

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

Uniformidade e Estabilidade da Cor da Madeira
Termorretificada de *Tectona grandis* L. f.

Juliana de Oliveira Lopes

2012



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**UNIFORMIDADE E ESTABILIDADE DA COR DA MADEIRA
TERMORRETIFICADA DE *Tectona grandis* L. f.**

JULIANA DE OLIVEIRA LOPES

Sob a Orientação da Professora
Rosilei Aparecida Garcia

e

Co-orientação dos Professores
Alexandre Miguel do Nascimento
João Vicente de Figueiredo Latorraca

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

Seropédica, RJ
Abril de 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

JULIANA DE OLIVEIRA LOPES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/04/2012

Rosilei Aparecida Garcia. Prof^a. Dr^a. UFRRJ
(Orientadora)

Roberto Carlos Costa Lelis. Prof. Dr. UFRRJ

Luiz Fernando de Moura. Dr. ESAL/USP

Dedico

À Deus, pela minha vida sem a qual não poderia me orgulhar das vitórias e agradecê-las.

À minha melhor amiga e mãezinha, Maria, por me amar e por ter me ensinado a ser o que sou.

Ao meu guerreiro pai, José, por ser meu alicerce na jornada de meus estudos.

Ao meu irmão, Rogério, pela nossa linda amizade e amor que nos une.

Ao meu sobrinho, Leonardo, amor maior, e pela sua incansável pergunta: Tia porque você tem que voltar pra Rural?

Ao meu amado, André, por todos esses anos felizes juntos e pelo seu amor e companheirismo incondicional.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Rosilei A. Garcia a qual foi de grande peso na minha escolha entre duas universidades para ingressar-me no mestrado e isso deve-se pela minha admiração, mas não somente pela sua atenção, apoio e paciência nos ensinamentos mas pelo seu profissionalismo, ser humano de respeito ao próximo, seriedade e amor pelo que faz e são essas qualidades que levo de melhor aprendizado e de exemplo para minha vida profissional.

Ao meu co-orientador Alexandre Miguel do Nascimento pelo seus ensinamentos na aplicação e entendimento da estatística e por toda a paciência e disponibilidade sempre que precisei para tirar minhas infinitas dúvidas.

Ao meu co-orientador João Vicente de Figueiredo Latorraca pelo apoio e pelos ensinamentos no Laboratório de Secagem da Madeira na realização prática desse estudo.

Ao professor Roberto Carlos Costa Lelis, ao programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais e à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela aquisição da câmara de envelhecimento acelerado.

Ao Professor Carlos Alberto Passos (*in memoriam*) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso, Campus de Cáceres por conceder o material de estudo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação.

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

Ao técnico do Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira, Tiago, que me ajudou na realização prática desse estudo.

À todos do Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira, obrigado pelos momentos de descontração e pela ajuda durante o processo do estudo.

Aos funcionários Dinaldo e Apolinário do Laboratório de Processamento Mecânico da Madeira por toda ajuda na preparação do meu material para dar início ao meu trabalho.

Aos pais do meu namorado, Jane e Luiz e irmã, Jaqueline, pelo amor, carinho e incentivo, essencial para que eu chegasse até aqui.

Às minhas vizinhas Georgina e Janaína, que são mais que uma família para mim, sempre prontas a nos acolher e por estar sempre em suas orações.

Aos meus amigos de todo o sempre e aos novos amigos Elaine e Danilo que fiz pelo caminho, apoio, risadas e momentos felizes.

Enfim, à todos aqueles que de alguma forma participaram desta importante e magnífica etapa da minha vida.

RESUMO

LOPES, Juliana de Oliveira. **Uniformidade e estabilidade da cor da madeira termorretificada de *Tectona grandis* L. f.** 2012. 83p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

A madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.) proveniente de plantios jovens (12 anos de idade) apresenta algumas características indesejáveis em termos de uniformidade de cor além de apresentar alta proporção de alburno, o qual distingue-se do cerne pela menor durabilidade e cor clara. Além disso, a madeira de teca apresenta alteração de cor quando exposta à radiação ultravioleta (UV), o que acaba depreciando o material ao longo do tempo. Tratamentos termorretificadores podem ser aplicados para alterar, uniformizar e estabilizar a cor da madeira, agregando assim maior valor ao produto final. Neste contexto, os objetivos deste estudo foram: (1) determinar o efeito do espaçamento entre árvores nas propriedades físicas (densidade e teor de umidade) e na cor original da madeira, (2) determinar a alteração da cor da madeira após a termorretificação, (3) avaliar a uniformidade da cor da madeira (peças contendo cerne e alburno) após os tratamentos termorretificadores e (4) avaliar a estabilidade da cor da madeira termorretificada à radiação UV em condições de envelhecimento acelerado. Foram utilizadas nove árvores de teca provenientes de três espaçamentos (4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m), sendo 3 árvores para cada espaçamento. Amostras de 150 x 75 x 20 mm foram produzidas e divididas em três grupos: I: amostras com predominância de madeira do cerne ($\geq 75\%$ de cerne em relação ao alburno), II: amostras com 100% de alburno e III: amostras com aproximadamente 50% de cerne e 50% de alburno. Os grupos I e II foram utilizados para determinar as propriedades físicas, a variação da cor da madeira antes e após a termorretificação e a estabilidade da cor após à radiação UV, enquanto que o grupo III foi utilizado para determinar a uniformidade da cor após a termorretificação. A termorretificação foi realizada em um forno mufla elétrico laboratorial Linn Elektro Therm sob duas temperaturas: 180 e 200°C. As medições de cor foram realizadas através do espectrofotômetro portátil CM 2600d no espaço CIE-L*a*b*. O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado em uma câmara QUV/Spray da Q-Lab. O ciclo total de exposição à radiação UV foi de 168 horas, sendo realizadas medições de cor à cada 42 horas. O espaçamento afetou as propriedades físicas e a cor original da madeira. A termorretificação afetou mais a densidade do cerne que do alburno. As madeiras de cerne e alburno apresentaram uma redução média de 52% no teor de umidade de equilíbrio após a termorretificação. O cerne e o alburno apresentaram o mesmo padrão de luminosidade nos diferentes espaçamentos. Após a termorretificação, a madeira teve perda de luminosidade, tornado-se mais escura, sendo isso mais acentuado para o tratamento à 200°C. As madeiras de cerne e alburno apresentaram comportamentos diferentes para as coordenadas a* e b* dependendo do espaçamento, antes e após a termorretificação. Ocorreu uma maior formação de pigmento vermelho e perda de pigmento amarelo nas madeiras de cerne e alburno tratadas à 200°C. A termorretificação proporcionou uma maior alteração à cor do alburno, o que resultou em uma maior uniformidade às peças de madeira contendo cerne e alburno. A cor da madeira de alburno termorretificada à 180°C apresentou maior estabilidade à radiação UV, mostrando assim o potencial da termorretificação para obtenção de produtos de maior valor agregado.

Palavras-chave: sistema CIE-L*a*b*, envelhecimento acelerado, fotodegradação da madeira.

ABSTRACT

LOPES, Juliana de Oliveira. **Uniformity and stability of color of the heat-treated *Tectona grandis* L. f. wood.** 2012. 83p. Dissertation (Master Science in Environmental and Forest Sciences). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

The teak wood (*Tectona grandis* L. f.) from young plantations (12 years old) has some undesirable characteristics in terms of color uniformity as well as presenting a high proportion of sapwood, which is distinguished from heartwood by the lower durability and light color. In addition, teak wood has color change when exposed to ultraviolet (UV) radiation, which depreciates the product over time. Heat treatments can be applied to change, standardize and stabilise the color of the wood, thus adding more value to the final product. In this context, the objectives of this study were: (1) to determine the effect of spacing between trees on the physical properties (density and moisture content) and the original color of wood, (2) to determine the color change of wood after heat treatments, (3) to evaluate the color uniformity of the wood (pieces containing heartwood and sapwood) after heat treatments and (4) to evaluate the color stability of heat-treated wood after UV radiation in accelerated aging conditions. Nine trees from three different levels of spacing (4 x 2 m, 5 x 2 m and 6 x 2 m) were used, with three trees per spacing. Samples of 150 x 75 x 20 mm were produced and divided into three groups: I: samples with a predominance of heartwood ($\geq 75\%$ heartwood in relation to sapwood), II: samples with 100% of sapwood and III: samples with approximately 50% heartwood and 50% sapwood. The groups I and II were used to determine the physical properties, wood color changes before and after heat treatments and color stability after exposure to UV radiation, whereas those of group III were used to determine the color uniformity after heat treatments. Heat treatments were performed in a laboratorial electric oven from Linn Elektro Therm under two temperatures: 180 and 200°C. Color measurements were performed using the portable spectrophotometer CM 2600d in the CIE-L*a*b* space. The accelerated aging test was performed in a QUV/Spray from Q-Lab chamber. The total cycle of exposure to UV radiation was 168 hours, and color measurements were taken to every 42 hours. The spacing affected the physical properties and the original color of wood. The heat treatment affected more the density of heartwood than sapwood. Heartwood and sapwood presented an average decrease of the 52% in equilibrium moisture content after heat treatments. Heartwood and sapwood had the same lightness pattern at the different spacings. After the heat treatment, wood had a loss of lightness, becoming darker, and this was more pronounced in the treatment at 200°C. Heartwood and sapwood presented different behavior for the coordinates a* and b* depending of spacing, before and after heat treatments. There was a greater formation of red hue and loss on yellow hue of heartwood and sapwood treated at 200°C. Heat treatments caused a higher color change on sapwood than heartwood, which provided greater uniformity to the pieces of wood with heartwood and sapwood. The color of sapwood heat-treated at 180°C woods had higher stability at UV radiation, thus demonstrating the potential of heat treatment to obtain products of higher added value.

Key words: CIE-L*a*b* system, accelerated aging, photodegradation of wood.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** (A) Aspecto de um painel de madeira de teca, contendo cerne e alburno. (B) Produto de madeira de teca composto por peças tratadas termicamente (com cor mais uniforme e caramelizada) e peças não tratadas (cor clara) (Fonte: RILLING, 2009).....4
- Figura 2.** Comprimentos de onda perceptíveis pelos olhos humanos (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).....6
- Figura 3.** (A) Espaço de cor tridimensional do sistema CIE-L*a*b*. L*: luminosidade (eixo preto-branco). a* e b*: variáveis cromáticas (eixos verde-vermelho e azul-amarelo, respectivamente). (B) Diagrama de cromaticidade (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).....8
- Figura 4.** Classificação das cores em termos de tonalidade (cor), luminosidade (clara/escuro) e saturação (pureza) (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).....9
- Figura 5.** (A) Sólido em três dimensões (tonalidade, luminosidade e saturação). (B) Sólido de cores (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).....10
- Figura 6.** Alteração da cor da madeira de *Pinus sylvestris* L. após a termorretificação entre 120 e 220°C (Fonte: THERMOWOOD HANDBOOK, 2003).....13
- Figura 7.** Processo de degradação das superfícies da madeira. (A) Madeira não exposta. (B) e (C) Perda das fibras. (D) Erosão das superfícies: perda do lenho inicial. (E) Superfície da madeira de *Thuja plicata*: exposta vs. não exposta às intempéries. (F) Erosão das superfícies da madeira de *Thuja plicata* causada pelas intempéries (Fonte: <http://www.chemisys.com.au/cuttek/exposedwood.htm>).....15
- Figura 8.** Grupos de amostras de madeira. (A) Grupo I: amostras com predominância de madeira do cerne ($\geq 75\%$ de madeira do cerne em relação ao alburno). (B) Grupo II: amostras com 100% de madeira de alburno. (C) Grupo III: amostras com aproximadamente 50% de madeira de cerne e 50% de madeira de alburno.....25
- Figura 9.** (A) Forno mufla elétrico laboratorial, da marca LINN ELEKTRO THERM, com dimensões de 600 x 600 x 700 mm. (B) Interior do forno mufla e posicionamento das amostras de madeira. (C) Sistema de controle de temperatura e tempo de tratamento. (D) Amostras de madeira antes do tratamento termorretificador.....26
- Figura 10.** (A) Programa de temperatura vs. tempo dos tratamento termorretificadores aplicados à madeira de *Tectona grandis*. a: aquecimento até 100°C. b: aumento da temperatura de 100°C até a temperatura de termorretificação. c: tratamento de termorretificação. d: resfriamento.....27
- Figura 11.** (A) Espectrofotômetro portátil CM 2600d da Konica Minolta. (B) Placa de calibração do branco CM-A145. (C) Medições de cor nas amostras de madeira.....28
- Figura 12.** Esquema dos pontos de medição das coordenadas L*, a* e b*, antes e após os tratamentos termorretificadores para a determinação da uniformidade da cor da madeira.....29

Figura 13. Interação entre espaçamento e grupo para a densidade da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes da termorretificação (DENS).....	33
Figura 14. Interação entre espaçamento e grupo para a densidade da madeira de <i>Tectona grandis</i> após a termorretificação (DENS-termo).....	33
Figura 15. Interação entre espaçamento e grupo para o teor de umidade da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes da termorretificação (TUE).....	34
Figura 16. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para o teor de umidade da madeira de <i>Tectona grandis</i> após a termorretificação (TUE-termo).....	35
Figura 17. Coordenada L* (luminosidade) da madeira de cerne e alburno de <i>Tectona grandis</i> antes e após a aplicação dos tratamentos termorretificadores	39
Figura 18. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a variação da luminosidade após a termorretificação (ΔL^* -termo) da madeira de <i>Tectona grandis</i>	40
Figura 19. Coordenada a* (vermelho) da madeira de cerne e alburno de <i>Tectona grandis</i> antes e após a aplicação dos tratamentos termorretificadores.....	41
Figura 20. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a variação do pigmento vermelho após a termorretificação (Δa^* -termo) da madeira de <i>Tectona grandis</i>	42
Figura 21. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a pigmento amarelo após a termorretificação (b^* -termo) da madeira de <i>Tectona grandis</i>	43
Figura 22. Interação entre espaçamento e temperatura para a variação do pigmento amarelo após a termorretificação (Δb^* -termo) da madeira de <i>Tectona grandis</i>	44
Figura 23. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a variação total da cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> após a termorretificação (ΔE^*_{ab} -termo).....	45
Figura 24. Interação entre espaçamento e temperatura para $\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ da madeira de <i>Tectona grandis</i> após a termorretificação.....	48
Figura 25. Uniformidade da cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> , contendo cerne e alburno (grupo III) após os tratamentos termorretificadores. (A) Madeira original. (B) Madeira tratada à 180°C. (C) Madeira tratada à 200°C.....	49
Figura 26. Ensaio de envelhecimento acelerado. (A) Câmara de envelhecimento acelerado QUV, marca Q-Lab, modelo QUV/Spray. (B) Disposição das amostras de madeira na câmara de envelhecimento. (C) e (F) Fixação das amostras de madeiras no porta amostra. (G) Posicionamento das amostras com relação às lâmpadas UVA-340.....	58
Figura 27. Variação total da cor das madeiras termorretificadas e não-termorretificadas de cerne e alburno de <i>Tectona grandis</i> em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta.....	61

Figura 28. Aspecto visual das madeiras não termorretrificadas e termorretrificadas de <i>Tectona grandis</i> proveniente do espaçamento de 4 x 2 m, após exposição à radiação ultravioleta (UV) na câmara de envelhecimento acelerado QUV/Q-Lab	63
Figura 29. Aspecto visual das madeiras não termorretrificadas e termorretrificadas de <i>Tectona grandis</i> proveniente do espaçamento de 5 x 2 m, após exposição à radiação ultravioleta (UV) na câmara de envelhecimento acelerado QUV/Q-Lab.....	64
Figura 30. Aspecto visual das madeiras não termorretrificadas e termorretrificadas de <i>Tectona grandis</i> proveniente do espaçamento de 6 x 2 m, após exposição à radiação ultravioleta (UV) na câmara de envelhecimento acelerado QUV/Q-Lab.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condições utilizadas para determinar a alteração da cor da madeira após o envelhecimento acelerado.....	17
Tabela 2. Análise de variância (valor de F) das propriedades físicas da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes e após a termorreificação.....	31
Tabela 3. Resultados obtidos para as análises estatísticas descritivas (média e desvio padrão) das propriedades físicas (densidade e teor de umidade) da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes e após a termorreificação.....	32
Tabela 4. Análise de variância (valor de F) para as variáveis de cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes e após a termorreificação.....	36
Tabela 5. Resultados obtidos para as análises estatísticas descritivas (média e desvio padrão) das variáveis de cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes e após a termorreificação.....	37
Tabela 6. Valores médios obtidos para a luminosidade da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes e após a termorreificação.....	38
Tabela 7. Resultados obtidos para os rankings dos somatórios dos postos e valores de Z da variável L*-termo da madeira de <i>Tectona grandis</i> , comparando as temperaturas dentro de cada grupo.....	39
Tabela 8. Resultados obtidos para os rankings dos somatórios dos postos e valores de Z da variável L*-termo da madeira de <i>Tectona grandis</i> , comparando as grupos dentro de cada temperatura.....	39
Tabela 9. Resultados obtidos para as análises estatísticas descritivas (média e desvio padrão) das variáveis utilizadas na avaliação da uniformidade da cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes e após a termorreificação.....	47
Tabela 10. Resultados obtidos para a análise de variância (valor de F) das variáveis utilizadas na avaliação da uniformidade da cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> antes e após a termorreificação.....	48
Tabela 11. Valores médios obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis para as variações das coordenadas de cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> após a radiação ultravioleta.....	60
Tabela 12. Resultados obtidos pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para as variações das coordenadas de cor da madeira de cerne e alburno de <i>Tectona grandis</i> após a radiação ultravioleta.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Espécie estudada.....	3
2.2 Cor da madeira.....	5
2.2.1 Colorimetria aplicada à madeira.....	5
2.3 Tratamento de termorretificação	10
2.3.1 Propriedades tecnológicas da madeira termorretificada.....	11
2.3.2 Cor da madeira termorretificada.....	13
2.4 Fotodegradação da madeira	14
2.4.1 Estabilidade da cor da madeira termorretificada após a fotodegradação	18
CAPÍTULO I	
ALTERAÇÃO E UNIFORMIDADE DA COR DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> L. f. APÓS A TERMORRETIFICAÇÃO	
RESUMO	21
ABSTRACT.....	22
1 INTRODUÇÃO.....	23
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
2.1 Material.....	25
2.2 Tratamento de termorretificação	26
2.3 Determinação das propriedades físicas.....	27
2.4 Análises colorimétricas.....	27
2.5 Determinação da uniformidade da cor da madeira após a termorretificação	28
2.6 Análises estatísticas	30
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
3.1 Propriedades físicas da madeira	31
3.1.1 Densidade da madeira antes e após a termorretificação.....	31
3.1.2 Teor de umidade da madeira antes e após a termorretificação.....	34
3.2 Cor da madeira antes e após a termorretificação.....	35
3.3 Uniformidade da cor da madeira após a termorretificação.....	47
4 CONCLUSÕES	51
CAPÍTULO II	
ESTABILIDADE DA COR DA MADEIRA TERMORRETIFICADA DE <i>Tectona grandis</i> L. f. APÓS O ENVELHECIMENTO ACELERADO	
RESUMO	53
ABSTRACT	54
1 INTRODUÇÃO.....	55
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	57
2.1 Material e tratamento de termorretificação	57
2.2 Ensaio de envelhecimento acelerado.....	57
2.3 Análises colorimétricas.....	58
2.4 Análises estatísticas	59
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4 CONCLUSÕES	67
CONCLUSÕES GERAIS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS.....	81

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, vários trabalhos têm demonstrado as melhorias que o tratamento de termorretificação pode causar nas propriedades da madeira, sendo elas, principalmente a estabilidade dimensional e a durabilidade natural (VIITANIEMI & JÄMSÄ, 1994; KAMDEM et al., 2002; ESTEVES et al., 2007). Além dessas características, o tratamento também pode causar alterações na cor da madeira original, fazendo com que ela adquira uma cor mais escura. Esta mudança de cor é muitas vezes considerada como um efeito positivo, do ponto de vista estético, agregando valor ao produto final.

Na Europa, o tratamento de termorretificação é utilizado para o escurecimento de madeiras claras, de baixo valor comercial, tornando-as mais próximas da coloração das madeiras tropicais, as quais são mais escuras e consideradas de alto valor comercial. Esse processo é denominado “tropicalização”. Segundo Ayadi et al. (2003), a alteração da cor pelo tratamento é particularmente apreciada para madeiras de *Populus* sp, *Pinus* sp e *Betula* sp, as quais apresentam cores claras.

Além disso, a termorretificação é um tratamento alternativo visando a preservação da madeira e ecologicamente amigável, pois, não necessita a aplicação de produtos químicos nocivos ao meio ambiente. Atualmente, a madeira termorretificada está sendo comercializada, principalmente na Europa, onde vários processos foram patenteados, os quais são conhecidos como Retification[®] e Perdure[®] (França); Oil Heat Treatment-OHT (Alemanha); Plato[®] Wood «Proving Lasting Advanced Timber Option» (Países Baixos) e Thermowood[®] (Finlândia) ou Thermoholz[®] (Áustria) (RAPP, 2001; MILITZ, 2002; OLTEAN et al., 2007). As principais diferenças entre estes processos são a utilização de oxigênio ou nitrogênio, a presença ou ausência de vapor, processo seco ou úmido e a utilização de óleos (MILITZ, 2002).

Normalmente, os tratamentos de termorretificação são realizados com temperaturas variando entre 150° e 280°C e durante períodos que variam entre 15 minutos e 24 horas dependendo do processo, do tamanho da amostra, do teor de umidade da madeira, da espécie – devido sua composição química e caracteres anatômicos específicos – e das características desejadas ao produto final (KAMDEM et al., 2002).

A madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.) é considerada uma das mais valiosas e mais importantes espécies tropicais no mercado internacional devido às suas propriedades físicas e mecânicas (MOYA & PÉREZ, 2007; MIRANDA et al., 2011). O cerne apresenta uma madeira com boa estabilidade dimensional e alta durabilidade natural devido a presença de duas substâncias: o caucho, espécie de látex responsável pela redução da absorção de água; e a tectoquinona, um preservativo natural contido nas células da madeira. O alburno, de cor clara, apresenta propriedades similares ao cerne, entretanto, apresenta menor durabilidade, sendo necessária a utilização de tratamentos preservativos.

A teca é nativa das zonas úmidas do subcontinente Índico e do Sudeste Asiático. As árvores apresentam entre 20 e 35 metros de altura na idade adulta. Está presente também ao sul do Equador, em Java e em algumas ilhas do arquipélago indonésio. De acordo com sua distribuição é uma espécie que se encontra nos trópicos e subtropicais da Ásia (SANCHEZ, 2002).

No Brasil, os plantios de teca foram estabelecidos principalmente na região de Cáceres, no Estado do Mato Grosso, onde a espécie encontrou condições climáticas favoráveis para o seu desenvolvimento. As condições de clima e solo favoráveis e os tratamentos silviculturais adequados contribuiriam para reduzir o ciclo de produção de 80 anos, na região de origem, para 25 anos na região de Cáceres (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003). Segundo a FAO (2000), nos plantios mais rentáveis já se encontra ciclos de 15 anos e isso já é bem ocorrente no Brasil. Entretanto, ciclos mais curtos implicam na obtenção de peças de

madeira com maior proporção de alborno, os quais apresentam características bem distintas em termos de cor e de durabilidade, quando comparado ao cerne, o que justifica a aplicação de tratamentos termorretrificadores.

A madeira de teca é utilizada principalmente em aplicações externas (decks, móveis de jardins, construções de pontes, etc). Entretanto, estas aplicações requerem um material de alta estabilidade dimensional, cor atrativa e estável, e resistência à patógenos e às intempéries (KOKUTSE et al., 2006). Além disso, a uniformidade da cor da madeira também apresenta um impacto direto no estabelecimento do preço final do produto (MÖTTÖNEN et al., 2002).

A cor é um dos atributos estéticos mais importantes, sendo tão importante quanto as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Ela pode ser influenciada pelas características intrínsecas da madeira (físicas, químicas e anatômicas), assim como pelos fatores externos (condições climáticas e tratamentos silviculturais). No caso da teca, estudos têm demonstrado que a cor pode ser afetada pelos tratamentos silviculturais. Thulasidas et al. (2006) estudaram a variação da cor da madeira de teca proveniente de florestas naturais secas e úmidas e de florestas plantadas e observaram um valor significativamente menor na coordenada b^* (amarelo) para a madeira proveniente de regiões secas.

Além dos inúmeros fatores afetando a cor original da madeira, a cor é instável, sofrendo alterações importantes quando a madeira é exposta às intempéries (sol, chuva, variação de temperatura e umidade), e esse fenômeno pode afetar o seu valor do ponto de vista estético. Esta alteração de cor está associada à degradação do próprio material com o tempo, e isso pode ocasionar perdas mecânicas.

Estudos recentes têm demonstrado que o tratamento de termorretrificação pode proporcionar uma maior estabilidade à cor da madeira. Ayadi et al. (2003) estudaram a estabilidade da cor da madeira termorretrificada de quatro espécies, sendo elas: *Fraxinus* sp, *Fagus sylvatica* L., *Pinus pinaster* e *Populus* sp. durante a exposição ao intemperismo artificial, e observaram que a cor das madeiras tratadas foi mais estável. Vernois (2001) observou que a madeira termorretrificada, quando exposta à radiação ultravioleta (UV), apresentou uma cor acinzentada; entretanto, sua coloração foi mais homogênea quando comparada à madeira não tratada. Além disso, a madeira termorretrificada, quando exposta às condições de intemperismo, apresenta menor número de rachaduras devido à maior estabilidade dimensional.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi aplicar tratamentos termorretrificadores à madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.) proveniente de diferentes espaçamentos e avaliar a alteração, a uniformidade e a estabilidade da cor da madeira tratada.

Esta dissertação está dividida em dois capítulos. O Capítulo I trata da Alteração e uniformidade da cor da madeira de *Tectona grandis* L. f. após a termorretrificação. O Capítulo 2 trata da Estabilidade da cor da madeira termorretrificada de *Tectona grandis* L. f. após o envelhecimento acelerado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Espécie estudada

A teca (*Tectona grandis* L. f.) é uma espécie arbórea da família Verbenaceae e ocorre naturalmente no centro e sul da Índia, em Myanmar, no norte da Tailândia e em Laos (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003). Ela tem sido identificada como uma das espécies de maior potencial para estabelecer plantações de madeira tropical de alta qualidade sob o manejo florestal sustentável (KEOGH, 1996).

A madeira de teca é altamente valorizada pela indústria madeireira para produção de madeira serrada e laminados devido às suas excelentes propriedades mecânicas e físicas, bem como ao seu agradável aspecto estético (SANWO, 1987; KJAER et al., 1999).

A espécie apresenta cerne e alburno bem distintos. A madeira do cerne é atrativa pela sua coloração amarela ou marrom dourado e por outras propriedades desejáveis, tais como a durabilidade natural, a aptidão à usinagem e ao acabamento superficial e a alta estabilidade dimensional, sendo muitas vezes utilizada como referência entre as espécies para a classificação de madeiras tropicais, pois serve como exemplo de evolução das propriedades da madeira. A madeira do alburno apresenta as mesmas propriedades do cerne, entretanto, apresenta menor durabilidade, sendo necessária a utilização de tratamentos preservativos, não oferecendo nenhuma resistência à impregnação (VIEIRA et al., 2002 citado por OLIVEIRA, 2008).

Nos últimos anos, devido à necessidade de diminuir a utilização de produtos tóxicos para a preservação da madeira, tem-se optado por utilizar madeiras que são naturalmente duráveis. A teca por apresentar seu cerne naturalmente durável e resistente à patógenos, pode ser utilizada com sucesso em condições internas e externas (VIEIRA et al., 2002 citado por OLIVEIRA, 2008).

Comparada à outras espécies, a formação do cerne começa relativamente cedo nas árvores de teca, ocorrendo em torno dos sete anos de idade (OKUYAMA et al., 2000). Entretanto, o volume de cerne na teca parece ser influenciado pela idade da árvore, pelas práticas silviculturais, pela procedência genética e pelos fatores climáticos e edáficos. Kjaer et al. (1999) relataram que o volume de cerne da teca originária da Ásia foi maior do que o da teca obtida em plantios da África. Okuyama et al. (2000) observaram que a porcentagem de cerne de teca aumentou mais rapidamente com o diâmetro do tronco em árvores jovens em relação às árvores com mais de 30 anos de idade. Segundo Kokutse (2002), o volume de cerne é mais dependente do diâmetro do que da idade da árvore e a proporção de cerne não aumenta de forma significativa uma vez que a árvore tenha atingido 45 anos de idade.

Segundo Kjaer & Foster (1996), a teca se adapta facilmente em regimes de plantações, quando comparada à outras espécies tropicais de alto valor. Essa característica associada às excelentes propriedades da madeira, têm incentivado o seu cultivo no mundo todo. Por razões econômicas, ciclos curtos de 20-30 anos, estão sendo propostos contra a rotação tradicional de 50-60 anos (BHAT & OKUYAMA, 1997). Entretanto, ciclos mais curtos implicam na obtenção de peças de madeira com maior proporção de alburno, o qual apresenta características bem distintas em termos de cor e de durabilidade, quando comparado ao cerne.

