A.; LATORRACA J. V. F.; NASCIMENTO A. M. Uniformização da cor da madeira jovem de teca pela termorretrificação. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.3, p.561-568, 2014.

MACEDO, R. L. G.; GOMES, J. E.; VENTURIN, N.; SALGADO, B. G. **Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f (Teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu**, MG. Lavras: Revista Cerne, 2005.

MALLAN, F. A. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, IPEF/IPT, **Anais...**, São Paulo, IPEF/IPT, 05-06, abr., 1995. p.1-19.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. DA S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G. DA; FIEDLER, N. C. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* lam.) nativa e de reflorestamento. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.2, p.373-380, 2012.

MARTINS, V. A.; GOUVEIA, F. N.; MARTINEZ, S. Secagem convencional de madeira de Eucalipto. In: Congresso internacional sobre ecossistemas florestais, 5., Curitiba, 1999. **Anais...** Curitiba: Biosfera, 1999.

MBURU, F.; DUMARÇAY. S.; HUBER, F.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, 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**, Amsterdam, v. 98, n. 18, p. 3478-3486, 2007.

MELLO, H. A. Alguns aspectos da introdução da Teca no Brasil In: **Anuário Brasileiro de Economia Florestal**. Rio de Janeiro: 15 (15); 1963. p. 113-119.

MENZ HOLZ. **Catálogo**. Disponível em: < <http://www.menzholz.de/#/0> >. Acesso em: 20/08/2016.

MIRANDA, A. P. **Efeito do termotratamento em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Tectona grandis* L. f. sob variação de temperaturas**. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Faculdade de Jaguariaíva, Jaguariaíva, 2010.

MOHAREB, A.; SIRMAH, P.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Effect of heat treatment intensity on wood chemical composition and decay durability of *Pinus patula*. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 4, p. 519-524, 2012.

MONONEN, K.; ALVILA, L.; PAKKANEN, T. CIEL*a*b* Measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood.

Scandinavian Journal of Forest Research. 17(2): 179-191. 2002 <http://dx.doi.org/10.1080/028275802753626827>.

MONTERO, M. M.; UGALDE, L.; KANNINEN, M. Relación del índice de sitio con los factores que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. **Revista Forestal Centroamericana**, n. 35, p. 13-18, 2001.

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

MORI, C. L. S. O.; LIMA J.T.; MORI, F. A; TRUGILHO, P. F.; GONCALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne** 11(2): 137-146, 2005.

MOTTA, J. P; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, R. C.; VIDAURRE DAMBROZ, G. B. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, v.43, n.8, p.1393-1398, 2013.<<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013000800009>>.

MÖTTÖNEN K, ALVILA L, PAKKANEN T. CIELab Measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood. **Scandinavian Journal Forest Research** 2002; 17(2): 179- 191. <http://dx.doi.org/10.1080/028275802753626827>.

NUNES, C. S. **Estabilidade dimensional e modificações químicas da madeira termorretrificada de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill e L.A.S. Johnson.** 2009. 32 f. Monografia (Título de Engenheiro Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

OLIVEIRA, J.R.V. **Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendação de calagem e adubação de povoamentos de Teca-Nutriteca.** 2003, 93 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2003.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil.** 1998. 429 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OMBINA, C. A. **Soil characterization for teak (*Tectona grandis*) plantations in Nzara District of South Sudan.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Université des Sciences et Techniques de Masuku - Gabão. 135 f. 2008.

PAES, B. J.; SANTOS, L. L.; SILVA, L. F.; MOTTA, J. P.; LEITE, R. B.; RECLA, L. L. Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectona grandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, vol. 10, núm. 3, pp. 437-442, Universidade Federal Rural de Pernambuco Pernambuco, Brasil. 2015.

PALA, H. **Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira.** Escola superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, 2012.

PELISSARI, A. L.; GUIMARÃES, P. P.; BEHLING, A.; EBLING, A. A. Teak cultivation: specie characteristics for the formation and Conduction of forest stands. **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.1, n.01; p. 127. 2012.

PESSOA, A. M. das C. **Termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden (Myrtaceae) submetida ao cupim de madeira seca *Cryptotermes brevis* (WALKER, 1983) (ISOPTERA: KALOTERMITIDAE) para teste de resistência.** 39 f. Dissertacao (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de Sao Paulo, Piracicaba, 2002.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Efeito da termorretificação no envernizamento, colagem e cor da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.** 115 f. Dissertacao (Mestrado em Ciencia e Tecnologia de Madeiras-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, (Universidade de Sao Paulo, Piracicaba, 1999.

PINHEIRO, P. C. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. E. A. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática.** 2. ed. Belo Horizonte, 2008.

PINTO, M. L. **Propriedades e Características da Madeira de Teca (*Tectona grandis*) em função da idade.** 2007. 124p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

PLATOWOOD. Disponível em: <<http://www.platowood.nl/69/The-PlatoTechnology.html>>. Acesso em: 22/09/2016.

PONCSÁK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006.

RAPPOLD, P. M.; SMITH, W. B. An investigation of the relationships between harvest season, log age, and drying schedule on the coloration of hard maple lumber. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 12, p. 178-184, 2004.

RAYMUNDO, R. F. **Análise da resistência biológica em madeira de *Tectona grandis* l. f. in natura e termo-tratada.** Jaguariaíva - Paraná: Faculdade Jaguariaíva - ULT FAJAR, 2010;

RAYNER, A. D. M.; BODDY, L. **Fungal decomposition of wood.** Chippenham: Jonh Wiley and Sons, 1988. 587p.

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

RETIWOOD. Disponível em: < <http://www.retiwood.com/en/processes.html>>. Acesso em: 23/09/2016.

RICHTER, H. G., DALLWITZ, M. J. 2000 onwards. **Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval.** In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 25th June 2009.

RILLING, E. A. G. **Madeira modificada com calor - TMT (Thermally Modified Timber)**. *TWBrazil*, 2009. 7p.

RILLING, E.A.G. **Madeira modificada com calor: TMT - Thermally modified timber**. Ponta Grossa, 2010. Informativo Técnico *TWBrazil*.

RINK, G. Heartwood color and quantity variation in a Young Black walnut progeny test. **Wood and Fiber Science**, v. 15, n. 3, p. 93-100, 1987.

ROUSSET, P.; PERRE, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. **Holz als Rohund Werkstoff** 2004; 62(2): 113-119. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-003-0459-5>

SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 120-129, jun. 2004.

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Composição Química da Madeira de *Eucalyptus citriodora* em Função das Direções Estruturais. **Silva Lusitana** 14(1): p. 113 - 126., ed. ENF, Lisboa - Portugal, 2010.

SHI, J. L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behavior of Quebec wood species heat-treated using thermo wood process. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.65, n. 4, p. 255-259, 2007.

SIAU, J. F. **Wood**: influence of moisture on physical properties. Virginia: Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.

SILVÉRIO, F. O. **Caracterização de extrativos de madeira de *Eucalyptus* e depósitos de pitch envolvidos na fabricação de polpa e celulose**. 157 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. San Diego: Academic Press, 1993.

SJÖSTRÖM, E.; WESTERMARK, U. Chemical composition of wood and pulps: basic constituent and their distribution. In: SJÖSTRÖM, E.; ALÉN, R. (Ed.). **Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking**. Heidelberg: Springer, 1999. p. 1-19.

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972.

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

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 154 f. Tese (Doutorado) - Division of Wood Material Science, Luleå University of Technology, Skellefteå, 2004.

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.

SYRJANEN T. Production and classification of heat treated wood in Finland. In: Rapp AO. Review on heat treatments of wood. In: **Special Seminar: Environmental Optimization of Wood Protection**; 2001; Antibes, France. Antibes, COST Action E22; 2001. p.11-20.

TANAKA, N.; HAMAZAKI, T.; VACHARANGKURA, T. Distribution, growth and site requirements of teak. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 32, p. 65-77, 1998.

TEWARI, D. N. Monograph on Teak (*Tectona grandis* Linn. F) Dehra Dun-India, 1999. 478 p. Citado por DRESHER, R. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* Linn F., em povoamentos jovens de duas regiões do estado de Mato Grosso- Brasil**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. 133 p.

THULASIDAS, P.K.; BHAT, K. M, OKUYAMA, T. Heartwood colour variation in home garden teak (*Tectona grandis*) from wet and dry localities of Kerala, India. **Journal of Tropical Forest Science**; 18(1): 51-54, 2006.

TOMAZELLO, F., M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenoides*. **IPEF**, Piracicaba, (36):35-42, 1987.

TONINI, H.; COSTA, M. C. G. C.; SCHWENGBER, L. A. M. Crescimento da teca (*Tectona grandis*) em reflorestamento na Amazônia Setentrional. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 59, p. 05-14, 2009.

TROPICOS. **Missouri botanical garden**. 2013. Disponível em: <<http://www.tropicos.org>>. Acesso em: 16 fev. 2015.

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

TSUKAMOTO, F. A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MULLER, M. D. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**; 27(4): 487-494, 2003 <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622003000400009>.

VALE, A. T.; MARTINS, I. S.; ARAÚJO, W. O. Estudo da densidade básica de três espécies do cerrado. **Revista Árvore**, v.16, n.2, p.209-217, 1992.

VIEIRA, A.H; MARTINS, E.P; PEQUENO, P. L.L; LOCATELLI, M. Aspectos Silviculturais da Teca (*Tectona grandis* L.f.) em Rondônia. Porto Velho, RO: **Embrapa Rondonia**, 2002. 15 p: Brasil. - (Embrapa Rondônia. Documentos).

VIEIRA, R. DA S., **Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão produzido entre 350°C e 900°C**. Tese de doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 80p. 2009.

WEAVER, L. ***Tectona grandis* L. f. Teak**: SOITF-SM-64. New Orleans: USDA, 1993. 18 p.

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff** 2003; 61(3): 216-220.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The chemistry of wood strength. In: ROWELL, R.M. **The chemistry of solid wood**. Washington: American Chemical Society, p. 211-256. 1984.

WINANDY, J.E.; ROWELL, R.M. Chemistry of wood strength. In: **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Ed. Rowell, R.M. p. 329 - 330. 2005

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

2 CAPÍTULO I - ALTERAÇÕES DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA DE *Tectona grandis* LINN. F. MODIFICADA TERMICAMENTE

2.1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico constituído de compostos químicos como a celulose, hemiceluloses e lignina, de alto grau de polimerização, responsáveis pela sua morfologia e estrutura (SILVA, 2002). O conhecimento da composição química da madeira é essencial para a compreensão do comportamento deste material, as quais determinarão o seu uso final.

Os extrativos ou componentes acidentais, são importantes para a madeira, apesar de não fazerem parte da estrutura química da parede celular, mas atuam como componentes complementares e apresentam grande variabilidade em sua quantidade e constituição. Além disso, incluem um alto número de compostos, tais como breu, terebintina, graxas, ceras, taninos, dentre outros e, que podem-se solubilizar em água quente, álcool, benzeno e outros solventes orgânicos neutros (BARRICHELO; BRITO, 1985).

A quantificação da composição química da madeira de uma determinada espécie, é de difícil precisão, pois ela varia entre as partes da árvore (raiz, tronco, ramos e folha), com o tipo de lenho (normal ou de reação) ou com as condições ambientais de crescimento (localização geográfica, clima, tipo de solo, etc.) (PETTERSEN, 1984).

O estudo dos compostos químicos da madeira é de extrema importância para as interações do processo de modificação térmica com todas as propriedades (físicas, mecânicas e

biológicas) da madeira. As pesquisas com tratamento térmico apresentam resultados que alteram a composição química da madeira, em que os principais constituintes degradados são as hemiceluloses e os extrativos, sendo que a celulose e lignina são degradados mais lentamente. Entretanto, a alteração nos constituintes químico da madeira é influenciada pela resistência térmica de cada um deles, e dependente do método experimental empregado (HILL, 2006; ESTEVES et al. 2008).

As propriedades físicas e mecânicas são muito influenciadas pela alteração nos componentes químicos da madeira como, por exemplo, a degradação das hemiceluloses, constituinte mais hidrofílico da madeira, que pela ação do calor reduz a afinidade por água aumentando a estabilidade dimensional (WEILAND; GUYONNET, 2003). Outra propriedade física da madeira afetada, pela modificação térmica, é da perda de massa que reduz consequentemente as propriedades mecânicas, e com isso limita o emprego estrutural da madeira (BORREGA; KÄRENLAMPI, 2008).

Segundo Finnish Thermowood Association (2003) e Poncsák et al. (2006) as madeiras de espécies de folhosas são as que apresentam maiores perdas na resistência mecânica, em comparação com as espécies de coníferas, quando submetidas ao processo de modificação térmica. Isso ocorre principalmente pela reação química do processo que induz a quebra de cadeias de hemiceluloses e celulose que constituem a estrutura fibrosa dos vegetais.

Diante do exposto e da importância dos componentes químico da madeira submetida à ação do calor, buscou-se realizar um estudo dos constituintes químicos da madeira de *Tectona grandis*, modificada termicamente, pelo processo industrial.

Dessa forma esta pesquisa objetivou avaliar a influência do tratamento térmico na composição química da madeira de *Tectona grandis* tais como os extrativos totais, lignina Klason, holocelulose, hemiceluloses e alfa celulose.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A origem da madeira de *Tectona grandis*, a amostragem, os tratamentos e o processo de modificação térmica constam no material e métodos gerais desta pesquisa. Após o tratamento térmico a madeira de *Tectona grandis*, tratada e não tratada de primeira e segunda qualidade, foram destinadas as análises da composição química.

2.2.1 Amostragem

As análises da composição química foram realizadas no Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A determinação das propriedades químicas (teores de extrativos totais, de lignina Klason, fração de holocelulose, hemicelulose e alfa celulose) buscou analisar o efeito da modificação térmica nos constituintes químicos da madeira de *Tectona grandis*, de primeira e segunda qualidade e comparar com a madeira testemunha (não tratada) nas mesmas condições.

As tábuas de madeira destinadas as análises químicas de cada tratamento foram reduzidas a cavacos, posteriormente em palitos e serragem no moinho de facas do tipo Willey (Figura 2.1 A e B). Após a serragem foi classificada em um agitador eletromagnético de peneiras na fração 40/60 (F 40/60), que corresponde à fração que passou pela peneira de 40 e ficou retida na de 60 mesh (Figura 2.1 C e D). As amostras então foram secas ao ar e armazenadas em frascos de vidro para posteriores análises químicas.

Figura 2.1 - Amostras de madeira em palito (A), moinho de facas do tipo Willey (B), agitador eletromagnético de peneiras acopladas (C), amostras classificadas (D)



Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados em triplicata, perfazendo 12 amostras por análise (TABELA 2.1).

Tabela 2.1 - Tratamentos utilizados nas análises químicas

Tratamentos	Avaliações	Repetições
T1	Tábuas não tratadas de 1ª qualidade	3
T2	Tábuas não tratadas de 2ª qualidade	3
T3	Tábuas tratadas de 1ª qualidade	3
T4	Tábuas tratadas de 2ª qualidade	3

Fonte: Autor.

Posteriormente ao preparo do material e sua armazenagem, foi determinado o teor de umidade para todos os tratamentos.

2.2.2 Análises químicas

As análises químicas seguiram as metodologias descritas nas normas (Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), como demonstrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Normas e análise para a determinação dos constituintes químicos da madeira

Normas	Avaliação
T 210 cm-03 (2003)	Determinação do teor de umidade
TAPPI T204 cm-97	Extrativos totais (Tolueno+água)
TAPPI T 222 om-98	Teor de lignina Klason
TAPPI T 19 cm-54 (1991)	Teor de holocelulose
T 203 cm-99 (2009)	Alfa celulose e hemicelulose

Fonte: Normas TAPPI.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise foi realizada pelo modelo em delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando quatro tratamentos, e as amostras que os compõe como repetições para cada característica química avaliada.

Os resultados foram explicados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA), e quando significativa a 95% de confiabilidade, realizou-se a comparação entre os tratamentos por meio do teste de Tukey, a 5% de significância de erro. Para a validação da ANOVA foi realizado o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade das variâncias, e quando pelo menos um esteve estatisticamente igual, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Além disso, foi utilizado as correlações de Pearson significativas a 5% de probabilidade de erro.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises químicas serviram de embasamento para as discussões dos capítulos III e IV, já que a alteração desta propriedade interfere a variação dimensional, resistência mecânica e organismo decompositores da madeira, e além disso, é sensível ao tratamento térmico. As médias da composição química nos teores de extrativos totais, lignina Klason, holocelulose, alfa celulose e hemicelulose referentes aos tratamentos na madeira de *Tectona grandis* estão descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Resultados das análises químicas das madeiras de acordo com cada tratamento

Tratamento	Composição química (%)				
	Extrativos totais	Lignina Klason	Holocelulose	Alfa celulose	Hemicelulose
T1	6,69 a (4,88)	30,17 a (0,15)	63,24 b (0,64)	41,22 a (0,86)	22,02 c (1,52)
T2	6,65 a (4,05)	30,26 a (0,48)	63,49 b (0,60)	41,08 a (0,13)	22,41 c (0,23)
T3	16,05 b (25,33)	30,66 a (0,68)	52,20 a (4,26)	42,16 b (1,72)	10,04 b (6,89)
T4	16,51 b (1,84)	30,88 a (1,46)	50,55 a (1,73)	42,26 b (0,32)	8,29 a (1,45)
Teste de Bartlett	29,90 ^{ns}	62,0 ^{ns}	61,64 ^{ns}	90,09 ^{ns}	91,11 ^{ns}
ANOVA - Teste F	45,17*	17,53*	224,50*	7,81*	216,37*

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). *Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$). Fonte: Autor.

De acordo com o teste de Bartlett todos os dados químicos avaliados não foram significativos, ou seja, as variâncias são homogêneas, aplicando a análise da variância

(ANOVA). Segundo o mesmo teste, pelo menos uma das médias foram estatisticamente diferentes, logo foi aplicado o teste Tukey, para verificar quais eram distintas, com 5% de probabilidade de erro.

Comparando-se os resultados dos tratamentos (T3 e T4) os quais foram submetidos ao tratamento da modificação térmica, com os obtidos por Bellon (2013), que trabalhou com a mesma espécie e temperatura, observou-se que as médias foram inferiores em 3,64 (T3) e 3,86 (T4) pontos percentuais (p.p.) para a lignina Klason, e para os extrativos totais 3,35 (T3) e 2,89 (T4) p.p. Contudo, a quantidade média de holocelulose, deste estudo, foi superior em 7,1 e 5,45 p.p. para o T3 e T4, respectivamente. Da mesma forma ocorreram para as médias dos tratamentos não submetidos a modificação térmica, que foram maiores em 3,84 (T1) e 4,09 (T2) p.p. Por mais que o processo, equipamento e espécie nos dois trabalhos tenham sido os mesmos, diversos fatores podem ter contribuídos para a diferença entre as médias como, por exemplo, a origem da madeira (idades, local, material genético, entre outros) e as variáveis do processo (taxa de aquecimento, pressão, dentre outros).

De maneira geral a composição química avaliada nesta pesquisa está em conformidade com os autores Esteves et al. (2008) e Mohareb et al. (2012) que em seus estudos concluíram que a madeira modificada termicamente possui mais extrativos, mais lignina e menos polissacarídeos do que a original, com exceção da celulose.

De acordo com a Tabela 2.3, os extrativos totais dos tratamentos T1 e T2 não diferiam estatisticamente, em contrapartida se compararmos estes com o T3 e T4, que foram modificados termicamente, verificamos um aumento significativo de cerca de 9,36 p.p. e 9,86 p.p., respectivamente. Dessa maneira, pode-se verificar, que a qualidade da madeira não influenciou no resultado final dos extrativos totais, pois os dois tratamentos de 1ª e 2ª qualidade foram estatisticamente iguais.

Os extrativos são encontrados na madeira mais comumente no cerne do que no alburno, mas, ao analisar as médias estatisticamente iguais dos tratamentos, percebe-se que isso não ocorreu neste trabalho, pois o T1 é de 1ª qualidade, ou seja, possui uma maior quantidade de cerne em relação ao T2, e mesmo assim foram estatisticamente iguais. Mesma tendência dos resultados nos tratamentos tratados termicamente (T3 e T4).

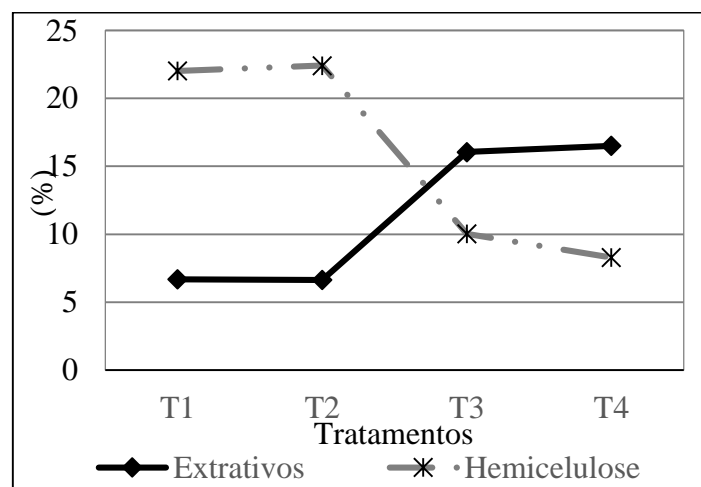
Resultados semelhantes foram encontrados por Bellon (2013) que estudando a mesma espécie, na temperatura de 160°C encontrou um acréscimo de 12,7 p.p., em relação a testemunha para os extrativos. Contudo, Lengowski (2011), estudando a composição química da madeira modificada termicamente encontrou valores médios de extrativos totais sem e com tratamento de 2,54 e 3,54%, respectivamente, e Andrade (2011), em estudo similar obteve

2,83% para testemunha e 3,87% para a temperatura máxima do processo. Ambos os resultados inferiores aos expostos nesta pesquisa. Castro (1998), comparando as propriedades da *Tectona grandis*, em três diferentes alturas do fuste, encontrou valores médios de extrativos totais entre 11,6 e 13,5%, ou seja, acima das médias das testemunhas (T1 e T2) deste estudo. Os resultados do teor de extrativos totais obtidos neste estudo, para *Tectona grandis*, seguem as tendências de diversos trabalhos como Silva; Batista (2012) e Bellon (2013), em que, ocorrem um aumento inicial até a temperatura de 160°C, podendo alcançar valores de até seis vezes em comparação com a testemunha.

A composição química de uma forma geral, varia consideravelmente com a idade, localidade e o tipo de processo (modificação térmica). Dessa forma, diversos autores Windeisen et al. (2003); Thulasidas e Bhat (2009); Marinonio (2011); Haupt et al. (2003), estudando a madeira natural de teca, em diferentes localidades e idades (12 a 35 anos), sem tratamento térmico, encontraram valores de extrativos totais entre 4 a 13,31%. Médias estas, que estão de acordo com os valores encontrados para os tratamentos T1 (6,69%) e T2 (6,65%) deste estudo.

De acordo com vários pesquisadores, como Stamm (1964); Fengel e Wegener (1989); Sudqvist (2004); Hakkou et al. (2006); Esteves et al. (2008); Esteves et al. (2011); Mohareb et al. (2012), a madeira modificada termicamente sofre um aumento no teor de extrativos resultante da formação de subprodutos derivados da degradação das hemiceluloses (FIGURA 2.2).

Figura 2.2 - Comportamento dos extrativos totais e hemicelulose em relação aos tratamentos da madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

A Figura 2.2 elucida o que foi descrito anteriormente, podendo ser observado um comportamento antagônico do teor de extrativo e da hemicelulose da madeira, nos tratamentos T3 e T4, ou seja, os que foram aplicados o tratamento térmico. A degradação da hemicelulose ocorre entre 160°C e 260°C (SCHNIEWIND, 1985). Além disso, a hemicelulose é o primeiro carboidrato a se degradar, devido a sua estrutura heterogênea, a natureza não cristalina e seu baixo peso molecular em relação aos outros polímeros da madeira. Entretanto, a redução dos extrativos ocorre a temperaturas mais elevadas (acima de 260°C), por meio da sua volatilização e a polimerização desses subprodutos com outros polímeros da parede celular da madeira (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

Na Tabela 2.3 pode-se observar que a hemicelulose dos tratamentos (T1 e T2) não submetidos ao tratamento térmico, são estatisticamente iguais, com apenas 0,39 p.p. de aumento para o T2. Ao contrário, os tratamentos T3 e T4 foram diferentes estatisticamente, sendo que a diferença entre eles foi de 1,75 p. p. A maior diferença foi entre o tratamento T4, com cerca de 14,12 p.p. em relação a sua testemunha (T2). No tratamento T1 para o T3 a redução foi significativa de 11,98 p.p. Além destes, os tratamentos T2 e T4 se diferenciaram significativamente.

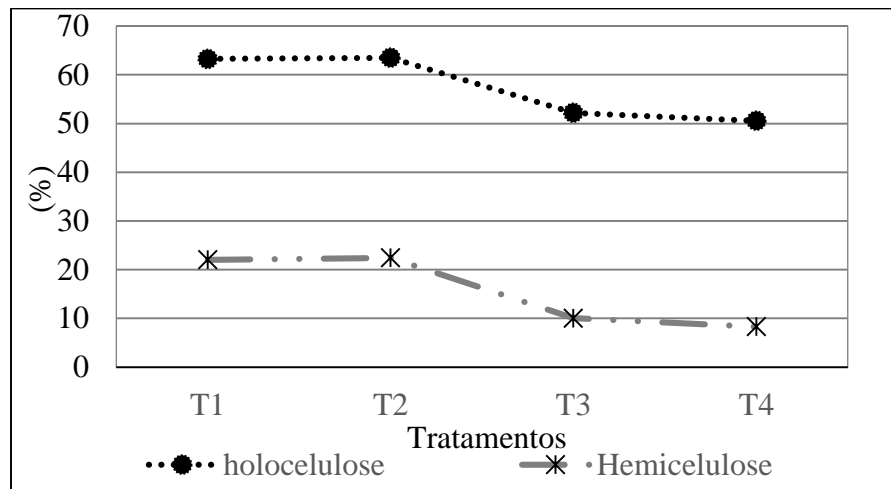
Beall (1969) citar que em um tratamento térmico de 150-180 °C o teor de hemiceluloses se manteve constante e igual ao da madeira controle. Isso ocorreu devido à fragmentação da parte amorfa da celulose em hexoses (glucoses), que apareceram como parte da fração hemiceluloses e encobriu o real teor do componente.

Brito et al. (2008), encontraram redução significativa nos teores de arabinose, manose, galactose e xilose, que compõem as hemiceluloses, sendo que a madeira de conífera tratada apresentou degradação de 32% da soma desses componentes, enquanto que na folhosa a perda foi de 39%. Segundo os mesmos autores o tratamento de calor provoca a degradação de hemiceluloses.

Ainda segundo, Figueroa e Moraes (2009), o gradiente térmico, promove a degradação térmica dos constituintes químicos da madeira, sendo que a 55°C a hemicelulose inicia seu processo de amolecimento. Esta degradação é extremamente benéfica para a estabilidade da madeira, pois as hemiceluloses são os constituintes químicos mais hidrofílicos da parede celular. Em contrapartida, pode haver uma diminuição das propriedades mecânicas da madeira.

A combinação de hemicelulose com celulose é chamada de holocelulose, então qualquer variação em uma afeta, conseqüentemente, a outra. Pode-se notar essa tendência na Figura 2.3, em que a degradação da hemicelulose diminui a holocelulose.

Figura 2.3 - Comportamento da holocelulose e hemicelulose na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Verifica-se na Figura 2.3 o comportamento análogo da holocelulose em relação a hemicelulose, após a aplicação da temperatura (T3 e T4). A principal justificativa é a perda de massa de hemiceluloses, que são responsáveis pelo decréscimo da holocelulose (STAMM 1964; FENGEL; WEGENER, 1989; WEILAND e GUYONNET, 2003; SUNDQVIST, 2004; MBURU et al., 2007; PINHEIRO et al. 2008).

Em relação ao teor de holocelulose pode-se averiguar na Tabela 2.3 que houve uma redução para todos os tratamentos submetidos a modificação térmica, ocorrendo uma degradação maior no tratamento T4, com cerca de 12,94 p.p. em relação a sua testemunha (T2). O tratamento T1 para o T3 a redução foi significativa com 11,04 p.p. Neste caso, é evidente que o tratamento térmico tenha influenciado de forma direta nos resultados. Entretanto, não se pode descartar a influência da qualidade da madeira, pois o T3 foi diferente significativamente do T4, ambos tratados e com qualidade diferente. Contudo segundo Browning (1963) o cerne e alburno de folhosa não possuem diferenças consistentes entre extrativos totais, lignina e celulose. Dessa forma, a qualidade não influenciaria entre os tratamentos da madeira. Miranda et al. (2011), verificaram a composição química entre o cerne e alburno da madeira de teca com 50 a 70 anos, e encontraram semelhança entre os valores médios, com variação apenas no teor de extrativos, que aumentou a partir da medula (8,3%) para a região de transição cerne alburno (12,7%) e diminuiu no alburno (9,2%).

Teores de holocelulose abaixo deste estudo foram encontrados para a mesma espécie por Bellon (2013), que obteve 14,3 p.p. de redução na temperatura de 160°C em relação a

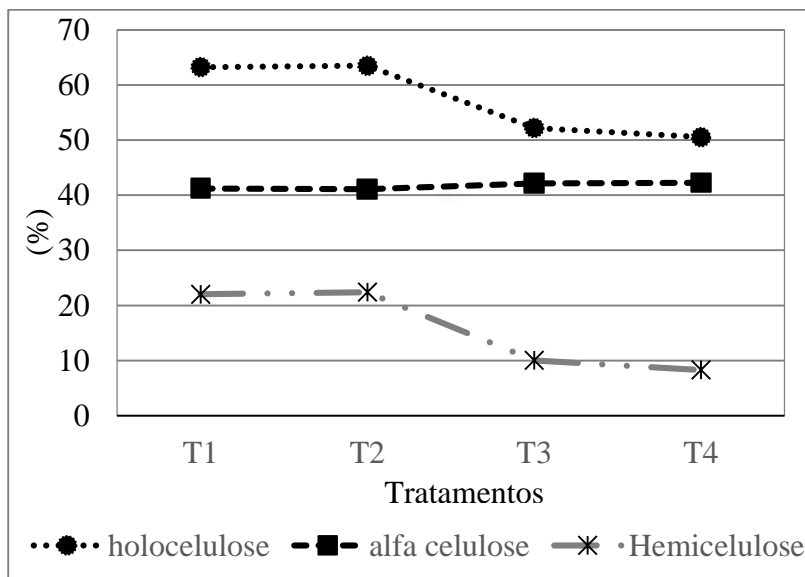
testemunha. Lengowski (2011) encontrou teores médios de holocelulose para a madeira modificada à 160°C de *Tectona grandis* de 49,07%, valores estes próximos das madeiras tratadas deste estudo (T3 e T4), e além disso verificou redução no teor de hemicelulose em relação a madeira natural.

Shiguri et al. (2005) tratando termicamente a madeira de conífera, encontraram decréscimo significativo médio de 5% no teor de holocelulose, o que, segundo ele foi devido à decomposição das hemiceluloses.

A celulose dificilmente é danificada as temperaturas de tratamento térmico, pois a maior perda de massa da celulose ocorre próximo dos 300°C, sendo esta progressiva e ocorrendo pela despolimerização e desidratação (ALÉ et al., 2002, FIGUEROA; MORAES, 2009).

Na Figura 2.4 pode-se observar a influência da temperatura no teor médio de holocelulose e conseqüentemente na hemicelulose e alfa celulose da madeira de *Tectona grandis* e respectivos tratamentos.

Figura 2.4 - Comportamento da holocelulose, hemicelulose e alfa celulose na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Conforme a Figura 2.4 a alfa celulose aumentou em relação aos tratamentos que não sofreram com o processo de modificação térmica. Esse aumento, apesar de 1,06 p.p. para o T3 e T4, em relação ao T1 e T2, foi significativo. Estes resultados foram semelhantes aos

encontrados por Silva (2012), que submeteu a madeira de *Eucalyptus citriodora* ao tratamento térmico a 160°C, e obteve um aumento de 1,6 p.p. em relação a sua testemunha (não tratada).

Em geral, conforme preconiza Li et al. (2007), o teor de alfa celulose em folhosas está entre 38-56%. A qualidade da madeira não influenciou nos tratamentos, pois as testemunhas (T1 e T2) e as tratadas (T3 e T4) não diferiram estatisticamente entre si.

Na taxa de degradação térmica dos compostos da madeira, a alfa celulose é degradada após a hemicelulose e, por último, a lignina (STAMM, 1964; ESTEVES et al., 2011, BATISTA 2012). Durante a degradação da hemicelulose ocorre a formação de outros subprodutos como o ácido acético e ácido fórmico, os quais agem como um catalisador para a despolimerização das microfibrilas de celulose, quebrando-as em cadeias mais curtas, causando, na maioria das vezes a redução da celulose. Entretanto, neste estudo foi encontrado um acréscimo do teor de alfa celulose (T3 e T4) em comparação com as suas testemunhas (T1 e T2).

Ishiguri et al. (2005) observaram aumento no teor de celulose na ordem de até 10%. Bhyuian et al. (2000) e Esteves e Pereira (2009) salientam que tratamentos térmicos em condições de vapor aumentam o grau de cristalinidade da celulose devido à degradação das regiões amorfas do polímero. Ainda os mesmos descrevem a capacidade de cristalização de xilanas e mananas durante tratamentos térmicos, fato que aumenta a espessura da região cristalina do polímero de celulose.

Quanto a lignina Klason as médias dos tratamentos foram estatisticamente iguais (TABELA 2.3). Logo, conclui-se que tanto a temperatura, como a qualidade da madeira não interferiram no teor de lignina. Esta é termicamente mais resistente que os demais carboidratos que compõem o material. A maior perda de lignina, segundo Alé et al. (2002), começa entre 250°C e 450°C, ou seja, temperatura acima da utilizada nesta pesquisa.

Na temperatura utilizada neste estudo (160°), começa a ocorrer o rompimento das ligações de carbono (SCHNIEWIND, 1985), o que pode gerar novos compostos. Segundo Fengel e Wegener (1989), o teor aparente de lignina na madeira começa a aumentar a 140-150°C. Neste estudo a lignina Klason obteve no tratamento T4 (30,88%) a maior média dentre os tratamentos, com 0,62 pontos percentuais de acréscimo em relação a sua testemunha T2, e o T3 aumentou 0,49 pontos percentuais em relação ao T1, entretanto ambas as comparações não foram significativas.

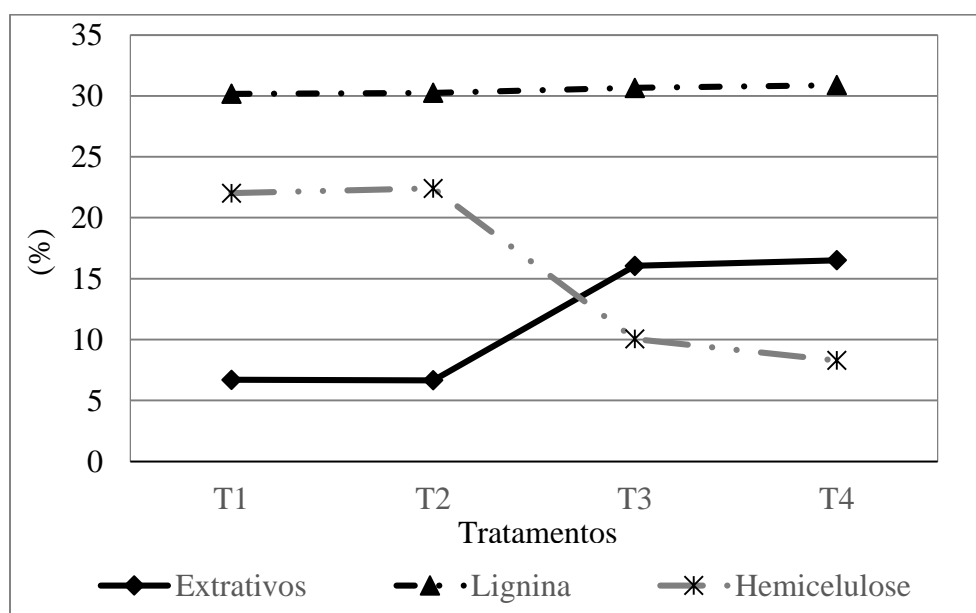
O teor de lignina em folhosas, segundo Li et al. (2007) está entre 18 e 25%, valores abaixo dos encontrados neste trabalho. A ocorrência da grande disparidade dos teores de lignina baseia-se na composição, idade, tipo de lenho e outras características de cada material estudado (OLIVEIRA et al., 2005b; TRUGILHO et al., 2007).

Assim como encontrado neste trabalho, Bellon (2013) observou tendência de aumento do teor de lignina com o aumento da temperatura, sendo que dentre as espécies analisadas a *Tectona grandis* obteve o menor aumento de 6,85 p.p. Ainda Batista (2012), Soratto (2012) e Andrade (2011), encontraram aumentos significativos no teor de lignina para as espécies de *Eucalyptus grandis* (10,2 p.p.) e *Pinus taeda* (27,10 p.p.). Lengowski (2011), utilizando a temperatura de 160°C e as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis*, encontrou valores médios de 31,51, 30,07 e 32,56%, respectivamente.

Estes aumentos confirmam a teoria de Fengel e Wegener (1989) que afirmam que a madeira submetida as temperaturas entre 140 e 160°C inicia o decréscimo do teor de lignina, ou seja, esta terá um aumento até a temperatura deste estudo, após começa a reduzir. Ainda segundo os mesmos autores, este aumento e redução, relaciona-se diretamente e proporcionalmente com a degradação da holocelulose, ou mais precisamente, da hemicelulose por meio de hidrólise ácida. Além disso, Yilgor et al. (2001) destacam que o amolecimento da lignina facilita reações de condensação entre a lignina e outros componentes, gerando aumento do teor de lignina Klason em ácido (lignina Klason).

Na Figura 2.5 constam as médias de hemicelulose, lignina Klason e extrativos totais em relação a cada tratamento.

Figura 2.5 - Comportamento da lignina Klason, hemicelulose e extrativos totais na madeira de *Tectona grandis*



Compreende-se que a 160 °C a degradação das hemiceluloses está iniciando, fazendo com que a proporção da lignina Klason aumente na parede celular, o que explica o aumento desse componente químico neste tratamento. Esteves et al. (2008); Esteves et al., (2011); Mohareb et al. (2012), obtiveram um aumento significativo na degradação do teor de lignina Klason entre 10 e 20% em relação a testemunha, em temperaturas acima de 180°C.

A degradação da lignina deste estudo foi pequena, entretanto, foi proporcionalmente à degradação das hemiceluloses e ao aumento do teor de extrativos, fazendo com que, aparentemente, o teor de lignina Klason fosse praticamente igual ao da madeira original.

Na Tabela 2.4 são apresentadas as correlações de Pearson observadas entre a extrativos totais, lignina Klason, holocelulose, alfa celulose e hemicelulose da madeira de *Tectona grandis* de todos os tratamentos.

Tabela 2.4 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a composição química da madeira de *Tectona grandis*

Composição química	Extrativos totais	Lignina Klason	Holocelulose	Alfa celulose	Hemicelulose
Extrativos totais	-	-0,4878	-0,9826*	0,4401	-0,9957*
Lignina Klason		-	0,5306	0,0858	0,5138
Holocelulose			-	-0,3537	0,9788*
Alfa celulose				-	-0,4718
Hemicelulose					-

Onde: * = correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autor.

Observa-se que existe uma correlação positiva entre holocelulose e hemicelulose, ou seja, o aumento da primeira eleva a segunda e vice-versa. Isto ocorre pois a holocelulose é a união da hemicelulose com a celulose, e entre elas, a primeira é mais facilmente degradada pela ação do calor. Dentre os carboidratos da madeira a hemicelulose é a primeira a degradar devido a sua estrutura heterogênea, a seu baixo peso molecular e a estrutura não cristalina. Ainda pode-se notar que apesar de não significativo, a alfa celulose tem uma correlação negativa, com a holocelulose e hemicelulose, comprovando o comportamento oposto entre elas. Mesmo caso, ocorre com os extrativos e a lignina Klason.

Os extrativos obtiveram correlação negativa com a holocelulose e hemicelulose, o que significa que o aumento de um, diminuí o outro, ratificando o que foi discutindo nos resultados desta pesquisa.

Em estudo sobre a modificação térmica Bourgeois et al. (1989) e Sundqvist (2004), comprovaram que o decréscimo da hemicelulose acabou contribuindo para a redução da holocelulose e aumento no teor de extrativos totais. Ainda segundo os mesmos autores, a celulose dificilmente é danificada a temperatura utilizada neste estudo (160°C).

2.5 CONCLUSÕES

Após a análise da composição química da madeira de *Tectona grandis* em relação aos seus tratamentos, conclui-se que:

- O teor de extrativos e alfa celulose aumentaram significativamente com a modificação térmica.

- A holocelulose e hemicelulose reduziram com a modificação térmica.

- O teor de lignina Klason não foi alterado significativamente pela temperatura e pela qualidade da madeira.

- A holocelulose e hemicelulose foram correlacionadas significativa e positivamente, enquanto que, os extrativos totais foram correlacionados com as mesmas, entretanto negativamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALÉ, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical Behavior of Norway Spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. **Wood Science and Technology**, Nova York, v. 36, n.1, p. 71-163, 2002.

ANDRADE, E. G. **Influência da termorreificação de amostras de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas propriedades físicas, dureza Janka e flexão estática.** 2011.39p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Química da madeira.** Piracicaba, SP, ESALQ, 1985. 125p.

BEALL, F. C. Thermogravimetric analysis of wood lignin and hemicelluloses. **Wood and Fiber**, Lawrence, v. 1, n. 3, p. 215-226, 1969.

BELLON, K. R. da R. **Qualidade da madeira das espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* modificadas termicamente**. 101 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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

BORREGA, M.; KÄRENLAMPI, P. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 66, n. 1, p. 63-69, 2008.

BRITO, J. O. et al. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, London, v. 99, p. 8545-8548, 2008.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. 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.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: John Wiley, 1963. 689 p.

CASTRO, F. **Propiedades tecnológicas de la madera de teca procedente de Colorado de Abangares**. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, CR. 1998.

ESTEVES, B.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, v. 62, n. 3, p. 2008.

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

ESTEVES, B. M.; VIDEIRA, R.; PEREIRA, H. Chemistry and ecotoxicity of heat-treated pine wood extractives. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 45, n.4, p. 661-676, 2011.

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

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, out./dez. 2009.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood Handbook**. Helsinki: Finnish ThermoWood Association, 2003. 66p.

HAKKOU, M., PÉTRISSANS, M.; 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.

HAUPT, M.; LEITHOFF, H.; MEIER, D.; PULS, J.; 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, n. 6, p. 473- 474, 2003.

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

ISHIGURI, F. et al. Changes in the physical and chemical properties of six Japanese softwoods caused by length smoke-heating treatments. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 51, n. 2, p. 161-166, 2005.

LENGOWSKI, E. C. **Efeito da termorreificação nas propriedades anatômicas, físico-mecânicas e químicas das madeiras de *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis***. 2011. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

Li, X.; Shupe, B.; Peter, T.F.; Hse, G.F.; Eberhardt, T.L. “**Chemical changes with maturation of the bamboo species *Phyllostachys pubescens***”. 2007; 19 (1): p.6-12.