Árvores mais jovens também apresentam maiores proporções de madeira juvenil, a qual geralmente apresenta propriedades inferiores à madeira adulta. Entretanto, vários estudos sobre a qualidade da madeira de teca de árvores de diferentes idades têm indicado que a madeira juvenil (formada por um câmbio juvenil), ao contrário de muitas espécies de clima temperado, não é inferior à madeira adulta, em termos de densidade e de resistência mecânica (SANWO, 1986, 1987; ZOBEL & BUIJTENEN VAN, 1989; BHAT et al., 2001).

Bryce (1966) relatou que a menor rotação de cultivo de teca e o crescimento mais rápido dessa espécie são fatores que podem proporcionar uma cor mais pálida à sua madeira. Já a madeira de teca produzida em áreas mais secas exibem um cerne escuro com listras pretas decorativas, provavelmente, devido ao menor crescimento e maior quantidade de extrativos em relação ao sítio ou à fatores edáficos (BHAT, 2003; THULASIDAS & BHAT, 2007). Esses autores mencionam que a madeira de teca proveniente de diferentes locais (ex. úmidos vs. secos) podem diferir significativamente em seus principais atributos de qualidade tais como a cor da madeira. Thulasidas et al. (2006) estudaram a variação da cor da madeira de teca proveniente de florestas naturais seca e úmida e de florestas plantadas utilizando o espaço de cor CIE-L*a*b* e constaram que a madeira proveniente de regiões secas apresentava valores significativamente menores para a coordenada b* (amarelo).

No Brasil, os plantios de teca também apresentam menor ciclo de corte. De acordo com a SI-FLORESTA (2009), a madeira proveniente de árvores entre 7 e 18 anos é apropriada para a indústria moveleira, construção e decoração; entretanto, a madeira apresenta coloração mais clara e maior elasticidade, o que a torna adequada para desenvolver o designer final dos móveis. A tonalidade clara e o aspecto mesclado (contraste entre cerne e alburno) dessa madeira pode apresentar um aspecto negativo, já que as madeiras de teca dos países de origem apresentam uma maior uniformidade quanto à cor e conseqüentemente uma maior aceitação no mercado em relação à madeira proveniente de plantios do Brasil. Segundo George et al. (2004), o contraste de cor entre cerne e alburno na madeira de teca é ainda maior quando exposta à radiação ultravioleta (UV). A Figura 1A apresenta um painel de madeira de teca, com um aspecto mesclado devido ao contraste de cor entre cerne e alburno.

No sul do Brasil, a empresa TWBrasil utiliza o tratamento térmico para melhorar determinadas propriedades tecnológicas da madeira, assim como para alterar artificialmente a cor da madeira visando aumentar a comercialização de espécies que, apesar de possuírem boas propriedades, apresentam baixa procura no mercado devido à sua baixa atratividade estética. No caso da teca, o tratamento é aplicado para modificar a coloração para marrom caramelo, semelhante à tonalidade das madeiras nativas (RILLING, 2009). A Figura 1B mostra o aspecto da madeira de teca (cerne e alburno), com uma cor mais uniforme e caramelizada após o tratamento térmico.

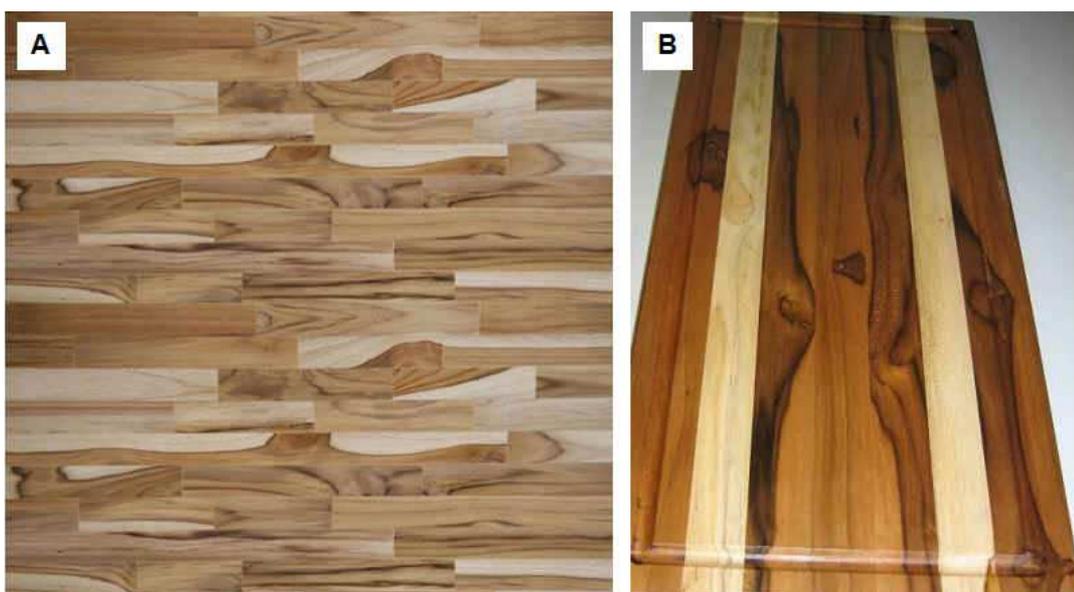


Figura 1. (A) Aspecto de um painel de madeira de teca, contendo cerne e alburno. (B) Produto de madeira de teca composto por peças tratadas termicamente (com cor mais uniforme e caramelizada) e peças não tratadas (cor clara) (Fonte: RILLING, 2009).

2.2 Cor da madeira

Entre as principais propriedades organolépticas, ou seja, aquelas percebidas pelos sentidos humanos, a cor possui grande importância para a identificação e classificação de madeiras (ARAÚJO, 2002). Entretanto, recentemente, a cor vem sendo considerada também como um indicador de qualidade da madeira já que é uma característica tão importante quanto as propriedades físicas e mecânicas. Por esta razão, a análise da cor deve ser incorporada ao planejamento visando a caracterização tecnológica da madeira a fim de atender aos usos mais nobres desse material (MORI et al., 2005).

A análise final da cor de qualquer produto lhe garante um padrão de qualidade de mercado exigido mundialmente. De acordo com vários autores (JANIN et al., 2001; MÖTTÖNEN et al., 2002; MORI et al., 2005), 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.

O consumidor ao comprar artefatos de madeira privilegia não somente quesitos como preço, qualidade e durabilidade mas também a aparência do objeto e seu design, salientando assim a importância da cor no momento da escolha de um determinado produto. Há casos em que o comprador é especialmente seduzido pela cor, que pode ser limitante na decisão da compra, além do desenho, que deve apresentar harmonia (GONÇALEZ et al., 2006).

A escolha de uma espécie de madeira é influenciada, primeiramente, por suas características visuais, ou seja, cor e figura, e por meio dessas características é possível obter a valorização de espécies pouco conhecidas, podendo ser realizadas comparações com espécies já tradicionais, buscando semelhanças com as mesmas e induzindo a criação de termos de referência como: padrão mogno, padrão cerejeira, entre outros.

A cor natural da madeira pode ser afetada por fatores genéticos e ambientais. A cor varia entre as espécies, sendo influenciada pelas características físicas (ex.: densidade e teor de umidade), estrutura anatômica (ex.: anéis de crescimento, vasos, raios e tipo de parênquima axial), teor de extrativos, tratamentos silviculturais, taxa de crescimento, altura, diâmetro e idade da árvore, condições edáficas e climáticas (RINK, 1987; GONÇALEZ, 1993).

A cor da madeira, principalmente do cerne, deve-se ao depósito de substâncias químicas, os extrativos, que ao longo do tempo se acumulam nas paredes de fibras, vasos e raios lenhosos e absorvem seletivamente a luz de diversas fontes luminosas (JANIN, 1988).

Flot (1988) estudou a variação da cor da madeira de carvalho (*Quercus robur*) na direção radial e longitudinal para árvores provenientes de regiões com diferentes tipos de solos. O autor observou que a claridade (ou luminosidade) diminuiu, em média, 1,9 vezes quando passou do alburno (parte externa) para o cerne (parte interior). Ele observou ainda que a claridade foi 1,5 vezes mais elevada na altura de 2,5 m que à 1,5 m. Portanto, pode-se dizer que, neste caso, a claridade aumentou com a altura da árvore e diminuiu na direção casca-medula. Quanto às características do solo, o autor constatou que os carvalhos cultivados em solos arenosos e argilosos produziram madeiras mais rosadas, enquanto que os carvalhos produzidos em solos limosos, eram mais amarelos.

Os diferentes métodos silviculturais reduzem ou aceleram o crescimento da árvore dentro de um povoamento e influenciam, sobretudo, o desenvolvimento do alburno e o crescimento em diâmetro, acarretando assim alteração na cor da madeira.

2.2.1 Colorimetria aplicada à madeira

Ao passarmos a luz solar por um prisma podemos criar uma distribuição de cor como em um arco-íris e essa distribuição é conhecida como espectro. A razão pela qual o ser

humano pode ver esse espectro é porque esse comprimento específico estimula a retina do olho humano. O espectro está disposto em uma ordem: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul e violeta, de acordo com os diferentes comprimentos de onda de luz. A região da luz com os comprimentos de onda mais longos é visto como vermelha, e a região da luz com os comprimentos de onda mais curtos é vista como violeta (KONICA MINOLTA, 1998).

A região da luz que o olho humano pode ver é chamado de região de luz visível, intervalo que se localiza entre 400 e 700 nm no espectro eletromagnético tal como ilustrado na Figura 2. O condicionante para o aparecimento da cor ocorre por dois elementos: a luz, objeto físico, que age como estímulo; e o olho, aparelho receptor, que funciona como dissipador do fluxo luminoso, decompondo-o ou alterando-o através da função seletora da retina (PEDROSA, 1989).

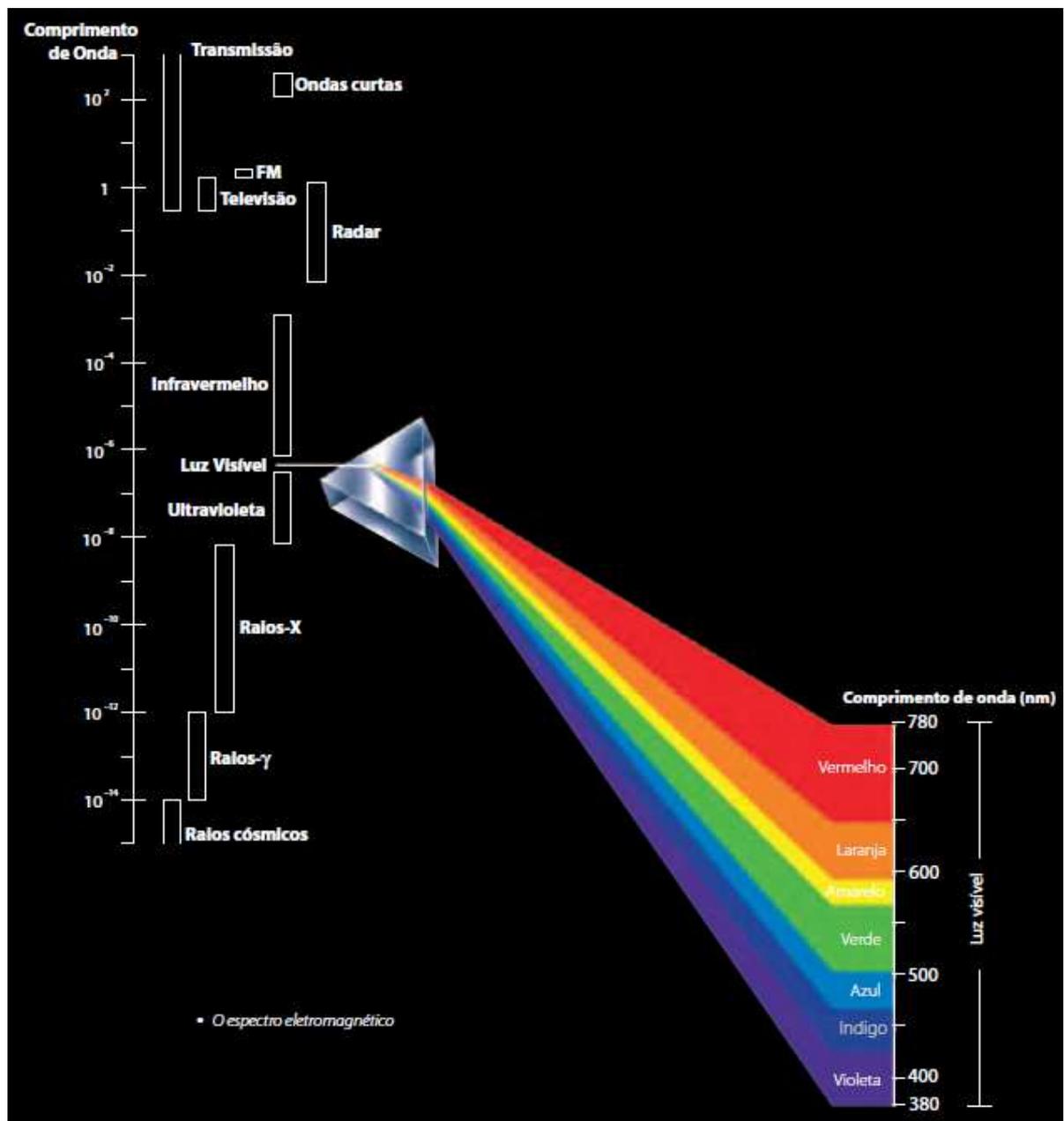


Figura 2. Comprimentos de onda perceptíveis pelos olhos humanos (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).

A percepção da cor de um objeto depende de três fatores: a luz, o objeto que está sendo visto e o observador. Sendo assim, existem várias condições que afetam a aparência da cor: diferenças na fonte de luz, diferenças no observador, diferenças de fundo, diferenças no tamanho do objeto e diferenças direcionais. Por exemplo, diferentes tipos de iluminação farão com que um mesmo objeto possa apresentar aparências diferentes. Além disso, a sensibilidade de cada olho varia de forma sutil e a precisão muda também com a idade. Desta forma, o ângulo pelo qual o objeto é observado e também o ângulo pelo qual o objeto é iluminado deve ser constante para uma comunicação de cor precisa (KONICA MINOLTA, 1998).

No passado, vários estudiosos desenvolveram métodos utilizando fórmulas complexas para quantificar as cores e expressá-las numericamente, com o objetivo de tornar a comunicação mais fácil e mais precisa. Esses métodos visavam proporcionar uma forma numérica de expressar as cores, da mesma forma que nos expressamos em termos de comprimentos e pesos (KONICA MINOLTA, 1992).

Para a determinação da cor existem os métodos comparativos (ex.: Munsell Soil Color Chart) e os métodos quantitativos, os quais possibilitam a medição precisa da cor através de equipamentos específicos (colorímetros e espectrofotômetros).

O sistema de notação Munsell foi criado pelo artista americano A. H. Munsell em 1905 e foi um dos primeiros métodos de determinação da cor. Nesse sistema, a cor de um objeto é determinada por codificação alfa numérica numa tabela colorimétrica tridimensional, tendo como componentes a matiz, a luminosidade e o croma ou saturação (GONÇALEZ et al., 2001). Apesar de muito difundido, esse sistema de determinação de cor para madeira é ineficiente, principalmente quando se têm amostras de madeiras de cores extremamente parecidas levando à uma única classificação de cor para materiais diferentes. Estudos sobre a madeira de *Liquidambar* L. demonstrou a ineficácia deste método, pois as madeiras ficam limitadas a uma certa parte das cores da tabela Munsell, sendo muito difícil de comparar visualmente um padrão de cor homogêneo com uma amostra de madeira heterogênea (DAVIS & BEALS, 1977).

Os colorímetros possuem uma série de filtros e fotodetectores para quantificar a cor dos materiais expostos à luz enquanto que, os espectrofotômetros iluminam a superfície do objeto a ser medido e calcula o comprimento de onda e a quantidade de luz por ela refletida (RAPPOLD & SMITH, 2004).

Os colorímetros eram os instrumentos preferidos para a determinação da cor, não só pelo baixo custo de fabricação, mas também por sua portabilidade, porém, sua principal desvantagem era a incapacidade de gerar dados de refletância espectral. Atualmente, com os avanços tecnológicos alcançados, os espectrofotômetros se tornaram portáteis e mais baratos, transformando-se nos principais aparelhos em uso na colorimetria (ITG, 2006).

No método quantitativo, um dos sistemas mais utilizados para medição de cores é o CIE- $L^*a^*b^*$, o qual trabalha de acordo com a norma CIE «Commission Internationale de L'Éclairage» (1976) e é caracterizado por três diferentes coordenadas (L^* , a^* e b^*) em um espaço de cor tridimensional tal como ilustrado na Figura 3A. A axe L^* representa a luminosidade, a qual varia de zero (preto) à 100 (branco) enquanto que, a^* e b^* representam as coordenadas cromáticas, ambas variando entre -60 e +60. No diagrama de cromaticidade CIE- $L^*a^*b^*$, os sinais positivos e negativos significam: $+a^*$ aumento na cor vermelha, $-a^*$ aumento na cor verde, $+b^*$ aumento na amarela e $-b^*$ aumento na cor azul, representando a tonalidade, tal como mostrado na Figura 3B (KONICA MINOLTA, 1998).

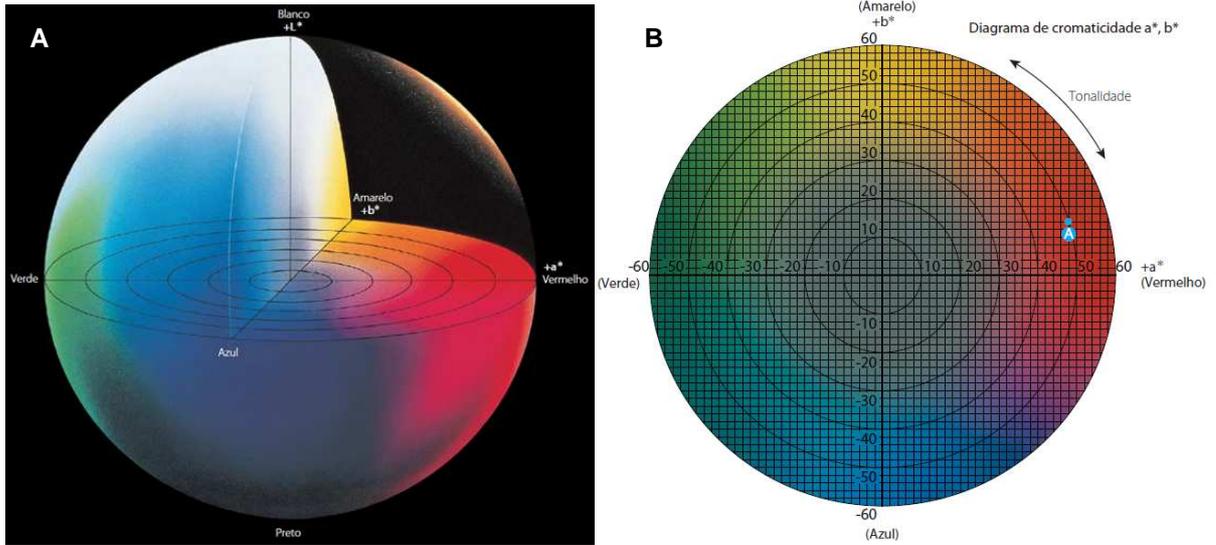


Figura 3. (A) Espaço de cor tridimensional do sistema CIE-L*a*b*. L*: luminosidade (eixo preto-branco). a* e b*: variáveis cromáticas (eixos verde-vermelho e azul-amarelo, respectivamente). (B) Diagrama de cromaticidade (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).

Os valores de L*, a* e b* são calculados de acordo com as seguintes equações:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (1)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (2)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3)$$

onde, X, Y, Z: valores tristímulos XYZ (observador padrão 2°) ou x_{10} , y_{10} e z_{10} (observador padrão 10°) da amostra; e X_n , Y_n , Z_n : valores tristímulos XYZ (observador padrão 2°) ou X_{10} , Y_{10} e Z_{10} (observador padrão 10°) de um difusor de reflexão ideal. Os observadores padrão 2° e 10° foram estipulados pela norma CIE, pois a sensibilidade à cor do olho muda de acordo com o ângulo de observação (KONICA MINOLTA, 1998).

Para entender o sistema CIE-L*a*b* é necessário conhecer algumas definições sobre a teoria das cores (GREENBERG & GREENBERG, 1995 citado por AUTRAN & GONÇALEZ, 2006; KONICA MINOLTA, 1998), a saber:

- Tonalidade - A tonalidade é o termo usado no mundo das cores para a classificação dos vermelhos, amarelos, azuis, etc tal como mostrado na roda de cores da Figura 4. Corresponde ao comprimento de onda da cor dominante, isto é, da cor observada: as diferentes sensações que a cor produz no olho humano dependem de seu comprimento de onda que, por sua vez, é determinado pela energia vibratória do elemento radiante;
- Luminosidade - Corresponde à classificação das cores em claras e escuras. A luminosidade das cores muda verticalmente e pode ser medida independentemente

da tonalidade (Figura 4). Quanto menor a luminosidade, mais acinzentada é a cor, pois ela corresponde ao intervalo entre zero (preto) e 100 (branco);

- Saturação - Corresponde à pureza da cor, ou seja, quanto da cor é diluída pela luz branca, sendo classificada em cores vivas e sujas. A saturação muda à partir do centro e é um atributo totalmente independente da tonalidade e da luminosidade; as cores são mais sujas (menos saturadas) no centro e se tornam mais limpas e vivas à medida que se distancia do centro (Figura 4).

Os três atributos da cor: tonalidade, luminosidade e saturação criam um sólido tridimensional tal como apresentado na Figura 5.

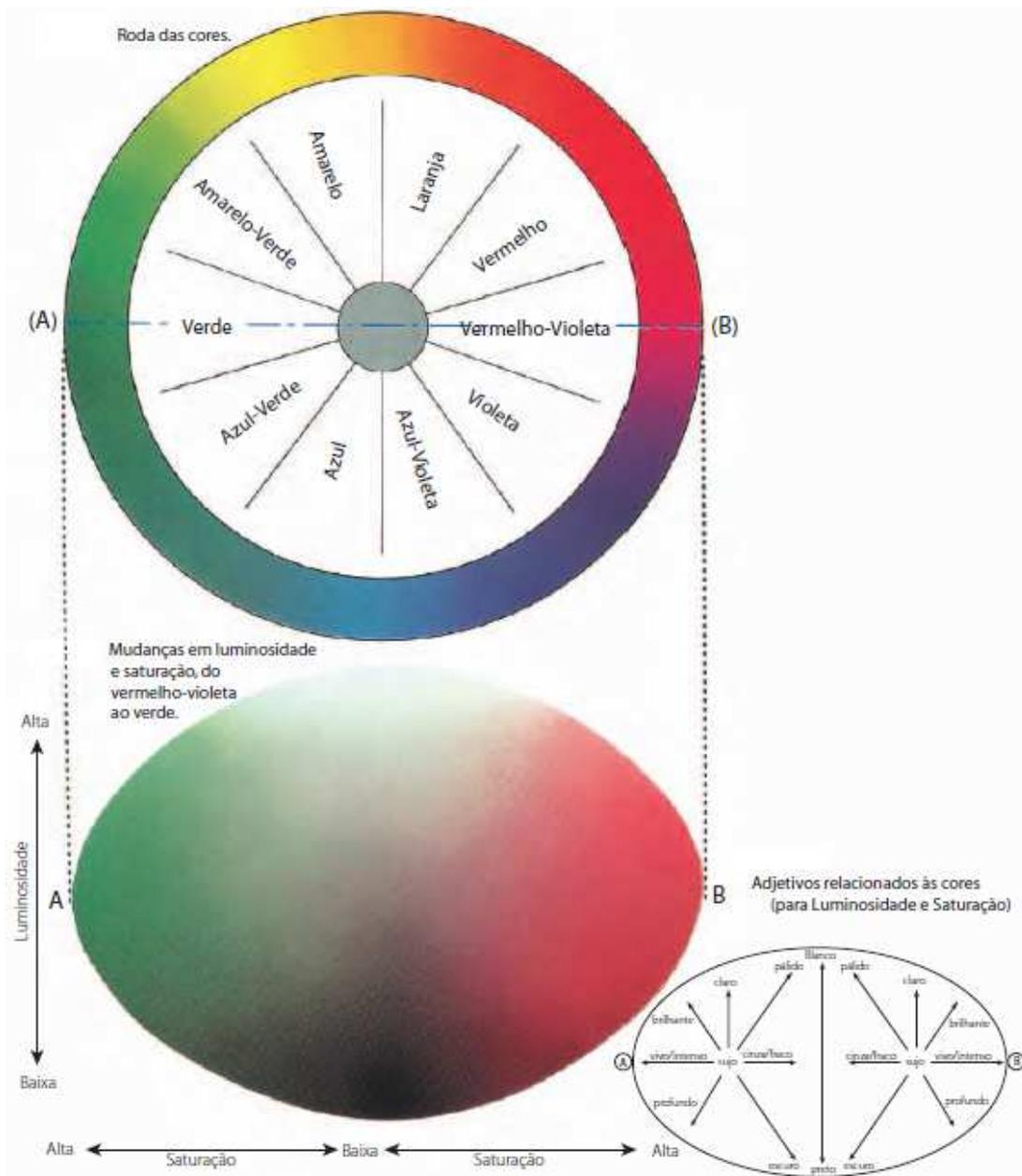


Figura 4. Classificação das cores em termos de tonalidade (cor), luminosidade (clara/escura) e saturação (pureza) (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).

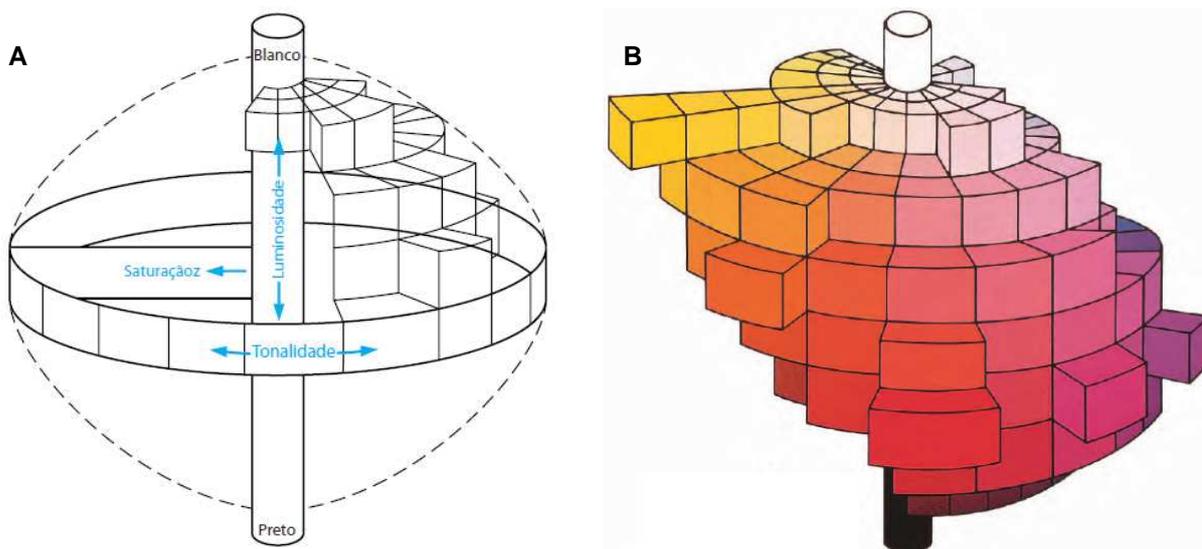


Figura 5. (A) Sólido em três dimensões (tonalidade, luminosidade e saturação). (B) Sólido de cores (Fonte: KONICA MINOLTA, 1998).

O sistema CIE-L*a*b* tem sido empregado para avaliar a cor da madeira em várias áreas de estudo, por exemplo, para determinar a degradação biológica e a fotodegradação da madeira através da alteração de cor, detectar a presença de nós na madeira, analisar a cor da madeira após tratamentos térmicos, prever as propriedades tecnológicas de madeiras termorretificadas, entre outros (AYADI et al., 2003; JOHANSSON, 2005; OLTEAN et al., 2007).