MARINONIO, G. B. **Efeito da densidade e do teor de extrativos na variação da cor da madeira de *Tectona grandis* L. f.** 2011. 20f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

MIRANDA, I.; SOUSA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, Volume 57, Issue 3, pp 171-178, 2011. Disponível em: < <http://rd.springer.com/article/10.1007/s10086-010-1164-8>>. Acesso em: 19 out. 2016.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; HUBER, F.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, 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**, Amsterdam, v. 98, n. 18, p. 3478-3486, 2007.

MOHAREB, A.; SIRMAH, P.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Effect of heat treatment intensity on wood chemical composition and decay durability of *Pinus patula*. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 4, p. 519-524, 2012.

OLIVEIRA, J. T. S et al. Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p.819-826, 2005b.

PETTERSEN, R.C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (ed). **The chemistry of solid wood**. Washington, American Chemical Society, p.54-126. 1984.

PINHEIRO, P. C. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. E. A. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. 2. ed. Belo Horizonte, 2008.

PONCSÁK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006.

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

SCHNIEWIND, A. P. **Concise Encyclopedia of Wood and Wood-Based Materials**. Nova York: Pergamon Press, p. 271-273. 1985.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

SORATTO, D. N. **Efeito das variáveis do tratamento térmico nas propriedades da madeira de *Eucalyptus* sp.** 63 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

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

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 154 f. Tese (Doutorado) - Division of Wood Material Science, Luleå University of Technology, Skellefteå, 2004.

TAPPI Standard. - "Method T19 cm-54", **TAPPI Test Methods** (1991).

TAPPI. T 203 cm-99. **Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp**. 2009, 7p.

TAPPI T 210 cm-03. **Sampling and testing wood pulp shipments for moisture**. 2003. 5 pag.

TAPPI T 222 om-98. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. 2002. 5 pag.

TAPPI. T 204 cm-97. **Solvent extractives of wood and pulp**. 1997, 4-10p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **Normas técnicas**. Atlanta: 1999. Preparation of wood for chemical analysis, norma TAPPI T 264 cm-97.

THULASIDAS, P.; BHAT, K. M. Log characteristics and sawn timber recovery of home garden teak from wet and dry localities of Kerala, India. **Small-Scale Forestry**, Chicago, v. 8, n. 1, p. 15-24, 2009.

TRUGILHO, P. F. et al. Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 73, p. 55-62, 2007.

WINDEISEN, E.; KLASSEN, A.; WEGENER, G. On the chemical characterisation of plantation teakwood from Panama. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, n. 61, p. 416-418, 2003.

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 61, n. 3, p. 216-220, 2003.

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

3 CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Tectona grandis* LINN. F. MODIFICADA TERMICAMENTE

3.1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico, sendo naturalmente susceptível a ação do tempo e aos esforços mecânicos. A madeira, por todas essas características que a definem, pode variar entre espécies, entre a mesma espécie, e ainda dentro do mesmo indivíduo.

As propriedades físicas avaliam características intrínsecas da madeira como, por exemplo, teor de umidade, massa específica básica e aparente e cor, ou ainda a estímulos físicos como alterações dimensionais nas trocas de água com o meio e reação ao calor. As relações de algumas propriedades físicas da madeira como umidade, massa específica, retratibilidade e expansão volumétrica são de fundamental importância para o seu melhor aproveitamento (REZENDE, 2003).

Além das propriedades físicas, os conhecimentos das propriedades mecânicas são necessários para a utilização da madeira, principalmente na sua forma sólida, possibilitando o seu dimensionamento adequado. A caracterização da madeira para a construção civil, por exemplo, é de extrema importância, pois exige o conhecimento das características para o uso adequado da mesma.

As propriedades físicas e mecânicas são bastante utilizadas na classificação e avaliação da qualidade da madeira. Recentemente, a cor vem sendo considerada com estes atributos, pois a sua uniformidade influencia no valor final do produto (JANIN et al., 2001; MÖTTÖNEN et al. 2002; MORI et al., 2004). Por este motivo, segundo aos mesmos autores, a cor é considerada um índice de classificação e qualidade, carecendo de ser incluída na caracterização tecnológica da madeira.

Devido às limitações da madeira, há muitos anos os pesquisadores estudam novas técnicas para melhorar suas propriedades, e assim aumentar a sua utilização e durabilidade natural. Dessa forma, diferentes estudos vêm sendo empregados, como a modificação térmica. Este método é um dos mais antigos para melhorar as propriedades físicas da madeira como a higroscopicidade, estabilidade dimensional e a mudança na cor (ARAÚJO, 2010). Estas são as propriedades mais beneficiadas pelo processo térmico, em contrapartida, há uma redução da massa específica, acarretando uma redução na resistência mecânica. Desta forma, os ensaios mecânicos, físicos e de cor desta pesquisa, objetivaram avaliar o efeito da modificação térmica, em escala industrial, na madeira de *Tectona grandis*.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

A origem da madeira de *Tectona grandis*, a amostragem, os tratamentos e o processo de modificação térmica constam no material e métodos gerais desta pesquisa. Após o tratamento térmico a madeira de *Tectona grandis*, tratada e não tratada, foi destinada as todas as análises físicas e mecânicas.

3.2.1 Propriedades físicas

3.2.1.1 Determinação da umidade de equilíbrio, massa específica aparente e coeficiente de inchamento total

Para a realização dos ensaios físicos foram utilizados os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2000). Os corpos de prova foram confeccionados nas dimensões nominais de 2,5 x 2,5 x 10,0 cm, orientados nas direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Avaliação e equações utilizadas para a determinação das propriedades físicas

Avaliação	Equação
Umidade de equilíbrio	$UE = ((M_c - M_{0\%})/M_{0\%}) * 100$ (3.1)
Massa específica aparente	$\rho \text{ (aparente)} = \frac{M_{12\%}}{V_{12\%}}$ (3.2)
Inchamento total	$\alpha_{(t,r,l,v)} = \frac{D_{\text{saturada}} - D_{0\%}}{D_{0\%}} \times 100$ (3.3)
Anisotropia de inchamento	$Ai = \frac{IT}{IR}$ (3.4)

UE = Umidade de equilíbrio na condição de 20°C e 65% de umidade relativa (%); M_c = Massa constante na condição de equilíbrio higroscópico (g); $M_{0\%}$ = Massa constante na condição de secagem em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g). ρ = massa específica aparente à 12% (20°C e 65% UR) (g/cm³); $M_{12\%}$ = massa das amostras a 12% de umidade relativa (g); $V_{12\%}$ = volume da amostra a 12% de umidade relativa (cm³); $\alpha_{(t,r,l,v)}$ = Inchamento total tangencial, radial, longitudinal ou volumétrico (%); D_{saturada} = dimensão correspondente na condição saturada, cm; D_0 - dimensão na condição seca a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, cm; Ai = Anisotropia de inchamento; IT = Inchamento tangencial, %; IR = Inchamento radial, %.

Fonte: Autor.

As variáveis da Tabela 3.1 foram determinadas após os corpos de prova seguirem as seguintes etapas:

Estabilização em câmara climatizada (20 °C e 65% UR); submersão em água até a completa saturação das fibras e, secos em estufa 103±2°C, até a massa constante. Os corpos de prova foram pesados e medidos (direção radial, tangencial, longitudinal) em cada etapa descrita acima.

3.2.1.2 Colorimetria

A avaliação da cor da madeira foi realizada na Universidade Federal de Pelotas (UFPEL). Para isso, foram utilizados 15 corpos de prova por tratamento. A análise colorimétrica foi realizada com o auxílio de um colorímetro portátil Konica Minolta, modelo CR-400 (Figura 3.1), com abertura do sensor de 8 mm na superfície longitudinal das amostras. As leituras foram realizadas nas faces longitudinal radial e tangencial, sendo realizadas 3 leituras por plano (total 6 leituras por amostra).

Figura 3.1 - Colorímetro portátil Konica Minolta, modelo CR-400 (A) e aplicação do teste no corpo de prova (B)



Fonte: Autor.

O aparelho foi configurado para o iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente, obedecendo ao sistema CIE-L*a*b*. Antes das análises procedeu-se a calibração do colorímetro com auxílio de duas referências fornecidas pelo equipamento, uma com L*= 100 (branco total) e outra com L*= 0 (preto total).

Dessa forma, foram obtidos os parâmetros de luminosidade (L*), das matizes vermelho (+a*), verde (-a*), amarelo (+b*) e azul (-b*). O valor da saturação da cor (C*) e o ângulo de

tinta (h) foram calculados por meio das Equações 3.5 e 3.6 de acordo com a ASTM D 2244-09a (ASTM, 2009):

$$C=(a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (3.5)$$

$$h^{*}=\text{tang}^{-1}(b^{*}/a^{*}) \quad (3.6)$$

Onde:

C = saturação de cor;

h* = ângulo de tinta;

a* = coordenada cromática vermelho (+) - verde (-);

b* = coordenada cromática amarelo (+) - azul (-).

3.2.2 Propriedades mecânicas

3.2.2.1 Flexão estática e compressão paralela as fibras

Os ensaios mecânicos foram realizados na madeira tratada e nas testemunhas (não tratada). Os procedimentos de confecção, condicionamento e ensaios mecânicos para os corpos de prova seguiram as recomendações da norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2000) (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Ensaio, dimensões dos corpos de prova e velocidade na determinação das propriedades mecânicas

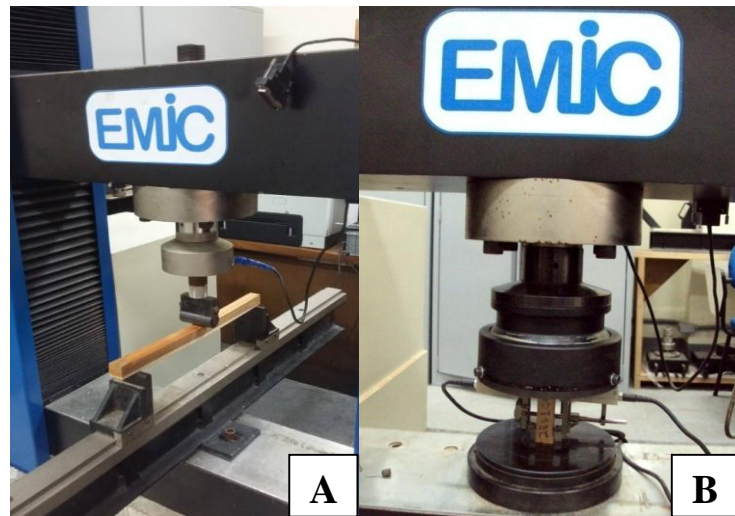
Ensaio	Dimensão do corpo de prova (cm)	Velocidade (mm/min)
Flexão estática	2,5 x 2,5 x 41,0*	1,3
Compressão paralela às fibras	2,5 x 2,5 x 10,0*	0,6

*Maior dimensão no sentido axial

Fonte: Autor.

Os ensaios mecânicos de flexão estática e compressão paralela as fibras foram realizados na Universidade Federal de Pelotas (UFPel), por meio de uma máquina universal de ensaios mecânicos (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Máquina universal de ensaios mecânicos submetendo a madeira ao teste de flexão estática (A) e compressão paralela as fibras (B)



Fonte: Autor.

Antes do início dos ensaios mecânicos os corpos de prova foram mantidos em câmara climatizada a uma temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%, até que atingissem umidade de equilíbrio de 12%.

3.2.2.2 Resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola

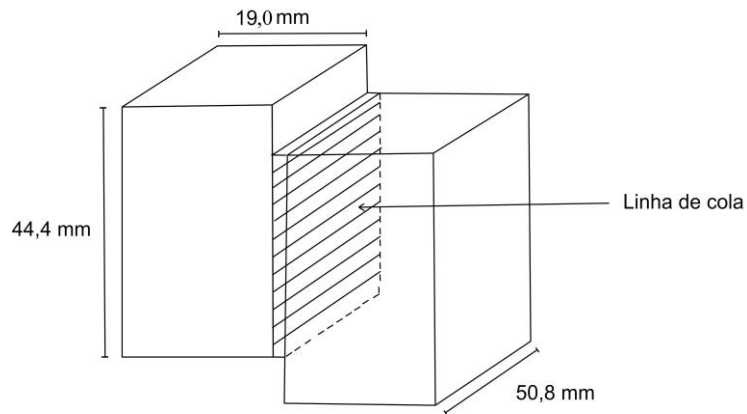
A madeira de *Tectona grandis* depois de modificada termicamente e a testemunha (não tratada) foram submetidas a avaliações de comportamento em relação à linha de colagem. Para isto, foram selecionadas 20 tábuas de cada tratamento, totalizando 80 amostras.

O preparo dos corpos de prova seguiu as recomendações da norma American Society for Testing and Materials - ASTM D - 905 (ASTM, 2008a). Para isso, as tábuas foram cortadas e aplainadas inicialmente em peças com dimensões de 19,0 x 50,8 x 300,0 mm (espessura, largura e comprimento, respectivamente), para preparo da face de colagem. Após foram limpas, pesadas e separadas aos pares, com massa semelhante entre elas.

A colagem foi realizada com adesivos termoplástico de contato utilizado pela empresa *TWBrazil*. Antes da aplicação do adesivo a madeira foi climatizada para atingir o teor de umidade de 12%. Após aplicou-se adesivo na madeira com o auxílio de uma espátula dentada, na quantidade de aproximadamente 200 g/cm², nas duas faces, e após 30 minutos foram unidas as faces. Para a cura do adesivo as amostras foram prensadas a frio durante 7 horas a uma

pressão entorno de $0,5 \text{ N/mm}^2$, a temperatura ambiente como recomenda o fabricante. Após a colagem as amostras foram dimensionadas como demonstra a Figura 3.3.

Figura 3.3 - Esquema do corpo de prova para o teste de resistência de cisalhamento na linha de cola

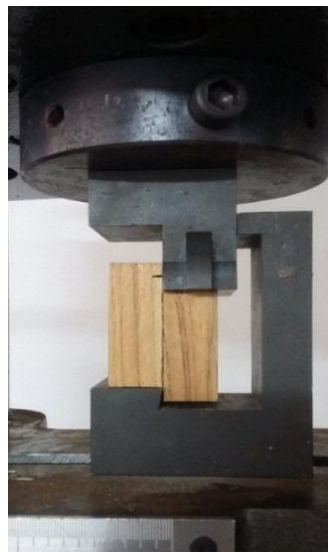


Fonte: adaptado de ATSM (2008a).

Em seguida as amostras foram armazenadas em câmara climatizada (20°C e 65% de umidade relativa) por um período de 30 dias, para a cura completa do adesivo.

A avaliação dos testes foi realizada quanto à resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, registrando-se a carga para romper os corpos de prova colados (Figura 3.4),

Figura 3.4 - Máquina universal de ensaios mecânicos aplicando o teste de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola



Fonte: Autor.

Após o teste do cisalhamento, foi avaliado o percentual de falhas dos corpos de prova, seguindo a norma ASTM D - 3110 (ASTM, 2008 b). Nesse último teste, foi utilizada uma malha composta por 90 quadriculas de 0,5 x 0,5 cm, sobre a superfície de cisalhamento, correspondendo cada quadricula a 1,11% da área total.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram avaliados estatisticamente pelo uso do software Statgraphics Centurion XVI. A análise foi realizada pelo modelo em delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando quatro tratamentos, e as tábuas que os compõe como repetições para cada característica física e mecânica avaliada.

Os resultados foram explicados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA), sendo que a comparação entre os tratamentos foi executada através do teste de Tukey, a 5% de significância de erro. Para validação da ANOVA foi realizado o teste de Bartlett, e quando pelo menos uma das variâncias não foram estatisticamente igual, aplicou-se o teste não paramétrico H de Kruskal-Wallis. Por fim, aplicou-se a correlação de Pearson, entre as propriedades físicas e os compostos químicos, com significância de 5% de probabilidade de erro.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Propriedades físicas

3.4.1.1 Umidade de equilíbrio

Na Tabela 3.3 encontram-se as médias e a redução da umidade de equilíbrio da madeira de *Tecnota grandis* antes e após o tratamento térmico.

Tabela 3.3 - Médias da umidade de equilíbrio da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos

Tratamentos	Médias (%)
T1	12,33 b (9,24)
T2	12,06 b (6,99)
T3	8,76 a (3,86)
T4	8,11 a (5,17)
Teste Bartlett	2,25 ^{ns}
ANOVA - Teste F	26,15*

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. T1 = Tábuas de 1ª qualidade; T2 = Tábuas de 2ª qualidade; T3 = Tábuas tratadas de 1ª qualidade; T4 - Tábuas tratadas de 2ª qualidade. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). *Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autor.

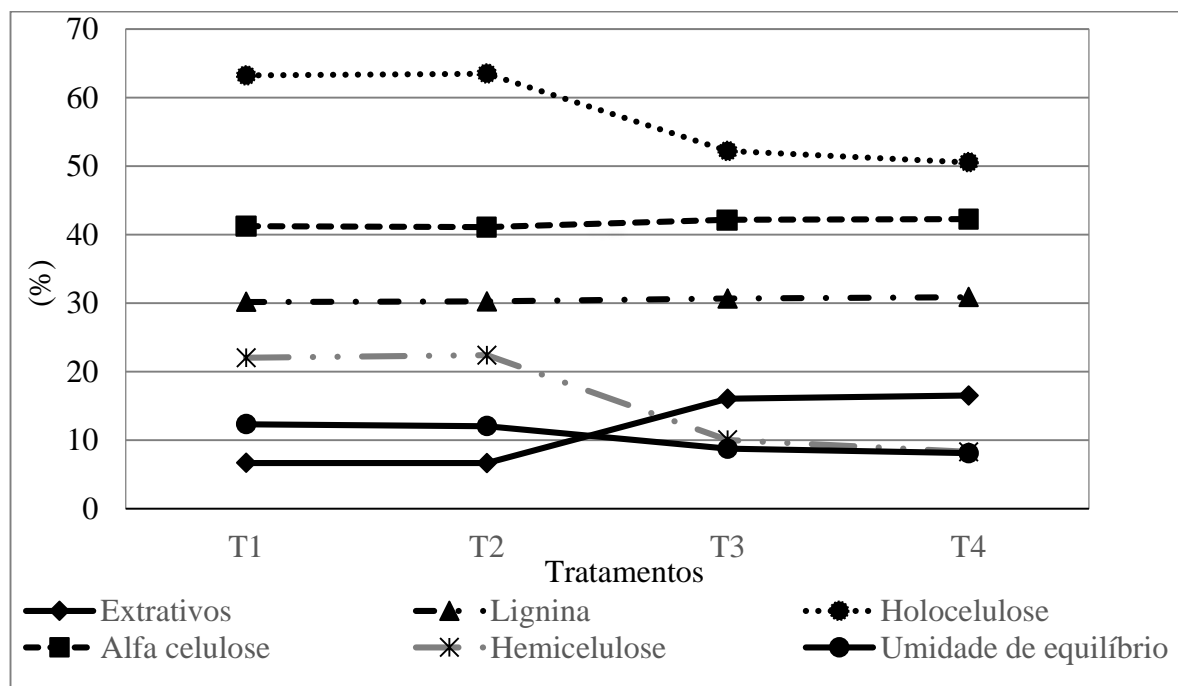
O teste de Bartlett não foi significativo, sendo assim as variâncias foram homogêneas, então aplicou-se a análise da variância (ANOVA), que confirmou que as médias da umidade de equilíbrio foram diferentes ao nível de 95% de confiabilidade. Posteriormente as médias foram testadas pelo teste de Tukey, que demonstrou, que os tratamentos T1 e T2 foram estatisticamente diferentes dos T3 e T4.

De acordo com a Tabela 3.3, pode-se notar que a modificação térmica reduziu significativamente o teor de umidade de equilíbrio. Os tratamentos T1 e T2 obtiveram os maiores valores se comparados com o T3 e T4. O tratamento T3 obteve uma redução de 28,95% se comparado com a sua testemunha T1, já o T4 obteve o maior decréscimo de 32,75% em comparação ao T2. Existe uma tendência de decréscimo da umidade de equilíbrio da madeira modificada termicamente em relação à madeira natural. Bellon (2013), encontrou para a mesma espécie e temperatura final deste estudo, 63,5% de redução da umidade de equilíbrio, valor bem superior ao relatado nesta pesquisa. Lopes (2014a), estudando o efeito de tratamentos da modificação térmica na umidade de equilíbrio da madeira de *Tectona grandis* L. f., proveniente de plantios de diferentes espaçamentos e amostras de madeira de cerne e alburno, observou uma redução média de 52% no teor de umidade de equilíbrio, após a modificação térmica, sendo que o teor de umidade se apresentou maior na madeira de cerne. Este estudo apresentou a mesma tendência, as madeiras de 1ª qualidade (T1 e T3), obtiveram valores de médias maiores que os de 2ª qualidade (T2 e T4), pois estes possuem menor proporção de cerne.

Autores como Modes (2010) e Borges e Quirino (2004) relatam uma redução da umidade de equilíbrio na madeira após o processo de modificação térmica. Segundo Jamsa e Viitameni (2001), Brito et al. (2006) e Esteves et al. (2008), a madeira após o tratamento térmico apresenta decréscimos de até 50% no teor de umidade de equilíbrio higroscópico, devido a diminuição dos sítios de adsorção e degradação parcial das hemiceluloses, as quais são os polímeros mais higroscópico da parede celular. Para complementar, segundo Boonstra et al. (2006a), ocorre um decréscimo da acessibilidade por aumento da cristalinidade da celulose e aumento das ligações cruzadas na lignina que por sua vez levam a um aumento da estabilidade dimensional.

Nota-se na Figura 3.5 que o decréscimo da umidade de equilíbrio da madeira modificada termicamente, deve-se à perda de massa dos componentes higroscópicos da parede celular, além do efeito dos extrativos, em que maior teor de extrativos contribui para a sua redução (STAMM, 1964; HILL, 2006; ESTEVES e PEREIRA, 2009; BASTISTA, 2012).