2.3 Tratamento de termorretificação

As primeiras pesquisas e patentes relacionadas à melhoria da durabilidade e da estabilidade dimensional da madeira utilizando apenas o calor, foram apresentadas durante a primeira metade do século passado. Durante os anos 90, a necessidade de se elaborar novas alternativas que fossem atrativas para atender as exigências crescentes do mercado por produtos de madeira mais estáveis e, conseqüentemente, de maior valor agregado, aumentou a importância do emprego de tratamentos térmicos. Desta forma, surgiram vários processos, sendo alguns deles patenteados e comercializados principalmente na Europa e na América do Norte: ThermoWood® na Finlândia, Suíça e Canadá; Plato® Wood na Holanda; Retification® na França; Bois Perdure® na França e Canadá; Oil Heat Treatment (OHT) na Alemanha; e Westwood® nos EUA, Canadá e Rússia (HOMAN et al., 2000; RAPP, 2001; WASKETT & SELMES, 2001; ALÉN et al., 2002; MOMOHARA et al., 2003; ROUSSET et al., 2004; METSÄ-KORTELAINEN et al., 2005). As principais diferenças existentes entre esses processos são: a temperatura máxima aplicada, o uso ou não de atmosfera inerte com nitrogênio ou com vapor, o uso de óleos e/ou se o processo é adequado para a madeira seca ou úmida. Abaixo, são apresentadas as condições utilizadas nesses processos:

(a) ThermoWood®: processo desenvolvido pela VTT na Finlândia. Este tratamento é baseado no aquecimento à altas temperaturas, entre 150°C e 250°C, utilizando-se vapor de água como gás protetor. O processo compreende três etapas: (1) secagem da madeira verde à alta temperatura (100-130°C), podendo perdurar por 48 horas; (2) tratamento térmico à 190 ± 2°C (Madeira Thermo-S) ou 212 ± 2°C (Madeira Thermo-D) durante 2-4 horas dependendo das características desejadas ao produto final; e (3) resfriamento e reumidificação da madeira a 4-8% com duração de aproximadamente 24 horas (JÄMSÄ & VIITANIEMI, 2001; SYRJÄNEN, 2001; METSÄ-KORTELAINEN et al., 2005);

(b) Plato[®] Wood (Proving Lasting Advanced Timber Option): neste processo, deve ser utilizada a madeira verde, pois a abundância de água na parede celular provoca o aumento da reatividade dos componentes químicos da madeira, e é composto por cinco etapas: (1) pré-secagem: até a madeira atingir 14-18% de umidade em um secador convencional; (2) hidrotérmico: tratamento térmico à 150-180°C em condição aquosa sob pressão atmosférica (4-5 horas) realizado em um reator de aço inoxidável; (3) secagem convencional (3-5 dias) até atingir 8-9% de umidade; (4) tratamento térmico à 150-190°C sob condições secas (14-16 horas) em um secador de aço inoxidável especial; e (5) acondicionamento (2-3 dias) até atingir 4-6% de umidade (www.platowood.nl);

(c) Retification[®]: processo desenvolvido pela École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (França) e cuja patente foi adquirida pela Companhia NOW (New Option Wood), também conhecida como RETITECH, e consiste em colocar a madeira previamente seca (12% de umidade) sob temperatura de 210°C à 240°C, e atmosfera com alta concentração de nitrogênio (inferior à 2% de oxigênio) (VERNOIS, 2001; METSÄ-KORTELAJINEN et al., 2005);

(d) Bois Perdure[®]: processo desenvolvido pela Companhia BCI-MBS, o qual consiste no tratamento da madeira verde à 230°C, sob o vapor gerado pela água contida no próprio material (VERNOIS, 2001; METSÄ-KORTELAJINEN et al., 2005). Os processos Retification[®] e Perdure[®] são diferenciados pelo teor de umidade inicial da madeira e pelas condições do tratamento;

(e) Oil Heat Treatment-OHT: processo realizado pela MENZ HOLZ na Alemanha, no qual o tratamento da madeira é realizado em um tanque fechado (autoclave), imersa em óleo aquecido à temperaturas de 180°C à 220°C durante 2-4 horas, sem aplicação de pressão;

(f) Westwood[®]: processo patenteado pela empresa Termawood em que a madeira é tratada à temperaturas de 230-240°C (<http://www.termawood.com/index.html>).

No Brasil há um processo denominado TMT «Thermally Modified Timber» realizado pela empresa TWBrazil «Treated Wood Brazil» (Ponta Grossa, Paraná) em que o material é submetido à elevadas temperaturas utilizando vapor saturado, aliado à eliminação de oxigênio. Este processo têm sido aplicado à espécies de reflorestamentos (ex.: *Pinus* sp, *Eucalyptus* sp e *Tectona grandis* L. f.) e ao bambu (RILLING, 2009).

O desempenho do tratamento térmico depende das características da madeira (ex.: espécie, teor de umidade inicial e dimensões das peças) e das características do processo (ex.: volume de material à ser tratado, temperatura, tempo e condições ambientes). Normalmente, os tratamentos de termorretificação são realizados entre temperaturas de 150°C e 280°C por períodos de 15 minutos à 24 horas dependendo do processo, do material e das características desejadas ao produto final (KAMDEM et al., 2002).

O objetivo principal do tratamento de termorretificação da madeira consiste na obtenção de um produto com maior estabilidade dimensional e maior durabilidade, e em alguns casos, com cores diferenciadas, agregando assim maior valor ao produto final. Entretanto, o tratamento também pode afetar outras propriedades da madeira, sendo a resistência mecânica a mais importante. Sendo assim, apesar de algumas propriedades não serem o foco do nosso estudo, uma breve revisão será apresentada sobre o efeito da termorretificação nas propriedades tecnológicas da madeira.

2.3.1 Propriedades tecnológicas da madeira termorretificada

A madeira termorretificada apresenta melhorias em suas propriedades físicas e sua durabilidade natural quando comparada à madeira não tratada. Syrjänen (2001) afirma que a propriedade mais importante da madeira termorretificada é o menor teor de umidade de equilíbrio higroscópico que, conseqüentemente, melhora as variações dimensionais (contração

e inchamento) do material, quando comparada à madeira não tratada.

Weiland & Guyonnet (2003) e Rousset et al. (2004) afirmam que a madeira termorretificada apresenta uma maior estabilidade dimensional devido à redução da higroscopicidade causada pela degradação das hemiceluloses (constituente mais higroscópico da parede celular), à ruptura dos grupos hidroxílicos livres da região amorfa da celulose e à reticulação dos polímeros que compõem a madeira.

Estudos realizados por Jämsä & Viitaniemi (2001) mostraram que madeiras de *Pinus* sp., *Picea abies* e *Betula pendula* termorretificadas apresentaram reduções de 50% nos teores de umidade de equilíbrio higroscópico, devido à diminuição dos sítios de adsorção da parede celular e, conseqüentemente, uma melhoria na estabilidade dimensional de 50% a 90%.

A durabilidade natural da madeira é melhorada pelo tratamento térmico, pois este altera a composição química da madeira e promove a indisponibilidade de alimentos (hemiceluloses) aos fungos, reduz o teor de umidade de equilíbrio, promove a criação de novas moléculas livres que atuam como fungicidas, além de reticular a rede de lignina dificultando o reconhecimento do substrato pelos fungos (VERNOIS, 2001; WEILAND & GUYONNET, 2003).

Momohara et al. (2003) trataram o cerne da madeira de *Cryptomeria japonica* entre 105 e 150°C durante períodos de 6 à 72 horas, e concluíram que quanto maior o tempo e a temperatura de tratamento melhor a resistência da madeira ao fungo *Fomitopsis palustris*. A perda de massa, mediante o ataque de fungo durante 8 semanas em condições de laboratório foi de 30% para a madeira controle e 10% para a madeira tratada à 150°C durante 24 horas.

A termorretificação também causa uma perda de massa na madeira, afetando assim sua densidade e conseqüentemente suas propriedades mecânicas. Hakkou et al. (2005) salientaram que a madeira de *Fagus sylvatica* termorretificada durante 8 horas, sob temperatura de 180°C, apresentou uma perda de massa de aproximadamente 7%. Com o aumento da temperatura, houve um aumento progressivo da perda de massa até um valor máximo de 35% na madeira tratada à 260°C.

A redução da resistência mecânica da madeira depende da espécie de madeira, do seu teor de umidade, do tempo e da temperatura de aquecimento. Em geral, as propriedades mecânicas da madeira decrescem com o aquecimento e aumentam com o resfriamento (BODIG & JAYNE, 1982; HAYGREEN & BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; THIAM et al., 2002).

Thiam et al. (2002) compararam o efeito da secagem convencional, com temperatura máxima de 82°C, e da secagem à alta temperatura, com 116°C, na resistência mecânica da madeira de *Tsuga heterpylla*. Os autores encontraram uma redução significativa de 4,7% no módulo de ruptura (MOR) e de 6,4% na resistência ao cisalhamento para a madeira secas à alta temperatura, quando comparada à madeira seca em estufa convencional. Por outro lado, os autores não encontraram diferenças significativas para o módulo de elasticidade (MOE), sendo observada apenas uma redução não-significativa de 1,2%.

De acordo com a literatura, os efeitos da termorretificação na rigidez da madeira são contraditórios. Alguns autores afirmam que há um aumento da espessura da região cristalina da celulose, que é capaz de impedir a diminuição da rigidez do material devido à perda de massa, e há outros que mostram que a perda de massa acentuada, provocada pela termorretificação, é suficiente para reduzir o MOE da madeira. Garcia et al. (2006) tratando painéis de fibras de madeira de média densidade (MDF) observaram uma tendência ao aumento do MOE quando estes foram tratados à 150°C e 180°C. Garcia et al. (2012) termorretificaram a madeira de *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições de temperatura (180, 200, 215 e 230°C) e tempo (15 minutos, 2 e 4 horas) e constataram que a rigidez da madeira foi afetada somente quando tratada à 230°C durante 4 horas, com uma redução significativa de aproximadamente 13%. Já Yilgor et al. (2001) verificaram que a madeira de

Fagus orientalis vaporizada à 80°C durante 100 horas, apresentou uma redução permanente de aproximadamente 16,5% na rigidez.

2.3.2 Cor da madeira termorretrificada

Apesar do objetivo principal da termorretrificação ser a melhoria da estabilidade dimensional e da resistência à agentes biológicos, o tratamento também possibilita a alteração da cor da madeira, a qual pode ser controlada para a criação de novos padrões de cor.

A utilização de tratamentos térmicos resulta no escurecimento da madeira, o qual geralmente aumenta com a temperatura e o tempo de tratamento. A Figura 6 mostra a alteração da cor da madeira de *Pinus sylvestris* L. após diferentes tratamentos de termorretrificação.

Geralmente, quando os valores de temperatura se aproximam de 200°C a mudança é mais intensa, sendo que a maior parte do escurecimento ocorre nas primeiras quatro horas de tratamento (BEKHTA & NIEMZ, 2003). A temperatura não atua isoladamente na alteração das propriedades da madeira. Fatores como o teor de umidade, a atmosfera da reação, a pressão e o tempo de duração do tratamento também influenciam as modificações ocorridas em sua estrutura (FENGEL & WEGENER, 1984; YILDIZ et al., 2006).

Dentre as causas da alteração da cor da madeira durante o tratamento térmico podemos citar a dissolução, oxidação e decomposição dos extrativos e outros componentes químicos. No caso de madeiras com grandes quantidades de extrativos solúveis em água, as alterações de cor são ainda mais intensas após o tratamento (VARGA & VAN DER ZEE, 2008).

A estrutura celular da madeira pode sofrer modificações em diferentes intensidades pela ação do calor. Essas alterações são associadas ao fenômeno da pirólise, caracterizada pela degradação da madeira na ausência de agentes oxidantes. Dentre os componentes químicos fundamentais da madeira, as hemiceluloses são os mais afetados devido à sua alta sensibilidade à ação do calor (BRITO et al., 2006). A celulose e as hemiceluloses da madeira não tratada não absorvem luz na região visível, portanto não contribuem para a alteração da cor. Entretanto, quando coloridas por produtos formados durante a degradação das hemiceluloses podem contribuir para a alteração da cor (KOCAEFE et al., 2007).



Figura 6. Alteração da cor da madeira de *Pinus sylvestris* L. após a termorretrificação entre 120 e 220°C (Fonte: THERMOWOOD HANDBOOK, 2003).

Após o tratamento térmico há formação de produtos oxidativos (ex.: quinonas), produtos da degradação das hemiceluloses e da lignina, os quais migram às superfícies da madeira; remoção ou migração dos extrativos e compostos nutritivos tais como açúcares de baixo peso molecular e aminoácidos em direção às superfícies da madeira; e aumento no teor de lignina, os quais podem trazer alterações importantes na cor original da madeira (SUNDQVIST & MORÉN, 2002; BEKHTA & NIEMZ, 2003; SEHLSTEDT-PERSSON, 2005; ESTEVES et al., 2008).

Ayadi et al. (2003) constatararam que a mudança de cor provocada pelo aquecimento de peças de madeira de *Fraxinus* sp., *Fagus sylvatica*, *Pinus pinaster* e *Populus* sp pode causar um bom impacto entre os consumidores, tornando as peças de madeira mais atrativas e agregando maior valor ao produto final. As madeiras de *Populus* sp. são termicamente modificadas para competir no mercado com espécies mais nobres, como a teca e o cedro vermelho (WEILAND & GUYONNET, 2003). Poncsák et al. (2006) também atestam que as madeiras podem apresentar melhor aparência após terem sido tratadas termicamente.

2.4 Fotodegradação da madeira

Para entender o processo de fotodegradação da madeira, é necessário entender primeiramente o processo de intemperismo. O termo intemperismo é utilizado para definir a degradação natural da madeira quando exposta às intempéries. Os principais fatores que contribuem para essa degradação são umidade, luz solar, calor/frio e abrasão causada pelo vento e outros materiais, os quais podem atuar isoladamente ou de forma combinada (WILLIAMS, 2005).

O intemperismo causa a degradação das superfícies da madeira, a qual é iniciada primeiramente pela radiação solar, embora outros fatores também sejam importantes (WILLIAMS, 2005). A madeira, quando exposta à luz, absorve intensamente a radiação solar e sofre uma degradação fotoquímica devido à ação dos raios ultravioletas (UV), que comprometem o seu aspecto geral, tornando-a descorada ou acizentada, amarelada ou escurecida, dependendo da influência da sua composição química, principalmente dos extrativos (CHANG et al., 1982; FEIST, 1983; AYADI et al., 2003). Esse processo é chamado de fotooxidação ou degradação fotoquímica da superfície (fotodegradação).

No processo de fotodegradação da madeira, o primeiro fenômeno observado é a alteração da cor, seguida da perda de fibras e erosão das superfícies (Figura 7). O processo de erosão é lento e depende de vários fatores tais como densidade, proporção de lenho inicial e tardio, entre outros (WILLIAMS, 2005).

A fotodegradação da madeira é um fenômeno superficial devido à grande quantidade de grupos (carbonila, dupla ligação, hidroxila fenólica, etc) ou sistemas cromóforos (quinonas, bifenil, etc) dos componentes distribuídos na camada externa que impedem a entrada de luz na madeira. A radiação UV consegue penetrar até uma profundidade de 75 μm e a visível atinge cerca de 200 μm , dependendo da cor original da madeira. Apesar da radiação visível penetrar mais profundamente, sua energia (inferior à 70 $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$) é insuficiente para romper as ligações químicas dos constituintes da madeira (HON, 2001). Por isso, a radiação UV é considerada a mais danosa ao uso da madeira. A luz visível situa-se na faixa de 400-700 nm enquanto que a radiação UV está entre 295-400 nm (WILLIAMS, 2005).

Williams (2005) afirma que a penetração depende da densidade da madeira e da distribuição dos comprimentos de onda da radiação UV e da luz visível. Assim, madeiras mais densas são menos penetradas pela radiação UV e comprimentos de ondas curtos também penetram menos.

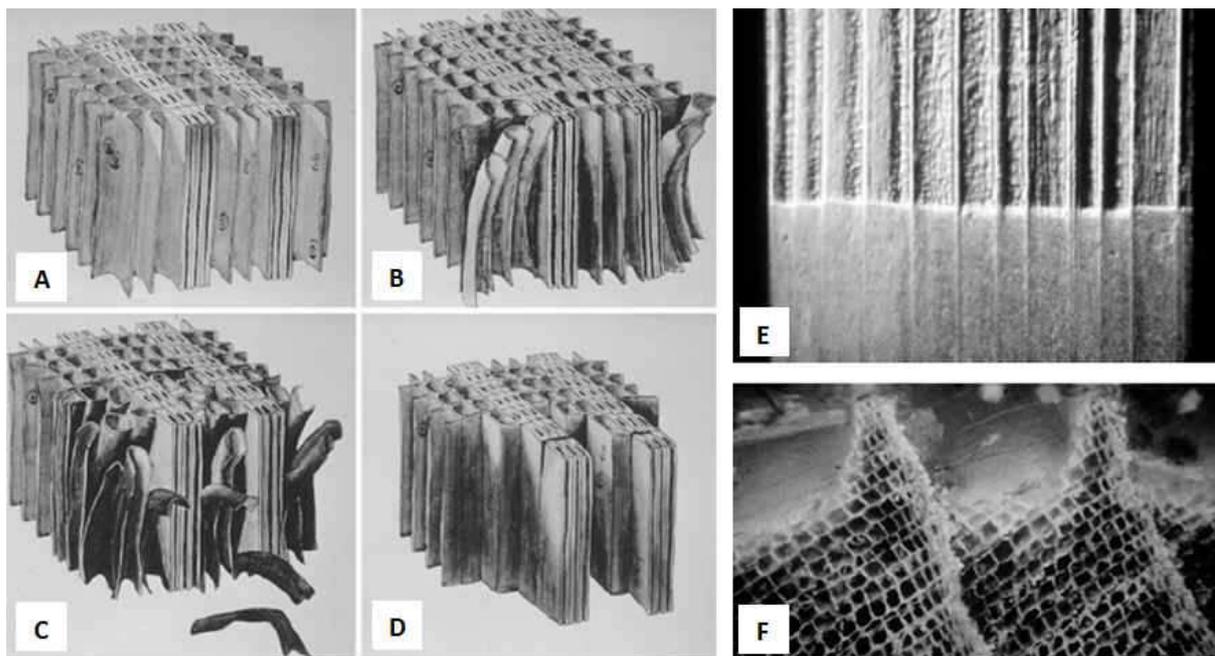


Figura 7. Processo de degradação das superfícies da madeira. (A) Madeira não exposta. (B) e (C) Perda das fibras. (D) Erosão das superfícies: perda do lenho inicial. (E) Superfície da madeira de *Thuja plicata*: exposta vs. não exposta às intempéries. (F) Erosão das superfícies da madeira de *Thuja plicata* causada pelas intempéries (Fonte: <http://www.chemisys.com.au/cutek/exposedwood.htm>).

Existem dois caminhos para entender a fotodegradação da madeira, o primeiro, da celulose e hemicelulose, por serem quimicamente semelhantes e o segundo, da lignina. A celulose quando irradiada com comprimentos de onda superiores à 340 nm, na presença de oxigênio e energia, produz radicais alcoxi e carbônicos, por meio da cisão nas posições C1 e C4 da ligação glicosídica. Os radicais alcoxi geralmente são estáveis comparados com os carbônicos, que em contato com o oxigênio, perdem o hidrogênio e formam hidroperóxidos (PASTORE, 2004).

A lignina é o principal constituinte responsável pela fotodegradação da madeira. Sua estrutura fenólica possui grupos cromóforos que sofrem a ação dos raios UV. Os mecanismos de fotodegradação da lignina são complexos e geram diversos radicais fenólicos, sendo o principal deles o guaiacol. Este radical é transformado em estruturas quinóides, que são a origem do amarelecimento da superfície da madeira (GEORGE et al., 2005).

Segundo Ayadi et al. (2003), grupos como β -carbonil, bifênil, anéis de dupla ligação conjugada absorvem a radiação UV e formam grupos cromóforos como as carbonilas e carboxilas, estruturas responsáveis pela alteração de cor nas madeiras. Nas superfícies de madeiras expostas à ação do intemperismo observa-se que a relação entre o teor de lignina e o de celulose diminui (TEMIZ et al., 2005).

Segundo Pastore (2004), o processo de fotodegradação da madeira acontece da seguinte forma:

- Os cromóforos primários das ligninas absorvem luz UV (300-400 nm);
- Nas ligninas, as ligações éteres são quebradas e novos radicais são formados;
- Os radicais reagem com a lignina para produzir outros, do tipo fenóis e cetílicos;
- Os radicais cetílicos são quebrados e dão origem à novos grupos fenóis e cetonas, que agem como cromóforos secundários;
- Os fenóis são oxidados e formam quinonas amarelas e cetonas aromáticas;

- Os cromóforos secundários absorvem a luz e provocam um novo ciclo de fotodegradação das ligninas.

Como as coníferas normalmente possuem teores maiores de lignina, as madeiras de folhosas são consideradas mais resistentes à alteração da cor causada pela fotodegradação do que as madeiras de coníferas (MITSUI et al., 2004).

Para madeiras de clima temperado, Kuo & Hu (1991) estimaram que a lignina contribui com cerca de 80-95% para o coeficiente de absorção UV, enquanto que as parcelas de contribuição dos carboidratos e dos extrativos são de 5-12% e 2%, respectivamente. A cor da madeira é, então, dependente da natureza dos seus constituintes químicos que, por serem susceptíveis à reações com a luz e com o calor, sofrem alterações na coloração original (HON, 2001).

Além dos componentes poliméricos principais presentes na madeira, existe um grupo de compostos variados denominados genericamente de extrativos, os quais, mesmo em pequenas quantidades, têm grande importância na determinação da cor da madeira (TSOUMIS, 1991).

Do ponto de vista químico, os extrativos são compostos cromóforos responsáveis pela cor e pelo odor da madeira. Como são altamente absorvedores da radiação solar causam alteração de cor na madeira exposta externamente (PANDEY, 2005). Exemplos de compostos extrativos presentes nas madeiras de folhosas são os terpenos, fenóis, lignanas, taninos e flavonóides, entre outros. Ishiguri et al. (2003) relataram que os compostos fenólicos presentes nos extratos da madeira seriam os responsáveis pela sua fotodescoloração.

Independentemente da espécie, toda madeira sofre modificação de cor com a radiação de luz, no entanto, a taxa de variação é diferente para cada espécie (HON, 2001). As madeiras escuras tendem à descoloração e as claras tendem ao amarelo ou marrom (FEIST, 1983). Portanto, a cor da madeira não é estável e quando exposta à luz geralmente escurece e, em casos mais raros, tornam-se mais claras (ISHIGURI et al., 2003).

A variação de cor também depende do comprimento de onda da fonte de luz, onde comprimentos de onda inferiores à 396 nm são responsáveis pelo fotoamarelecimento enquanto que valores superiores conduzem à descoloração (DAVIDSON, 1996; PAULSSON & RAGAUSKAS, 2000).

Hon (1981), estudando algumas espécies, como *Caesalpinia echinata* (pau-brasil) e *Pinus sylvestris*, verificou que estas perderam significativamente o brilho no primeiro mês de exposição ao sol. Além da alteração do brilho, essas espécies apresentaram uma mudança na coloração, de uma cor amarelo-pálido para marrom e cinza após 180 dias de exposição ao sol. Essas mudanças de cor podem ser explicadas pelas mudanças químicas que ocorrem na madeira durante o intemperismo, a mudança para uma coloração cinza pode ser explicada pela constituição de partes da celulose mais resistentes à lixiviação e quando a madeira fica exposta ao sol em climas com pouca precipitação.

Browne & Simonsen (1957) alegaram que a cor marrom formada na madeira de *Pinus ponderosa* à uma profundidade de 508-2540 µm não poderia ser causada pela luz, mas sim pela transferência de energia dos radicais livres que se formaram logo após a reação fotoquímica. Esses radicais são ricos em energia e tendem a sofrer reações em cadeia para estabilizar a matriz dos radicais. Portanto, os radicais formados podem migrar das camadas superficiais da madeira e transferir energia às camadas mais profundas provocando reações de descoloração.

O estudo do comportamento colorimétrico da madeira perante a ação de radiação UV é uma forma de contribuir para o conhecimento desse material, na busca de alternativas para o prolongamento de sua vida útil, pois a madeira é um importante material de construção, susceptível ao intemperismo (radiação solar, umidade, gases poluentes, temperatura e

conteúdo de ozônio atmosférico) e que poderá vir à sofrer um processo de descoloração e por fim limitar suas finalidades e determinar o seu valor no mercado.

Apesar da ação da fotodegradação ser limitada à superfície da madeira, esse fenômeno constitui um problema para os usuários e para os tecnologistas, porque afeta o desempenho dos produtos aplicados sobre ela. Por exemplo, as resinas que contêm compostos absorvedores de UV possuem tempo de vida limitado, exigem manutenção freqüente, o que inclui a sua remoção total e preparação de uma nova superfície (FEIST & HON, 1984). Além disso, os produtos semitransparentes permitem que a radiação atinja a superfície da madeira, degradando-a antes mesmo do revestimento (PANDEY & PITMAN, 2002; SILVA & PASTORE, 2004) e reduzindo o grau de adesão entre o produto e o substrato (PANDEY & PITMAN, 2002).

Atualmente é crescente a busca por tecnologias utilizadas para o monitoramento da fotodegradação e entre elas podemos citar os ensaios de envelhecimento acelerado que simulam os efeitos do intemperismo natural acelerando de 5 a 20 vezes o tempo de exposição. As condições de temperatura, umidade, radiação UV e oxigênio podem ser simuladas e controladas de acordo com o objetivo de cada estudo.

A técnica de envelhecimento acelerado tem sido bastante utilizada no estudo do envelhecimento da madeira devido à sua rapidez e por ser não-destrutiva (AYADI et al., 2003; GOUVEIA, 2008; MARTINS et al., 2011; COSTA et al., 2011). A Tabela 1 apresenta um breve resumo das condições utilizadas por vários autores para simular o processo de envelhecimento da madeira.

Tabela 1. Condições utilizadas para determinar a alteração da cor da madeira após o envelhecimento acelerado.

Fonte	Espécie estudada	Dimensões da amostra	Equipamento	Condições
Gouveia (2008)	<i>Simarouba amara</i> <i>Sextonia rubra</i> <i>Cariniana micrantha</i>	23 x 23 x 23 mm	Reator fotoquímico Rayonet com 12 lâmpadas UV (8W cada); Amostras fixadas em carrossel dentro do reator com umas das faces tangencias expostas	84 horas de radiação UV com 350 nm e 3 ciclos de medição (12, 36 e 84 horas) - período corresponde à 1 ano de exposição em um ambiente interno
Martins et al. (2011)	<i>Pinus caribae</i> <i>var.hondurensis</i> <i>Eucallyptus benthamii</i>	80 x 30 x 5 mm	idem	168 horas de radiação UV com 350 nm e 4 ciclos de medição (42, 84, 126 e 168 horas)
Costa et al. (2011)	Jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i> L. var. <i>courbaril</i>) Tauari (<i>Couratari oblongifolia</i>)	80 x 30 x 5 mm	idem	168 horas de radiação UV com 350 nm e 4 ciclos de 42 horas
Hansmann et al. (2006)	<i>Picea abies</i> <i>Populus nigra</i>	75 x 10 x 60 mm (radial x tangencial x longitudinal)	Câmara QUV/spray (Q-Panel Lab Products, Cleveland, EUA) equipada com lâmpadas UVA 340	Ciclos de condensação + luz UV com 340 nm + spray de água, segundo a norma EN 927-6 (CEN, 2004) ¹ com mais de 40 dias de exposição
Ayadi et al. (2003)	<i>Fraxinus</i> sp, <i>Fagus sylvatica</i> <i>Pinus pinaster</i> <i>Populus</i>	150 x 75 x 5 mm (longitudinal x radial x tangencial)	Q-panel QUV weathering tester (Q-panel, EUA) equipado com lâmpadas UVA-340	835 horas com ciclos de exposição à 2:30 horas de radiação UV à 60°C e 340 nm + 30 minutos de condensação à 50°C

Continuação da Tabela 1...

Ishiguri et al. (2003)	<i>Cryptomeria japonica</i>	30 x 30 x 10 mm (longitudinal x tangencial x radial)	Lâmpada UV portátil (Spetronics, modelo ENF-280C), fonte de luz à uma distância de 25 cm	40 horas de exposição à radiação UV à 365 nm com medições após 5, 10, 20, 40 horas
Deka & Petric (2008)	<i>Picea abies</i>	50 x 10 x 50 mm (radial x tangencial x longitudinal)	OSRAM ULTRA-VITALUX 300W Sunlamp com UVA (315-400 nm) e UVB (280-315 nm)	200 horas de radiação, com medições à cada 50 horas e intervalos de 1 semana entre as medições
Deka et al. (2008)	idem	idem	idem	500 horas de radiação com intervalos de 1 semana à cada 100 horas de exposição
Oltean et al. (2008)	16 espécies europeias (12 folhosas e 4 coníferas)	120 x 60 x 10 mm (longitudinal x radial x tangencial)	SUNTEST CPS (Heraeus Instruments, Hanau Alemanha)	600 horas de exposição à condições simuladas de radiação solar à 320 nm com medições efetuadas após 3, 4, 5, 6, 9, 12, 24, 48, 72, 120 e 600 horas, segundo a norma ÖNORM ISO 11341 ²
Mitsui et al. (2004)	<i>Chamaecyparis obtusa</i> <i>Cryptomeria japonica</i> <i>Fagus crenata</i> <i>Celtis occidentalis</i>	-	WEL-SUN-D (Suga Test Instruments)	60 horas de exposição à luz UV (300-400 nm), luz visível (400-700 nm) e infravermelho (700-3000 nm)
Cucui (2009)	<i>Castanea sativa</i> <i>Quercus robur</i> <i>Robinia pseudoacacia</i> <i>Fagus sylvatica</i>	105 x 2 x 4,5 cm	QUV Accelerated Weathering	Ciclos de condensação (24 horas) + sub-ciclos de spray de água (30 minutos) + radiação UVA-340 (2:30 horas à 340 nm) segundo a norma EN 927-6 (CEN, 2004); 12 ciclos de 168 horas
Carrilo-Parra (2007)	<i>Prosopis laevigata</i> <i>Tectona grandis</i> <i>Fagus sylvatica</i>	150 x 72 x 15 mm (longitudinal x tangencial x radial)	Q-Panel QUV (Q Panel, Lab. Products, Cleveland, USA)	Ciclos de condensação (24 horas à 45±3°C) + radiação UV (2:30 horas à 60±3°C com 340 nm) + spray de água

¹ CEN (2004) prEN927-6 Paints and varnishes – Coating materials and coating systems for exterior wood – Part 6: Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV and water. CEN (European committee for standardization), Brüssel.

² ÖNORM EN ISO 11341 (1994) Paints and varnishes-Artificial weathering and exposure to artificial radiation-Exposure to filtered xenon-arc radiation.

2.4.1 Estabilidade da cor da madeira termorretificada após a fotodegradação

Estudos recentes têm demonstrado que o tratamento de termorretificação pode proporcionar uma maior estabilidade à cor da madeira, dependendo da espécie, quando exposta às condições de radiação UV. George et al. (2005) afirmam que tratamentos térmicos e fotoquímicos podem ser empregados para aumentar a resistência da madeira à fotodegradação, pois apesar de alterarem a cor original da madeira, eles a tornam mais resistente ao longo do tempo.

A utilização de tratamentos térmicos mostrou-se eficiente para as madeiras de marupá (*Simarouba amara*) e louro-vermelho (*Sextonia rubra*). Essas espécies, quando submetidas à 200°C por 1 hora e à 150°C por 2 horas, apresentaram maior resistência à fotodescoloração após 84 horas de radiação UV. Por outro lado, a aplicação de tratamentos térmicos à madeira de jequitibá-rosa (*Cariniana micrantha*) não melhorou a resistência à fotodescoloração (GOUVEIA, 2008).

Ayadi et al. (2003) estudaram a estabilidade da cor da madeira termorretificada de quatro espécies, sendo elas: *Fraxinus* sp, *Fagus sylvatica* L., *Pinus pinaster* e *Populus* sp. durante a exposição ao intemperismo artificial, ou seja, exposta à luz UV à distância de 5 cm

por 835 horas, com ciclos de 2,5 horas de radiação UV à 60°C e condensação à 50°C por 30 minutos. Os resultados indicaram uma maior estabilidade de cor para a madeira tratada.

Segundo Vernois (2001), a madeira termorretificada, quando exposta ao sol e aos raios UV, apresenta uma cor acinzentada, entretanto, sua coloração é mais homogênea quando comparada a madeira não tratada. Além disso a madeira termorretificada, quando exposta às condições de intemperismo, apresenta rachaduras menores devido a maior estabilidade dimensional.

Mitsui et al. (2003) investigaram as alterações da cor da madeira termorretificada após a exposição à luz e verificaram que a alteração de cor foi atribuída à decomposição da lignina, sendo essa alteração maior nas coníferas.

Durante a termorretificação ocorre um processo de condensação na estrutura da lignina que poderia minimizar as reações de radicais livres fenoxil os quais estão entre os grupos capazes de promover alterações na cor da madeira. Isso ocorre pelo fato da lignina e também dos extrativos apresentarem capacidade antioxidante por conta de fenóis totais produzidos por essas estruturas durante o processo de condensação, que podem extinguir os radicais livres instáveis formados pela degradação das hemiceluloses durante a termorretificação, por reações de transferência de radicais livres para formar radicais fenoxil estáveis e consequentemente colaborar para menores alterações na cor da madeira após a radiação UV (AHAJJI et al., 2009). Assim, um tratamento que estabiliza a cor de madeira concomitantemente induz uma redução na concentração de radicais livres fenoxil (TRIBOULOT, 1993).

Estudos sobre a fotodegradação da madeira evidenciaram uma relação entre as modificações de cor e a intensidade de fenoxil atribuídos aos radicais livres. Radicais fenoxil são capazes de absorver luz visível e, em seguida, participar da coloração da madeira (MERLIN & DEGLISE, 2001). Krzysnik (2001) também relatou um aumento na intensidade de radicais livres após a exposição de madeira de *Picea abies* à luz UV durante 30 minutos, seguido de uma evidente diminuição após 2 horas de exposição e novamente um aumento após 120 horas de exposição. Ahajji et al. (2009), submetem madeiras de *Fagus sylvatica* e *Picea abies* à radiação UV durante 1 hora e verificaram uma menor quantidade de radicais livres fenoxil produzidos sob o efeito de radiação UV para as madeiras termorretificadas.

Avat (1993) afirma que quanto maior a temperatura de termorretificação, mais importante será o conteúdo de fenóis totais, o que pode ser explicado pela degradação da lignina e dos extrativos durante o tratamento.

A atividade oxidante aumenta com o teor de fenóis dos extratos e com a temperatura de termorretificação, e pode ser quantificada por determinação da taxa de formação do radical livre fenoxil (AHAJJI et al., 2009).

É nesse contexto que estudos sobre rendimentos de extrativos e capacidade antioxidante de fenóis produzidos durante a termorretificação estão sendo importantes para analisar o comportamento das madeiras tratadas quando expostas à radiação UV, já que são considerados os precursores das reações químicas capazes de desencadear um processo de descoloração na madeira.

CAPÍTULO I

ALTERAÇÃO E UNIFORMIDADE DA COR DA MADEIRA DE *Tectona grandis* L. f. APÓS A TERMORRETIFICAÇÃO

RESUMO

A madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.) proveniente de plantios jovens apresenta algumas características indesejáveis em termos de uniformidade de cor além de apresentar alta proporção de alburno, o qual distingue-se do cerne pela menor durabilidade e cor clara. Além disso, os tratamentos silviculturais podem afetar as propriedades físicas e estéticas da madeira. Tratamentos termorretilificadores podem ser aplicados para alterar e uniformizar a cor da madeira, agregando assim maior valor ao produto final. Neste contexto, os objetivos deste estudo foram: (1) determinar o efeito do espaçamento nas propriedades físicas (densidade e teor de umidade) e na cor original da madeira de teca, (2) determinar a alteração da cor da madeira de teca após a termorretilificação e (3) avaliar a uniformidade da cor da madeira (peças contendo cerne e alburno) após os tratamentos termorretilificadores. Foram utilizadas nove árvores provenientes de três diferentes espaçamentos (4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m), sendo três árvores para cada espaçamento. Amostras de 150 x 75 x 20 mm foram produzidas e divididas em três grupos: grupo I: amostras com predominância de madeira de cerne ($\geq 75\%$ de cerne em relação ao alburno), grupo II: amostras com 100% de madeira de alburno e grupo III: amostras com aproximadamente 50% de cerne e 50% de alburno. As amostras dos grupos I e II foram utilizadas para determinar as propriedades físicas e a variação da cor da madeira antes e após a termorretilificação, enquanto que as amostras do grupo III foram utilizadas para determinar a uniformidade da cor após a termorretilificação. A termorretilificação foi realizada em um forno mufla elétrico laboratorial, da marca Linn Elektro Therm sob duas condições de temperatura: 180 e 200°C. As análises colorimétricas foram realizadas através do espectrofotômetro portátil CM 2600d no espaço de cor CIE-L*a*b*. Os resultados mostraram que o espaçamento afetou as propriedades físicas e a cor original da madeira de teca. A madeira de cerne sofreu um maior decréscimo na densidade após os tratamentos termorretilificadores quando comparada ao alburno. As madeiras de cerne e alburno apresentaram uma redução média de 52% no teor de umidade de equilíbrio após a termorretilificação. As madeiras de cerne e alburno apresentaram o mesmo padrão de luminosidade nos diferentes espaçamentos. Após a termorretilificação, a madeira teve uma perda de luminosidade, tornando-se mais escura, sendo isso mais acentuado para o tratamento à 200°C. As madeiras de cerne e alburno apresentaram comportamentos diferentes para as coordenadas a* e b* nos três espaçamentos, antes e após a termorretilificação. Ocorreu uma maior formação de pigmento vermelho e perda de pigmento amarelo nas madeiras de cerne e alburno tratadas à 200°C. Os tratamentos termorretilificadores causaram uma maior alteração na cor do alburno que na cor do cerne. O tratamento mais agressivo (200°C) teve um efeito maior na alteração da cor da madeira. Ambos os tratamentos termorretilificadores, 180 e 200°C, proporcionaram uma maior uniformidade às peças de madeira contendo cerne e alburno, mostrando assim o potencial da termorretilificação para obtenção de produtos de maior valor agregado.

Palavras-chave: propriedades físicas, sistema CIE-L*a*b*, produto de maior valor agregado.

ABSTRACT

The teak wood (*Tectona grandis* L. f.) from young plantations has some undesirable characteristics in terms of color uniformity as well as presenting a high proportion of sapwood, which is distinguished from heartwood by the lower durability and light color. In addition, silvicultural treatments can affect the physical and aesthetic properties of wood. Heat treatments can be applied to change and standardize the color of the wood, thus adding more value to the final product. In this context, the objectives of this study were: (1) determine the effect of spacing between tree on the physical properties (density and moisture content) and the original color of teak wood, (2) determine the color change of teak wood after heat treatments and (3) evaluate the color uniformity of the wood (pieces containing heartwood and sapwood) after heat treatments. Nine trees from three different spacing (4 x 2 m, 5 x 2 m and 6 x 2 m) were used, with three trees per spacing. Samples of 150 x 75 x 20 mm were produced and divided into three groups: group I: samples with a predominance of heartwood ($\geq 75\%$ heartwood in relation to sapwood), group II: samples with 100% of sapwood and group III: samples with approximately 50% of heartwood and 50% of sapwood. The samples of groups I and II were used to determine the physical properties and wood color changes before and after heat treatments, whereas those of group III were used to determine the color uniformity after heat treatments. Heat treatments were performed in a laboratorial electric oven from Linn Elektro Therm under two different temperatures: 180 and 200°C. Color analysis were performed using the portable spectrophotometer CM 2600d in the CIE-L*a*b* color space. Results showed that the spacing affects the physical properties and the original color of teak wood. The heartwood had a greater decrease in density after heat treatments than sapwood. Heartwood and sapwood presented an average decrease of the 52% in equilibrium moisture content after heat treatments. Heartwood and sapwood had the same lightness pattern at the different spacings. After the heat treatment, wood had a loss of lightness, becoming darker, and this was more pronounced in the treatment at 200°C. Heartwood and sapwood presented different behavior for the coordinates a* and b* for the three spacings, before and after heat treatments. There was a greater formation of red hue and loss on yellow hue of heartwood and sapwood treated at 200°C. Heat treatments caused a higher color change on sapwood than heartwood. The most severe treatment (200°C) had a larger effect on the color change of teak wood. Both heat treatment, 180 and 200°C, provided greater uniformity to the pieces of wood with heartwood and sapwood, thus demonstrating the potential of heat treatment to obtain products of higher added value.

Key words: physical properties, CIE-L*a*b* system, high value added products.

1 INTRODUÇÃO

A teca (*Tectona grandis* L. f.) é uma espécie arbórea da família Verbenaceae e ocorre naturalmente no centro e sul da Índia, em Myanmar, no norte da Tailândia e em Laos, sendo vulgarmente conhecida como teak (Índia, Siam, Birmânia e Indonésia), teck (França), ojati (Java), may sak (Laos) e tiek (Alemanha) (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003).

A madeira de teca possui uma vasta gama de utilização, sendo utilizada em construções marinhas, na fabricação de chapas de madeira, em painéis decorativos e móveis entre outros. A qualidade de sua madeira destaca-se dentre as principais razões para o seu plantio. A espécie apresenta cerne e alburno bem distintos. A madeira do cerne também apresenta alta resistência ao ataque de cupins, brocas marinhas e outros insetos, possuindo alto valor no mercado internacional e preços bem mais elevados que o do mogno (*Swietenia macrophylla* King) (VEIT, 1996). Outros aspectos qualitativos que se destacam são o desenho, a cor e densidade que a tornam a madeira de folhosa mais valorizada no mundo atualmente (VIEIRA et al., 2002). A madeira do alburno apresenta propriedades similares ao cerne, entretanto, apresenta menor durabilidade, sendo necessária a utilização de tratamentos preservativos.

No Brasil, os plantios de teca apresentam um incremento maior em relação aos países de origem, devido às condições climáticas e edáficas, atingindo anualmente 24 m³/ha, na região de Cáceres-MT, com ciclo de corte de 30 anos (SHIMIZU et al., 2007). Segundo Passos et al. (2006) esse fato é resultante das excelentes condições ambientais encontradas no país e propícias para o seu pleno desenvolvimento.

Segundo a FAO (2000), o sucesso dos plantios de teca deve-se à redução da idade de rotação, onde nos plantios mais rentáveis já se encontra em torno de 15 anos e isso já é bem ocorrente no Brasil o que justifica encontrar peças de madeira com maior proporção de madeira juvenil e maior proporção de alburno com relação ao cerne, os quais apresentam características bem distintas em termos de cor e de durabilidade.

Vários estudos relatam que a madeira de teca pode diferir significativamente em seus principais atributos de qualidade tais como a cor quando cultivadas em diferentes regiões, secas e úmidas, ou com maior ou menor rotação de cultivo, influenciando na taxa de crescimento da espécie e conseqüentemente provocando alterações nas suas características estéticas (BRYCE, 1966; BHAT, 2003; THULASIDAS & BHAT, 2007; THULASIDAS et al., 2006).

De acordo com a SI-FLORESTA (2009), a madeira proveniente de árvores entre 7 e 18 anos é apropriada para a indústria moveleira, construção e decoração; entretanto, a madeira apresenta coloração mais clara e maior elasticidade, o que a torna adequada para desenvolver o acabamento final dos móveis. A tonalidade clara e o aspecto mesclado (contraste entre cerne e alburno) dessa madeira pode apresentar um aspecto negativo, já que as madeiras de teca dos países de origem apresentam uma maior uniformidade quanto à cor e conseqüentemente uma maior aceitação no mercado em relação à madeira proveniente de plantios do Brasil.

A atratividade estética é um fator importante para a comercialização de uma espécie por isso o motivo pela insesante procura por técnicas que possam melhorar as características da madeira, e uma técnica já conhecida mundialmente e utilizada na Europa é a tropicalização, em que se utiliza o tratamento de termorreificação para o escurecimento de madeiras claras, de baixo valor comercial, tornando-as mais próximas da coloração das madeiras tropicais, as quais são mais escuras e consideradas de alto valor comercial.

A termorreificação é um tratamento térmico aplicado à madeira, geralmente à temperaturas próximas à 200°C, em que obtem-se um produto de maior estabilidade dimensional e maior durabilidade. Além disso, o tratamento também causa um escurecimento

na madeira, o que em muitos casos é esteticamente apreciado, agregando assim maior valor ao produto final.

No sul do Brasil, a empresa TWBrasil utiliza o tratamento térmico para melhorar determinadas propriedades tecnológicas da madeira, assim como para alterar artificialmente a cor da madeira visando aumentar a comercialização de espécies que, apesar de possuírem boas propriedades, apresentam baixa procura no mercado devido à sua baixa atratividade estética. No caso da teca, o tratamento é aplicado para modificar a coloração para marrom caramelo, semelhante à tonalidade das madeiras nativas (RILLING, 2009).

Atualmente é perceptível a intensa procura por novas tecnologias que possam agregar maior valor comercial a madeira e que venham a contribuir para melhorias em seus atributos, principalmente da cor já que esta é uma característica que vem sendo considerada como um importante índice de classificação e qualidade da madeira (MORI et al., 2004).

Möttönen et al. (2002) observaram que as características e a uniformidade da coloração da madeira representam um papel direto no estabelecimento do preço e no valor final do produto. A cor natural da madeira pode ser afetada por fatores genéticos e ambientais. A cor varia entre as espécies, sendo influenciada pelas características físicas (ex. densidade e teor de umidade), estrutura anatômica (ex. anéis de crescimento, vasos, raios e tipo de parênquima axial), teor de extrativos, tratamentos silviculturais, taxa de crescimento, altura, diâmetro e idade da árvore, condições edáficas e climáticas (RINK, 1987; GONÇALEZ, 1993; MADY, 2000).

Sendo assim, torna-se claro a importância da cor, uma vez que ela é um dos primeiros contatos visuais, podendo indicar de forma imediata a finalidade de um determinado produto (MORI et al., 2005). Há casos em que o comprador é especialmente seduzido pela cor, além do desenho, que deve apresentar harmonia, pois o consumidor avalia não somente o preço, a qualidade, a durabilidade, mas associado a estas características é influenciado no ato da compra simplesmente pelo fato de maior satisfação pela obtenção de um produto de melhor aparência, design, relevando a cor como fator limitante e decisivo durante a escolha do produto (GONÇALEZ et al., 2006).

O estudo da cor da madeira é de grande importância por estabelecer uma relação direta entre qualidade e finalidade, e que através de novas tecnologias a cor pode ser alterada trazendo resultados positivos esteticamente e vir a tornar-se um grande potencial para ampliar a comercialização de espécies que apesar de apresentarem boas propriedades tecnológicas deixam de ser competitivas no mercado internacional pela não aceitação da sua aparência.

Neste contexto, os objetivos deste estudo foram: (1) determinar o efeito do espaçamento nas propriedades físicas (densidade e teor de umidade) e na cor original da madeira de *Tectona grandis* L. f.; (2) determinar a alteração da cor da madeira após a termorreificação; e (3) avaliar a uniformidade da cor da madeira (peças contendo cerne e alburno) antes e após os tratamentos termorreificadores.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Árvores de teca (*Tectona grandis* L. f.) com 12 anos de idade foram obtidas de um plantio localizado na área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso, localizado em Cáceres, Mato Grosso. Foram selecionadas nove árvores provenientes de três diferentes espaçamentos: 4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m, sendo consideradas três árvores para cada espaçamento.

As toras, obtidas à partir do DAP, foram processadas no Laboratório de Processamento Mecânico da Madeira do Departamento de Produtos Florestais (DPF) do Instituto de Florestas (IF) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), das quais foram obtidas amostras de 150 x 75 x 20 mm (comprimento x largura x espessura). Estas amostras foram então divididas em três grupos (Figura 8), sendo eles:

- Grupo I: amostras com predominância de madeira de cerne ($\geq 75\%$ de madeira de cerne em relação ao alburno);
- Grupo II: amostras com 100% de madeira de alburno;
- Grupo III: amostras com aproximadamente 50% de madeira de cerne e 50% de madeira de alburno.

As amostras dos três grupos foram secas ao ar livre e em seguida acondicionadas em câmara climática à 20°C e 65% de umidade relativa até atingir teor de umidade de equilíbrio.

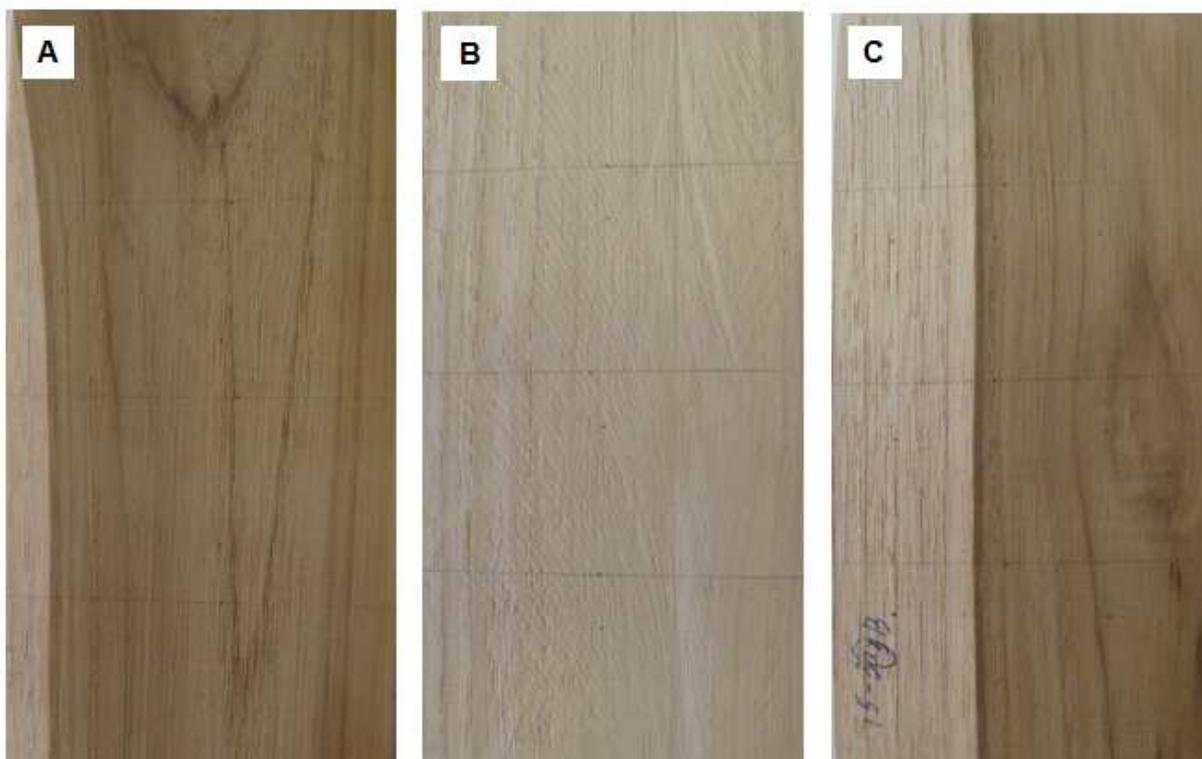


Figura 8. Grupos de amostras de madeira. (A) Grupo I: amostras com predominância de madeira do cerne ($\geq 75\%$ de madeira do cerne em relação ao alburno). (B) Grupo II: amostras com 100% de madeira de alburno. (C) Grupo III: amostras com aproximadamente 50% de madeira de cerne e 50% de madeira de alburno.

As amostras dos grupos I e II foram utilizadas para determinar as propriedades físicas e a variação da cor da madeira de cerne (grupo I) e albarno (grupo II) entre os diferentes espaçamentos, antes e após os tratamentos termorretilificadores.

As amostras do grupo III (cerne-albarno) foram utilizadas para determinar a uniformidade das peças de madeira contendo cerne e albarno após a termorretilificação.

2.2 Tratamento de termorretilificação

Para os três grupos de amostras foram aplicados tratamentos termorretilificados, os quais foram realizados em um forno mufla elétrico laboratorial, da marca Linn Elektro Therm, com dimensões de 600 x 600 x 700 mm equipado com um sistema de controle de temperatura e tempo (Figuras 9A e 9C).

O tratamento de termorretilificação foi realizado em quatro etapas, sendo selecionadas duas diferentes temperaturas de termorretilificação: 180 e 200°C. As quatro etapas do tratamento foram: 1) aquecimento do material até 100°C: período corresponde à 2 horas; 2) aumento da temperatura de 100°C até a temperatura final de termorretilificação (180 e 200°C): período correspondente à 30 minutos; 3) tempo de tratamento na temperatura de termorretilificação: 2 horas e 30 minutos; e 4) resfriamento do material durante aproximadamente 1 hora. A Figura 10 apresenta o ciclo total de tratamento, correspondente à 6 horas. O teor de umidade inicial das amostras foi de aproximadamente 8-10%.

Para cada batelada de tratamento, foram tratadas 15 amostras de madeira, as quais foram dispostas horizontalmente na parte inferior do forno mufla, tal como mostrado nas Figuras 9B e 9D.

Após o tratamento, as amostras foram reacondicionadas em câmara climática à 20°C e 65% de umidade relativa até atingir o teor de umidade de equilíbrio para os posteriores ensaios físicos e colorimétricos.



Figura 9. (A) Forno mufla elétrico laboratorial, da marca Linn Elektro Therm, com dimensões de 600 x 600 x 700 mm. (B) Interior do forno mufla e posicionamento das amostras de madeira. (C) Sistema de controle de temperatura e tempo de tratamento. (D) Amostras de madeira antes do tratamento termorretilificador.

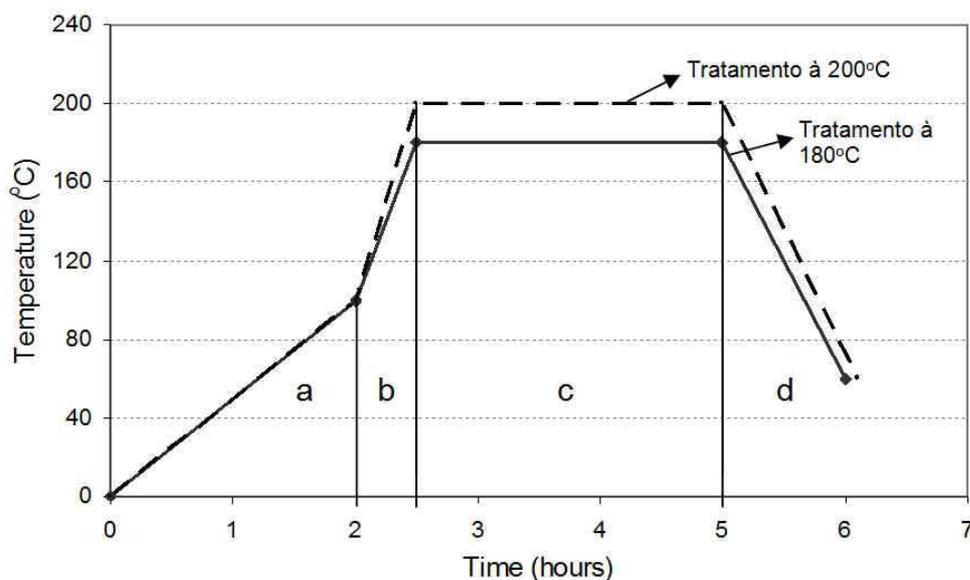


Figura 10. Programa de temperatura vs. tempo dos tratamentos termorretificadores aplicados à madeira de *Tectona grandis*. a: aquecimento até 100°C. b: aumento da temperatura de 100°C até a temperatura de termorretificação. c: tratamento de termorretificação. d: resfriamento.

2.3 Determinação das propriedades físicas

As propriedades físicas avaliadas foram a densidade aparente e o teor de umidade de equilíbrio da madeira, antes e após os tratamentos termorretificadores. A densidade aparente foi determinada através da seguinte equação:

$$DENS = \frac{M}{V} \quad (4)$$

onde, *DENS*: densidade aparente da madeira no teor de umidade de equilíbrio, g.cm⁻³; *M*: peso da amostra no teor de umidade de equilíbrio, g; *V*: volume da amostra no teor de umidade de equilíbrio, cm³.

Os teores de umidade da madeira foram determinados através do medidor de umidade M51 da MARRARI Automação (Curitiba, Paraná), antes e após os tratamentos termorretificadores. Para tal, foi realizada uma varredura na superfície de cada amostra e então utilizada a média dos valores de umidade obtidos.

As densidades obtidas antes e após os tratamentos termorretificadores (*DENS* e *DENS-termo*, respectivamente) assim como os teores de umidade obtidos antes e após os tratamentos termorretificadores (*TUE* e *TUE-termo*, respectivamente) foram mensurados à partir das amostras climatizadas à 20°C e 65% de umidade relativa.

2.4 Análises colorimétricas

As análises colorimétricas foram realizadas no espaço de cor CIE-L*a*b*, antes e após os tratamentos termorretificadores, com o auxílio do espectrofotômetro portátil CM 2600d, versão 1.41, da Konica Minolta Sensing, Inc. (Figura 11A), o qual permitiu realizar medições de cor através do contato direto entre a superfície da amostra, em pontos pré-determinados, e a área de iluminação do aparelho (Figura 8C), com diâmetro de abertura de 3 mm (SAV). Utilizou-se o iluminante padrão D₆₅, ângulo de observação de 10° e luz especular incluída. Para efetuar as medições, o aparelho foi calibrado com o padrão preto e branco, sendo que para a calibração do branco, utilizou-se a placa CM-A145 (Figura 11B).

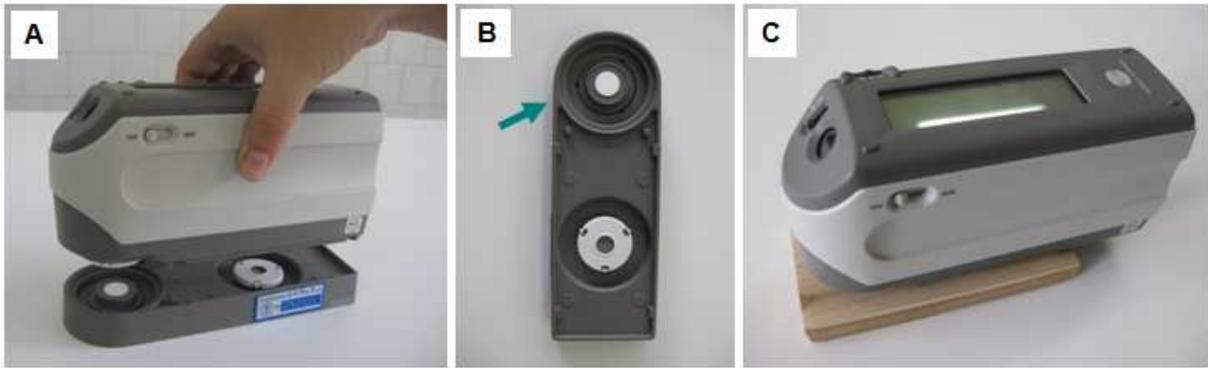


Figura 11. (A) Espectrofotômetro portátil CM 2600d da Konica Minolta. (B) Placa de calibração do branco CM-A145. (C) Medições de cor nas amostras de madeira.

Antes das medições, as superfícies das amostras foram polidas com uma sequência de lixas de granulometria de 80 e 120 a fim de eliminar as irregularidades e obter uma superfície fresca.

Para determinar a variação da cor entre a madeira do cerne (grupo I) e do alburno (grupo II) dos diferentes espaçamentos, antes e após os tratamentos termorretrificadores foram obtidos os valores de L^* (luminosidade), a^* (verde-vermelho) e b^* (azul-amarelo) de cada amostra. Foram efetuadas 3 medições ao longo do comprimento das amostras, isto é, à 25%, 50% e 75% do comprimento total, na face tangencial.