Figura 3.5 - Comportamento da umidade de equilíbrio em função da alteração dos componentes químicos dos tratamentos na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Analisando a Figura 3.5 pode-se ratificar que a umidade de equilíbrio segue o padrão de comportamento dos constituintes químicos da madeira. Antes do tratamento térmico (T1 e T2)

a umidade de equilíbrio estava praticamente constante, após o tratamento térmico (T3 e T4), iniciam-se as modificações nos constituintes químicos e a redução na umidade de equilíbrio. Logo quanto menor o teor de holocelulose, menor a hemicelulose e menor a umidade de equilíbrio higroscópico.

Dentre os constituintes analisados os extrativos foram inversos a umidade de equilíbrio, ou seja, após o tratamento térmico aumentou o teor de extrativos e decresceu a umidade de equilíbrio. Este acréscimo é resultado da produção de outros compostos químicos da degradação da holocelulose e lignina. Entretanto, está última foi pouco degradada, e pouco significativa para o decréscimo da umidade de equilíbrio. Isto ocorre, segundo Skaar (1972), porque a lignina é a menos higroscópica que os demais constituintes da parede celular e além disso degrada menos na temperatura utilizada neste estudo (160°C).

3.4.1.2 Massa específica aparente

De modo geral, a massa específica é uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, pois ela condiciona o seu uso. Além do mais, está relacionada com as propriedades de resistência mecânica e estabilidade dimensional. Na Tabela 3.4 pode-se observar as médias das massas específica aparente de cada tratamento.

Tabela 3.4 - Médias da massa específica aparente da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos

Tratamentos	Médias (g/cm ³)
T1	0,67 b (10,40)
T2	0,67 b (7,77)
T3	0,65 a (9,03)
T4	0,64 a (9,36)
Teste de Bartlett	2,0 ^{ns}
ANOVA - Teste F	3,72*

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. T1 = Tábuas de 1ª qualidade; T2 = Tábuas de 2ª qualidade; T3 = Tábuas tratadas de 1ª qualidade; T4 - Tábuas tratadas de 2ª qualidade. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). *Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$).
Fonte: Autor.

Segundo o teste de Bartlett as variâncias são homogêneas, logo aplicou-se a análise da variância (ANOVA), que evidenciou que as médias das massas específicas aparentes foram diferentes ao nível de 95% de confiabilidade. O teste de Tukey demonstrou, que os tratamentos T1 e T2 foram estatisticamente diferentes dos T3 e T4. O valor médio dos tratamentos T1 e T2 foram superiores significativamente em 2,98% e 4,7%, para o T3 e T4, respectivamente.

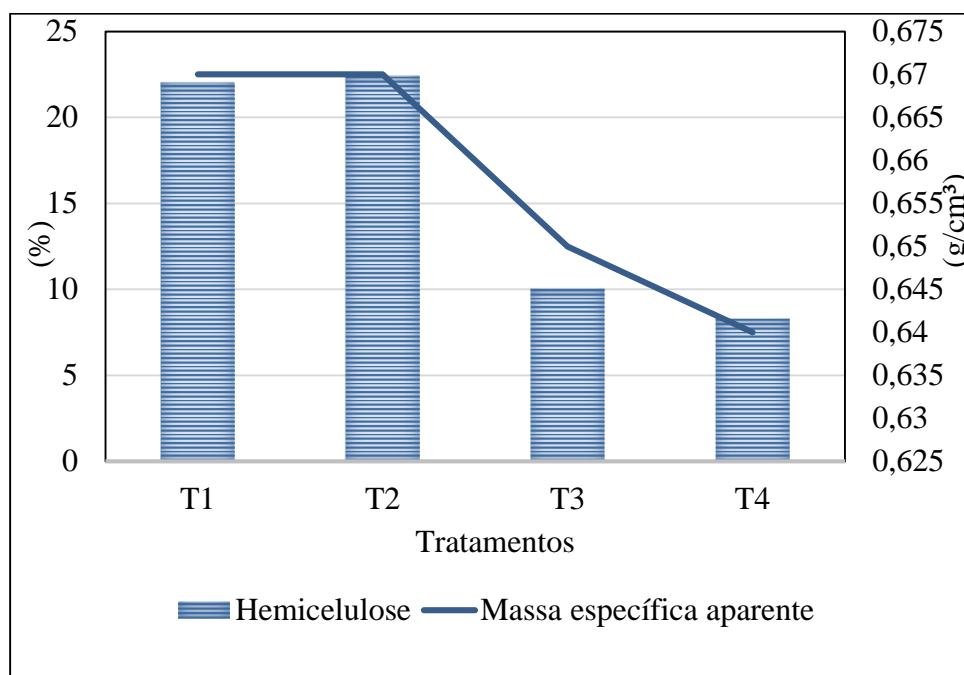
Dessa forma, não se pode afirmar que a qualidade da madeira influenciou na massa específica aparente, pois se compararmos os dois tratamentos (T1 e T2) e (T3 e T4) submetidos ao tratamento térmico, nas mesmas condições, mas com qualidade diferente, não observamos diferença estatística entre eles. De maneira geral, o que pode ser visto na Tabela 3.4 é a influência da temperatura nos tratamentos, pois as médias diminuíram, após o tratamento térmico.

As médias de massa específica deste estudo, estão de acordo com a literatura da madeira de teca adulta, a qual apresenta um valor médio de densidade próximo a $0,65 \text{ g/cm}^3$ (LINCOLN, 1986). Segundo Richter e Dallwitz (2009), a massa específica aparente da madeira de teca pode apresentar grande amplitude de variação, entre $0,44$ e $0,82 \text{ g/cm}^3$, podendo variar em função da idade, do material genético e posição no tronco.

Bellon (2012) verificou uma perda de massa específica aparente de 8,33% na temperatura de 160°C , em relação a testemunha, para a espécie de *Tectona grandis*, aproximadamente o dobro do valor encontrado neste trabalho. O valor médio de massa específica aparente observados por Lobão et al. (2011) e Flórez (2012), estão abaixo dos obtidos deste estudo.

A Figura 3.6 exemplifica a relação da massa específica aparente e a hemicelulose. Logo, pode-se destacar a perda de massa deste constituinte da parede celular, que é a mesma fonte de redução da higroscopicidade e do inchamento da madeira.

Figura 3.6 - Comportamento da massa específica aparente e a hemicelulose em função dos tratamentos na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Verifica-se na Figura 3.6 que o decréscimo na hemicelulose acarreta na redução da massa específica aparente, o que pode ser benéfico para a madeira desde que não seja demasiado, pois o efeito pode levar a perdas da resistência mecânica da madeira, que é diretamente relacionada com a massa específica.

De acordo com Tsoumis (1991) e Pinheiro et al. (2008), as hemiceluloses são responsáveis pela redução da massa específica durante o processo de modificação térmica, podendo reduzir à medida que se utilizam maiores temperaturas no processo.

O efeito da massa específica aparente da *Tectona grandis*, assim como qualquer outra espécie de folhosa, é de difícil definição. Apesar de neste caso, em específico, o tratamento térmico influenciar. Esta complexidade é manifestada pela interação dos diversos fatores como a porosidade (em anel ou difusa), largura dos anéis de crescimento, proporção de lenho inicial e lenho tardio, proporção de lenho juvenil e lenho adulto, e proporção de cerne e alborno torna a análise mais complexa (TSOUMIS, 1991). No caso da teca, a formação da madeira juvenil é um fator que influencia diretamente no seu comportamento físico e mecânico (BHAT et al., 2001).

3.4.1.3 Inchamento total e anisotropia de inchamento

Normalmente a madeira modificada termicamente reduz a sua higroscopicidade e, dessa forma, melhora a sua estabilidade dimensional. Na Tabela 3.5 encontra-se as médias do inchamento radial, tangencial, longitudinal, volumétrico e anisotropia de inchamento da madeira de *Tectona grandis* modificada termicamente, de acordo com cada tratamento, e as suas interações.

Tabela 3.5 - Médias do inchamento total e anisotropia de inchamento da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos

Tratamentos	Inchamento total (%)				Anisotropia de inchamento
	Radial	Tangencial	Longitudinal	Volumétrico	
T1	2,51 b (14,10)	4,14 b (15,3)	0,25 b (25,10)	6,94 b (27,16)	1,65 b (28,47)
T2	2,48 b (25,04)	4,20 b (14,17)	0,24 b (10,72)	6,44 b (26,67)	1,69 b (24,39)
T3	1,94 a (27,12)	2,99 a (39,3)	0,21 a (14,85)	5,20 a (23,47)	1,54 a (20,06)
T4	1,98 a (29,06)	3,05 a (30,03)	0,22 a (19,32)	5,24 a (29,62)	1,55 a (24,72)
Teste Bartlett	2,16 ^{ns}	12,16 ^{ns}	4,96 ^{ns}	4,0 ^{ns}	7,52 ^{ns}
ANOVA - Teste F	10,04*	4,65*	1,70*	8,14*	1,92*

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. T1 = Tábuas de 1ª qualidade; T2 = Tábuas de 2ª qualidade; T3 = Tábuas tratadas de 1ª qualidade; T4 - Tábuas tratadas de 2ª qualidade. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). *Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autor.

Como pode-se observar na Tabela 3.5, o teste de Bartlett não foi significativo para todas as médias avaliadas. Dessa forma, as variâncias foram homogêneas e então pode-se aplicar a análise da variância (ANOVA), a qual demonstrou que as médias foram diferentes entre os tratamentos. Em seguida para diferencia-las empregou-se o teste de Tukey ao nível de 95% de confiança.

Observa-se na Tabela 3.5 que o valor médio de inchamento total no sentido longitudinal é menor, seguido do radial e tangencial. Este comportamento já descrito por diversos autores (Del MENEZZI, 2006; ARAÚJO 2007; MELO et al., 2010). Esta ocorrência pode ser elucidada

segundo Durlo e Marchiori, (1992), pela direção do raio no sentido horizontal das fibras, proporcionando uma menor variação dimensional no sentido radial, sendo que o sentido longitudinal quase não é considerado pois os valores encontrados são irrisórios. Para confirmar este fato, Kollmann e Cotê (1968) afirmaram que a contração longitudinal total de madeira normalmente varia entre 0,1 e 0,9%.

Os tratamentos T3 e T4 foram estatisticamente diferentes do T1 e T2 na avaliação do inchamento e da anisotropia de inchamento (Tabela 3.5). Os valores médios do inchamento total radial, tangencial, longitudinal e volumétricas apresentaram um decréscimo, em 22,70; 27,77; 16 e 25,07 %, do T1 para o T3, e 20,16; 27,38; 8,33 e 18,63% do tratamento T2 para o T4, respectivamente. Bellon (2013) estudando a madeira de *Tectona grandis* submetida ao tratamento térmico, encontrou uma redução no inchamento total radial, tangencial, longitudinal e volumétrico, em 38,49; 28,48; 18,75 e 38,28%, a 160°C, respectivamente, valores estes acima deste estudo.

Os valores médios do inchamento volumétrico total do presente estudo (Tabela 3.5) evidenciam que a madeira de teca apresenta estabilidade dimensional superior quando comparada com outras espécies como o *Eucalyptus* spp. o qual os inchamentos volumétricos alcançam valores superiores a 12%. Um exemplo disso é o estudo de Batista (2012) que constatou que o inchamento volumétrico total para a madeira testemunha de *Eucalyptus grandis* (não tratada) foi de 13,40%, ou seja, valor acima da madeira natural deste trabalho (6,94% (T1) e 6,44% (T2)).

De acordo com Retiwood (2011) e Batista (2012) a redução no inchamento volumétrico do processo de Retification® apresentam entre 25 e 43%, que se enquadra somente no tratamento T3 (25,07%) deste trabalho. Em relação aos tratamentos térmicos patenteados, citados por Batista (2012), Perdure®, Plato®, ThermoWood® e Menz OHT®, os valores de decréscimo no inchamento volumétrico total, foram respectivamente 38,9-64,0%, 50%, 50-66,7% e 68% (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003; PERDURE, 2011; PLATOWOOD, 2011; MENZ HOLZ, 2012). Estes valores médios foram superiores ao desse estudo.

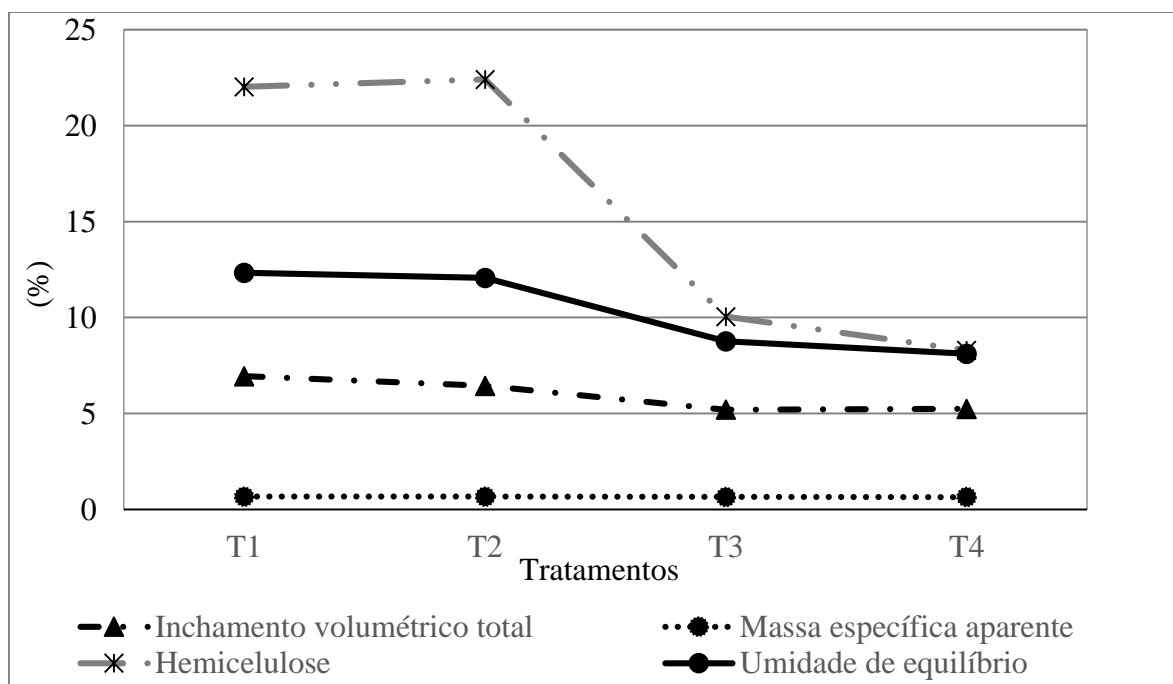
Os valores médios de anisotropia de inchamento apresentaram uma redução de 0,11 e 0,14 pontos percentuais em relação as suas testemunhas T1 e T2, respectivamente. Estas diferenças foram significativas. Os valores médios dos tratamentos estudados estão abaixo da pesquisa de Castro (2000), que obteve valor médio de 1,8 de coeficiente de anisotropia para a *Tectona grandis* de 17 anos. Contudo, Pinto (2007), encontrou um valor médio 1,38 para a retração e 1,34 para o inchamento, para a madeira de *Tectona grandis* aos 5 anos de idade,

abaixo do presente estudo. Os valores de anisotropia de inchamento desta pesquisa, podem ser consideradas como excelentes, de acordo com a classificação estabelecida por Durlo e Marchiori (1992), pois estão entre o intervalo de 1,5 a 2,0. De acordo com Oliveira (1998), em sua classificação a madeira de *Tectona grandis*, todos os tratamentos deste estudo, se enquadram em alta estabilidade dimensional, pois os valores de anisotropia de inchamento estão entre 1,3 e 3,0.

Os corpos de prova da madeira de *Tectona grandis*, submetida ao tratamento térmico (T3 e T4), apresentaram maior estabilidade dimensional se comparadas com os não tratados (T1 e T2), já que o inchamento total e a anisotropia de inchamento foram significativamente menores para os tratados. A principal causa da redução da higroscopicidade da madeira de *Tectona grandis* segundo Stamm (1964), Weiland e Guyonnet (2003), Rousset et al. (2004), é a degradação das hemiceluloses, em razão do baixo peso molecular e estrutura ramificada. Ainda segundo os mesmos autores ocorre a ruptura dos grupos hidroxílicos livres da região amorfa da celulose e a reticulação dos polímeros que compõem a madeira.

Na Figura 3.7 encontra-se a relação entre o inchamento volumétrico total, a umidade de equilíbrio e a hemicelulose da madeira de *Tectona grandis* de acordo com cada tratamento.

Figura 3.7 - Comportamento do o inchamento volumétrico total, umidade de equilíbrio e a hemicelulose em função dos tratamentos na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 3.7 que o inchamento volumétrico total apresentou a mesma tendência da umidade de equilíbrio e da hemicelulose. Fato este, que era esperado pois a redução na higroscopicidade e a degradação da hemicelulose origina ao mesmo tempo redução da movimentação dimensional da madeira. A estabilidade da madeira talvez seja um dos maiores benefícios que o tratamento térmico alcance, e que é buscado, principalmente para a produção de peças maciças e de maior valor agregado.

O inchamento, conhecido como o fenômeno de adsorção, ocorre principalmente pela entrada de água nos espaços submicroscópicos, entre as regiões amorfas da celulose e hemicelulose, separando-as, gerando assim, a alteração volumétrica da madeira. A saída dessa água é conhecida como o fenômeno de desorção (contração), ocasionando a aproximação das moléculas que constituem a parede celular, e conseqüentemente ocorrendo alteração volumétrica da madeira (SKAAR, 1988; GOMES et al., 2006).

O inchamento e a massa específica aparente decresceram com o tratamento térmico, apesar da segunda apresentar uma pequena variação (FIGURA 3.7). Segundo Stamm (1964), existe uma correlação entre a variação volumétrica da madeira com a sua massa específica. Está é a característica mais utilizada para prever o inchamento e a contração volumétrica das madeiras.

A Tabela 3.6 expõe a correlação entre o inchamento volumétrico, massa específica aparente, umidade de equilíbrio e a hemicelulose.

Tabela 3.6 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as propriedades avaliadas da madeira de *Tectona grandis*

Parâmetros	Inchamento volumétrico	Massa específica aparente	Umidade de equilíbrio	Hemicelulose
Inchamento volumétrico	-	0,7732*	0,9732*	0,9601*
Massa específica aparente		-	0,8060*	0,8011*
Umidade de equilíbrio			-	0,9962*
Hemicelulose				-

Onde: * = correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autor

A Tabela 3.6 corrobora com a Figura 3.7 e com o que foi discutido anteriormente, pois a matriz correlação de Pearson com 95% de significância demonstra que todas as variáveis avaliadas foram significativas. Além disso, todos os valores têm uma correlação positiva, ou seja, seguem a mesma tendência, com o decréscimo ou acréscimo de um deles. Neste estudo, a

modificação térmica melhorou a estabilidade da madeira de *Tectona grandis*, e provavelmente isto ocorreu pela degradação da hemicelulose que levou a um decréscimo da umidade de equilíbrio, da massa específica aparente e do inchamento volumétrico.

3.4.1.4 Avaliação Colorimétrica

A Tabela 3.7 apresenta os valores médios dos parâmetros colorimétricos e as análises estatísticas da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos.

Tabela 3.7 - Médias dos parâmetros colorimétricos avaliados de acordo com cada tratamento

Tratamentos	Parâmetros Colorimétricos				
	L*	a*	b*	C	h*
T1	57,85 (13,32)	8,36 (24,11)	24,41 c (14,84)	25,95 b (15,05)	70,63 (6,0)
T2	59,42 (11,86)	8,19 (16,27)	25,35 c (13,0)	26,74 b (12,93)	71,60 (3,73)
T3	38,39 (9,47)	9,58 (9,54)	17,93 b (18,62)	20,37 a (15,62)	61,38 (4,05)
T4	35,92 (11,38)	9,49 (10,43)	14,84 a (28,42)	17,35 a (23,68)	58,16 (10,26)
Teste de Bartlett	17,04**	20,66**	1,69 ^{ns}	1,64 ^{ns}	15,03**
ANOVA - Teste F	--	--	48,15**	35,98**	--
Teste H	72,35**	8,26**	--	--	70,43**

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). **Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$). L* = Grau de claridade; a* = Coordenada cromática vermelho (+) e verde (-); b* = Coordenada cromática amarelo (+) e azul (-); C = Saturação da cor; h* = Ângulo de tinta.

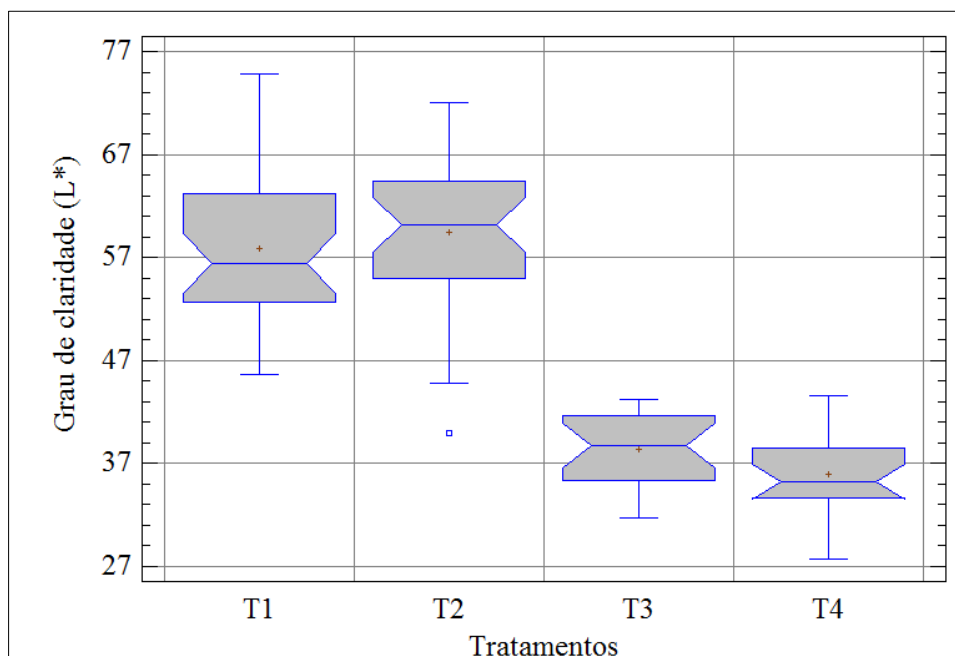
Fonte: Autor.