Os dados coletados pelo espectrofotômetro foram então transferidos para o software SpectraMagic™ NX (CM-S100w), versão 1.9, da Konica Minolta e então exportados para o software Microsoft Office EXCEL.

À partir dos dados obtidos para as três variáveis de cor antes (L^* , a^* e b^*) e após (L^* -termo, a^* -termo e b^* -termo) os tratamentos termorretrificadores, foram calculadas as variações de cada coordenada após a termorretrificação, sendo elas: ΔL^* -termo, Δa^* -termo e Δb^* -termo. A variação de cada coordenada foi determinada pela diferença entre o valor da coordenada da madeira original (não termorretrificada) e o valor da coordenada da madeira termorretrificada tal como realizado por outros autores (SUNDQVIST & MORÉN, 2002; OYARCE, 2006; GONZÁLEZ-PENA & HALE, 2009; DUBEY et al., 2011).

A variação total da cor da madeira após os tratamentos termorretrificadores também foi determinada através da seguinte equação:

$$\Delta E^*_{ab\text{-termo}} = \sqrt{(\Delta L^*_{\text{-termo}})^2 + (\Delta a^*_{\text{-termo}})^2 + (\Delta b^*_{\text{-termo}})^2} \quad (5)$$

onde, $\Delta E^*_{ab\text{-termo}}$: variação total da cor da madeira após a termorretrificação; $\Delta L^*_{\text{-termo}}$, $\Delta a^*_{\text{-termo}}$ e $\Delta b^*_{\text{-termo}}$: variação individual de cada coordenada (L^* , a^* e b^*) após a termorretrificação. Esta variável foi calculada de acordo com a definição dada pela Konica Minolta (1998), seguindo a norma CIE «*Commission Internationale de L'Éclairage*» (1976).

2.5 Determinação da uniformidade da cor da madeira após a termorretrificação

Para determinar a uniformidade da cor da madeira após os tratamentos termorretrificadores, em peças contendo cerne e alburno, foram utilizadas as amostras do grupo III (Figura 8C). Os valores das coordenadas L^* , a^* e b^* foram obtidos à partir de pontos pré-determinados, ou seja, à 25, 50 e 75% do comprimento da amostra, na região do cerne e do alburno antes e após os tratamentos termorretrificadores tal como apresentado na Figura 12. As variações das coordenadas de cor no interior da amostra ($\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$,

$\Delta a^*_{Cerne-Alburno}$ e $\Delta b^*_{Cerne-Alburno}$) foram calculadas pelas seguintes equações:

$$\Delta L^*_{Cerne-Alburno} = \frac{(|L^*_6 - L^*_1| + |L^*_5 - L^*_2| + |L^*_4 - L^*_3|)}{3} \quad (6)$$

$$\Delta a^*_{Cerne-Alburno} = \frac{(|a^*_6 - a^*_1| + |a^*_5 - a^*_2| + |a^*_4 - a^*_3|)}{3} \quad (7)$$

$$\Delta b^*_{Cerne-Alburno} = \frac{(|b^*_6 - b^*_1| + |b^*_5 - b^*_2| + |b^*_4 - b^*_3|)}{3} \quad (8)$$

onde, $\Delta L^*_{Cerne-Alburno}$, $\Delta a^*_{Cerne-Alburno}$ e $\Delta b^*_{Cerne-Alburno}$: variação média das coordenadas L^* , a^* e b^* no interior da amostra; L^*_1, L^*_2 e L^*_3 : valores de L^* obtidos para o cerne à 25, 50 e 75% do comprimento da amostra; L^*_6, L^*_5 e L^*_4 : valores de L^* obtidos para o alburno à 25, 50 e 75% do comprimento da amostra; a^*_1, a^*_2 e a^*_3 : valores de a^* obtidos para o cerne à 25, 50 e 75% do comprimento da amostra; a^*_6, a^*_5 e a^*_4 : valores de a^* obtidos para o alburno à 25, 50 e 75% do comprimento da amostra; b^*_1, b^*_2 e b^*_3 : valores de b^* obtidos para o cerne à 25, 50 e 75% do comprimento da amostra; b^*_6, b^*_5 e b^*_4 : valores de b^* obtidos para o alburno à 25, 50 e 75% do comprimento da amostra. A Figura 12 apresenta os pontos de medição das coordenadas colorimétricas na região do cerne e alburno.

A variação total da cor no interior da amostra ($\Delta E^*_{ab_{Cerne-Alburno}}$) também foi calculada através da seguinte equação:

$$\Delta E^*_{ab_{Cerne-Alburno}} = \sqrt{(\Delta L^*_{Cerne-Alburno})^2 + (\Delta a^*_{Cerne-Alburno})^2 + (\Delta b^*_{Cerne-Alburno})^2} \quad (9)$$

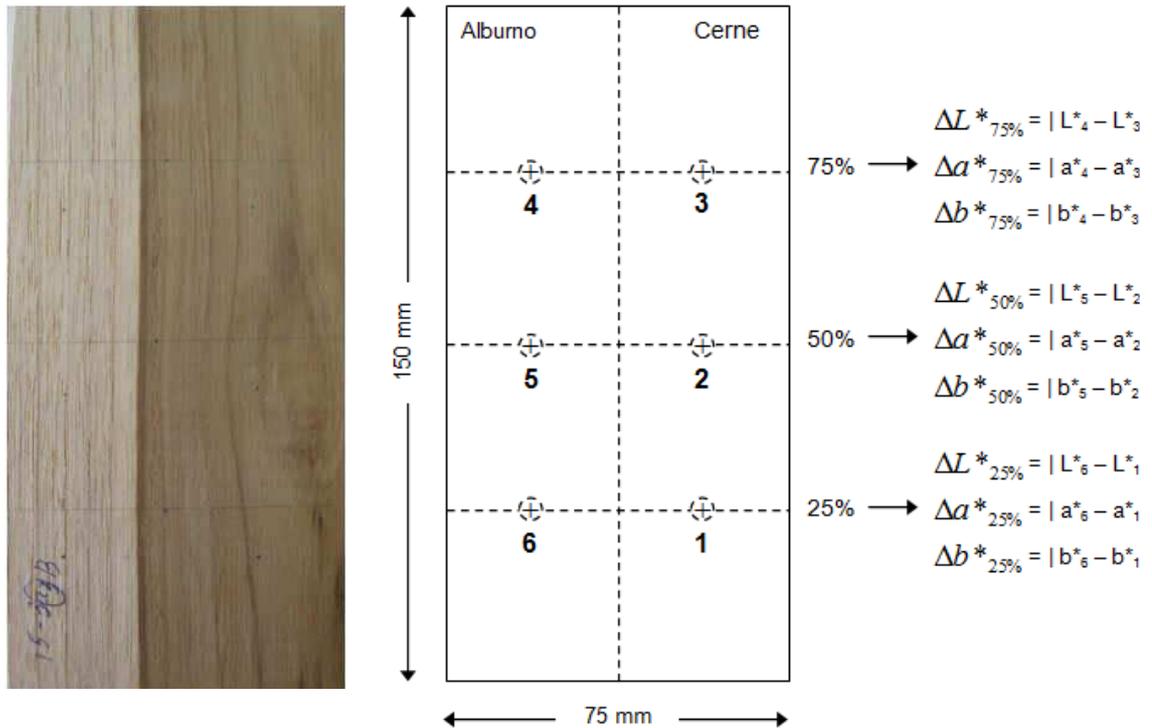


Figura 12. Esquema dos pontos de medição das coordenadas L^* , a^* e b^* , antes e após os tratamentos termorretificadores para a determinação da uniformidade da cor da madeira.

2.6 Análises estatísticas

Os dados obtidos para as propriedades físicas (DENS, DENS-termo, TUE e TUE-termo) e as variáveis colorimétricas (ΔL^* -termo, a^* , a^* -termo, Δa^* -termo, b^* , b^* -termo, Δb^* -termo, ΔE^*_{ab} -termo, $\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$, $\Delta a^*_{\text{Cerne-Alburno}}$, $\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$, $\Delta E^*_{ab_{\text{Cerne-Alburno}}}$) foram submetidos à uma análise de variância (ANOVA) com o auxílio do programa STATISTIC 6.0 a fim de determinar o efeito das variáveis independentes. Quando o valor F foi significativo ($\alpha = 0,05$), aplicou-se o teste de Tukey à 95% de significância a fim de determinar as diferenças entre as médias das variáveis estudadas.

As distribuições das variáveis citadas foram analisadas pelo teste Kolmogorov-Smirnov, a nível de 5% de significância, para verificar a normalidade das suas distribuições.

As variáveis DENS e DENS-termo não apresentaram distribuição normal, portanto aplicou-se a transformação logarítmica dos dados ($\log_{10}\text{DENS}$ e $\log_{10}\text{DENS-termo}$).

Para as variáveis L^* e L^* -termo, as análises indicaram não-normalidade dos dados mesmo após a transformação dos dados, portanto foi realizado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis. Este teste foi aplicado quando o número de tratamentos foi igual à 3 ($K=3$), ou seja, para determinar o efeito do espaçamento (4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m). Quando o teste indicou significância, realizou-se o teste de média, a fim de determinar as diferenças entre as médias dos postos das variáveis estudadas, à 95% de significância. O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney também foi utilizado para as variáveis L^* e L^* -termo quando o número de tratamentos foi igual à dois ($K=2$), ou seja, para determinar o efeito do grupo (grupo I: cerne e grupo II: alburno) e da temperatura (180 e 200°C).

Para avaliar as propriedades físicas e a alteração da cor da madeira após os tratamentos termorretilificadores, foram consideradas as seguintes variáveis independentes: espaçamento entre árvores (3 níveis: 4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m), grupo de madeira (2 níveis: grupo I: cerne e grupo II: alburno) e temperatura de termorretilificação (2 níveis: 180 e 200°C). Este delineamento experimental resultou em 12 tratamentos com 5 repetições, resultando em um total de 60 observações.

Para avaliar a uniformidade da cor da madeira após a termorretilificação, foram consideradas as seguintes variáveis independentes: espaçamento entre árvores (3 níveis: 4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m) e temperatura de termorretilificação (2 níveis: 180 e 200°C). Este delineamento experimental resultou em 6 tratamentos com 5 repetições, resultando em um total de 30 observações.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físicas da madeira

3.1.1 Densidade da madeira antes e após a termorreificação

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a análise de variância das propriedades estudadas. Os resultados médios obtidos para a densidade aparente da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorreificação são apresentados na Tabela 3.

As análises estatísticas indicaram uma interação significativa entre espaçamento e grupo para a densidade antes do tratamento (DENS) (Tabela 2 e Figura 13). Ao compararmos os três espaçamentos, observa-se que a densidade da madeira de cerne (grupo I) não apresentou diferenças significativas. Entretanto, para o alburno, encontra-se uma diferença significativa entre a densidade da madeira do espaçamento mais adensado (4 x 2 m) e dos demais espaçamentos, apresentando o maior valor médio de densidade, $0,663 \text{ g.cm}^{-3}$ (Tabela 3).

Ao comparar a densidade da madeira do cerne (grupo I) com o alburno (grupo II), observa-se que ela apresenta um comportamento diferenciado somente no espaçamento mais adensado (4 x 2 m), com valores médios de $0,594 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,663 \text{ g.cm}^{-3}$ para cerne e alburno, respectivamente. Portanto, a madeira de alburno é mais densa que a madeira do cerne nesse espaçamento.

De acordo com a literatura, a madeira de teca adulta apresenta um valor médio de densidade próximo à $0,650 \text{ g.cm}^{-3}$ (LINCORN, 1986). Os valores médios de densidade encontrados neste estudo são inferiores, exceto para a madeira de alburno do espaçamento de 4 x 2 m. Esses resultados podem ser explicados pela idade das árvores de teca utilizadas neste estudo, as quais são consideradas jovens com 12 anos de idade, sendo, provavelmente, composta apenas por madeira juvenil.

Souza (2010) estudou a variação do comprimento de fibras, no sentido medula-casca para caracterizar a transição entre os lenhos juvenil e adulto na madeira de teca de 12 anos de idade provenientes do mesmo plantio e observou que o comprimento das fibras não se estabilizou, deduzindo-se que a madeira ainda não possuía lenho adulto. Entretanto, o autor observou diferenças significativas para o comprimento e a espessura de parede das fibras em função da posição radial, ou seja, ocorreu um aumento da espessura de parede na direção medula-casca. Os valores médios obtidos para o comprimento das fibras próximo à medula e à casca foram de $814,013 \mu\text{m}$ e $1177,430 \mu\text{m}$, respectivamente, enquanto que os valores médios obtidos para espessura de parede foram de $4,04 \mu\text{m}$ e $5,27 \mu\text{m}$, respectivamente.

Tabela 2. Análise de variância (valor de F) das propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorreificação.

Fonte de variação	Log ₁₀ DENS	Log ₁₀ DENS-termo	TUE	TUE-termo
Espaçamento	4,62*	3,98*	3,59*	0,46 ^{ns}
Grupo	16,84**	24,79**	1,92 ^{ns}	72,39**
Temperatura	-	0,009 ^{ns}	-	25,75**
Espaçamento x Grupo	4,72*	4,69*	10,69**	0,22 ^{ns}
Espaçamento x Temperatura	-	0,098 ^{ns}	-	1,59 ^{ns}
Grupo x Temperatura	-	0,911 ^{ns}	-	1,54 ^{ns}
Espaçamento x Grupo x Temperatura	-	2,99 ^{ns}	-	8,75**

* Significativo à 95% de probabilidade. ** Significativo à 99% de probabilidade. ^{ns} Não significativo

Tabela 3. Resultados obtidos para as análises estatísticas descritivas (média e desvio padrão) das propriedades físicas (densidade aparente e teor de umidade) da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorreificação.

Espaçamento (m)	Grupo	Temperatura (°C)	DENS (g.cm ⁻³)	Log ₁₀ DENS	DENS-termo (g.cm ⁻³)	Log ₁₀ DENS-termo	TUE (%)	TUE-termo (%)
4 x 2	I	Controle	0,594 (0,018)	-0,226 a	-	-	9,0 a (0,34)	-
		180	-	-	0,561 (0,012)	-0,251 a	-	4,9 cd (0,35)
		200	-	-	0,528 (0,019)	-0,277 a	-	3,3 a (0,41)
	II	Controle	0,663 (0,028)	-0,163 b	-	-	9,2 ab (0,81)	-
		180	-	-	0,644 (0,036)	-0,268 ab	-	5,1 d (0,34)
		200	-	-	0,682 (0,015)	-0,234 b	-	5,2 d (0,52)
5 x 2	I	Controle	0,575 (0,023)	-0,238 a	-	-	10,0 b (0,87)	-
		180	-	-	0,539 (0,013)	-0,268 a	-	4,1 c (0,15)
		200	-	-	0,520 (0,034)	-0,234 a	-	4,0 abc (0,46)
	II	Controle	0,605 (0,034)	-0,208 a	-	-	8,7 a (0,38)	-
		180	-	-	0,579 (0,042)	-0,240 ab	-	4,8 d (0,17)
		200	-	-	0,593 (0,044)	-0,234 ab	-	4,3 bcd (0,77)
6 x 2	I	Controle	0,616 (0,017)	-0,210 a	-	-	9,4 abc (0,38)	-
		180	-	-	0,555 (0,012)	-0,255 a	-	4,5 bcd (0,61)
		200	-	-	0,560 (0,018)	-0,245 a	-	4,1 bc (0,34)
	II	Controle	0,624 (0,050)	-0,207 a	-	-	9,8 bc (0,32)	-
		180	-	-	0,536 (0,028)	-0,232 ab	-	5,4 d (0,40)
		200	-	-	0,560 (0,055)	-0,249 a	-	4,6 bc (0,52)

I e II: cerne e alburno, respectivamente. DENS, DENS-termo: densidade aparente da madeira antes e após a termorreificação, respectivamente. TUE, TUE-termo: teor de umidade da madeira antes e após a termorreificação, respectivamente. Os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si segundo o teste de Tukey. As comparações entre as médias são feitas na mesma coluna.

Souza (2010) afirma ainda que o comprimento das fibras e a espessura de parede no espaçamento 6 x 2 m se diferiam do espaçamento 4 x 2 m e 5 x 2 m, sendo que nos plantios mais adensados, o volume de madeira produzido por unidade de área era menor, com fibras de menor comprimento e maior espessura de parede.

O efeito do espaçamento nos caracteres anatômicos da madeira de teca apresentados por Souza (2010) podem explicar a razão pela qual a madeira de alburno no espaçamento mais adensado (4 x 2 m) apresentou um valor maior para a densidade. A diferença entre cerne (próximo à porção mais interna do tronco) e alburno (próximo à casca) para o espaçamento 4 x 2 m, corroboram com os resultados obtidos por Garcia (2009), o qual observou um aumento da densidade no sentido radial (direção medula-casca).

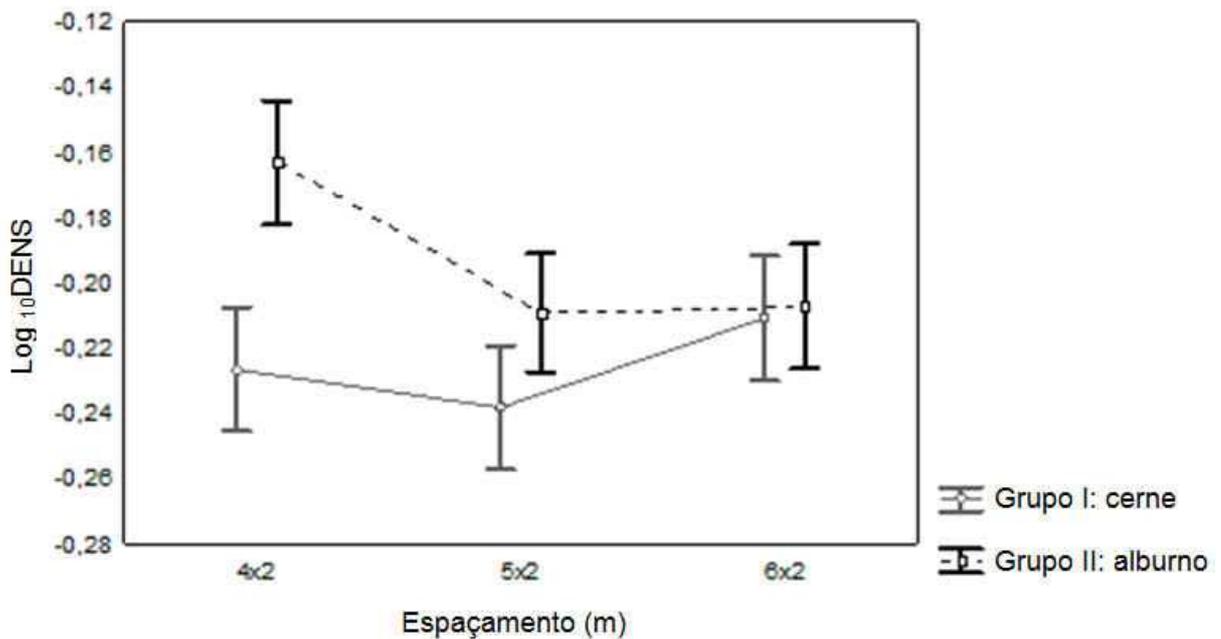


Figura 13. Interação entre espaçamento e grupo para a densidade da madeira de *Tectona grandis* antes da termorretificação (DENS).

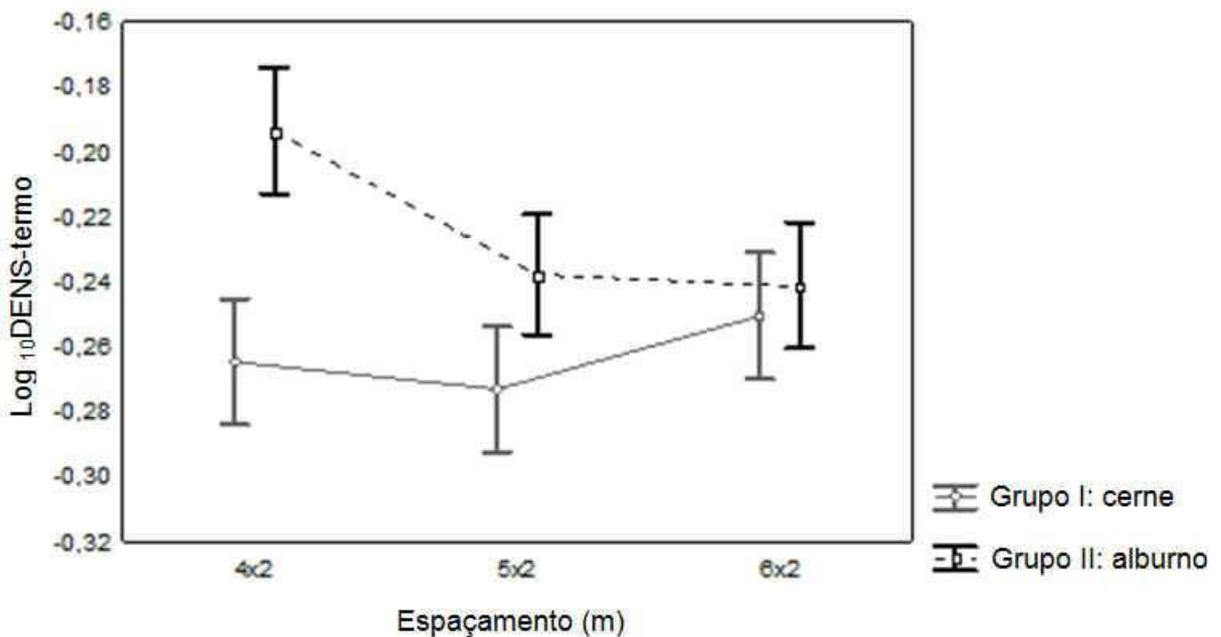


Figura 14. Interação entre espaçamento e grupo para a densidade da madeira de *Tectona grandis* após a termorretificação (DENS-termo).

Ao analisarmos a densidade da madeira de teca termorretificada (DENS-termo), verificamos notavelmente o decréscimo da densidade para ambos os grupos (cerne e alburno) quando comparada à densidade antes do tratamento (DENS) (Tabela 3), porém DENS-termo não foi afetada significativamente pela temperatura do tratamento (Tabela 2).

As análises estatísticas mostraram uma interação significativa entre espaçamento e grupo para a densidade após o tratamento (DENS-termo) (Tabela 2 e Figura 14). Quando comparamos os grupos, verificamos que a madeira de cerne apresentou um decréscimo médio de 8,67% na densidade após a termorretificação, enquanto que a madeira de alburno apresentou um decréscimo médio de 6%. Sendo assim, o cerne apresentou uma redução maior

de densidade em relação ao alburno após a termorreificação. Metsä-Kortelainen et al. (2005) encontraram uma perda semelhante para a densidade do cerne e do alburno de *Pinus sylvestris* quando submetido ao tratamento térmico à 210°C, com perdas de densidade de 6,9 e 6,7%, respectivamente. A maior redução da densidade na madeira do cerne pode ser explicada pelo maior teor de extrativos, os quais se volatilizam durante o tratamento, causando assim maiores perdas de peso.

3.1.2 Teor de umidade da madeira antes e após a termorreificação

Para o teor de umidade da madeira original (TUE), as análises estatísticas indicaram diferenças significativas entre os espaçamentos e uma interação significativa entre espaçamento e grupo (Tabela 2). A Figura 15 apresenta esta interação. Comparando os teores de umidade encontrados dentro dos espaçamentos, observa-se uma diferença significativa somente entre as madeiras de cerne e alburno do espaçamento de 5 x 2 m, sendo que o teor de umidade apresentou-se maior na madeira de cerne (grupo I). Comparando TUE do grupo I (cerne) entre os espaçamentos, observa-se diferenças significativas somente entre os espaçamentos de 4 x 2 m e 5 x 2 m; já para a madeira de alburno (grupo II), encontrou-se diferenças significativas entre os espaçamentos 5 x 2 m e 6 x 2 m (Tabela 3).

Após o tratamento térmico, o teor de umidade (TUE-termo) sofreu um decréscimo médio de 52,1%. As análises estatísticas indicaram uma interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para TUE-termo (Tabela 2 e Figura 16). Rousset et al. (2004) obtiveram resultados similares para a madeira de *Populus robusta* tratada à 200°C durante 1 hora, a qual apresentou reduções significativas entre 40 e 60%.

A madeira de cerne (grupo I) sofreu um decréscimo médio de 53,5% no teor de umidade após a termorreificação, sendo que a temperatura mostrou um efeito somente no espaçamento de 4 x 2 m, onde a temperatura de 180°C promoveu um decréscimo menor no TUE-termo que a temperatura de 200°C (Tabela 3). O teor de umidade da madeira tratada à 180°C apresentou um decréscimo de 46% comparado ao valor inicial, enquanto que à 200°C, o teor de umidade sofreu um decréscimo de 54%, sendo também o menor valor obtido para o teor de umidade (Tabela 3).

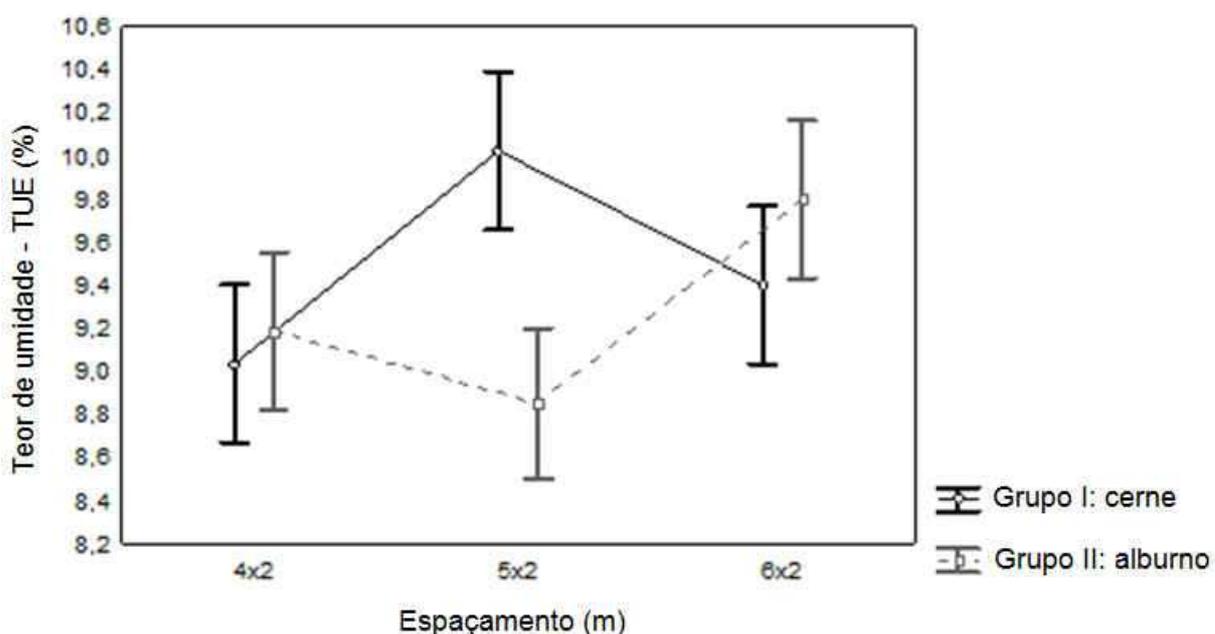


Figura 15. Interação entre espaçamento e grupo para o teor de umidade da madeira de *Tectona grandis* antes da termorreificação (TUE).

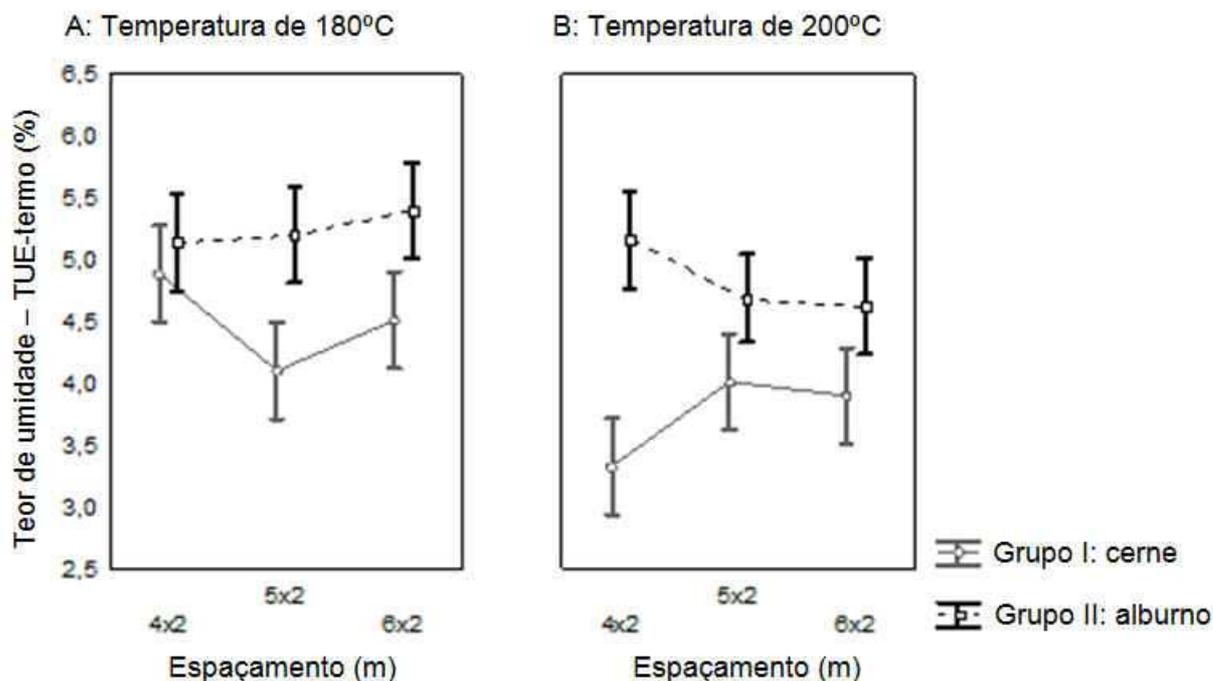


Figura 16. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para o teor de umidade da madeira de *Tectona grandis* após a termorreificação (TUE-termo).

Já a madeira de alburno (grupo II) sofreu um decréscimo médio de 47% no teor de umidade, sendo o efeito da temperatura significativo somente para o espaçamento de 6 x 2 m. Neste caso, o teor de umidade da madeira tratada à 180°C apresentou um decréscimo de 45%, enquanto que à 200°C, o teor de umidade da madeira foi reduzido em 54%. Esses resultados são similares aqueles relatados por Jämsä & Viitamäki (2001), os quais afirmam que as madeiras tratadas termicamente apresentam reduções de até 50% no teor de umidade de equilíbrio higroscópico, devido à diminuição dos sítios de adsorção (região amorfa) e à degradação parcial das hemiceluloses, as quais são os polímeros mais higroscópicos da parede celular.

Os resultados encontrados no presente estudo também são coerentes com a afirmação feita por Vernois (2001) de que as madeiras tratadas termicamente, em torno de 200°C, além de apresentarem higroscopicidade menor do que as não tratadas se estabilizaram em torno de 4-5% de umidade, em vez de 10-12%.

3.2 Cor da madeira antes e após a termorreificação

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises estatísticas das variáveis de cor com distribuição normal dos dados. Os resultados obtidos para as variáveis de cor da madeira antes e após os tratamentos termorreificadores são apresentados na Tabela 5.

Considerando os resultados obtidos neste estudo para a cor original da madeira de teca, o alburno está classificado no grupo branco acizentado, de acordo com a tabela proposta por Camargos (1999) devido ao alto valor encontrado para as coordenadas colorimétricas L* (72,01-75,80) e b* (20,03-22,09) e baixos valores encontrados para a coordenada a* (5,15-10,39) (Tabela 5). É importante observar que a cor amarela (b*) é determinante para a coloração final da madeira do alburno, pois se esta coordenada apresentasse valores superiores à 27 poderia ser classificada em outro grupo de cor, como amarelo-claro.

Tabela 4. Análise de variância (valor de F) para as variáveis de cor da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorreificação.

Fonte de variação	a*	a*-termo	b*	b*-termo	ΔL^* -termo	Δa^* -termo	Δb^* -termo	ΔE^*_{ab} -termo
Espaçamento	1,17 ^{ns}	0,86 ^{ns}	5,81**	2,36 ^{ns}	11,57**	5,46**	5,16**	8,64**
Grupo	415,19*	1,36 ^{ns}	141,97**	45,72**	162,60**	212,39**	0,0040 ^{ns}	172,29**
Temperatura	-	40,74**	-	216,85**	603,41**	25,92**	11,11**	523,28**
Espaçamento x Grupo	2,82 ^{ns}	3,22*	9,67**	4,47*	5,50**	0,60 ^{ns}	1,90 ^{ns}	4,28*
Espaçamento x Temperatura	-	6,28**	-	7,16**	4,07*	3,22*	10,47**	7,33**
Grupo x Temperatura	-	18,17**	-	126,24**	74,52**	3,63 ^{ns}	1,87 ^{ns}	72,35**
Espaçamento x Grupo x Temperatura	-	0,30 ^{ns}	-	4,00*	7,75**	6,23**	1,97 ^{ns}	6,67**

* Significativo à 95% de probabilidade. ** Significativo à 99% de probabilidade. ^{ns} Não significativo.

Tabela 5. Resultados obtidos para as análises estatísticas descritivas (média e desvio padrão) das variáveis de cor da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorreificação.

Espaça-Mento (m)	Grupo	Temperatura (°C)	L*	L*-termo	ΔL^* -termo	a*	a*-termo	Δa^* -termo	b*	b*-termo	Δb^* -termo	ΔE^*_{ab} -termo	
4 x 2	I	180	60,23 (3,78)	52,68 (3,32)	7,39 a (4,76)	8,65 a (1,21)	8,55 ab (0,80)	1,24 ab (0,74)	26,61 c (2,33)	21,99 c (1,97)	5,31 a (2,51)	9,73 a (4,87)	
		200		41,13 (1,24)	19,28 d (2,54)		10,26 bc (0,84)	1,97 bc (1,19)		19,70 bc (2,02)	6,55 ab (2,50)	20,58 e (3,04)	
	II	180	75,80 (5,31)	62,08 (3,64)	15,29 bc (4,33)	10,39 c (0,95)	9,52 de (0,76)	3,87 de (0,98)	20,12 a (2,72)	26,36 d (1,14)	5,68 c (1,56)	17,02 bcd (3,58)	
		200		42,94 (1,33)	32,57 ef (4,13)		9,99 e (1,36)	5,25 e (1,74)		18,95 b (3,12)	4,48 d (2,18)	33,42 fg (3,99)	
	5 x 2	I	180	60,75 (2,65)	49,76 (2,28)	11,26 ab (3,75)	8,65 a (0,82)	9,03 a (0,47)	0,49 a (0,29)	24,16 b (1,96)	21,44 bc (2,04)	3,58 ab (3,22)	11,97 a (4,56)
			200		40,21 (1,99)	20,28 d (3,31)		10,09 bc (0,89)	1,90 bc (0,66)		18,83 ab (2,10)	4,61 bc (2,57)	21,07 de (3,52)
II		180	75,46 (6,13)	62,40 (3,47)	12,14 ab (5,59)	5,56 d (1,40)	9,48 de (0,24)	3,22 cd (1,29)	22,09 a (2,01)	26,99 d (0,78)	4,89 d (1,570)	13,93 abc (473)	
		200		40,97 (2,05)	36,85 g (2,08)		8,94 cd (1,27)	4,17 de (1,47)		16,09 a (2,73)	4,09 e (3,04)	37,45 g (2,16)	
6 x 2		I	180	58,63 (4,29)	47,48 (3,42)	10,88 ab (3,19)	9,19 a (0,90)	8,05 bd (1,57)	2,27 bc (1,05)	23,8 b (2,53)	18,70 ab (4,15)	6,56 ab (92,83)	13,26 abc (3,08)
			200		41,36 (1,64)	17,54 cd (4,85)		10,13 ab (0,64)	1,40 ab (0,84)		20,00 bc (1,25)	2,75 bc (2,29)	17,89 cde (95,07)
	II	180	72,01 (4,78)	64,88 (3,32)	9,67 a (3,31)	5,15 b (1,45)	9,11 d (1,23)	3,76 d (1,70)	20,03 a (3,12)	27,35 d (1,46)	6,44 d (2,34)	12,41 ab (3,75)	
		200		40,74 (1,24)	28,74 e (5,24)		10,15 e (1,26)	5,22 e (1,60)		18,87 b (2,71)	3,31 e (2,15)	29,51 f (5,19)	

I e II: cerne e alburno, respectivamente. L*, L*-termo: luminosidade da madeira antes e após a termorreificação, respectivamente. a*, a*-termo: variável cromática no eixo verde-vermelho antes e após a termorreificação, respectivamente. b*, b*-termo: variável cromática no eixo azul-amarelo antes e após a termorreificação, respectivamente. ΔL^* -termo, Δa^* -termo, Δb^* -termo: variação das coordenadas L*, a* e b* após a termorreificação. ΔE^*_{ab} -termo: variação total da cor após a termorreificação. Os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si segundo o teste de Tukey.

Já a madeira original de cerne pode ser classificada no grupo das madeiras marrons (CAMARGOS, 1999). Os valores de a^* estão acima de 8, o que justifica o fato da coloração vermelha (a^*) se sobressair e caracterizar a cor marrom do cerne, apesar da coordenada b^* apresentar valores superiores à 15. Portanto a coordenada a^* define a cor do cerne e o classifica no grupo marrom-oliva, apresentando valores entre 8,65 e 9,19.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para as análises estatísticas da luminosidade antes e após a termorreificação (L^* e L^* -termo, respectivamente) considerando a média dos postos de Kruskal-Wallis, para determinar o efeito do espaçamento. A coordenada L^* apresentou um comportamento similar para os três espaçamentos, não havendo diferenças significativas entre eles, isto é, todos apresentam o mesmo padrão de luminosidade.

Através do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (valor de Z) foram observadas diferenças significativas entre cerne (grupo I) e alburno (grupo II) para a coordenada L^* , sendo que o ranking dos somatórios dos postos foi superior para o alburno quando comparado ao cerne com valores de 11870 e 4420, respectivamente ($Z = -10,65$, $p < 0,05$). Na Tabela 5, podemos observar que o cerne apresentou valores menores para a luminosidade (entre 58,63 e 60,23), quando comparado ao alburno (entre 72,01 e 75,46).

A variável L^* -termo também apresentou um comportamento similar para os três espaçamentos, não apresentando diferenças significativas entre eles (Tabela 6).

Tabela 6. Valores médios obtidos para a luminosidade da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorreificação.

Espaçamento (m)	L^*	L^* -termo
4 x 2	68,01 (97,93) a	23,36 (97,19) a
5 x 2	68,10 (95,95) a	23,12 (86,04) a
6 x 2	65,32 (77,63) a	21,91 (88,27) a
	NS	NS

L^* , L^* -termo: luminosidade antes e após a termorreificação, respectivamente. Os valores entre parêntesis referem-se as médias dos postos feitos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias dos postos com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si. NS: não significativo.

Nas Tabelas 7 e 8 estão, respectivamente, os resultados obtidos para as análises estatísticas de L^* -termo, considerando o ranking dos somatórios dos postos das temperaturas e dos grupos, assim como seus respectivos valores de Z de Wilcoxon-Mann-Whitney. Na Tabela 7, a coordenada L^* -termo apresentou diferenças significativas entre as temperaturas para ambos os grupos. Podemos afirmar ainda que para ambos os grupos, o ranking dos somatórios dos postos foi superior para o tratamento à 180°C, quando comparado ao tratamento à 200°C. Isso implica que ocorreu menor perda de luminosidade para as madeiras de cerne e alburno após o tratamento menos agressivo, enquanto que no tratamento mais agressivo a madeira tornou-se mais escura (menor valor de L^* -termo). Já na Tabela 8, a coordenada L^* -termo da madeira de cerne e alburno diferiram significativamente dentro do tratamento à 180°C, sendo que sob essa condição, a madeira de cerne sofreu um efeito maior em relação ao alburno, pois apresentou um menor valor para o ranking dos somatórios dos postos, isso quer dizer que a madeira de cerne escureceu mais que a madeira de alburno sob o tratamento menos agressivo (Tabela 8). Entretanto, sob o tratamento à 200°C, os valores dos rankings da coordenada L^* -termo das madeiras de cerne e alburno não apresentaram diferenças significativas. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 17.

Tabela 7. Resultados obtidos para os rankings dos somatórios dos postos e valores de Z da variável L*-termo da madeira de *Tectona grandis*, comparando as temperaturas dentro de cada grupo.

Grupo	Temperatura (°C)		Z	p
	180	200		
I	3015 a	1080 b	7,80*	0,000
II	3060 a	1035 b	8,17*	0,000

I e II: cerne e alburno, respectivamente. * Significativo à 95% de probabilidade pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Tabela 8. Resultados obtidos para os rankings dos somatórios dos postos e valores de Z da variável L*-termo da madeira de *Tectona grandis*, comparando os grupos dentro de cada temperatura.

Temperatura	Grupo		Z	p
	I	II		
180°C	1035 b	3060 a	-8,17*	0,000
200°C	1894 a	2201 a	-1,23 ^{ns}	0,215

I e II: cerne e alburno, respectivamente. * Significativo à 95% de probabilidade pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. ^{ns} Não significativo.

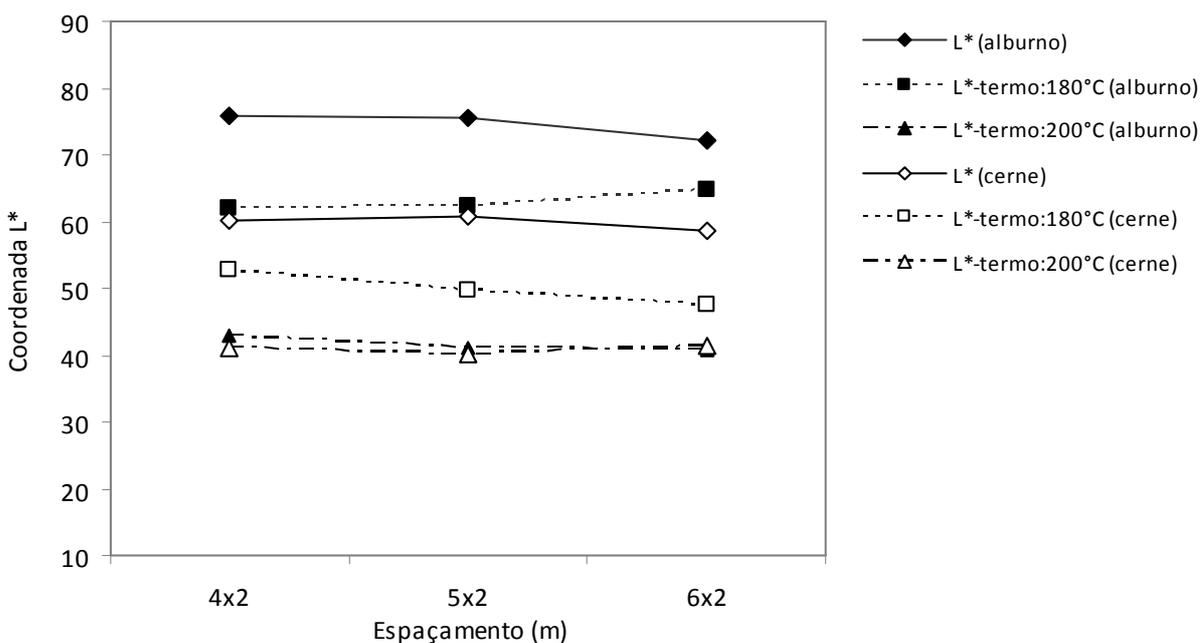


Figura 17. Coordenada L* (luminosidade) da madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis* antes e após a aplicação dos tratamentos termorretificadores.

Na Tabela 5 podemos observar a variação da coordenada L* após a termorretificação (ΔL^* -termo) em função dos espaçamentos, grupos e temperaturas. As análises estatísticas indicaram uma interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para ΔL^* -termo (Tabela 4).

A variável ΔL^* -termo obedeceu, para ambos os grupos, ao padrão relatado na literatura, ou seja, quanto maior a temperatura empregada por um tratamento térmico, maior a degradação provocada. Neste caso, à medida que os tratamentos tornaram-se mais agressivos, a madeira tornou-se mais escura, resultando em um maior ΔL^* -termo (Figura 18).

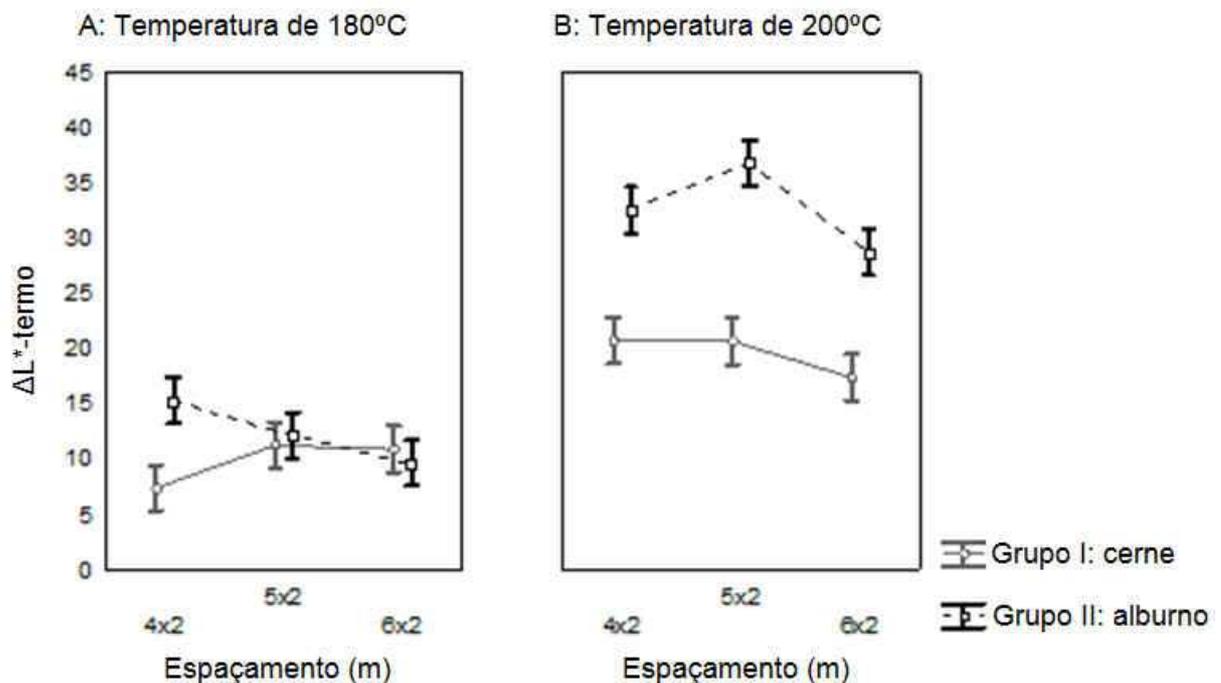


Figura 18. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a variação da luminosidade após a termorretificação (ΔL^* -termo) da madeira de *Tectona grandis*.

Estes resultados são similares aqueles encontrados por Gouveia (2008) que ao analisar o comportamento da cor da madeira de três espécies após a termoretificação à 150 e 200°C, verificou que à medida que o tratamento tornou-se mais agressivo as três espécies ficaram mais escuras. Estes resultados também corroboram com estudos realizados por outros autores (AHAJJI et al., 2009; ESTEVES, 2008). Segundo Ahajji et al. (2009), a alteração da cor original é causada pela modificação química dos grupos cromóforos responsáveis pela cor da madeira.

Para a madeira de cerne, ΔL^* -termo não apresentou diferenças significativas entre os espaçamentos, dentro da mesma temperatura (Tabela 5). Entretanto, para o alburno, o tratamento causou efeitos diferentes sobre ΔL^* -termo, dependendo do espaçamento. O alburno tratado à 180°C apresentou um comportamento diferente entre os espaçamentos de 4 x 2 m e 6 x 2 m, sendo que no espaçamento de 4 x 2 m, ΔL^* -termo foi maior (15,29) que no espaçamento de 6 x 2 m (9,67). Portanto, a madeira de alburno do espaçamento de 4 x 2 m escureceu mais após o tratamento à 180°C.

Para a temperatura de 200°C, a variável ΔL^* -termo do alburno do espaçamento de 5 x 2 m apresentou comportamento diferenciado dos demais espaçamentos, apresentando o maior valor (36,85), sendo assim as madeiras desse espaçamento escureceram bem mais após a termorretificação à 200°C (Tabela 5).

Ao analisarmos os grupos I e II dentro de cada espaçamento, verifica-se que no espaçamento de 4 x 2 m, ΔL^* -termo do alburno tratado à 180°C ou 200°C foi bem maior em relação a variação sofrida pelo cerne, portanto o alburno escureceu em maior proporção que o cerne em ambas temperaturas (Figura 18). Já nos espaçamentos de 5 x 2 m e 6 x 2 m, os valores de ΔL^* -termo do cerne e do alburno na temperatura de 180°C não apresentaram diferenças significativas, isto é, ambos escureceram na mesma intensidade. Entretanto, sob o tratamento de 200°C, ΔL^* -termo do alburno foi bem maior que a variação sofrida pelo cerne, sendo assim o tratamento à 200°C teve um efeito mais agressivo na variação de L^* do alburno e este sofreu um escurecimento maior.

Para a coordenada a^* , as análises estatísticas indicaram diferenças significativas entre os grupos (Tabela 4). O cerne apresentou um comportamento semelhante para os três espaçamentos, apresentando assim uma mesma intensidade de pigmento vermelho (a^*). Já para o alburno, a coordenada a^* apresentou um comportamento diferente entre os espaçamentos, sendo que o espaçamento mais adensado (4 x 2 m) apresentou o maior valor de a^* (10,39), podendo-se afirmar que o alburno nesse espaçamento tende a apresentar uma maior tonalidade vermelha (Figura 19).

Para a coordenada a^* -termo, foram observadas interações significativas entre espaçamento x grupo, espaçamento x temperatura e grupo x temperatura (Tabela 4). Para o cerne tratado à 180°C, a coordenada a^* -termo do espaçamento de 5 x 2 m foi diferente do espaçamento de 6 x 2 m, enquanto que para o tratamento à 200°C, não foram observadas diferenças significativas entre os espaçamentos.

Ao compararmos o comportamento da coordenada a^* -termo dentro dos grupos de cada espaçamento, podemos afirmar que no espaçamento mais adensado (4 x 2 m) a temperatura não teve efeito para ambos os grupos. A madeira do cerne apresentou uma maior formação de pigmento vermelho que o alburno, independente da temperatura do tratamento.

A coordenada a^* -termo do alburno do espaçamento de 5 x 2 m e do cerne do espaçamento de 6 x 2 m também não sofreu efeito da temperatura. O alburno apresentou uma maior tonalidade vermelha após os tratamentos termorretificadores, independentemente da temperatura, enquanto que o cerne apresentou um aumento na tonalidade vermelha quando tratado à 180°C e uma redução no vermelho quando tratado à 200°C.

A coordenada a^* -termo do cerne no espaçamento de 5 x 2 m e do alburno no espaçamento de 6 x 2 m sofreu efeito da temperatura sendo que, para ambos os casos, o tratamento mais agressivo apresentou uma maior tonalidade vermelha.

Esses resultados indicam que quanto mais agressivo for o tratamento de termorretificação, maior será a formação de pigmento vermelho na composição da cor da madeira, pois os valores de a^* -termo à 200°C tiveram um acréscimo médio de 33% quando comparado ao tratamento à 180°C.

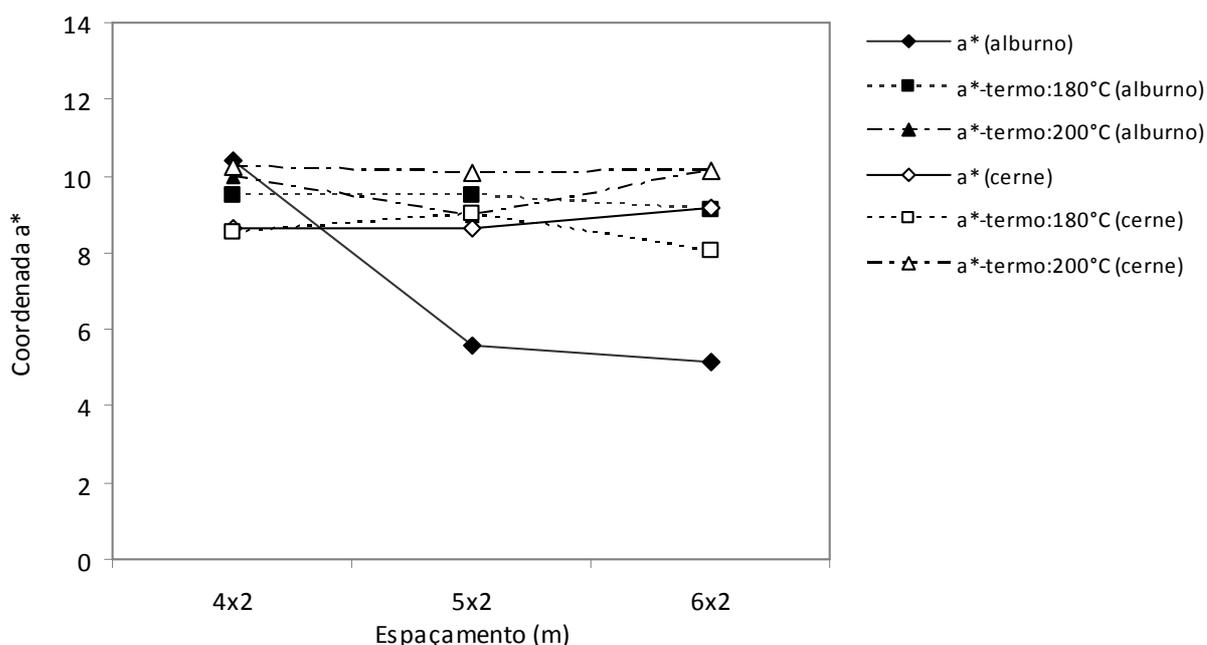


Figura 19. Coordenada a^* (vermelho) da madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis* antes e após a aplicação dos tratamentos termorretificadores.

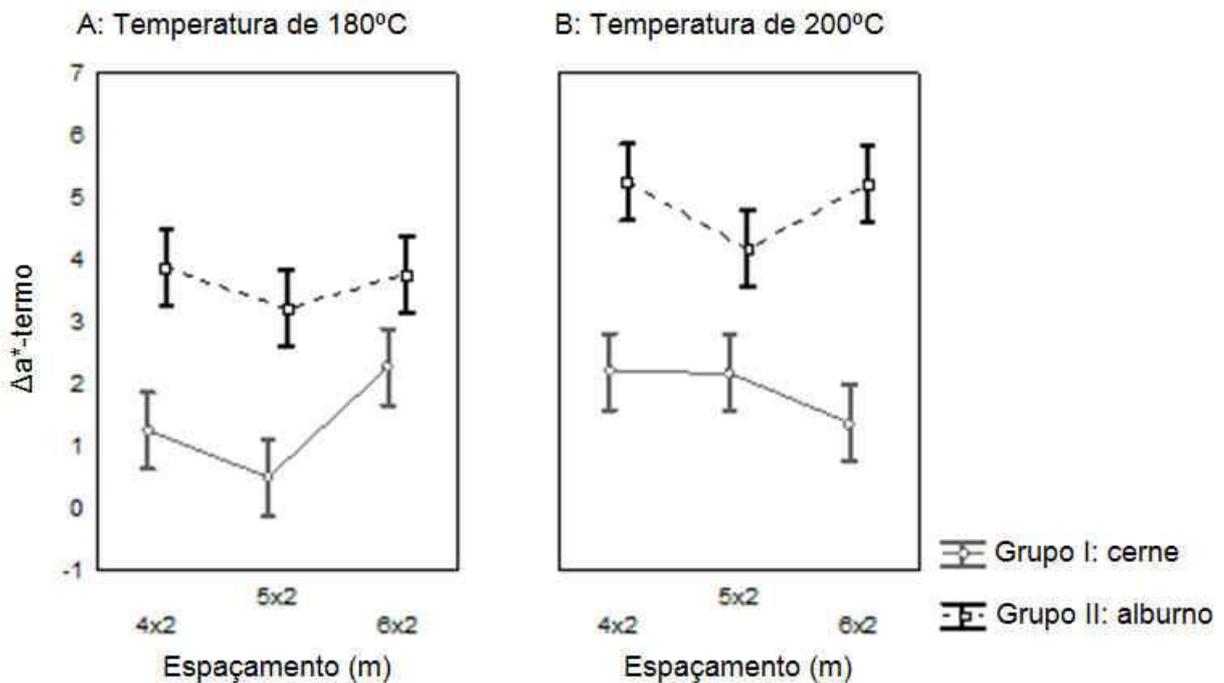


Figura 20. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a variação do pigmento vermelho após a termorretificação (Δa^* -termo) da madeira de *Tectona grandis*.

As análises estatísticas indicaram uma interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para Δa^* -termo (Tabela 4). A Figura 20 apresenta essa interação.

Para o cerne, Δa^* -termo aumentou ou diminuiu com a temperatura de termorretificação, dependendo do espaçamento, sendo que somente no espaçamento de 4 x 2 m, a temperatura não apresentou diferenças (Tabela 5). No espaçamento de 5 x 2 m, o aumento da temperatura de 180°C para 200°C causou um aumento em Δa^* -termo, enquanto que no espaçamento de 6 x 2 m, o aumento da temperatura de tratamento causou uma redução em Δa^* -termo.

Os maiores valores de Δa^* -termo foram encontrados para o alburno, sendo que nos espaçamentos de 4 x 2 m e 5 x 2 m, esta variável não foi afetada pela temperatura. Entretanto, no espaçamento de 6 x 2 m, o aumento da temperatura causou um aumento em Δa^* -termo (Figura 20).

As variações observadas no pigmento vermelho devem-se provavelmente à alteração dos teores de extrativos na madeira após a termorretificação. Poubel (2011) observou que a coordenada a^* da madeira de *Pinus caribaea* termorretificada à 180°C e 200°C durante 2 horas foi diretamente proporcional ao teor de extrativos. Segundo o Thermowood® Handbook (2003), o teor de extrativos da madeira aumenta quando o tratamento é realizado à temperaturas de até 180°C e diminui à temperaturas próximas à 230°C. Isso ocorre porque à baixas temperaturas há uma degradação dos compostos da madeira, principalmente hemiceluloses, enquanto que à altas temperaturas ocorre a volatilização dos extrativos.