O teste de Bartlett foi significativo para os parâmetros colorimétricos do grau de claridade (L*), coordenada cromática vermelho (a*) e o ângulo de tinta (h*), ou seja, as variâncias não foram homogêneas, e dessa forma, não se aplicou a análise da variância. As variáveis foram avaliadas pelo teste não paramétrico H de Kruskal-Wallis. Esse verificou que existe diferença significativa, com 95% de confiança, entre as médias dos parâmetros colorimétricos L*, a* e h*.

De acordo com a Figura 3.8, pode-se observar que houve sobreposição das áreas dos entalhes das caixas entre os tratamentos T1 e T2, e entre T3 e T4, para o L^* , significando que foram estatisticamente iguais.

Entretanto entre os tratamentos testemunhas (T1 e T2) e os tratados (T3 e T4) existe uma diferença estatística. Diante disso, pode-se afirmar que a qualidade da madeira não interferiu nos valores médios do grau de claridade, mas sim o tratamento térmico, que escureceu mais a madeira.

Figura 3.8 - Grau de claridade do parâmetro colorimétrico da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos



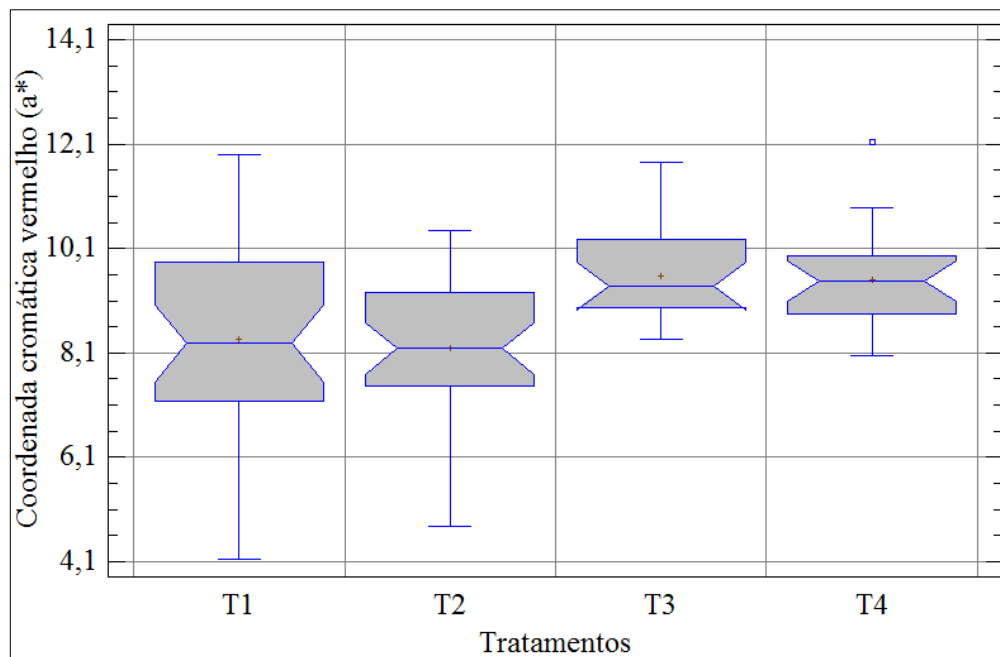
Fonte: Autor.

O maior valor foi do tratamento T2 com 59,42 que pode ser explicado pela maior proporção de alburno (região mais clara). Contudo, ficou abaixo da classificação proposta por Camargo (1999) onde o alburno possui alto valor de L^* (72,01-75,80), e pertence ao grupo branco acinzentado. Lopes (2014b) estudando o alburno e cerne a madeira de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos encontrou um valor próximo (58,63) ao deste estudo, para a madeira não tratada (testemunha) e com espaçamento 6x2 metros. A menor média do tratamento T4 (35,92) foi inferior ao estudo de Lopes (2014b) que obteve 40,21 para a região do cerne em 200°C no espaçamento 5x2 metros.

Os resultados deste estudo são semelhantes aos encontrados por outros autores Gouveia (2008), Ahajji et al. (2009) e Esteves et al. (2008), que verificaram o escurecimento da madeira após o tratamento térmico. Segundo os mesmos autores a alteração da cor original é causada pela degradação dos extrativos e hemiceluloses, que tornam a madeira escura, mas mais precisamente, pelos grupos cromóforos responsáveis pela caracterização da cor da madeira.

Pode ser verificado na Figura 3.9 para o parâmetro colorimétrico a^* que ocorre sobreposição das áreas dos entalhes das caixas dos tratamentos T1 e T2 e do T3 e T4, ou seja, indicando que não houve diferença estatística significativa entre as médias desses tratamentos, em 95% de probabilidade. Dessa forma, pode-se ratificar que a qualidade da madeira não influenciou significativamente nos resultados da variável a^* .

Figura 3.9 - Coordenada cromática vermelha (a^*) do parâmetro colorimétrico da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos



Fonte: Autor.

Todavia pode-se notar na Figura 3.9, que os tratamentos testemunha (T1 e T2) são diferentes estatisticamente dos modificados termicamente (T3 e T4), o que confirma o resultado do teste H da Tabela 3.7 para o parâmetro colorimétrico (a^*). Esse obteve o maior valor médio no tratamento T1 e T3 antes e após o tratamento térmico, respectivamente, devido principalmente pela diferença na qualidade, pois eles possuíam maior proporção de cerne, o que lhes conferiu maior tonalidade vermelha, a qual caracteriza a cor marrom do cerne. De

maneira geral, todos os tratamentos estão acima de oito para a variável a^* , o que justifica a coloração avermelhada, mesmo com valores superiores a 15 para a coordenada b^* .

A coordenada b^* foi não significativa na avaliação do teste estatístico de Bartlett, em 95% de confiança, e desta forma as variâncias foram homogêneas, sendo assim aplicou-se a análise da variância que demonstrou diferença significativa entre os tratamentos em 5% de probabilidade de erro. O teste de Tukey foi então utilizado para diferenciar as médias da coordenada b^* .

As médias de b^* não seguiram a mesma tendência dos demais parâmetros colorimétricos, pois os tratamentos testemunha (T1 e T2) foram iguais, enquanto que os tratados (T3 e T4) foram diferentes entre si, todavia houve diferença estatisticamente em 95% de confiança, se comparados antes e após o tratamento térmico. O b^* obteve valores positivos, sendo considerado na coloração amarela, por isso que o maior valor médio foi do tratamento T2 (8,19), pois esse possui uma maior proporção de alburno se comparado com os tratamentos de melhor qualidade. O alburno da madeira de *Tectona grandis* apresenta a pigmentação do amarelo.

Gonzalez et al. (2001) confirmam a análise e discussão dos parâmetros cromáticos, quando relatam que as coordenadas a^* e b^* positiva e crescente, apresentam coloração avermelhada mais pronunciada e amarelada, respectivamente. No presente estudo, a coordenada b^* foi maior nos tratamentos T1 e T2, e decresceu com o tratamento térmico, em contrapartida, a coordenada a^* obteve um comportamento inverso, que gerou um aspecto de tonalidade avermelhada na madeira tratada (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Aspecto visual da madeira de *Tectona grandis* avaliados na colorimetria

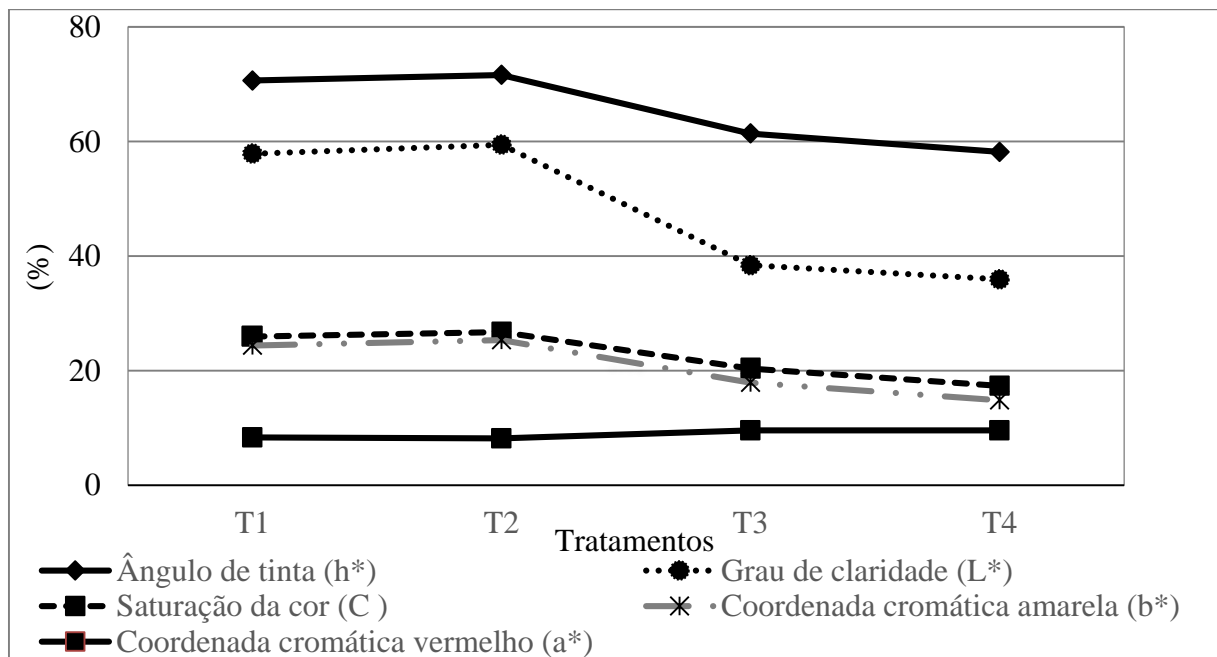


De acordo os parâmetros colorimétricos avaliados por Camargos e Gonzalez (2001) a classificação para a madeira natural de *Tectona grandis* é a cor Oliva-amarelado e após ao tratamento térmico é mais próximo do Marrom-escuro.

O padrão de coloração de uma madeira pode variar em tonalidades de bege claro até quase preto, e entre estas podem ser encontradas madeiras amareladas, avermelhadas, arroxeadas e alaranjada (MORI et al., 2005).

Na medida em que os valores de a^* para madeira são em geral maiores que os de b^* , assume-se que a matriz vermelha (a^*) tem mais influência sobre a saturação, o que explica o comportamento antagônico entre a^* e C. Entretanto o comportamento da matriz amarela (b^*), segue a mesma tendência do parâmetro C (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Comportamento dos parâmetros colorimétricos em função dos tratamentos na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

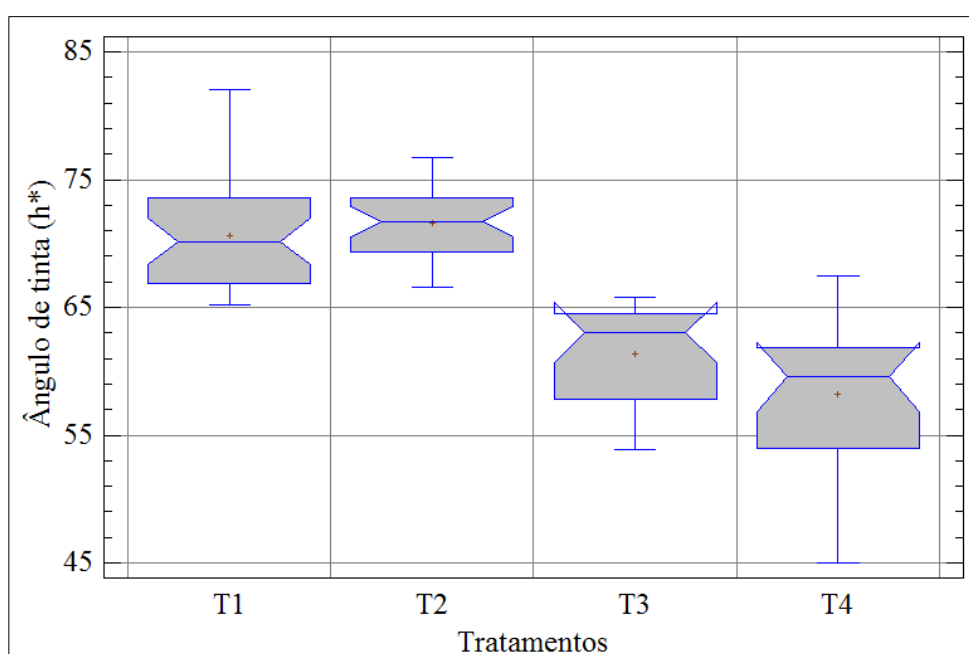
Na Figura 3.11 nota-se que os parâmetros h^* , C, L^* seguiram o mesmo comportamento de decréscimo da coordenada b^* e, por conseguinte contrário ao a^* . Dessa forma, a madeira obteve uma maior saturação na cor amarela antes da modificação térmica e após na coloração avermelhada.

Os valores do parâmetro C foram avaliados pela análise da variância, já que o teste de Bartlett não foi significativo em 95% de confiança, ou seja, as variâncias foram homogêneas.

Dessa forma, pode-se observar que os menores valores foram encontrados nos tratamentos modificados termicamente (T3 (20,37) e T4 (17,35)), sendo esses significativos em relação aos que não foram tratados (T1 (25,95) e T2 (26,74)).

O parâmetro h^* apresentou significância no teste de Bartlett (15,03**), logo as variâncias não foram homogêneas em 95% de confiança. Dessa forma, aplicou-se o teste H que demonstrou diferença estatística significativa que pode ser visualizada na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Ângulo de tinta do parâmetro colorimétrico da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos



Fonte: Autor.

Houve sobreposição das áreas dos entalhes das caixas entre os tratamentos T1 e T2, e entre o T3 e T4 (FIGURA 3.12). Logo os tratamentos foram estatisticamente de acordo com o teste H ao nível de 95% de confiança. Contudo, foram estatisticamente diferentes os tratamentos T1 e T2 dos T3 e T4.

O parâmetro h^* é resultante das coordenadas a^* (vermelho) e b^* (amarelo). Dessa maneira, o h^* mostrou um comportamento semelhante com o b^* , devido ao seu maior valor em relação ao a^* (FIGURA 3.11). O parâmetro h^* diminuiu de 70,63 (T1) e 71,60 (T2) para 61,38 (T3) e 58,16 (T4), ou seja, reduziu após o tratamento térmico.

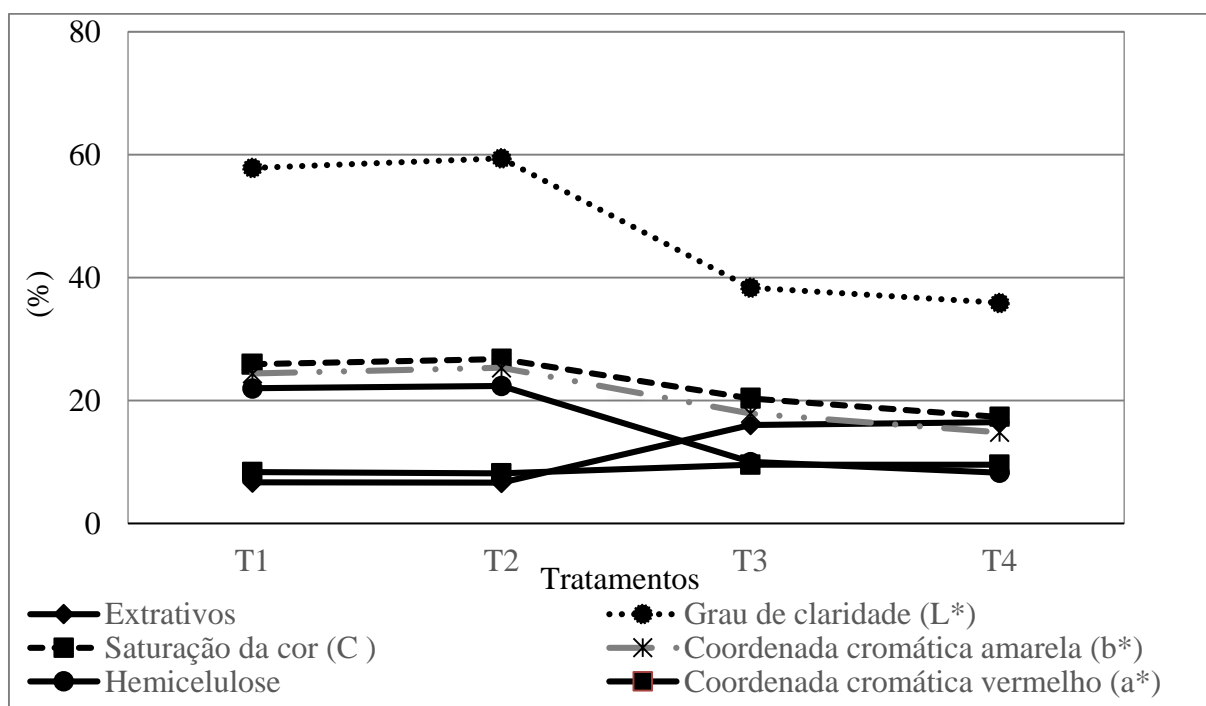
A diminuição do ângulo de tinta (h^*) na madeira de teca indica que estas amostras estão adquirindo tons mais escuros, evidenciados pela diminuição nos valores do parâmetro L^*

(FIGURA 3.11). Em estudo sobre 97 espécies de madeira da Guiana Francesa, Nishino et al. (1998), confirmaram a correlação positiva entre os valores dos parâmetros h^* e L . Pincelli et al. (2012) descreveram tendência inversa ao deste trabalho, com aumento de 55,8 para 58,7, ao passo que, Cademartori et al. (2013), relataram redução de 66,15 para 62,21, sendo ambos estudos para *Eucalyptus grandis* a 180°C.

Como foi discutido anteriormente, após a modificação térmica da madeira ocorrem mudança dos parâmetros colorimétricos. Segundo diversos autores Sundqvist e Moren, (2002); Esteves et al. (2008) e Lopes et al. (2014 b), este comportamento é devido a alteração da composição química da madeira como, por exemplo, a formação de produtos oxidativos e da degradação das hemiceluloses, as quais deslocam-se para a superfície da madeira. Ainda podem ocorrer o mesmo movimento de migração ou a remoção dos extrativos e outros compostos, tais como açúcares de baixo peso molecular e aminoácidos.

A Figura 3.13 ilustra o comportamento dos parâmetros colorimétricos da madeira de *Tetona grandis*, antes e após a modificação térmica.

Figura 3.13 - Comportamento dos parâmetros colorimétricos e os constituintes químicos em função dos tratamentos na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 3.13 que nos tratamentos que antecedem a modificação térmica (T1 e T2) a tendência é praticamente a mesma dos parâmetros colorimétricos (a^* , b^* , C e L^*) e dos constituintes químicos (extrativos e hemicelulose). Contudo, após o início do tratamento térmico temos alterações em ambos (T3 e T4). Pode-se notar um decréscimo dos parâmetros b^* , C e L^* juntamente com a degradação da hemicelulose, o que significa uma diminuição na saturação da cor amarela e escurecimento da madeira. Por outro lado, ocorre um acréscimo na coordenada a^* e dos extrativos, que eleva a pigmentação avermelhada. Segundo Rappold e Smith, (2004), os extrativos fenólicos (quinonas, flavonóides, lignanas e taninos) e suas enzimas são as principais interações químicas na madeira responsáveis pela sua mudança de cor.

Gouveia (2008) estudando a técnica de reflectância difusa no infravermelho, observou o comportamento de componentes químicos de três espécies de folhosas tratadas sob duas condições de temperatura (150 e 200°C) e tempo (1 e 2 h). O autor verificou que todos os tratamentos apresentaram a formação de compostos cromóforos, sendo maior no tratamento de maior temperatura e tempo.

3.4.2 Propriedades mecânicas

3.4.2.1 Flexão estática

A Tabela 3.8 expõe as médias da resistência na flexão estática da madeira de *Tectona grandis* com os tratamentos antes e após a modificação térmica.

Tabela 3.8 - Médias dos módulos ruptura e elasticidade do teste de flexão estática por tratamento

Tratamentos	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
T1	117 c (11,48)	12.302 b (8,12)
T2	79 b (32,99)	10.646 a (19,46)
T3	76 b (23,61)	11.523 b (10,60)
T4	54 a (28,94)	10.090 a (17,35)
Teste de Bartlett	4,26 ^{ns}	4,05 ^{ns}
ANOVA - Teste F	17,99*	6,33*

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. T1 = Tábuas de 1ª qualidade; T2 = Tábuas de 2ª qualidade; T3 = Tábuas tratadas de 1ª qualidade; T4 - Tábuas tratadas de 2ª qualidade. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). *Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$).
Fonte: Autor.

Segundo o teste de Bartlett aplicado aos dados de módulo de ruptura (MOR), as variâncias dos tratamentos foram homogêneas com 95% de confiança, aplicando-se a ANOVA. Dessa forma, encontrou-se diferença estatísticas entre as médias dos tratamentos. O resultado do teste de Tukey indicou que pelo menos uma das médias foi diferente das demais.