Para a coordenada b^* , as análises estatísticas indicaram um efeito significativo do espaçamento e do grupo assim como uma interação entre esses fatores (Tabela 4). Para o alburno, a coordenada b^* apresentou um comportamento semelhante nos três espaçamentos, sendo assim, o alburno apresentou a mesma intensidade de pigmentação amarela, portanto a coordenada b^* não sofreu efeito do espaçamento. Entretanto, para o cerne, os valores de b^* apresentam um comportamento diferenciado em um dos espaçamentos, sendo que no espaçamento de 4 x 2 m, b^* foi maior (26,61) quando comparado aos demais espaçamentos

(24,16 e 23,80) para os espaçamentos de 5 x 2 m e 6 x 2 m, respectivamente. Portanto, o cerne do espaçamento de 4 x 2 m tende a ser mais claro que dos demais espaçamentos.

Para b*-termo, as análises estatísticas indicaram uma interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) (Tabela 4). A coordenada b*-termo do cerne apresentou um comportamento diferenciado entre os espaçamentos somente no tratamento à 180°C, onde o espaçamento de 4 x 2 m foi estatisticamente diferente do espaçamento de 6 x 2 m (Figura 21). O cerne do espaçamento de 4 x 2 m apresentou mais pigmentação amarela (21,99) que do espaçamento de 6 x 2 m (18,70), entretanto, em ambos os casos os valores médios de b*-termo foram inferiores aos valores de b* da madeira original (antes do tratamento) indicando perda de pigmento amarelo após a termorreificação. Após o tratamento à 200°C, o cerne perdeu pigmentação amarela na mesma intensidade para os três espaçamentos.

A coordenada b*-termo do alburno apresentou comportamentos diferentes em função da temperatura. Para o tratamento à 180°C, não foram observadas diferenças significativas entre os espaçamentos, ou seja, todos tiveram um ganho de mesma intensidade para o pigmento amarelo quando comparados aos valores de b* da madeira original. Já após o tratamento à 200°C, o alburno apresentou valores inferiores à b* da madeira original. Além disso, b*-termo do alburno do espaçamento de 5 x 2 m tratado à 200°C apresentou o menor valor (16,09) em comparação aos demais espaçamentos (Figura 21). O fato da pigmentação amarela do alburno aumentar e diminuir, dependendo da temperatura também foi observado por outros autores. Schnabel et al. (2007) observaram que o valor de b* aumentou lentamente para tratamentos de baixa intensidade e diminuiu para tratamentos em que foram aplicadas altas temperaturas. Estes resultados podem ser explicados pelas modificações químicas ocorridas à diferentes temperaturas.

Esses resultados mostram que quanto mais agressivo for o tratamento térmico menor será a tonalidade amarela na cor da madeira de teca, pois os valores de b*-termo tendem a diminuir. Este resultado corrobora com os resultados obtidos por Ahajji et al. (2009) em que o tratamento térmico ocasionou uma redução de b* para a madeira de faia (*Fagus sylvatica*).

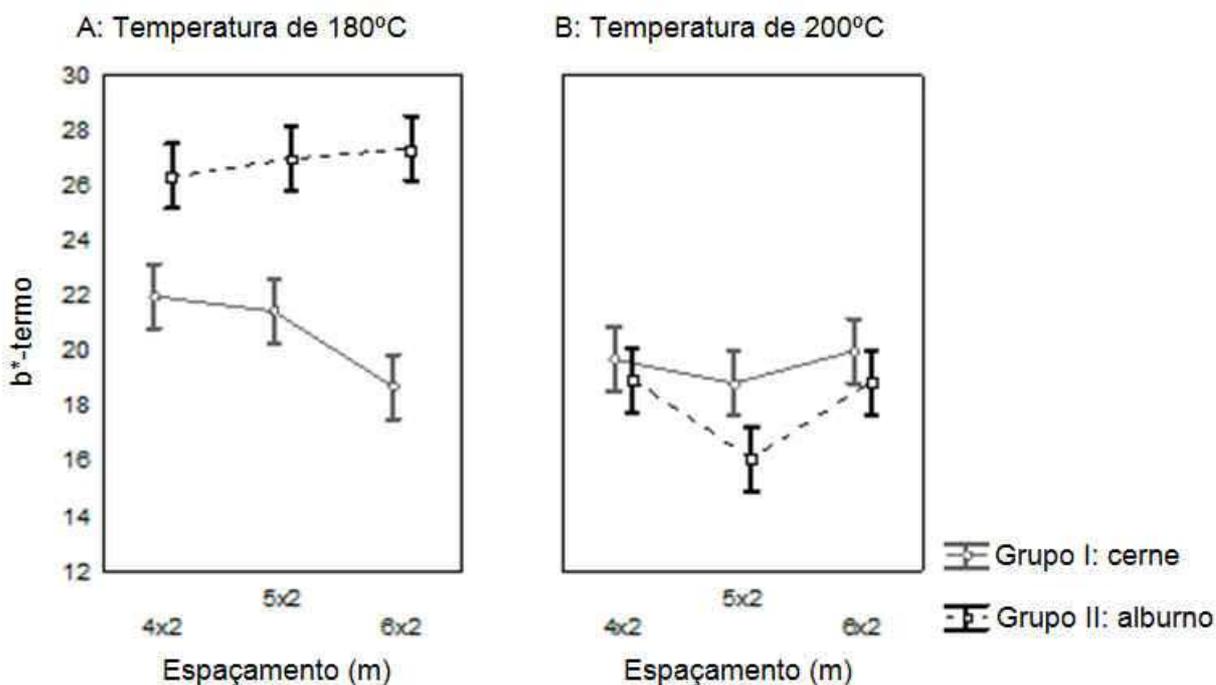


Figura 21. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a pigmento amarelo após a termorreificação (b*-termo) da madeira de *Tectona grandis*.

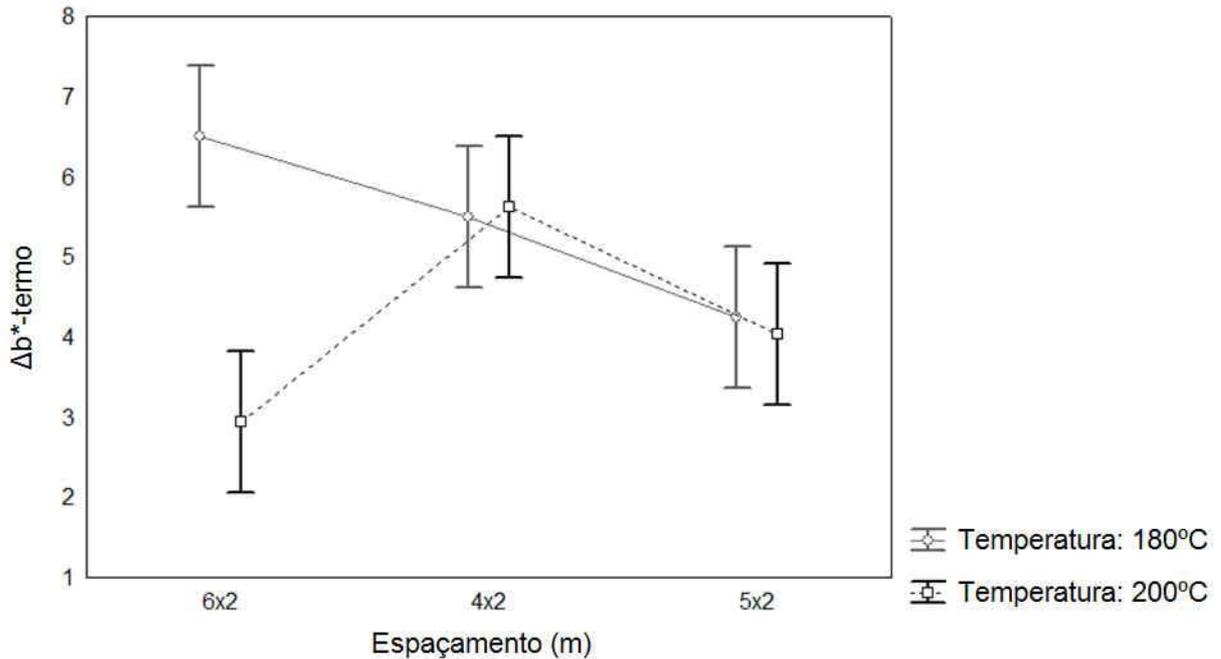


Figura 22. Interação entre espaçamento e temperatura para a variação do pigmento amarelo após a termorreificação (Δb^* -termo) da madeira de *Tectona grandis*.

Para a variável Δb^* -termo, as análises estatísticas indicaram um efeito significativo do espaçamento e da temperatura assim como uma interação entre esses fatores (Tabela 4). Esta interação pode ser visualizada na Figura 22.

Para a variável Δb^* -termo, não foram encontradas diferenças significativas entre as temperaturas para o cerne (Tabela 5). Entretanto, para o alburno, os valores de Δb^* -termo foram menores para o tratamento à 200°C quando comparados ao tratamento menos agressivo, ou seja, o alburno tratado à 180°C teve um ganho médio de 27,5% de pigmento amarelo enquanto que à 200°C houve uma perda do mesmo pigmento correspondente à 11,2%.

Avaliando a variação total da cor da madeira após os tratamentos termorreificadores (ΔE^*_{ab} -termo), encontrou-se uma interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) (Tabela 4).

Ao observarmos ΔE^*_{ab} -termo, é possível verificar que para o cerne não foram encontradas diferenças significativas entre os espaçamentos (Tabela 5). Entretanto, foram observadas diferenças significativas entre as temperaturas, onde ΔE^*_{ab} -termo foi maior na temperatura de 200°C (Figura 23).

Para o alburno tratado à 180°C, ΔE^*_{ab} -termo apresentou o mesmo comportamento para os três espaçamentos, não havendo diferenças significativas entre eles (Tabela 5). Entretanto, quando tratado à 200°C, ΔE^*_{ab} -termo do alburno foi diferente entre os espaçamentos de 5 x 2 m e 6 x 2 m, sendo que no espaçamento de 5 x 2 m, ΔE^*_{ab} -termo foi maior (37,45) que no espaçamento de 6 x 2 m (29,51) (Figura 23).

Ao analisarmos os valores de ΔE^*_{ab} -termo de cada grupo dentro de cada espaçamento, podemos afirmar que para o tratamento térmico mais agressivo, os valores apresentaram-se maiores devido à degradação da madeira sob temperaturas mais altas.

Podemos afirmar ainda que em média os tratamentos termorreificadores causaram uma efeito maior na alteração da cor do alburno que do cerne. O alburno apresentou uma alteração de cor média de 23,92% enquanto que o cerne foi de 15,73%.

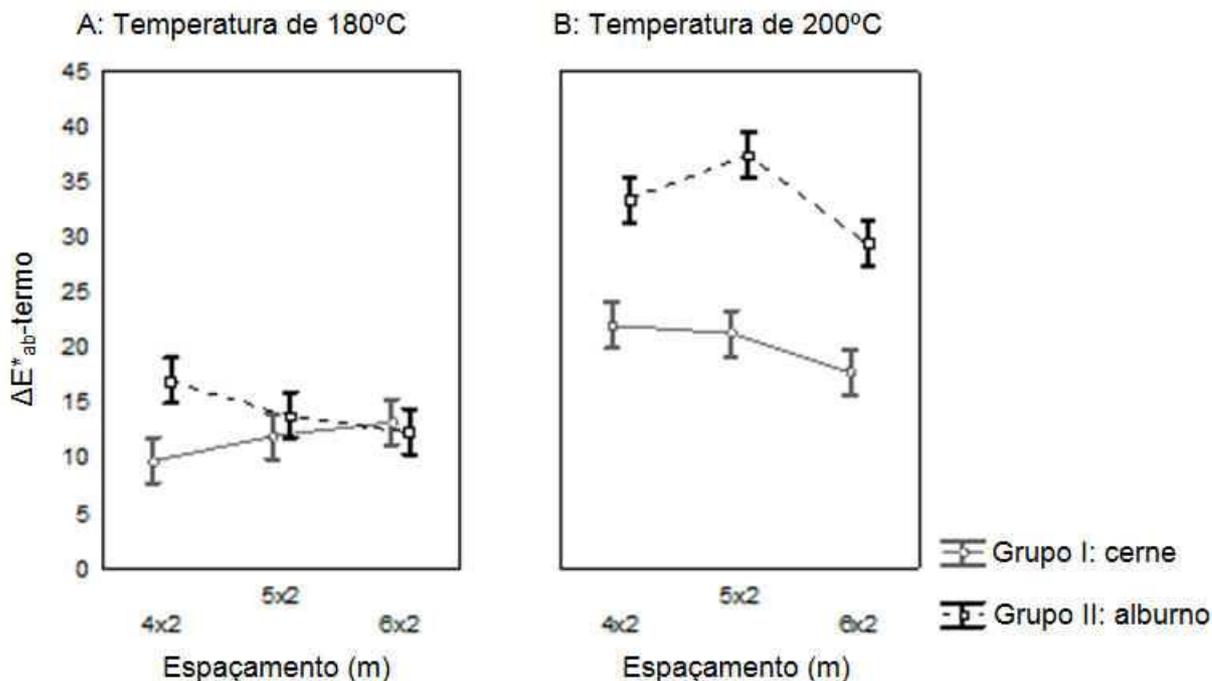


Figura 23. Interação tripla (espaçamento x grupo x temperatura) para a variação total da cor da madeira de *Tectona grandis* após a termorretificação ($\Delta E^*_{ab-termo}$).

Com a termorretificação, a cor da madeira é modificada adquirindo uma tonalidade mais escura que é muitas vezes justificada pela formação de produtos resultantes da degradação das hemiceluloses (SEHLSTEDT-PERSSON, 2003; SUNDQVIST, 2004) e dos extrativos que parecem participar na formação de cor da madeira tratada hidrotermicamente (MCDONALD et al., 1997; SUNDQVIST & MORÉN, 2002). A formação de produtos oxidantes, tais como quinonas é também referida como a razão para a mudança de cor (TJEERDSMA et al., 1998; MITSUI et al., 2001; BEKHAT & NIEMZ, 2003).

Gouveia (2008), através da técnica de reflectância difusa no infravermelho, observou o comportamento de componentes químicos de três espécies de folhosas tratadas termicamente, sob duas condições de temperatura (150 e 200°C) e tempo (1 e 2 horas) em pontos específicos do espectro. O autor verificou que as madeiras submetidas ao tratamento mais agressivo tiveram um aumento de 50% em suas ligações C=C presentes nos anéis aromáticos que representam o padrão de intensidade de lignina e extrativos, porém o tratamento provocou uma maior degradação de compostos como carbonilas ligadas ao anel benzênico. Todos os tratamentos apresentaram a formação de cromóforos, a qual foi relativamente maior no tratamento de maior temperatura e tempo.

O comportamento diferenciado na alteração da cor da madeira de cerne e alburno de teca após a aplicação de tratamentos termorretificadores pode se fundamentar na hipótese de que os grupos químicos que os compõem apresentam teor e/ou natureza distintos. Por isso poderão vir à apresentar maior ou menor resistência à ação do calor e, por seguinte, poderão vir a ter uma resposta diferenciada quanto à formação de novos compostos químicos.

Os resultados de variação de cor encontrados para a madeira de cerne de teca podem se assemelhar ao resultado obtido por Gouveia (2008) para a espécie de louro-vermelho, cuja madeira também é escura e classificada no grupo das madeiras marrons tal como o cerne da teca. Segundo Gouveia (2008) a madeira de louro-vermelho apresentou uma elevada formação de grupos cromóforos após o tratamento térmico mais agressivo, provavelmente devido ao alto teor de extrativos existente nessa espécie.

No entanto, Gouveia (2008) encontrou comportamento diferenciado para a madeira de marupá que, por sua vez, se assemelha à coloração da madeira de alburno de teca, e que apresentou uma resposta não significativa quanto à formação de grupos cromóforos após a termorretrificação, já que é uma madeira clara e possui baixo teor de extrativos, reduzindo a formação de cromóforos. O autor observou que para a madeira de marupá houve a formação de compostos aromáticos e a degradação de polioses.

O maior ou menor escurecimento do cerne e alburno na teca poderá ser eventualmente explicado pela volatilização de substâncias extrativas e, conseqüentemente, sua deposição na sua superfície, recomendando-se, portanto, a realização de estudos sobre as alterações químicas. Estes compostos podem vir a ser carregados pela água que é evaporada durante o tratamento térmico, migrando das camadas internas para a superfície da madeira, ou então pelo acréscimo de outros compostos como as ligações C=C em anéis aromáticos, relacionados aos extrativos, formação de polioses ou degradação de grupos como as polioses e hidroxilas.

Pelo que foi apresentado neste estudo, o espaçamento tem efeito sobre a formação da cor original da madeira de teca, ocorrendo variações entre os grupos I (cerne) e II (alburno). A variação da cor da madeira pode estar relacionada com as condições de crescimento, que influenciam diretamente na taxa de crescimento da árvore, sendo portanto necessário realizar um mapeamento interno nos sentidos medula-casca e base-topo da árvore bem como uma análise química da madeira.

Thulasiadas et al. (2006) estudando o comportamento das árvores de teca em regiões secas e úmidas, de crescimento lento e rápido, concluíram que a madeira de teca apresentou diferenças significativa em seus principais atributos de qualidade, tais como a cor da madeira.

Os extrativos apresentam uma estrutura heterogênea entre as espécies e um número altamente variável de componentes químicos. O ideal seria a realização de estudos específicos para cada espécie visando determinar seu efeito na alteração da cor da madeira termorretrificada. Além disso, os extrativos não se distribuem homogênea pela árvore aumentando em direção à medula e diminuindo em relação ao topo (LEPAGE et al., 1986). Da Costa (1975) afirma que os extrativos do cerne, formado em árvores jovens, são menos tóxicos ou menos abundantes que naqueles formados nas árvores maduras.

Marinomio (2011) estudando a madeira de teca proveniente de plantios de diferentes espaçamentos, concluiu que árvores de plantios menos densos (6 x 2 m) produziram madeiras de cerne e alburno mais densas e com maiores teores de extrativos. O autor também observou um maior teor de extrativos para o cerne quando comparado ao alburno. Oliveira (2011) encontrou uma diferença significativa entre as densidades da madeira de teca com e sem extrativos, com valores médios de 0,669 e 0,631 g.cm⁻³, respectivamente.

Marinomio (2011) observou que o teor de extrativos apresentou uma correlação significativa com a luminosidade (L*) e a coordenada cromática (a*), indicando que as madeiras mais escuras (menor L*) e com mais pigmento vermelho (a*) apresentam um maior teor de extrativos. Estes resultados são similares aqueles encontrados por Gierlinger et al. (2004). Estes autores também observaram que a cor vermelha (a*) e a luminosidade (L*) da madeira de *Larix decidua* Mill estava correlacionada com o teor de extrativos.

A mudança de cor pode ser altamente dependente da espécie, afirma Varga & Van Der Zee (2008) ao estudar o efeito do tratamento térmico sobre os parâmetros colorimétricos da madeira de *Robinia pseudoacacia* e *Intsia bijuga*. Esses autores encontraram uma importante mudança para as coordenadas L* e b* dessas espécies, as quais apresentaram numerosas substâncias solúveis que afetaram sua cor natural e seu comportamento durante o tratamento.

3.3 Uniformidade da cor da madeira após a termorreificação

Ao analisarmos os dados apresentados na Tabela 9, podemos afirmar que antes dos tratamentos termorreificadores a variação da luminosidade ($\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$) entre a madeira de cerne e alburno (grupo III) apresentou um comportamento similar para os três espaçamentos, com valores médios variando entre 13,27-15,84, não apresentando diferenças significativas entre os espaçamentos tal como apresentado na Tabela 10.

Entretanto, após os tratamentos termorreificadores, $\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ apresentou diferenças significativas entre os espaçamentos e as temperaturas assim como uma interação entre espaçamento e temperatura (Tabela 10). Nota-se que para os três espaçamentos, $\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ foi significativamente menor para o tratamento mais agressivo (200°C) quando comparado ao tratamento à 180°C. Para o tratamento à 180°C, $\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ ainda apresentou-se alto, com diferenças significativas entre os espaçamentos de 4 x 2 m e 6 x 2 m, cujos valores médios foram de 14,54 e 9,43, respectivamente (Tabela 9). Para o tratamento à 200°C, os valores médios de $\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ situaram-se entre 2,48 e 2,95, não havendo diferenças significativas entre os espaçamentos (Figura 24). Esses resultados indicam que as peças de madeira mescladas (contendo cerne e alburno) termorreificadas à 200°C apresentaram uma maior uniformidade em termos de luminosidade. Esse efeito deve-se, tal como discutido no item 3.2, ao fato da variação dos valores de L^* (ΔL^* -termo) do alburno (grupo II) sob as duas temperaturas ser bem maior em relação a variação sofrida pelo cerne (grupo I). Portanto, o alburno escureceu em maior proporção que o cerne em ambas as temperaturas. A Figura 25 mostra o aspecto mais uniforme das peças de madeira contendo cerne e alburno (grupo III).

Para a variável $\Delta a^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ antes do tratamento, as análises estatísticas indicaram diferenças significativas entre os espaçamentos de 5 x 2 m e 6 x 2 m, sendo que no espaçamento mais adensado essa variação foi menor (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9. Resultados obtidos para as análises estatísticas descritivas (média e desvio padrão) das variáveis utilizadas na avaliação da uniformidade da cor da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorreificação.

Espaçamento (m)	Temperatura (°C)	$\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$		$\Delta a^*_{\text{Cerne-Alburno}}$		$\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$		$\Delta E^*_{\text{abCerne-Alburno}}$	
		Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
4 x 2	180	14,97 a (3,96)	14,64 c (4,49)	5,73 ab (2,74)	0,89 a (0,72)	1,15 a (1,17)	4,46 ab (2,33)	16,46 a (3,65)	15,45 c (4,71)
	200		2,95 a (1,98)		1,4 a (1,48)		3,81 ab (3,46)		5,21 a (4,00)
5 x 2	180	15,84 a (3,94)	12,45 bc (4,72)	3,95 a (2,82)	1,11 a (0,72)	1,38 a (1,05)	5,65 b (2,65)	16,71 a (3,64)	13,99 bc (4,54)
	200		2,55 a (1,73)		1,66 a (1,26)		3,87 ab (2,89)		5,26 a (3,04)
6 x 2	180	13,27 a (4,89)	9,43 b (4,07)	6,01 b (2,52)	0,89 a (0,58)	0,84 a (0,72)	3,11 ab (1,71)	15,04 a (4,03)	10,12 b (4,12)
	200		2,48 a (2,87)		0,79 a (0,86)		1,99 a (1,60)		3,43 a (3,16)

$\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$, $\Delta a^*_{\text{Cerne-Alburno}}$, $\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$: variação das coordenadas L^* , a^* e b^* no interior da amostra do Grupo III. $\Delta E^*_{\text{abCerne-Alburno}}$: variação total da cor no interior da amostra do Grupo III. Médias com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si segundo o teste de Tukey.

Tabela 10. Resultados obtidos para a análise de variância (valor de F) das variáveis utilizadas na avaliação da uniformidade da cor da madeira de *Tectona grandis* antes e após a termorretificação.

Fonte de variação	$\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$		$\Delta a^*_{\text{Cerne-Alburno}}$		$\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$		$\Delta E^*_{\text{ab}_{\text{Cerne-Alburno}}}$	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
Espaçamento	2,77 ^{ns}	4,97*	418,15*	2,25 ^{ns}	2,21 ^{ns}	6,08*	1,75 ^{ns}	6,70*
Temperatura	-	167,18*	-	2,41 ^{ns}	-	4,90*	-	103,87*
Espaçamento x Temperatura	-	3,54*	-	1,00 ^{ns}	-	0,68 ^{ns}	-	0,23 ^{ns}

* Significativo a 95% de probabilidade. ^{ns} Não significativo.

Ao observar os valores de $\Delta a^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ após a termorretificação, podemos afirmar que essa variação apresentou-se bem menor, com valores entre 0,79 e 1,66, contribuindo para uma maior uniformidade da cor entre cerne e alburno dentro da peça. Pelo que já foi discutido no item 3.2, ambos os tratamentos provocaram um aumento na formação do pigmento vermelho nas madeiras de cerne e alburno, fato este que pode levar ao escurecimento de ambos e tornar a cor dentro da peça mais uniforme.

A variável $\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ antes do tratamento apresentou um comportamento semelhante para os três espaçamentos, não apresentando diferenças significativas entre eles (Tabela 10).

Podemos afirmar ainda que, após os tratamentos termorretificadores, ocorreu um aumento da variação do pigmento amarelo ($\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$) (Tabela 9). As análises estatísticas indicaram diferenças significativas entre os espaçamentos e entre as temperaturas para a variável $\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ (Tabela 10). A variável $\Delta b^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ se diferenciou entre o tratamento à 180°C do espaçamento de 5 x 2 m e o tratamento à 200°C do espaçamento de 6 x 2 m, sendo que este último apresentou o menor valor (1,99).

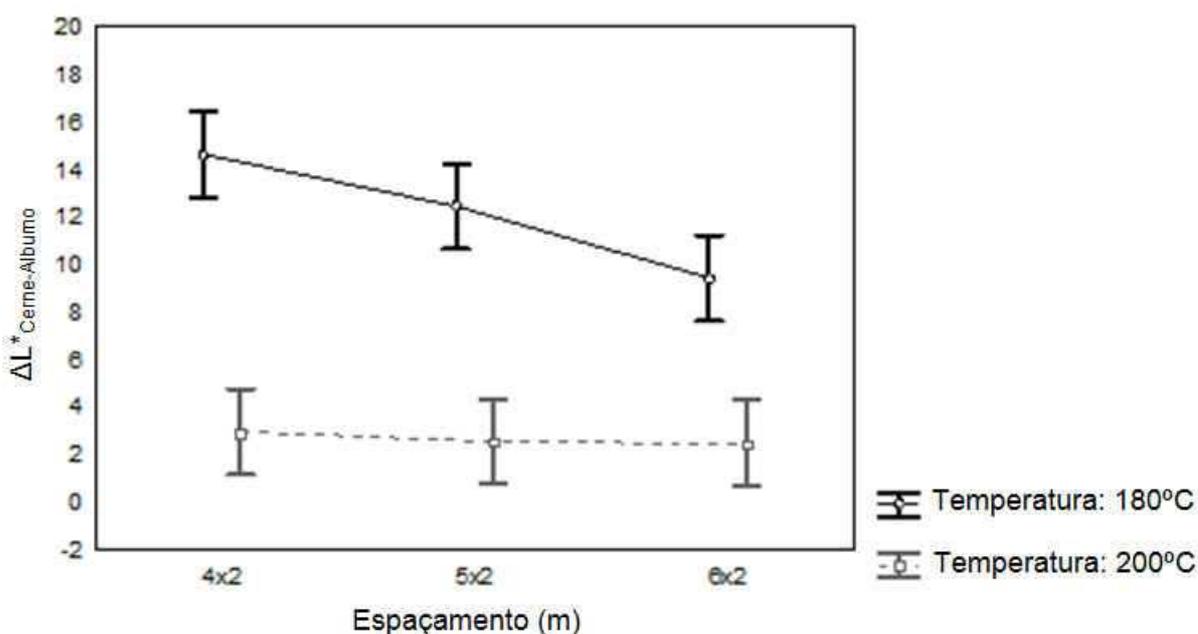


Figura 24. Interação entre espaçamento e temperatura para $\Delta L^*_{\text{Cerne-Alburno}}$ da madeira de *Tectona grandis* após a termorretificação.



Figura 25. Uniformidade da cor da madeira de *Tectona grandis*, contendo cerne e alburno (grupo III) após os tratamentos termorretificadores. (A) Madeira original. (B) Madeira tratada à 180°C. (C) Madeira tratada à 200°C.

Ao analisarmos a variação total da cor entre a madeira de cerne e alburno ($\Delta E^*_{ab_{\text{Cerne-Alburno}}}$) antes da termorretificação, podemos afirmar que a madeira de teca apresentou um comportamento semelhante para os três espaçamentos, não apresentando diferenças significativas entre eles (Tabelas 9 e 10).

Para as madeiras termorretificadas, a variável $\Delta E^*_{ab_{\text{Cerne-Alburno}}}$ apresentou diferenças significativas entre os espaçamentos e as temperaturas de termorretificação (Tabela 10). Como pode ser observado na Tabela 9, os espaçamentos de 4 x 2 m e 6 x 2 m foram significativamente diferentes entre si mas somente para as madeiras tratadas à 180°C, sendo que a uniformidade entre cerne e alburno foi relativamente maior no espaçamento menos adensado. Isso porque, quanto menor o valor de $\Delta E^*_{ab_{\text{Cerne-Alburno}}}$ maior é a uniformidade no interior da peça de madeira.

Os valores de $\Delta E^*_{ab_{\text{Cerne-Alburno}}}$ para o tratamento à 200°C (entre 3,43 e 5,21) foram significativamente inferiores aos valores encontrados para o tratamento à 180°C (entre 10,12 e 15,45) para todos os espaçamentos. Isso quer dizer que $\Delta E^*_{ab_{\text{Cerne-Alburno}}}$ para o tratamento mais agressivo foi mais eficiente para uniformizar a cor das peças (Figura 25).