A maior média foi do tratamento T1, enquanto que a menor foi do T4. Neste caso, a qualidade da madeira influenciou nos tratamentos. O tratamento T1 e T3, obtiveram a maior proporção de cerne, sem nós e região de medula, em relação aos tratamentos T2 e T4, o que pode ter contribuído para a sua maior resistência. A maior redução ocorreu no tratamento T3 em relação ao T1 com 35% e a menor foi entre o T2 e T4 com 31%. Os valores de MOR (54 e 117 MPa), para o ensaio de flexão estática, deste trabalho, estão dentro das tensões aceitáveis (55 e 160 MPa) para as várias formas de utilização da madeira (WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991; KRETSCHMANN, 2010).

Para o teste de Bartlett do módulo de elasticidade (MOE), conforme a Tabela 3.8, as variâncias foram homogêneas, possibilitando a aplicação da ANOVA. De acordo com esse, pelo menos uma das médias entre os tratamentos foram diferentes, o que foi elucidado pelo teste F.

Os tratamentos T1 e T3 assim como o T2 e T4 foram estatisticamente iguais ao nível de 95% de confiança, porém temos um decréscimo do MOE após o tratamento térmico (TABELA 3.8). Essa redução assim como no comportamento do MOR, provavelmente ocorreu pela diferença de qualidade entre a madeira, pois a proporção de cerne foi maior na madeira de melhor qualidade (T1 e T3), e além disso, a inexistência de nós e medula.

O MOE reduziu para o tratamento T1 em relação ao T3 em 6,3%, e de 5,2% do T2 para o T4. Entretanto em valores médios reais, a madeira de melhor qualidade obteve os maiores valores de resistência com 12.302 (T1) e 11.523 MPa (T3) contra 10.646 (T2) e 10.090 MPa (T4).

De acordo com Haygreen e Bowyer (1996), os valores de MOE, para a flexão estática, estão entre 3500 e 19300 MPa, ou seja, as médias deste estudo estão dentro deste intervalo. Para Tsoumis (1991), após o estudo de muitas madeiras de coníferas e folhosas, foi encontrado valores de MOE (12% de umidade) que variam entre 6.600 e 16.170 MPa.

Com relação ao MOE para madeira natural, Castro (2000), estudando a teca de 17 anos de idade obteve um valor médio de 9.767 MPa. Bhat e Priya (2004), encontraram um MOE de 8.435 até 13.911 MPa para a idade de 21 e 65 anos, respectivamente. Os autores Miranda et al. (2011) obtiveram 10.683 MPa para a teca madeira de 50 a 70 anos e Posch et al., 2004 encontraram 14.199 MPa para a mesma espécie. Pelos resultados encontrados na literatura

perceber-se que existe uma variação nos valores médios do MOE na madeira não tratada termicamente, ora maiores e outras menores em relação a este estudo.

De uma maneira geral os autores Stamm (1964); Winandy e Rowell (1984); Esteves et al. (2007a), (2007b); Esteves e Pereira (2009); Arnold, (2010); Batista (2012), estudando a aplicação térmica na madeira observaram a redução progressiva da sua resistência mecânica, de acordo com o aumento da severidade do tratamento. O que de fato ocorreu neste estudo, entretanto a qualidade da madeira apresentou maior influência.

3.4.2.2 Compressão paralela às fibras

Os resultados das médias do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira de *Tectona grandis* conforme os tratamentos estão apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Médias dos módulos de ruptura e elasticidade do teste de compressão paralela às fibras por tratamento

Tratamentos	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
T1	57 d (7,22)	14.949 (40,69)
T2	51 c (6,29)	9.620 (26,65)
T3	44 b (4,91)	12.199 (33,50)
T4	32 a (9,57)	8.049 (39,08)
Teste de Bartlett	7,63 ^{ns}	14,96*
ANOVA - Teste F	38,58*	--
Teste H	--	47,03*

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. T1 = Tábuas de 1ª qualidade; T2 = Tábuas de 2ª qualidade; T3 = Tábuas tratadas de 1ª qualidade; T4 - Tábuas tratadas de 2ª qualidade. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). *Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$).
Fonte: Autor.

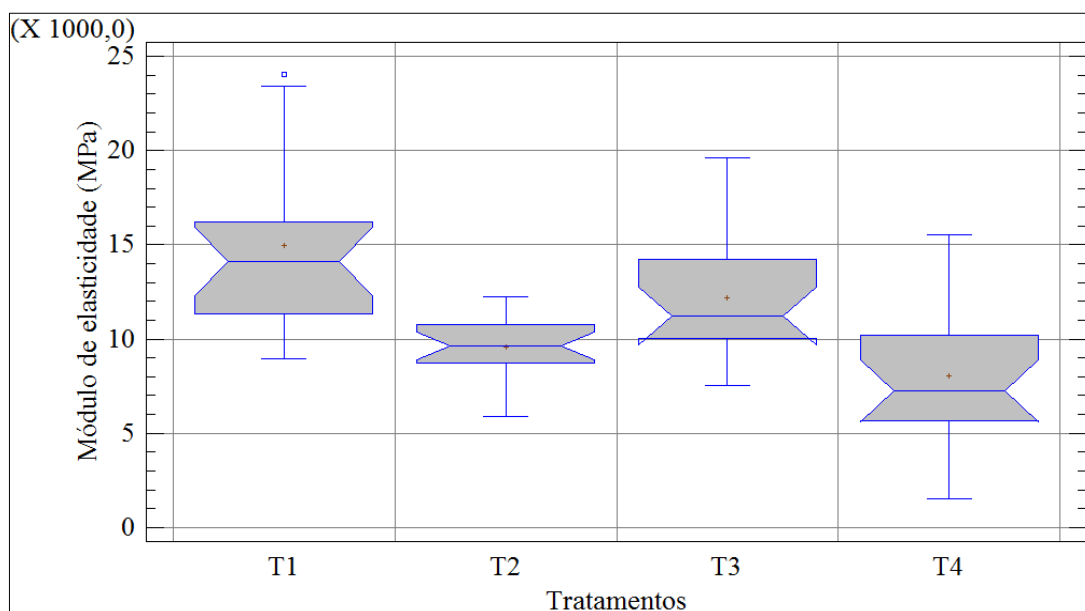
As variâncias foram homogêneas para os valores de MOR ao nível de 95% de confiança segundo o teste de Bartlett. Dessa forma, aplicou a ANOVA que apontou diferença entre as médias, que foi ratificado e distinguido pelo teste F de Tukey em 5% de probabilidade de erro.

As maiores médias do MOR foram dos tratamentos T1 (57 MPa) e T2 (51 MPa). O MOR reduziu significativamente em 22,8% do tratamento T1 para o T3, enquanto que o T4 decresceu 37,2% em relação a sua testemunha (T2). O MOR da madeira de menor qualidade

sem o tratamento (T2) obteve maior resistência em comparação com a tratada de melhor qualidade (T3).

De acordo com o teste de Bartlett, as variâncias dos valores MOE para o ensaio de compressão paralela às fibras não foram homogêneas. Sendo assim aplicou-se o teste não paramétrico H, que demonstrou diferença significativa de 95% de confiança, em pelo menos uma das médias dos tratamentos. Na Figura 3.14 pode-se destacar a diferença entre esses tratamentos.

Figura 3.14 - Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras da madeira de *Tectona grandis* de acordo com os tratamentos



Fonte: Autor.

Os tratamentos T2 e T4 foram estatisticamente iguais em 5% de erro, e por sua vez diferente aos demais tratamentos (T1 e T3), que foram diferentes entre si. O MOE reduziu 18,4% do tratamento T1 para o T3, e 16,33% entre o T2 e T4. Contudo, as maiores médias resistência foram 14.949 e 12.199 MPa para os tratamentos T1 e T3, respectivamente. O que comprova que para o MOE os tratamentos de melhor qualidade estão superiores, se comparados com os de qualidade inferior (T2 e T4), independente do tratamento térmico. Além da qualidade da madeira a modificação térmica diminuiu o MOE, se compararmos os valores reais antes e depois do tratamento térmico.

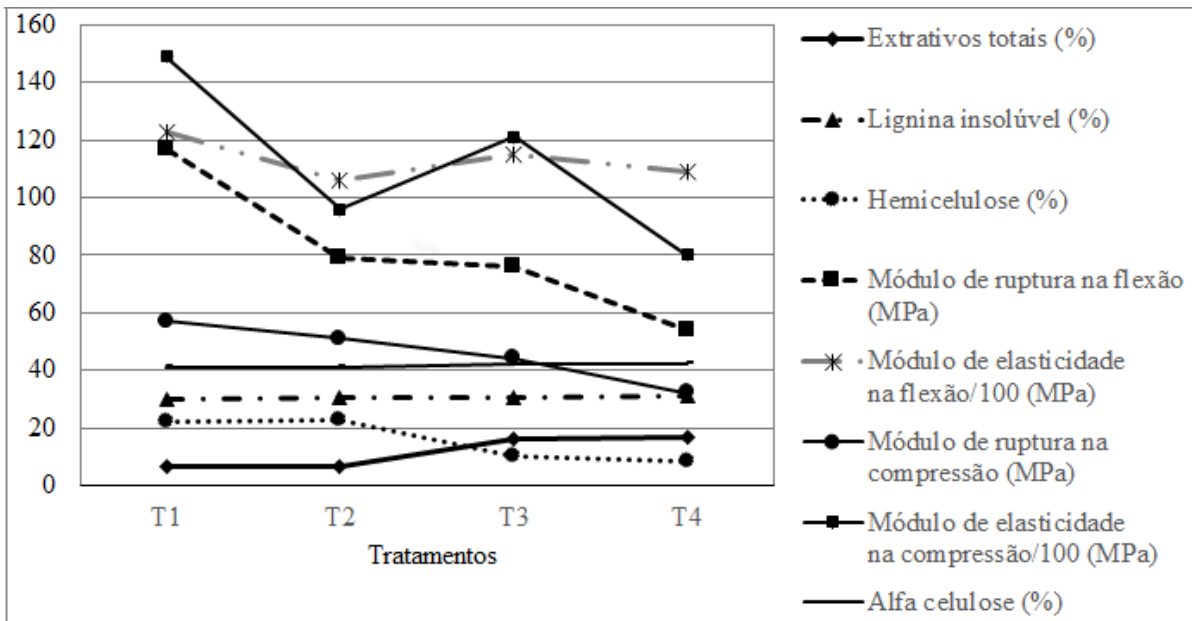
Na literatura encontramos os relatos de muitos pesquisadores que são unânimes em descrever que os resultados do ensaio de compressão na madeira após o tratamento térmico reduzem significativamente (GÜNDÜZ et al., 2008). Apesar disso, autores como Boonstra et al. (2007) encontraram aumento da resistência à compressão na madeira até uma determinada temperatura.

A modificação térmica segundo Esteves e Pereira (2009), tem a desvantagem de reduzir a resistência mecânica da madeira. Ainda segundo os mesmos autores, o efeito no MOE é pequeno, contudo no MOR pode ser mais significativo, tanto para o ensaio de flexão estática como o de compressão paralela às fibras. Neste estudo foi exatamente o que ocorreu, pois sempre o MOR decresceu mais que o MOE, independente do teste realizado.

Contudo, a resistência mecânica está diretamente associada à função dos constituintes químicos da parede celular (HILL, 2006; BOONSTRA et al., 2007; SHI et al., 2007; BORREGA; KÄRENLAMPI, 2008; ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Na Figura 3.15 são apresentadas as linhas de tendência dos resultados dos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras em relação aos constituintes químicos.

Figura 3.15 - Comportamento da resistência a flexão estática, compressão paralela às fibras e os constituintes químicos em função dos tratamentos na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Pode-se observar na Figura 3.15 as linhas de tendência semelhantes entre o MOR na flexão e compressão paralela e a hemicelulose. Ambos decrescem do tratamento T1 para o T4, ou seja, conforme menor a quantidade de hemicelulose na parede celular, menor a resistência. Este resultado foi obtido por outros autores (BOONSTRA et al., 2007; ESTEVES; PEREIRA, 2009; BATISTA, 2012). Entretanto, a hemicelulose dos tratamentos (T1 e T2), antes do tratamento térmico, foram estatisticamente iguais, e mesmo assim a redução nos testes mecânicos para o MOR foi significativo. Dessa forma, fica evidente que a qualidade da madeira tenha influenciado nos resultados da resistência para este parâmetro.

Nota-se na Figura 3.15 o comportamento mais suave no decréscimo do MOE, reduzindo do tratamento T1 para o T2 e voltando a aumentar no T3, e novamente decrescendo no T4. Neste caso, além da temperatura, a qualidade entre os tratamentos pode ter influenciado. Confirma o que foi descrito por Esteves e Pereira (2009), que o MOE é menos sensível ao tratamento térmico do que o MOR.

O teor de lignina destes tratamentos não diferiu estatisticamente, revelando que a mesma pode ter contribuído para manter a rigidez da madeira (STAMM, 1964; WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991). Segundo Gunduz et al. (2009) ocorre um aumento das ligações cruzadas na rede de lignina, melhorando a estrutura rígida em torno das microfibrilas de celulose e da resistência característica da lamela média. Além desta, a alfa celulose auxiliou na melhora da resistência da madeira (MOE), pois pouco decresceu entre os tratamentos, aliás, até aumentou após o tratamento térmico de forma significativa.

Para complementar Esteves e Pereira (2009) entendem que o MOE aumenta com o acréscimo de cristalinidade da celulose e com a redução do teor de umidade. Entretanto este efeito permanece no início do tratamento térmico, mas a tendência é a sua redução com a continuidade do processo.

Os extrativos totais não interferiram nos resultados mecânicos, pois seu acréscimo sempre representou resistência menor, reafirmando que os mesmos não possuem função estrutural na parede celular (STAMM, 1964; WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991; BATISTA 2012).

De qualquer forma, nota-se que a análise da composição química da madeira modificada termicamente na resistência mecânica não é simples, precisando de estudos mais aprofundados para se atingir melhores conclusões (BOONSTRA et al., 2007; BATISTA, 2012). Entretanto, segundo os mesmos autores, auxilia para entendermos as propriedades da madeira modificada termicamente.

3.4.2.3 - Resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola

Na Tabela 3.10 encontram-se os valores das médias da resistência ao cisalhamento na linha de cola e as falhas na madeira de acordo com cada tratamento e sua análise estatística para a madeira de *Tectona grandis*.

Tabela 3.10 - Médias da resistência ao cisalhamento na linha de cola de acordo com cada tratamento

Tratamentos	Resistência ao cisalhamento (MPa)	Falha na madeira (%)
T1	16 c (28,7)	87 d (7,25)
T2	10 b (35,05)	83 c (15,63)
T3	10 ba (34,46)	72 b (12,25)
T4	8 a (48,75)	68 a (9,23)
Teste de Bartlett	12,92 ^{ns}	16,54 ^{ns}
ANOVA - Teste F	16,57*	21,36*

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. T1 = Tábuas de 1ª qualidade; T2 = Tábuas de 2ª qualidade; T3 = Tábuas tratadas de 1ª qualidade; T4 - Tábuas tratadas de 2ª qualidade. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$). *Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$).
Fonte: Autor.

De acordo com o teste de Bartlett as variâncias dos valores da resistência ao cisalhamento na linha de cola e das falhas na madeira foram homogêneas. Sendo assim, aplicou-se a ANOVA, que verificou diferença estatística em 95% de confiança entre as médias. Para diferenciá-las utilizou-se o teste de Tukey.

A resistência ao cisalhamento obteve a maior média no tratamento T1 com 15,61 MPa e a menor no T4 com 8,01 MPa. A redução na resistência do cisalhamento na linha de cola do tratamento testemunha T1 para o T3 foi de 36,5%, e entre o T2 para o T4 reduziu 23,1%, ambos significativos.

Carvalho et al. (2015), estudando a resistência ao cisalhamento das juntas coladas com o adesivo PVA, e produzidas com madeira tratadas a diferentes temperaturas sendo a testemunha, 180, 200 e 220°C, observaram um decréscimo de resistência de 6,1; 5,5; 5,5 e 3,5 MPa, respectivamente. Estes resultados estão abaixo de todos os tratamentos encontrados neste trabalho. Outros autores como Kasemsiri et al. (2012) e Bakar et al. (2013) observaram a diminuição da resistência ao cisalhamento de juntas coladas de madeira com aumento da temperatura. Ainda segundo os autores, essa redução deve-se à degradação dos constituintes

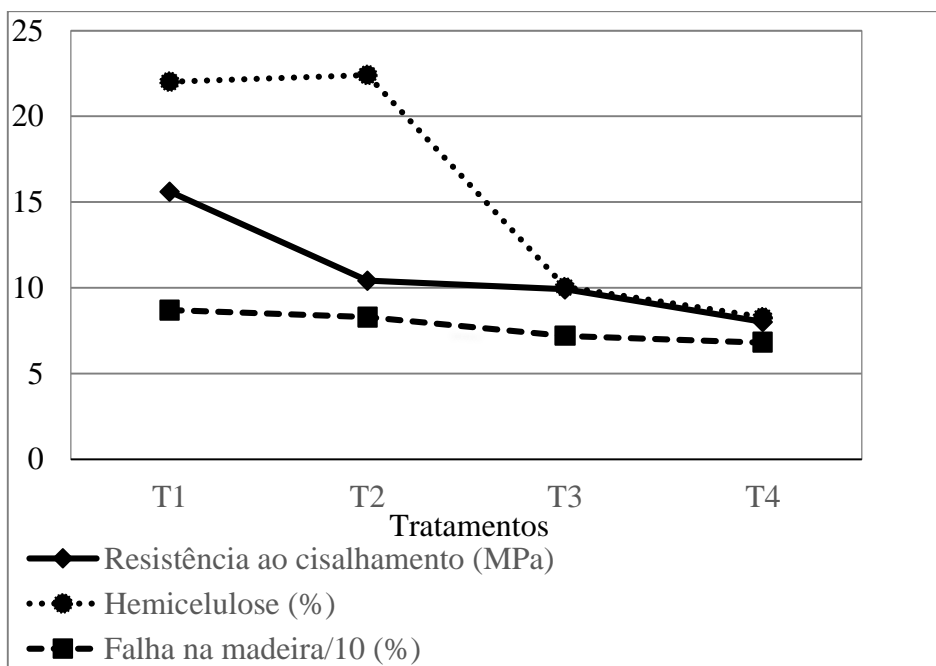
químicos durante o tratamento térmico, o que leva a despolimerização e redução do teor de hemicelulose.

Após a avaliação da interação madeira/adesivo na linha de cola para a madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*, Pincelli et al. (2002) não encontraram redução significativa, mas um decréscimo do módulo de cisalhamento com o aumento da temperatura.

Segundo Motta (2014), a resistência ao cisalhamento na linha de cola da madeira sólida de teca a 12% de umidade foi de 12,5 MPa, ou seja, abaixo da madeira natural do tratamento T1, contudo, maior que os demais (T2, T3 e T4). O tratamento térmico diminuiu ainda mais esses valores, devido a alteração da superfície, causando maior dificuldade de ancoramento do adesivo na madeira, reduzindo a força da interface madeira adesivo (CARVALHO et al., 2015). Além disso, a madeira de teca possui poucos poros, desde pequenos até grandes, mas as vezes interrompidos por tiloses ou goma-resinas, o que poderia impedir a colagem (MOTTA, 2011).

Na Figura 3.16 está ilustrado o comportamento da resistência ao cisalhamento na linha de cola da madeira de teca, e as falhas ocorridas durante o teste mecânico e o teor de hemicelulose.

Figura 3.16 - Comportamento da resistência ao cisalhamento e falha na madeira e a hemicelulose em função dos tratamentos na madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Pode-se observar na Figura 3.16 a tendência de decréscimo da resistência ao cisalhamento na linha de cola e da porcentagem de falha na madeira em função da redução da hemicelulose. Entretanto, a resistência decresceu entre os tratamentos testemunhas T1 e T2, contudo a hemicelulose manteve-se praticamente estável. O intervalo entre o tratamento T1 e T2 foi influenciado pela qualidade da madeira, pois estes foram estatisticamente diferentes ao nível de 95% de confiança. Após o tratamento térmico os tratamentos T3 e T4 reduziram significativamente para a hemicelulose (Capítulo I - Tabela 2.3) e cisalhamento na linha de cola, seguindo o mesmo comportamento.

As falhas na madeira apresentaram a mesma tendência do cisalhamento reduzindo ao longo dos tratamentos, em função principalmente da hemicelulose, mas em função da qualidade da madeira, pois todos os tratamentos foram diferentes estatisticamente. As falhas na madeira diminuíram significativamente, em 21,8% se compararmos o tratamento T1 com o T4. Entretanto, de acordo com a norma ASTM D - 3110 (ASTM, 2008b) o valor mínimo para as falhas na madeira é de 60%, ou seja, todos os valores deste trabalho estão de acordo com a norma, pois o valor mínimo foi de 68% para o tratamento T4. Normalmente alta porcentagem de falhas na madeira, juntamente ao elevado valor de tensão de cisalhamento, indica que o adesivo possui boa adesão e coesão com a madeira. Contudo Frihart e Hunt (2010) afirmam que os valores médios aceitáveis para esta característica devem variar de 75 a 85%. Em posse disso, a colagem da madeira de *Tectona grandis* para o adesivo termoplástico foi satisfatório.

3.5 CONCLUSÕES

Posterior a análise das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Tectona grandis* em relação aos seus tratamentos, conclui-se que:

- O teor de umidade de equilíbrio da madeira diminui com o tratamento térmico, devido à perda de massa da hemicelulose e aumento dos extrativos totais.

- A massa específica aparente diminui significativamente com o processo de tratamento térmico devido à perda de massa da hemicelulose.

- O inchamento total e anisotropia de inchamento da madeira decresceu em função da degradação da hemicelulose melhorando a estabilidade dimensional da madeira.

- A correlação de Pearson foi significativa e positiva entre a hemicelulose e os demais parâmetros (inchamento volumétrico, massa específica aparente, umidade de equilíbrio). Dessa forma, todos seguem a mesma tendência da hemicelulose.

- Os parâmetros colorimétricos foram influenciados pela modificação térmica da madeira, por meio, do escurecimento e aumento da tonalidade avermelhada.

- A correlação dos parâmetros colorimétricos demonstrou um decréscimo dos parâmetros b^* , C e L^* juntamente com a degradação da hemicelulose, o que significa uma diminuição na saturação da cor amarela e escurecimento da madeira.

- A resistência mecânica dos ensaios realizados foi reduzida pela qualidade da madeira e a modificação térmica, que neste último caso, causou a degradação da hemicelulose.

- De acordo com a norma ASTM D - 3110 (ASTM, 2008b) as falhas na madeira causada na resistência do cisalhamento na linha de cola foram satisfatórias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHAJJI, A.; DIOUF, P. N.; ALOUI, F.; ELBAKALI, I.; PERRIN, D.; MERLIN, A.; Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. **Wood Science and Technology** 2009; 43(1-2): 69-83. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-008-0208-3>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2244-09a**: Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. Philadelphia, 2009.

AMERICAN SOCIETY for testing and materials. **Standard methods of testing small clear specimens of timber**: ASTM D 143-94. Philadelphia, 2000. 31p.

ARAÚJO, S. de O. **Propriedades de madeiras termorretrificadas**. 77 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ARAÚJO, J. H. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, set./dez. 2007.

ARNOLD, M. Effect of moisture content on the bending properties of thermally modified beech and spruce. **Journal of Materials Science**, Berlin, v. 45, n. 3, p. 669-680, 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D - 905: **standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading**. Philadelphia, 2008a,5.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D - 3110**: standard specification for adhesives used in nonstructural glued lumber products. Philadelphia, 2008b. 9 p.

BAKAR, B. F. A.; HIZIROGLU, S.; AND TAHIR, P. M. "Properties of some thermally modified wood species," **Materials & Design** 43, 348-355. 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.054

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme®**. 338f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BELLON, K. R. da R. **Qualidade da madeira das espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* modificadas termicamente**. 101 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BHAT, K.M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterization of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology** 2001; 34:517-532. <http://dx.doi.org/10.1007/s002260000067>

BHAT, K. M.; PRIYA, P. B. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the western ghat region in India. **IAWA Journal**. 25(3):273-282. 2004.

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

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, Abr-Jun de 2004, p. 173-182.

BRITO, J. O.; GARCIA, J.N.; BORTOLETTO JR, G. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, Lavras, v.12, n.2, p.181-188, 2006.

CADEMARTORI, P. H. G. **Propriedades tecnológicas da madeira termorretificada de três espécies de *Eucalyptus***. Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais - (Dissertação). Universidade Federal de Pelotas, 2012.132f.

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

CARVALHO A. G.; DONATO, D. B.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R. FREITAS, F. P. de. Colagem da madeira de *Pinus* termoretificada. **Ciência da Madeira**. 6(3): 217-222, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p217-222

CASTRO, F. Crecimiento y propiedades físico mecánicas de la madera de teca *Tectona grandis* de 17 años de edad en san Joaquín de Abangares Costa Rica. **Agronomia Costarricense**, San José, v. 24, n. 2, p. 7-23, 2000.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Instabilidade dimensional da madeira e de seus subprodutos: causas, consequências e prevenção**. Brasília: UnB, 2006. 37 p.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: retratibilidade**. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992. 33p. (Série Técnica, 10).

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200°C. **Forest Products Journal**, Madison, v. 57, n. 1/2, p. 47-52, 2007a.

ESTEVES, B. M.; 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, 2007b.

ESTEVES, B., PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment: a review. **Bioresource Technology**, Lisboa, v. 4, n. 1, p.370-404. 2009.

ESTEVES, B.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, v. 62, n. 3, p. 2008.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood Handbook**. Helsink: Finnish ThermoWood Association, 2003. 66p.

FLÓREZ, J. B. **Caracterização tecnológica da madeira jovem de teca (*Tectona grandis* L. f)**. 2012. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: U.S. Department of Agriculture / Forest Service, 2010. p. 228 - 251.

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

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

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. **Revista Brasil Florestal**, ano XX. n. 72. p. 47 - 48. 2001.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

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

HILL, C. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

JÄMSÄ, S., VIITANIEMI, P. Heat treatment of wood - better durability without chemicals. In: COST ACTION E22, 2001, Antibes. **Proceedings of special seminar "Review on heat treatments of wood"**. Hamburg: The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001. p. 21-26.

JANIN G, GONÇALEZ J, ANANIAS R, CHARRIER B, FERNANDES G, DILEM A. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELab System. **Maderas: Ciencia y Tecnología** 2001; 3: 3-13.

KASEMSIRI, P.; HIZIROGLU, S.; RIMDUSIT, S. (2012). "Characterization of heat treated eastern redcedar (*Juniperus virginiana* L.)," **Journal of Materials Processing Technology** 212(6), 1324-1330. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.12.019

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v1. 592p.

LINCOLN, W. A. **World woods in colour**. Hertford: Stobart Davies; 1986.

LOBÃO, M. S.; CASTRO, V. R.; RANGEL, A. SARTO, C.; TOMAZELLO-FILHO, M.; SILVA-JUNIOR, F. G. S.; CAMARGO-NETO, L.; BERMUDEZ, M. A. R. C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 39, n. 92, p. 469-477. 2011.

LOPES J. O.; GARCIA R. A.; LATORRACA J. V. F.; NASCIMENTO A. M. Alteração da Cor da Madeira de Teca por Tratamento Térmico. **Floresta e Ambiente**; 21 (4): 521-534. 2014 b.

LOPES J. O.; GARCIA R. A.; NASCIMENTO A. M.; LATORRACA J. V. F. Propriedades físicas da Madeira de Teca Termorretificada. **Floresta e Ambiente**; 21 (4): 521-534. 2014a. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.040213>

MELO, R. R. et al. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Agrária**, Recife, v. 5, n. 1, p. 67-73, jan./mar. 2010.

MENZ HOLZ. **Catálogo**. Disponível em: < <http://www.menzholz.de/#/0> >. Acesso em: 15/12/2016.

MIRANDA, I.; SOUSA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, Volume 57, Issue 3, pp 171-178, 2011. Disponível em: < <http://rd.springer.com/article/10.1007/s10086-010-1164-8>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MÖTTÖNEN K, ALVILA L, PAKKANEN T. CIELab Measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood. **Scandinavian Journal Forest Research** 2002; 17(2): 179- 191. <http://dx.doi.org/10.1080/028275802753626827>.

MORI, C. L. S. O.; LIMA J.T.; MORI, F. A; TRUGILHO, P. F.; GONCALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne** 11(2): 137-146, 2005.

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

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA J. T. da S.; PAES, J. B.; ALVES, R. C.; VIDAURRE, G. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com madeira de teca (*Tectona grandis*). **Scientia. Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 615-621, dez. 2014.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; CHANSON, B.; DÉTIENNE, P.; GRIL, J.; THIBAUT, B. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. **J Wood Sci**, v. 44, n. 1, p. 3-8, jan. 1998.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1998. 429 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PERDURE. Disponível em: <http://www.perdure.com/PerdurePortal/DesktopDefault.aspx?tabindex=0&tabid=24>. Acesso em: 09/07/2016.

PLATOWOOD. Disponível em: <http://www.platowood.nl/69/The-PlatoTechnology.html>. Acesso em: 10/12/2016.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; L. F.; BRITO, J. O; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cientia Florestalis**. n. 61, p. 122-132, 2002.

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

PINHEIRO, P. C. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. E. A. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. 2. ed. Belo Horizonte, 2008.

PINTO, M. L. **Propriedades e Características da Madeira de Teca (*Tectona grandis*) em função da idade**. 2007. 124p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

POSCH, B., G.; WEGENER, D.; GROSSER & L.; WAGNER. 2004. Physical and mechanical investigations on teakwood (*Tectona grandis* L.f.) from plantations in Panamá. **Holz Roh Werkst.** 62: 31-35.

RAPPOLD, P. M.; SMITH, W. B. An investigation of the relationships between harvest season, log age, and drying schedule on the coloration of hard maple lumber. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 12, p. 178-184, 2004.

RETIWOOD. Disponível em: < <http://www.retiwood.com/en/processes.html>>. Acesso em: 12/12/2016.

REZENDE, M. A. de. Retratibilidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus saligna* e suas relações com a umidade e a densidade. **Scientia Forestalis**, IPEF-Instituto de Pesquisas Florestais, n.64, p.120-127, dez. 2003.

RICHTER, H. G., DALLWITZ, M. J. 2000 onwards. **Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval.** In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 25th June 2009.

ROUSSET, P.; PERRE, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. **Holz als Rohund Werkstoff** 2004; 62(2): 113-119. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-003-0459-5>

SHI, J. L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behavior of Quebec wood species heat-treated using thermo wood process. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.65, n. 4, p. 255-259, 2007.

SKAAR, C. **Water in wood.** Syracuse: Syracuse University Press, 1972.

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.

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

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

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff** 2003; 61(3): 216-220.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The chemistry of wood strength. In: ROWELL, R.M. **The chemistry of solid wood.** Washington: American Chemical Society, 1984. p. 211-256.

4 CAPÍTULO III - CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA A FUNGOS XILÓFAGOS DA MADEIRA DE *Tectona grandis* LINN F. MODIFICADA TERMICAMENTE

4.1 INTRODUÇÃO

A durabilidade natural da madeira é um dos principais fatores que determinam a sua utilização. Esta informação complementa o conhecimento das demais propriedades tecnológicas. Além do mais, segundo Trevisan (2006), a durabilidade natural pode enquadrar a madeira possibilitando resultados que a destinam quanto ao seu uso ou não em uma determinada situação.

A definição da durabilidade natural da madeira está em resistir a ação dos agentes biológicos ou físico-químicos, apresentando alta, média ou baixa resistência (PAES, 2002). Entretanto, segunda a mesma autora, em razão da frequência e da importância econômica, a resistência natural é normalmente entendida como referente aos agentes biológicos.

A madeira é naturalmente degradada por organismos xilófagos que a utilizam como fonte de alimento. A madeira atacada por fungos decompositores pode ter as suas propriedades alteradas, o que pode comprometer a qualidade e até inviabilizar seu uso tecnológico. Dentre os maiores problemas apresentado pelas madeiras atacadas por fungos se destacam a alteração química, modificação da cor natural, redução da resistência mecânica e aumento da permeabilidade (SANTOS, 1992).

Diante do exposto, diferentes técnicas têm sido aplicadas para aumentar a durabilidade da madeira, tais como, impermeabilizantes, tintas, pesticidas, fungicidas, etc. Entretanto, muitos deles causam efeito negativo ao meio ambiente, por este motivo suas aplicações estão sendo restringidas em diversos países, principalmente pelas leis e a pressão da mídia (MOHEBBY, 2003a).

Nesse contexto, uma das alternativas viáveis, e ecologicamente aceitável, sem aplicação de produtos químicos, tem sido a utilização de madeira modificada termicamente. As pesquisas e empresas detentoras dos processos industriais são unânimes em afirmar que a madeira tratada termicamente aumenta a resistência à organismos xilófagos, em relação a natural, exceto a térmitas (BATISTA, 2012). Além do acréscimo na resistência, ao final da vida útil, a madeira modificada pode ser descartada, reaproveitadas ou recicladas da mesma forma que a original, sem qualquer perigo ou prejuízo para o meio.

O objetivo deste estudo foi averiguar a resistência da madeira de *Tectona grandis* Linn F., tratada termicamente em escala industrial, ao fungo *Gonoderma applanatum* (podridão-branca).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A origem da madeira de *Tectona grandis*, a amostragem, os tratamentos e o processo de modificação térmica constam no material e métodos gerais desta pesquisa. Após o tratamento térmico a madeira de *Tectona grandis*, tratada e não tratada, foi testada por meio do ensaio de apodrecimento acelerado, com um fungo de podridão branca.

4.2.1 O ensaio de apodrecimento acelerado

Este ensaio foi realizado no laboratório do curso Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). A montagem das análises seguiu as recomendações da Norma Europeia EN 113 (1996). O fungo utilizado foi o *Ganoderma applanatum* (podridão-branca), fornecido pelo Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, localizado em Brasília, no Distrito Federal, o qual atua na área de tecnologia da madeira e outros produtos florestais.

Foram utilizadas 16 placas de petri contendo meio de cultura malte e Agar. Inicialmente inoculou-se o fungo no centro da placa, e posterior foram acondicionados por um período de três semanas em câmara incubadora com 75% de umidade relativa e temperatura entre 20-30°C, para a verificação de possível contaminação e de desenvolvimento adequado do fungo. Neste período ocorreu o crescimento micelial, em que a placa ficou completamente coberta pelas hifas. Logo em cada placa foram adicionadas quatro amostras de madeira, ou seja, uma de cada tratamento (Tabela 4.1), com dimensões 0,9 x 2,5 x 2,5 cm em diferentes posições (FIGURA 4.1).

Tabela 4.1 - Relação dos tratamentos da madeira de *Tectona grandis* submetidas ao fungo *Ganoderma applanatum*

Código	Tratamento	Repetições por coleta
T1	Corpos de prova 1ª qualidade	4
T2	Corpos de prova de 2ª qualidade	4
T3	Corpos de prova tratados de 1ª qualidade	4
T4	Corpos de prova tratados de 2ª qualidade	4

Figura 4.1 - Placas de petri com o fungo *Gonoderma applanatum* em contato com a madeira de *Tectona grandis*



Fonte: Autor.

Antes de ser posta em contato direto com o fungo a madeira foi devidamente identificada e seca em estufa a 70°C até a estabilização do seu peso, para obtenção da massa inicial. Ainda, foi esterilizada em autoclave com temperatura de 120°C durante o período de uma hora.

4.2.2 Avaliação da perda de massa

Para avaliação da perda de massa foram realizadas quatro coletas. A primeira foi realizada após quatro semanas de exposição ao fungo, e as seguintes a cada três semanas, totalizando 13 semanas.

A cada coleta, as amostras eram removidas da placa de petri com auxílio de uma pinça e limpas com pincel, para posterior secagem em estufa, nas mesmas condições iniciais para

obtenção do peso final após o ataque fúngico. Com base no peso inicial e final da madeira foi determinada a perda de massa individual para cada amostra, conforme a Equação 4.1.

$$PM = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (4.1)$$

Em que:

PM= Perda de massa (g);

M_i= Massa inicial (g);

M_f= Massa final (g).

Após os cálculos de perda de massa, e por meio da norma ASTM D 2017 (1994), foi avaliada a resistência ao ataque de fungo decompositor da madeira de *Tectona grandis*, tratada e não tratada termicamente, ou seja, de todos os tratamentos (TABELA 4.2).

Tabela 4.5 - Classes de resistência a fungos xilófagos

Classe de Resistência	Perda de massa (%)
Muito resistente	0-10
Resistente	11-24
Resistência moderada	25-44
Pouco resistente ou não resistente	≥45

Fonte: norma ASTM D 2017 (1994).

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O conjunto de dados da perda de massa da madeira de *Tectona grandis* pelo fungo *Ganoderma applanatum* foi avaliado estatisticamente pelo uso do software Statgraphics Centurion XVI. A análise foi realizada pelo modelo em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com o nível de significância de 5% de erro. Os fatores analisados foram tratamentos (quatro) de acordo com cada coleta (quatro) e a interação entre eles pela perda de massa.

Os resultados foram explicados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA), sendo que a comparação entre os tratamentos foi executada através do teste F, a 95% de significância. Nas propriedades em que a hipótese nula foi rejeitada, as médias foram

comparadas a 95% de significância, pelo teste de Tukey. Para validação da ANOVA foi realizado o teste de Bartlett, e quando pelo menos uma das variâncias não foram estatisticamente igual, aplicou-se o teste H de Kruskal-Wallis.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o teste de Bartlett da Tabela 4.3, houve homogeneidade das variâncias dos valores da perda de massa, logo aplicou-se a análise da variância (ANOVA). Dessa forma foi constatada a diferença entre as médias, que foi comprovada pelo teste F em 95% de confiabilidade.

Tabela 4.3 - Perda de massa do período da exposição da madeira de *Tectona grandis* com o fungo *Ganoderma applanatum*

Coletas (semanas)	Perda de massa (%)			
	T1	T2	T3	T4
4 ^a	0,96 aA (60)	2,27 aAB (49)	3,86 aB (27)	4,25 aB (49)
7 ^a	1,24 aA (54)	3,6 aB (55)	4,8 aB (53)	5,22 abB (56)
10 ^a	1,32 aA (37)	2,06 aA (29)	5,18 abB (29)	5,9 abB (37)
13 ^a	1,72 aA (25)	5,67 bB (15)	6,98 bB (22)	7,31 bB (10)
Média	1,31 A (44)	3,40 B (37)	5,20 C (33)	5,67 C (38)
Classes de resistência	MR	MR	MR	MR
Teste de Bartlett Interação	29,59 ^{ns}			
Teste F - Interação	21,18*			

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra minúscula ou na horizontal, por uma mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação, (%). n.s.: não significativo em nível de 5% de erro ($p > 0,05$).

*Significativo em nível de 5% de erro ($p \leq 0,05$). MR = muito resistente.

Fonte: Autor.

Os maiores valores de perda de massa ocorreram na 13^a semana para todos os tratamentos. De acordo com a norma ASTM D 2017, entre a 8^a e 12^a semana de ensaio, as médias de perda de massas deveriam se estabilizar, mas não foi o caso deste estudo. Entretanto, conseguiu-se verificar ao longo de cada coleta a tendência de crescimento da perda massa. Para Stangerlin (2012), estudando a perda de massa de três espécies nativas (*Simarouba amara*, *Cariniana micrantha* e *Dipteryx odorata*), e em contato com dois fungos decompositores

(*Trametes versicolor* e *Gloeophyllum trabeum*) constatou que as médias de perda de massa, não apresentaram estabilização entre a 8ª e 12ª semana de ensaio de apodrecimento. O autor sugere que este parâmetro seja revisto pela norma.

Os maiores valores de coeficiente de variação foram obtidos nas duas primeiras coletas, com 56 e 60% respectivamente, enquanto que nas duas últimas a variação foi de 10 a 37%. Isto indicou um padrão heterogêneo de deterioração, resultando em corpos de prova com perda de massa próxima a zero, que pode ser reflexo do não reconhecimento das enzimas fúngicas ao substrato em alguns casos, segundo a literatura (HAKKOU et al., 2006; LEKOUNOUGOU et al., 2009). Ainda, pode ter sido causado pela desuniformidade dos corpos de prova, pois estes, apresentavam quantidades diferentes de alburno e cerne, resultando em padrão desigual de resistência à biodeterioração.

A média da perda de massa dos tratamentos submetidos a modificação térmica apresentou menor resistência ao fungo decompositor *Gonoderma applanatum* (TABELA 4.3). Estatisticamente o tratamento T1 foi diferente do T2, sendo que a provável causa pode ter sido a maior quantidade de alburno deste último. Entretanto, para o tratamento T3 e T4 não ocorreu diferença significativa em 95% de confiança, neste caso a possível justificativa seja que o tratamento térmico tenha melhorado a resistência ao fungo, igualando a diferença que não havia entre as testemunhas. Isto pode ser explicado pelas mudanças na constituição química da madeira. Dessa forma, seria interessante um estudo mais aprofundado dos componentes químicos da madeira, para poder diferenciar quais compostos influenciaram nos tratamentos.

Batista (2012) submeteu a madeira de *Eucalyptus grandis* natural e modificada termicamente a 140, 160 e 180 °C ao fungo *Gloeophyllum trabeum* e *Postia placenta*, ambos de podridão parda, durante 12 semanas. O autor concluiu que houve redução significativa na perda de massa somente na temperatura de 180°C, para os dois fungos.

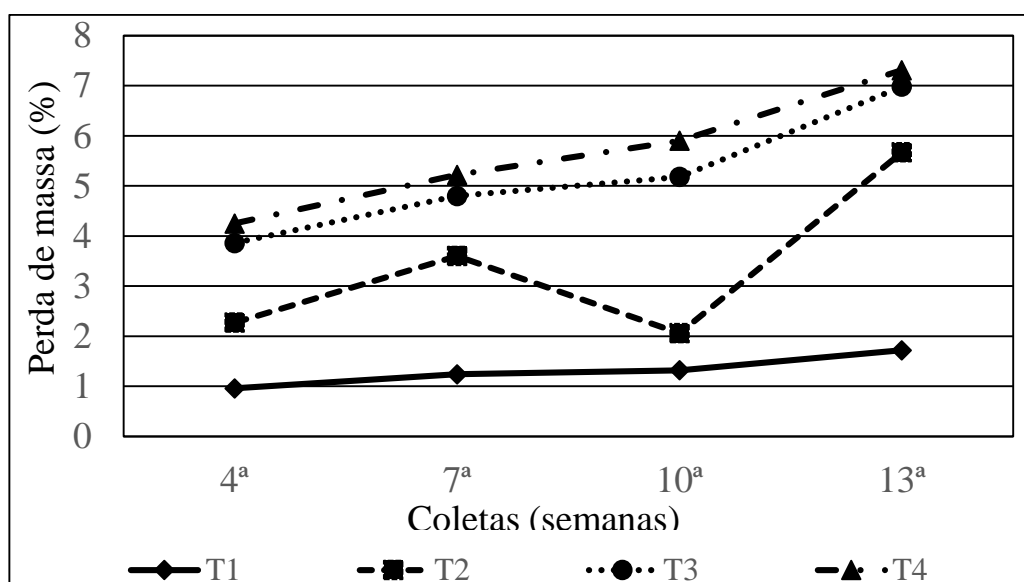
Bellon, (2013) estudando o apodrecimento acelerado dos fungos de podridão-branca (*Lentinula edodes* e *Pleurotus djamor*) na madeira natural e modificada termicamente para temperaturas de 140°C e 160°C, na madeira de *Tectona grandis*, obteve valor de perda de massa de 1,37, 2,31, 1,90 e 1,86% para a testemunha, 140°C, 160°C e a média, respectivamente. Entretanto, ocorreu um decréscimo da resistência a perda de massa na temperatura de 140°C. O autor concluiu que a madeira foi a mais resistente em comparação com as demais espécies.

Segundo Batista (2012) todos os processos de modificação térmica garantem que a madeira adquira mais resistência à biodeterioração, e o fator determinante é o aumento temperatura. Todos os processos patenteados como, por exemplo, o Retification® e Perdure®, e produtos Thermo-S e Thermo-D, são mais resistentes que a madeira original, mas as

temperaturas utilizadas estão entre 190 e 240°C, acima da temperatura máxima utilizada neste estudo, de 160°C (VERNOIS, 2001; FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003; PERDURE, 2011; RETIWOOD, 2011). Para Dubey et al. (2012) a temperatura de 160°C não aumentou a resistência à deterioração fúngica da madeira de *Pinus radiata*, apenas nas temperaturas de 180 e 210°C. Logo, a temperatura máxima utilizada neste estudo (160°C), não foi suficiente para aumentar a resistência da madeira de *Tectona grandis* em contato com fungo *Ganoderma applanatum*.

Dessa forma, verifica-se um efeito inverso, em que a madeira tratada termicamente obteve a menor resistência a degradação ao fungo (FIGURA 4.2).

Figura 4.2 - Comportamento da perda de massa da madeira de *Tectona grandis* sobre a ação do fungo *Gonoderma applanatum*



Fonte: Autor.

A perda de massa seguiu a mesma tendência para todos os tratamentos ao longo das coletas, com exceção do tratamento T2 que na 10ª semana reduziu (FIGURA 4.2). Pode-se destacar que os tratamentos de segunda qualidade (T2 e T4) foram inferiores aos de primeira (T1 e T3). A explicação para a menor resistência pode ter sido devido a sua estrutura do lenho, ou seja, a maior proporção de alburno.

Motta et al. (2013) estudando a resistência natural da madeira de *Tectona grandis* a fungos e térmitas xilófagos em condições de laboratório, constatou que o cerne da madeira de teca foi altamente resistente à ação dos agentes xilófagos, enquanto a madeira de alburno foi

classificada como de resistência moderada (*Polyporus fumosus*) ou resistente (*Postia placenta* e *Neolentinus lepideus*).

O alburno da maioria das espécies possui baixa resistência à degradação e, normalmente, tem uma menor vida útil sob condições desfavoráveis (CLAUSEN, 2010). Segundo Kirk e Cowling (1984) e Tsoumis (1991) o alburno é mais suscetível porque é encontrado menor teor de extrativos, além de maior umidade e substâncias nutritivas como açúcares e amido. Além dos extrativos, a lignina previne a degradação dos polissacarídeos (celulose e hemicelulose) da parede celular. Dessa forma, a biodeterioração dos materiais lignocelulósicos, incluindo a madeira, depende do teor de lignina (KIRK e COWLING, 1984).

Em oposto a este, o cerne normalmente apresenta maior durabilidade natural, devido à ausência de materiais nutritivos e, principalmente, à presença de extrativos (OLIVEIRA et al., 1986). Contudo, o cerne de coníferas contém mais extrativos e menos lignina e celulose, enquanto que em folhosas, onde se enquadra a espécie desta pesquisa, essas diferenças não são consistentes (BROWNING, 1963). A resistência à deterioração natural do cerne é principalmente afetada por diferenças entre os extrativos da madeira, do tipo de fungo e das condições de exposição da madeira.

De acordo com norma ASTM D 2017 os resultados da perda de massa da madeira de *Tectona grandis*, deste estudo, submetida ao fungo *Ganoderma applanatum* da podridão-branca, para todos os tratamentos enquadraram-se na classe de “muito resistente”, devido a baixa perda de massa 10%. Blanchette (2000) e Raymundo (2010) explicam que o ataque do fungo de podridão pode chegar até 65% de perda de massa, ocorrendo tanto da celulose quanto da hemicelulose da madeira.

De acordo Paes et al. (2007) a madeira de *Tectona grandis* é considerada de grande durabilidade natural. Contudo, Motta et al. (2013), estudando a mesma espécie com o fungo *Polyporus fumosus* causador de podridão branca, por 13 semanas, classificou a madeira de *Tectona grandis* como de resistência moderada, ou seja, abaixo da classificação deste trabalho.

Conforme Pala (2012) e Costa et al. (2011) os fungos da podridão são possivelmente os mais comuns biodecompositores da madeira, que resultam na deterioração pronunciada do material, transformando sua característica química, modificação da cor natural, redução da resistência mecânica, diminuição de massa, dentre outros. Ainda, segundo os mesmos autores, a alteração dessas propriedades na madeira pode comprometer a sua qualidade e inviabilizando sua utilização para fins tecnológicos.

Modes (2010) testou a resistência a biodeterioração pelo fungo *Trametes versicolor* (podridão branca) com madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* natural e modificada

termicamente, e encontrou decréscimo da resistência biológica para o *E. grandis*. Segundo a própria autora e complementado por Martínez et al. (2005), a maior degradação deve-se ao fato de que fungos de podridão branca se desenvolvem melhor em madeira de folhosas.

Na Figura 4.3 encontram-se os corpos de prova por tratamento, degradados pelo fungo da 4ª e 13ª semana, ou seja, a primeira e última coleta.

Figura 4.3 - Aspecto visual dos corpos de prova mais degradados pela ação fúngica

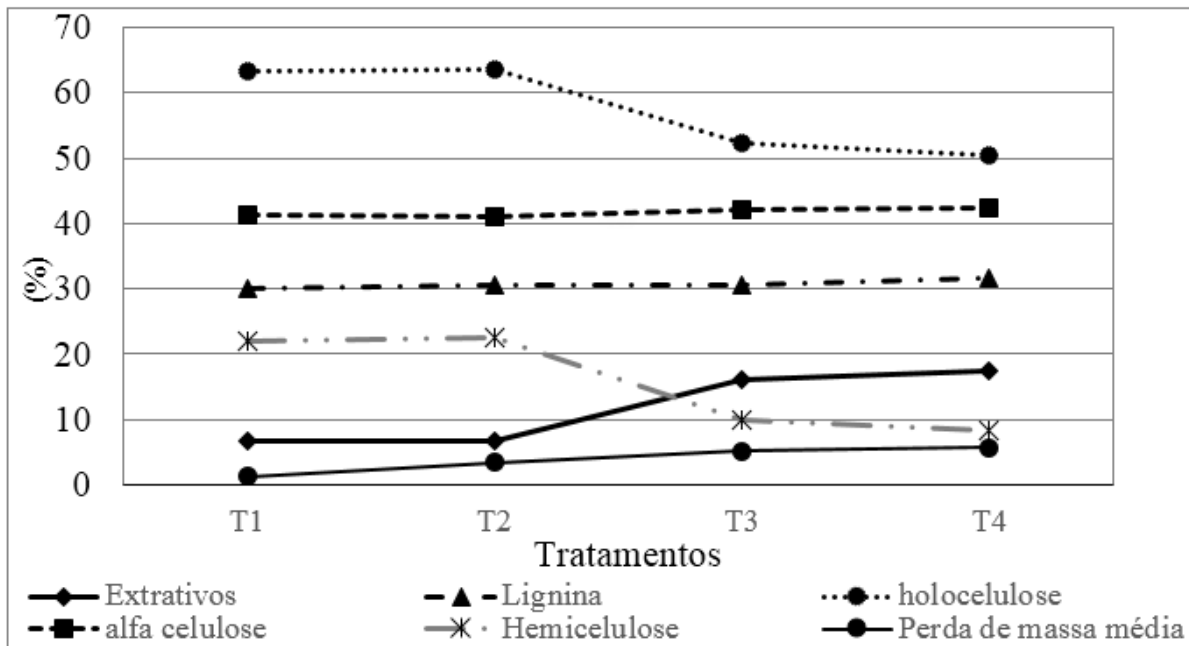


Fonte: Autor.

Verificando a Figura 4.3, nota-se pouca alteração no aspecto visual dos corpos de prova, com exceção do T4 após a 13ª semana. Neste caso, em especial o corpo de prova provavelmente estava com um nó solto, o que apresentou aparentemente degradação pelo fungo. Contudo, os corpos de prova tratados foram os que obtiveram as maiores perdas de massa, como já comprovado anteriormente (TABELA 4.3).

A madeira natural (T1 e T2) foi mais resistente do que a madeira modificada termicamente (T3 e T4) (FIGURA 4.2). Eaton e Hale (1993); Alves et al. (2006) ao considerar apenas o fator madeira, a resistência natural aos fungos apodrecedores está condicionada às vias de acesso (plano anatômico e teor de umidade) e à composição química. Porém, este último predomina após a modificação térmica. Nesse sentido, a Figura 4.4, demonstra a relação dos constituintes químicos avaliados e a perda de massa média da madeira de *Tectona grandis* após a exposição ao fungo *Ganoderma applanatum*.

Figura 4.4 - Comportamento da perda de massa média causada pela ação fúngica com a química da madeira



Fonte: Autor.

De acordo com Boonstra et al. (2007) a resposta ao ensaio de biodeterioração depende da composição química de cada espécie, pois essa, diferencia as respostas dos tratamentos térmicos quando relacionadas à resistência natural. Finnish Thermowood Association (2003); Hakkou et al. (2006); Weiland e Guyonnet (2003) e Mohareb et al. (2012), afirmam que a modificação da estrutura da parede celular é responsável pelo aumento da resistência à deterioração fúngica, mas complementam que a perda de holocelulose implica na diminuição da fonte de nutrição dos fungos. Entretanto o decréscimo de holocelulose, hemicelulose e o aumento dos extrativos não favoreceu o aumento da resistência da madeira para este estudo.

Embora não tenha sido possível discriminar a influência exata dos constituintes químicos da madeira, acredita-se que a degradação significativa da hemicelulose tenha produzido novas substâncias, nutritivas aos fungos, como açúcares que foram quebrados em menores unidades, facilmente digerível. Dessa forma, elevou a perda de massa da madeira. Contudo, esse fato carece de maior investigação.

Da mesma forma, Doi et al. (2005) constataram a mesma susceptibilidade com a madeira de *Larix leptolepis* ao apodrecimento pelo fungo *Fomitopsis palustris*, após tratada a temperaturas de 120 e 130°C. Os autores explicam que a provável perda de massa da madeira

tenha ocorrido da degradação da hemicelulose, pela liberação de fragmentos de açúcares de baixo peso molecular, que são uma das preferências alimentares dos fungos.

As temperaturas utilizadas na modificação térmica, geralmente acima de 150°C, são as que causam mudanças químicas na parede celular da madeira, e por consequência provocam efetivas alterações na durabilidade natural da madeira ao ataque de organismos xilófagos (ŠUŠTERŠIĆ et al., 2009; HAKKOU et al., 2006; BOONSTRA et al., 2007).

O mais provável seja que a temperatura utilizada nesse estudo tenha favorecido a disponibilidade de alimento para os fungos. Em temperaturas superiores, esses compostos podem ser reticulados com a lignina, tornando-se indisponíveis para utilização pelos fungos. O aumento da proporção da lignina na parede celular diminui a capacidade das enzimas fúngicas digerirem a madeira, por não reconhecerem o substrato (KIRK; COWLING, 1984; WEILAND; GUYONNET, 2003). Mazela et al. (2003) complementa que os elementos resultantes da hidrolização das hemiceluloses são produtos prontamente disponíveis para o ataque de fungos. Entretanto, acima de 200°C os produtos da decomposição destes compostos formam substâncias tóxicas como o furfural, afetando a resistência da madeira aos agentes xilófagos.

De acordo com a Figura 4.4 pode-se observar um comportamento oposto dos extrativos e da perda de massa. De acordo com Eaton e Hale (1993), os extrativos influenciam no grau de resistência biológica, podendo retardar/minimizar ou acelerar/maximizar a deterioração dos constituintes de alto peso molecular (celulose, polioses e lignina).

Conforme Carneiro et al. (2009), o teor de extrativos relaciona-se com a perda de massa e o potencial de resistência natural da madeira. Os mesmos complementam que o teor de extrativos acima de 7%, aumentam a resistência natural da madeira e, por conseguinte as perdas de massa são mínimas.

Todavia alguns autores já comprovaram que os novos extrativos produzidos não foram os responsáveis pelo aumento da resistência da madeira modificada termicamente à deterioração fúngica (HAKKOU et al., 2006; MOHAREB et al., 2012).

As causas mais prováveis para os resultados do presente estudo, ou seja, a madeira se tornar mais suscetível ao ataque dos fungos pode estar relacionada, de acordo com Doi et al. (2005), com o tipo de tratamento térmico. Segundo os autores a utilização de vapor aquecido na madeira podem ocorrer a desintegração química de certos componentes, como as xiloses, que podem vir a serem prontamente aproveitáveis pelos fungos; ou haver uma diminuição no pH, que cria condição propícia ao desenvolvimento micelial e ainda, a lixiviação de componentes tóxicos, ou seja, dos extrativos presentes no cerne, favorecendo a biodeterioração da madeira através de hidrólises enzimáticas. Ainda segundo os mesmos autores existe uma

relação linear de diminuição da perda de massa da madeira exposta a fungos com o aumento do tempo do tratamento térmico por meio de vapor (MOMOHARA et al., 2003).

A interação entre materiais biológicos como os fungos decompositores e a madeira sempre ocorrerá variabilidade nos resultados e, inclusive, contraditórios, inesperados e inexplicáveis (HILL, 2006). Logo, este estudo auxiliará em novas pesquisas para cada vez mais podermos aprimorar esse tema.

4.5 CONCLUSÕES

Após a análise do contato do fungo *Gonoderma applanatum* com a madeira de *Tectona grandis* em relação aos seus tratamentos, conclui-se que:

- A modificação térmica por meio da temperatura máxima de 160°C diminui a resistência da madeira ao fungo xilófago de podridão-branca (*Gonoderma applanatum*).

- As maiores perdas de massa da madeira em contato com o fungo ocorreram na décima terceira semana.

- A qualidade da madeira pode ter influenciado devido a maior proporção de alburno ou cerne.

- A madeira de *Tectona grandis* foi classificada como muito resistente, de acordo com a norma ASTM D 2017, em todos os tratamentos após a exposição ao fungo *Gonoderma applanatum*.

- Acredita-se que a degradação das hemiceluloses tenha produzido novas substâncias, nutritivas aos fungos, que por sua vez, elevaram a perda de massa da madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 ensaio de laboratório. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.1, p.17-26, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2017: standard

testmethod for accelerated laboratory test of natural decay resistance of wood. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, v. 410, p. 324-328, 1994b.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme®**. 338f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BELLON, K. R. da R. **Qualidade da madeira das espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* modificadas termicamente**. 101 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BLANCHETTE, R.A. A review of microbial deterioration found in archeological wood from different environments. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.46, p.189-204, 2000.

BOONSTRA, M. J. et al. Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 41, p. 41-57, 2007.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: John Wiley, 1963. 689 p.

CARNEIRO, J.S.; EMMERT, L.; STERNADT, G.H.; MENDES, J.C.; ALMEIDA, G.F. Decay susceptibility of Amazon wood species from Brazil against white rot and brown rot decay fungi. **Holzforschung**, Berlin, v.63, n.6, p.767-772, 2009.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 14-1 - 14-16.

COSTA, M. A.; COSTA, A. F. DA; PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, 21: 567-577. 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.5902/198050983814>.

DOI, S. et al. Changes of decay and termite durabilities of Japanese larch (*Larix leptolepis*) wood due to high-temperature kiln drying processes. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 1, p. 526-530, 2005.

DUBEY, M. K.; PANG, S.; WALKER, J. Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of *Pinus radiata* D. Don Wood with oil heat-treatment. **Holzforschung**, Berlin, v. 66, n. 1, p. 49-57, 2012.

EATON, R.A.; HALE, M.D.C. **Wood: decay, pests and protection**. Londres: Chapman & Hall, 1993. 546p.

European Committee for Standardization EN 113. **Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes - Determination of the toxic values**. (1996).

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® handbook** Helsink, 2003.

HAKKOU, M., PÉTRISSANS, M.; 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.

HILL, C. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

KIRK, T. K.; COWLING., E. B. Biological decomposition of solid wood. Chap 12, pp. 455-487 in R. M. Rowell, ed. **Chemistry of solid wood**. Advances in Chemistry Series 207, A.C.S., Washington, DC. 1984.

LEKOUNOUGOU, S.; PÉTRISSANS, M.; JACQUOT, J. P.; GELHAYE, E.; GÉRARDIN, P. Effect of heat treatment on extracellular enzymatic activities involved in beech wood degradation. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 43, n. 3-4; p. 331-341, 2009.

MODES. K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MARTÍNEZ, A. T. et al. Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. **International Microbiology**, n. 8, p. 195-204. 2005.

MAZELA, R. B. et al. Preliminary research on the biological resistance of thermally modified wood. In: EUROPEAN CONFERENCE ON WOOD MODIFICATION, 1., 2003, Ghent. **Proceedings...** Ghent: SHR, 2003. p. 113- 119.

MOHAREB, A.; SIRMAH, P.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Effect of heat treatment intensity on wood chemical composition and decay durability of *Pinus patula*. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 4, p. 519-524, 2012.

MOHEBBY B., **Biological attack of acetylated wood**; Ph.D. Thesis; Göttingen University; Göttingen: p. 147. 2003a.

MOMOHARA, I. et al. Effect of high-temperature treatment on wood durability against the Brown-rot fungus, *Fomitopsis palustris*, and the termite, *Coptotermes fimosanus*. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 2003. **Anais eletrônicos...** disponível em: <http://www.unitbv.ro/il/iufro2003modific/postiufro/Poster%20session/Momohara%20-%20Ohmura%20-%20Kato%20-%20Kubojima.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2016.

MOTTA, J. P. et al. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.8, p.1393-1398, ago, 2013.

OLIVEIRA, A. M.F. et al. Agentes destruidores da madeira. In: **MANUAL de preservação de madeiras**. São Paulo: 1986. p. 99-275.

PAES, J. B. Resistência natural da madeira de *Corymbia maculata* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson a fungos e cupins xilófagos, em condições de laboratório. **Rev.**

Árvore, vol.26, no.6, Viçosa, Nov./Dez. 2002.<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-7622002000600012>.

PAES, J. B.; MELO, R. R. de; LIMA, C. R. de. Resistência natural de sete madeiras a fungos e cupins xilófagos em condições de laboratório. **Cerne**, v. 13, n. 2, 2007.

PALA, H. **Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira**. Escola superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, 2012.

PERDURE. Disponível em: <http://www.perdure.com/PerdurePortal/DesktopDefault.aspx?tabindex=0&tabid=24>. Acesso em: 09/01/2017.

RAYMUNDO, R. F. **Análise da resistência biológica em madeira de *Tectona grandis* l. f. in natura e termo-tratada**. Jaguariaíva - Paraná: Faculdade Jaguariaíva - ULT FAJAR, 2010;

RETIWOOD. Disponível em: <http://www.retiwood.com>. Acesso em: 12/01/ 2017.

SANTOS, Z. M. **Avaliação da durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill: Maiden em ensaios de laboratório**. 1992. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

ŠUŠTERŠIĆ, T. et al. Prediction of the decay resistance of heat treated wood on the basis of its elemental composition. **Polymer Degradation and Stability**, Liège, v. 95, n. 1, p. 94-97, 2009.

STANGERLIN, D. M., COSTA, A. F. da; GARLET, A.; PASTORE, T. C. M. Resistência natural da madeira de três espécies amazônicas submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, Pelotas, v. 04, n. 01, p. 15-32, Maio de 2013.

TREVISAN, H. **Degradação natural de toras e sua influência nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies florestais**. 2006. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

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

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France - state of the art. In: COST ACTION E22: Environmental Optimisation of Wood Protection, 2001, Antibes. **Proceedings of special seminar "Review on heat treatments of wood"**. Hamburg: The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Information and Documentation, 2001. p. 39-46.

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff** 2003; 61(3): 216-220.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

O estudo da modificação térmica em escala industrial pelo processo VAP HolzSysteme®, patenteado pela empresa *TWBrazil*, origina benefícios para a madeira de *Tectona grandis*. Dentre os constituintes químicos avaliados pode-se destacar a degradação da hemicelulose e o aumento dos extrativos com o tratamento térmico, que se correlacionaram inversamente, ou seja, aumento de um ocorreu o decréscimo do outro. Essas análises foram importantes para entendermos a relação com a melhora da estabilidade dimensional, mudança na cor, diminuição da resistência e aumento da perda de massa da madeira em contato com o fungo *Gonoderma applanatum* (podridão-branca), mas apesar disso, classificada como muito resistente. A qualidade da madeira (1ª e 2ª), pouco influenciou nos resultados, sendo mais pronunciada na resistência mecânica da madeira, que aliás foi uma desvantagem do tratamento térmico. Dessa forma, pode-se recomendar a madeira de *Tectona grandis* modificada termicamente pelo processo VAP HolzSysteme®, para a indústria moveleira na fabricação de móveis (decorativos, interiores e externos), assoalhos, decks, lâminas decorativas, entretanto, restringi-la a construção civil e uso estrutural.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Visando complementar e auxiliar nas pesquisas futuras recomenda-se estudar, para a madeira de *Tectona grandis*, os seguintes parâmetros:

- ✓ Sugere-se comparar o processo de modificação térmica da madeira juvenil e adulta.
- ✓ Quantificar e identificar os açúcares dos polissacarídeos (celulose e hemiceluloses), a lignina e os extrativos totais da madeira, por cromatografia gasosa ou líquida, para averiguar o comportamento com as propriedades físicas, mecânicas e de resistência a fungos decompositores.
- ✓ Testar temperaturas maiores de tratamento e tempo de exposição da madeira com o fungo para verificar a estabilização da perda de massa.
- ✓ Submeter a madeira ao fungo de podridão-parda, para comparar com a da podridão-branca, e verificar a resposta em relação aos tratamentos.