Estes resultados corroboram com aqueles encontrados por Esteves et al. (2008) em que a cor da madeira de *Pinus pinaster* após o tratamento menos agressivo foi menos uniforme devido ao maior contraste entre lenho inicial e lenho tardio, sendo a cor das amostras dependente da razão entre os lenhos inicial/tardio na superfície da amostra.

O tratamento termorretificador menos agressivo (180°C), apesar de não atingir a perfeita uniformidade da cor no interior da peça (Figura 25), proporcionou ao alburno uma coloração mais escura tornando o contraste entre cerne e alburno menos evidente em relação à madeira não tratada. Portanto, este pode ser um tratamento viável para atender aos consumidores que apreciem a madeira de teca com uma certa uniformidade de cor mas não tão escuras.

A alteração da cor original pode agregar maior valor ao produto final. Em países da Europa e América do Norte, o tratamento têm sido aplicado em madeiras de cores claras e de menor valor comercial tais como *Pinus* spp e *Picea* spp visando a obtenção de produtos de

maior valor agregado. De acordo com Bekhta & Niemz (2003), Mitsui et al. (2001) e Mitsui (2006), a madeira termorretificada apresenta uma vantagem estética, já que esta adquire uma cor similar às madeiras tropicais, sendo, portanto, apreciada para inúmeras aplicações.

Embora o mercado nórdico aprecie madeiras de tons claros, em muitos outros mercados são preferidas cores mais escuras as quais estão associadas à preços mais elevados - por exemplo, em Portugal, a madeira de *Pinus* sp. é escurecida para a produção de móveis de alta qualidade.

Além da maior uniformidade da cor, a madeira termorretificada de teca pode apresentar melhorias em outras propriedades (ex.: maior durabilidade do alburno), sendo assim, a hipótese é que a variação de cor induzida pelo calor destas madeiras poderiam melhorar o seu valor para aplicações de alta qualidade.

A importância em estudar a uniformidade da cor da madeira de teca pode se basear em outros trabalhos realizados com outras espécies em busca de uma melhor estética. Neste caso apresentamos a madeira de *Robinia pseudoacacia*, espécie extremamente heterogênea, cujos estudos investigaram a mudança e a uniformidade da cor visando chegar à uma textura com maior aceitação no mercado (TOLVAJ et al., 2000, TOLVAJ et al., 2002).

Assim como o presente estudo buscou uma maior uniformidade dentro da peça da madeira de teca através da termorretificação, espécies como a faia (*Fagus sylvatica*) também foram submetidas ao mesmo tipo de processo para escurecer e homogeneizar sua cor e torná-la mais desejável para o mercado moveleiro (TOLVAJ et al.; 2002, TOLVAJ & MOLNÁR, 2006).

A madeira contém compostos químicos como o tanino que torna possível não só a mudança de cor como também a homogeneidade artificial da cor natural da madeira através da aplicação de produtos químicos (MILLER et al., 1985, MITSUI & TOLVAJ, 2005) e de tratamentos térmicos (MITSUI, 2006; AYADI et al., 2003). Entretanto, a termorretificação têm a vantagem de não utilizar produtos químicos nocivos ao meio ambiente, sendo portanto um tratamento ecologicamente mais correto.

4 CONCLUSÕES

O espaçamento afetou as propriedades físicas da madeira de teca após a termorretificação assim como a cor original da madeira de teca, antes e após a termorretificação.

Após a termorretificação, as madeiras de cerne e alburno sofreram decréscimo no teor de umidade de equilíbrio sendo que o aumento da temperatura tornou esse efeito mais pronunciado.

O aumento da temperatura de termorretificação teve um efeito crescente na alteração da cor da madeira de teca.

Os tratamentos termorretificadores causaram um efeito maior na alteração da cor da madeira do alburno em relação à madeira do cerne.

Os tratamentos termorretificadores proporcionaram uma maior uniformidade às peças de madeira contendo cerne e alburno, sendo o tratamento à 200°C o mais efetivo. Portanto, a termorretificação pode ser considerada como um método promissor para a obtenção de produtos de maior valor agregado.

CAPÍTULO II

ESTABILIDADE DA COR DA MADEIRA TERMORRETIFICADA DE *Tectona grandis* L. f. APÓS O ENVELHECIMENTO ACELERADO

RESUMO

A madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.) apresenta descoloração quando exposta à radiação ultravioleta (UV), o que pode depreciar o material ao longo do tempo. Em algumas madeiras, a termorretificação pode melhorar a estabilidade da cor à radiação UV. Desta forma, este estudo teve como objetivo determinar a estabilidade da cor da madeira termorretificada de *Tectona grandis* após exposição à radiação UV em condições de envelhecimento acelerado. Foram utilizadas nove árvores provenientes de três diferentes espaçamentos (4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m), sendo três árvores para cada espaçamento. Amostras de 150 x 75 x 20 mm foram produzidas e divididas em dois grupos: grupo I: amostras com predominância de madeira de cerne ($\geq 75\%$ de cerne em relação ao alburno) e grupo II: amostras com 100% de madeira de alburno. As amostras foram termorretificadas em um forno mufla elétrico laboratorial, da marca Linn Elektro Therm sob duas condições de temperatura: 180 e 200°C. As medições de cor foram realizadas com o espectrofotômetro portátil CM 2600d no espaço CIE-L*a*b*. O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado em uma câmara QUV/Spray da Q-Lab equipada com 8 lâmpadas UVA-340. O ciclo total de exposição à radiação UV foi de 168 horas à 340 nm. As medições de cor foram realizadas à cada 42 horas, sendo efetuadas duas medições ao longo do comprimento das amostras, isto é, à 25% e 50% do comprimento total, na face tangencial. O espaçamento não teve efeito na alteração da cor da madeira após a radiação UV. A madeira não tratada de alburno sofreu alterações mais bruscas de cor após a radiação UV quando comparada à madeira não tratada de cerne. Entretanto, após a termorretificação, o cerne sofreu alterações de cor maiores que o alburno com o envelhecimento. Ambos os tratamentos termorretificadores proporcionaram uma maior estabilidade à cor do alburno quando envelhecida. O tratamento à 180°C proporcionou uma maior estabilidade à cor da madeira do alburno de teca quando exposta à radiação UV.

Palavras-chave: radiação ultravioleta, sistema CIE-L*a*b*, termorretificação.

ABSTRACT

The teak wood (*Tectona grandis* L. f.) has discoloration when exposed to ultraviolet (UV) radiation, which depreciates the material over time. In some wood species, heat treatments can improve the color stability of the wood at UV radiation. Thus, the objective of this study was to determine the color stability of heat-treated teak wood after UV radiation in accelerated aging conditions. Nine trees from three different levels of spacing (4 x 2 m, 5 x 2 m and 6 x 2 m) were used, with three trees per spacing. Samples of 150 x 75 x 20 mm were produced and divided into two groups: group I: samples with a predominance of heartwood ($\geq 75\%$ heartwood in relation to sapwood) and group II: samples with 100% of sapwood. Samples were heat-treated in a laboratorial electric oven from Linn Elektro Therm under two temperatures: 180 and 200°C. Color measurements were performed using the portable spectrophotometer CM 2600d in the CIE-L*a*b* space. The accelerated aging test was performed in a QUV/Spray from Q-Lab chamber equipped with eight UVA-340 lamps. The total cycle of exposure to UV radiation was 168 hours at 340 nm. Color measurements were taken every 42 hours, which were made along the length of the sample, i.e., at 25% and 50% of the total length in the tangential face. The spacing had no effect on color change after UV radiation. The color change of untreated sapwood after UV radiation was higher than untreated heartwood. However, after heat treatment, heartwood had higher color change than sapwood with aging. Both heat treatments provided a higher color stability to sapwood. The treatment at 180°C provided a higher color stability to teak sapwood after UV radiation.

Key words: ultraviolet radiation, CIE-L*a*b* system, heat treatment.

1 INTRODUÇÃO

A exposição da madeira em ambientes internos ou externos, principalmente nos externos, torna-a suscetível a uma série de condições que comprometam sua durabilidade natural e permitem sua degradação natural. Os principais fatores que contribuem para a degradação natural da madeira são umidade, luz solar, calor/frio e abrasão causada pelo vento e outros materiais, que podem atuar isoladamente ou de forma combinada.

A madeira, quando exposta à luz, absorve intensamente a radiação solar e sofre uma degradação fotoquímica devido à ação dos raios ultravioletas (UV) que comprometem o seu aspecto estético, tornando-se descolorada ou acinzentada, amarelada ou escurecida, dependendo da influência da sua composição química, principalmente dos extrativos (CHANG et al., 1982; FEIST, 1983; AYADI et al., 2003). Esse processo é chamado de fotooxidação ou degradação fotoquímica da superfície (fotodegradação).

No processo de fotodegradação da madeira, o primeiro fenômeno observado é a alteração da cor, seguida da perda de fibras e erosão das superfícies. O processo de erosão é lento e depende de vários fatores tais como densidade, proporção de lenho inicial e tardio, entre outros (WILLIAMS, 2005). A fotodegradação da madeira é um fenômeno superficial já que a grande quantidade de sistemas ou grupos cromóforos dos componentes distribuídos na superfície da madeira impedem a entrada de luz. Apesar da luz visível penetrar à uma profundidade maior (200 μm) que a luz UV (75 μm) na madeira, sua energia (inferior à 70 Kcal.mol^{-1}) é insuficiente para romper as ligações químicas dos constituintes da madeira, sendo portanto, a radiação UV mais danosa ao uso da madeira (HON, 2001).

As alterações na cor da madeira exposta à radiação UV está associada às mudanças químicas nos seus constituintes. A celulose apresenta uma resistência à oxidação fotoquímica enquanto que a lignina é o componente mais susceptível, sofrendo alterações estruturais na presença de luz UV para gerar grupos cromóforos (HON, 2001). A mudança de cor da madeira pela ação da luz está relacionada à produção de quinonas (extrativos que alteram a cor da madeira) e tem início após a degradação da lignina por oxidação. Desta forma, as madeiras de folhosas são consideradas mais resistentes à alteração da cor do que as madeiras de coníferas por apresentarem menores teores de lignina (MITSUI & TSUCHIKAWA, 2005).

As madeiras, quando utilizadas em aplicações externas, devem atender à algumas exigências em termos de qualidade, já que estão sujeitas à ação de fatores (ex.: intempéries, fungos, etc.) que podem ocasionar perdas físicas, mecânicas e estéticas ao material. Portanto, a madeira deve apresentar alta estabilidade dimensional, boa durabilidade natural e características estéticas atrativas.

A madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.) apresenta todos esses atributos de qualidade, sendo portanto uma espécie desejável para a fabricação de produtos com aplicação externa. O cerne da madeira de teca, de cor marrom, apresenta boa estabilidade dimensional e alta durabilidade natural devido a presença de duas substâncias: o caucho, espécie de látex responsável pela redução da absorção de água; e a tectoquinona, um preservativo natural contido nas células da madeira. O alborno, de cor clara, apresenta propriedades similares ao cerne, entretanto, apresenta menor durabilidade, sendo necessária a utilização de tratamentos preservativos.

Apesar das excelentes propriedades físicas e mecânicas da madeira de teca, ela apresenta alterações importantes na cor quando exposta às intempéries, principalmente sob a ação da radiação UV. Segundo George et al. (2004), é visualmente perceptível a alteração da cor da madeira de teca quando exposta à radiação UV e o contraste de cor entre cerne e alborno é ainda maior com o envelhecimento da madeira.

Estudos recentes tem demonstrado que o tratamento de termorretificação pode proporcionar uma maior estabilidade à cor da madeira quando exposta à radiação UV

(VERNOIS, 2001; GOUVEIA, 2008), além de agregar maior durabilidade e estabilidade dimensional à madeira. No caso da madeira de teca, o tratamento pode ser uma alternativa para melhorar a durabilidade do alburno, uniformizar a cor entre cerne e alburno e proporcionar uma cor mais estável quando exposta à radiação UV, agregando assim maior valor ao produto final e aumentando sua competitividade no mercado.

Neste contexto, o objetivo principal deste estudo foi avaliar a estabilidade da cor da madeira termorretificada de *Tectona grandis* L. f. à radiação ultravioleta em condições de envelhecimento acelerado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material e tratamento de termorretificação

Árvores de teca (*Tectona grandis* L. f.) com 12 anos de idade foram obtidas de um plantio localizado na área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso, localizado em Cáceres, Mato Grosso. Foram selecionadas nove árvores provenientes de três diferentes espaçamentos: 4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m, sendo três árvores para cada espaçamento.

À partir das toras, foram obtidas amostras de 150 x 75 x 20 mm (comprimento x largura x espessura), as quais foram divididas em dois grupos: grupo I, com predominância de madeira do cerne ($\geq 75\%$ de madeira de cerne em relação ao alburno); e grupo II, com 100% de madeira do alburno. As amostras foram secas ao ar livre e em seguida acondicionadas em câmara climática à 20°C e 65% de umidade relativa até atingir teor de umidade de equilíbrio.

O tratamento de termorretificação foi realizado em um forno mufla elétrico laboratorial, da marca Linn Elektro Therm, com dimensões de 600 x 600 x 700 mm equipado com um sistema de controle de temperatura e tempo. O tratamento foi realizado em quatro etapas, sendo selecionadas duas diferentes temperaturas de termorretificação: 180 e 200°C. As quatro etapas do tratamento foram: 1) aquecimento do material até 100°C: período corresponde à 2 horas; 2) aumento da temperatura de 100°C até a temperatura final de termorretificação (180 e 200°C): período correspondente à 30 minutos; 3) tempo de tratamento na temperatura de termorretificação: 2 horas e 30 minutos; e 4) resfriamento do material durante aproximadamente 1 hora. O teor de umidade inicial das amostras foi de aproximadamente 8-10%.

Após o tratamento, as amostras foram reacondicionadas em câmara climática à 20°C e 65% de umidade relativa até atingir o teor de umidade de equilíbrio para as análises colorimétricas e os ensaios de envelhecimento acelerado.

2.2 Ensaio de envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado em uma câmara QUV Weathering Testers, marca Q-Lab, modelo QUV/Spray adaptada com 8 lâmpadas UVA, as quais simulam a luz solar em uma faixa de comprimento de onda de 295 à 365 nm, com picos de emissão à 340 nm (Figura 26 A). O ciclo total de exposição à radiação UV foi de 168 horas à 0,68 W/m² com emissões de radiação no comprimento de onda de 340 nm, sendo realizadas medições de cor à cada 42 horas. As condições e o tempo de exposição foram determinados de acordo com as especificações do equipamento utilizado e baseado em estudos realizados por outros autores (AYADI et al., 2003; GOUVEIA, 2008; MARTINS et al., 2011; COSTA et al., 2011). De acordo com Chang & Chang (2001) citado por Gouveia (2008), 84 horas de exposição à 350 nm correspondem à um ano de exposição em ambiente interno.

Antes da exposição à radiação UV, as amostras foram polidas com uma sequência de lixas de granulometria 80, 150 e 200, respectivamente, e em seguida, armazenadas em sacos plásticos e mantidas ao abrigo da luz ambiente visando manter as condições de recém-polimento e de umidade.

Durante o ensaio de envelhecimento, as amostras foram dispostas verticalmente, com uma das faces exposta às lâmpadas UVA-340 (Figuras 26B-G).



Figura 26. Ensaio de envelhecimento acelerado. (A) Câmara de envelhecimento acelerado QUV, marca Q-Lab, modelo QUV/Spray. (B) Disposição das amostras de madeira na câmara de envelhecimento. (C)-(F) Fixação das amostras de madeiras no porta amostra. (G) Posicionamento das amostras com relação às lâmpadas UVA-340.

2.3 Análises colorimétricas

As análises colorimétricas foram realizadas no espaço de cor CIE- $L^*a^*b^*$, antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado, com o auxílio do espectrofotômetro portátil CM 2600d, versão 1.41, da Konica Minolta Sensing, Inc., com diâmetro de abertura de 3 mm (SAV). Utilizou-se o iluminante padrão D_{65} , ângulo de observação de 10° e luz especular incluída. Para efetuar as medições, o aparelho foi calibrado com o padrão preto e branco, sendo que para a calibração do branco, utilizou-se a placa CM-A145.

As medições de cor foram efetuadas em dois pontos pré-determinados, ou seja, à 25% e 50% do comprimento total da amostra, antes e após os ciclos de radiação UV. Para cada amostra foram tomadas medições para as variáveis L^*_{UV} , a^*_{UV} e b^*_{UV} , à partir das quais foram calculadas as variações de cada coordenada após cada ciclo de exposição à radiação UV, sendo elas: ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} e Δb^*_{UV} . A variação de cada coordenada foi determinada pela diferença entre o valor da coordenada da madeira antes do ensaio (tempo = 0 horas) e o valor da coordenada da madeira após o ensaio de envelhecimento acelerado (tempo = 42, 84, 126 ou 168 horas).

A variação total da cor da madeira após os ciclos de radiação UV também foi determinada através da seguinte equação:

$$\Delta E^* ab_{UV} = \sqrt{(\Delta L^*_{UV})^2 + (\Delta a^*_{UV})^2 + (\Delta b^*_{UV})^2} \quad (10)$$

onde, $\Delta E^* ab_{UV}$: variação total da cor da madeira após a radiação UV; ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} e Δb^*_{UV} : variação individual de cada coordenada (L^* , a^* e b^*) após a radiação UV.

2.4 Análises estatísticas

Os dados obtidos para as variações colorimétricas (ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} e Δb^*_{UV}) foram analisados através do programa STATISTIC 6.0, utilizando-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, já que as análises indicaram não-normalidade dos dados, mesmo após a transformação dos dados. O teste de Kruskal-Wallis foi aplicado quando o número de tratamentos foi igual ou maior à 3 ($K=3$), ou seja, para determinar o efeito do espaçamento (4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m), da temperatura de termorretificação (controle, 180°C e 200°C) e do tempo de exposição à radiação UV (0, 42, 84, 126 e 168 horas). Quando o teste indicou significância, realizou-se o teste de média, a fim de determinar as diferenças entre as médias dos postos das variáveis estudadas, à 95% de significância.

O teste Wilcoxon-Mann-Whitney também foi aplicado para as variáveis ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} e Δb^*_{UV} , quando o número de tratamentos foi igual à 2 ($K=2$) visando determinar o efeito do grupo de madeira (grupo I: cerne e grupo II: alburno).

As variáveis independentes estudadas foram: espaçamento entre árvores (3 níveis: 4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m), grupo de madeira (2 níveis: grupo I e grupo II) e temperatura de termorretificação (3 níveis: controle, 180°C e 200°C). Este delineamento resultou em 18 combinações de tratamento, com 4 repetições, totalizando 72 observações.

As variáveis dependentes estudadas foram as variações das coordenadas colorimétricas após a radiação UV (ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} e Δb^*_{UV}) e a variação total da cor após a radiação UV ($\Delta E^* ab_{UV}$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 11 apresenta os valores médios obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis para as variações das coordenadas de cor da madeira de teca após a radiação UV. Ao analisarmos o efeito do espaçamento na alteração da cor da madeira após a radiação UV, é possível observar que para nenhuma das variáveis (ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} , Δb^*_{UV} e $\Delta E^*_{ab_{UV}}$) há diferenças significativas, isto é, todas apresentaram um comportamento semelhante com a mesma intensidade para os três espaçamentos.

Tabela 11. Valores médios obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis para as variações das coordenadas de cor da madeira de *Tectona grandis* após a radiação ultravioleta.

Variáveis independentes	ΔL^*_{UV}	Δa^*_{UV}	Δb^*_{UV}	$\Delta E^*_{ab_{UV}}$
1. Espaçamento (m)				
4 x 2	5,19 (285,44) a	2,30 (302,30) a	4,92 (284,98) a	8,10 (288,10) a
5 x 2	9,93 (273,36) a	1,88 (280,91) a	4,68 (278,18) a	7,68 (272,27) a
6 x 2	6,36 (306,70) a	1,90 (282,29) a	4,52 (302,33) a	8,25 (305,14) a
	NS	NS	NS	NS
2. Temperatura (°C)				
Controle	3,78 (294,78) b	2,94 (359,69) a	7,74 (370,66) a	10,06 (325,57) a
180	3,41 (203,89) c	1,01 (175,53) c	3,52 (236,20) c	5,22 (196,89) b
200	5,61 (370,29) a	1,95 (333,57) b	3,35 (259,13) b	8,76 (346,15) a
	S	S	S	S
3. Tempo de radiação UV (h)				
42	4,57 (257,87) a	1,92 (270,11) a	5,29 (290,40) a	8,25 (276,51) a
84	5,24 (288,29) a	2,10 (292,52) a	4,52 (268,53) a	7,87 (283,10) a
126	5,92 (303,75) a	2,12 (293,18) a	5,33 (295,93) a	8,24 (292,86) a
168	5,74 (304,09) a	2,43 (298,19) a	3,19 (299,13) a	8,49 (301,52) a
	NS	NS	NS	NS

ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} , Δb^*_{UV} : variação das coordenadas L*, a* e b*, respectivamente, após a radiação ultravioleta (UV). $\Delta E^*_{ab_{UV}}$: variação total da cor da madeira após a radiação UV. Os valores entre parêntesis referem-se as médias dos postos feitos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias dos postos com a mesma letra não são estatisticamente diferentes entre si. S: significativo à 95% de probabilidade. NS: não significativo.

Ao analisarmos o efeito da temperatura de termorretificação na alteração da cor da madeira após a radiação UV, observa-se diferenças significativas entre a madeira não termorretificada (controle) e as madeiras termorretificadas para todas as variáveis (Tabela 11). As maiores médias dos postos das variáveis Δa^*_{UV} , Δb^*_{UV} e $\Delta E^*_{ab_{UV}}$ ocorreram para a madeira não tratada com valores de 359,69, 370,66 e 325,57, respectivamente, enquanto que para ΔL^*_{UV} , a maior média foi encontrada para o tratamento à 200°C (5,61). As menores médias dos postos foram encontradas para a menor temperatura de termorretificação (180°C). Portanto, a termorretificação à 180°C proporcionou uma maior estabilidade à cor da madeira de teca. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 27, a qual apresenta a variação total da cor da madeira ($\Delta E^*_{ab_{UV}}$) após a radiação UV.

Resultados similares foram encontrados por Ayadi et al. (2003) para madeiras de *Fraxinus* sp., *Fagus sylvatica*, *Pinus pinaster* e *Populus* sp. termorretificadas à 240°C durante 2 horas. Os autores observaram alterações importantes na cor das madeiras não termorretificadas e termorretificadas durante as primeiras 36 horas de exposição, sendo essa alteração maior na madeira não termorretificada. Após às 36 horas, a cor da madeira apresentou pouca modificação ao longo do experimento, até a 835ª hora. Ao final do trabalho, os autores constataram que mesmo após 835 horas de radiação UV, as madeiras termorretificadas apresentaram uma menor variação total de cor (ΔE) quando comparadas às madeiras não tratadas.

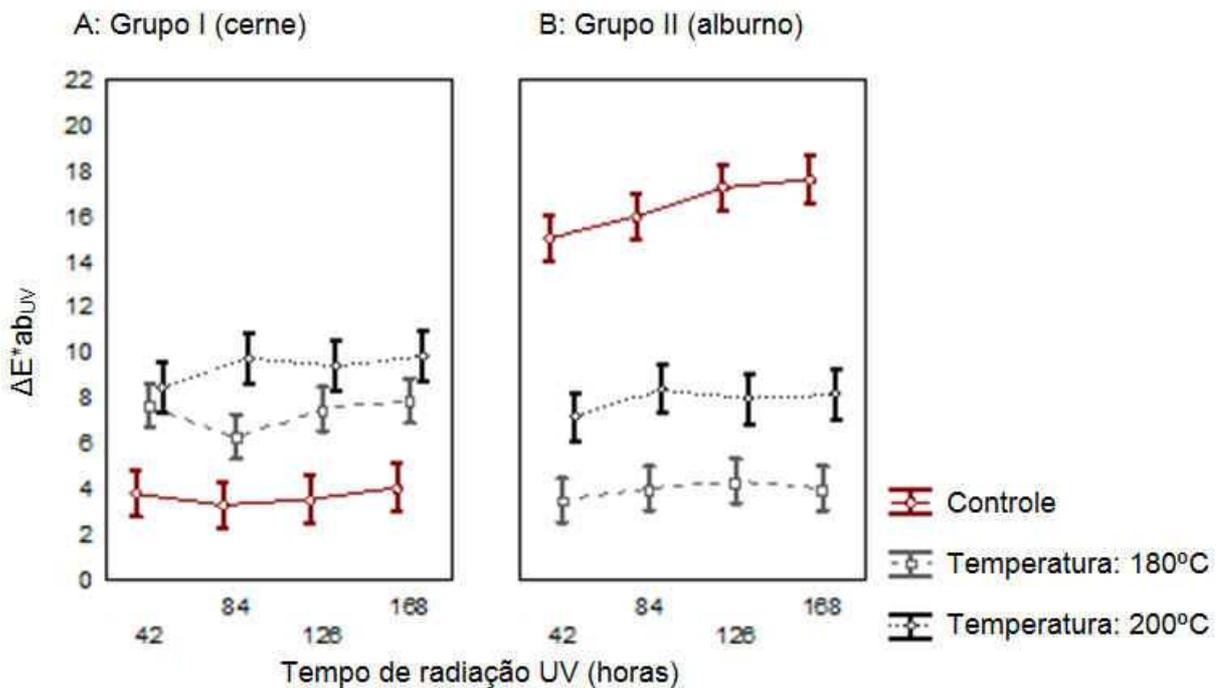


Figura 27. Variação total da cor das madeiras termorretificadas e não-termorretificadas de cerne e alburno de *Tectona grandis* em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta.

No trabalho realizado por Gouveia (2008), a utilização de tratamentos térmicos mostrou-se eficiente para a estabilidade da cor das madeiras de marupá (*Simarouba amara*) e louro-vermelho (*Sextonia rubra*). Essas espécies, quando tratadas à 200°C por 1 hora e à 150°C por 2 horas, apresentaram maior resistência à fotodescoloração após 84 horas de radiação UV. Por outro lado, a aplicação de tratamentos térmicos à madeira de jequitibá-rosa (*Cariniana micrantha*) não melhorou a resistência à fotodescoloração.

Segundo Vernois (2001), a madeira termorretificada, quando exposta à radiação UV, apresenta uma cor acinzentada; entretanto, sua coloração é mais homogênea quando comparada com a madeira não tratada. Além disso, a madeira termorretificada, quando exposta às condições de intemperismo, apresenta rachaduras menores devido a maior estabilidade dimensional, o que representa um ganho em termos de desempenho.

A maior fotoestabilidade apresentada pela madeira termorretificada pode ser atribuída ao menor ataque da radiação UV à lignina, cuja molécula é parcialmente modificada durante a termorretificação e muitos monômeros de fenol são formados, fenômeno conhecido como condensação da lignina (AHAJJI et al., 2009).

Os fenômenos de condensação da lignina são acompanhados por uma decomposição parcial das macromoléculas de lignina, provavelmente devido às clivagens da ligação β-aryl-éter, entre unidades de baixo peso molecular e que são produtos resultantes do aumento de fenóis totais e da concentração de radicais livres fenoxil (NUOPONNEN et al., 2005).

De acordo com Ayadi et al. (2003) e Ahajji et al. (2009), o processo de condensação na estrutura da lignina durante a modificação térmica aumenta a sua estabilidade pois ele inibe parcialmente a luz UV e minimiza as reações de radicais livres fenoxil e a formação de produtos de baixo peso molecular (ex.: quinonas), às quais promovem alteração da cor. Desta forma, a madeira termorretificada apresenta maior resistência à fotodescoloração.

Como pode ser observado na Tabela 11, o tempo de radiação UV não afetou de forma significativa a variação da cor de madeira de teca, entretanto notou-se uma evidente alteração da cor após o primeiro ciclo de 42 horas. Este comportamento coincide com o observado na literatura, o qual indica que as maiores modificações acontecem nas primeiras 20 horas de

exposição (GOUVEIA, 2008). Outros estudos também afirmam que as maiores modificações de cor ocorrem nas primeiras horas de exposição à radiação UV e o comportamento torna-se constante após os ciclos subsequentes (AYADI et al., 2003; SUNDQVIST, 2004; AHAJJI et al., 2009). Nas Figuras 28, 29 e 30, pode-se observar a variação da cor da madeira de teca após o primeiro ciclo de 42 horas à radiação UV para os espaçamentos de 4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m, respectivamente.

Sundqvist (2004) verificou que as madeiras não tratadas de *Picea abies*, *Pinus silvestres* e *Betula pubescens* apresentaram mudanças rápidas de cor após às 2 primeiras horas de exposição à radiação UV, enquanto que as madeiras termorretificadas apresentaram uma pequena variação de cor para o mesmo tempo de exposição. Após 100 horas de exposição, ambos os grupos apresentaram poucas mudanças de cor.

Gouveia (2008), ao avaliar a variação total de cor (ΔE) da madeira termorretificada de louro-vermelho (*Sextonia rubra*) após a radiação UV, notou que ΔE foi sempre maior nas amostras não tratadas termicamente em todos os intervalos de radiação UV. Entretanto, esta variação ocorreu em maior intensidade nas primeiras 36 horas de radiação UV. Após 84 horas, a diferença na variação da cor diminuiu, mas ainda assim ΔE foi maior para a madeira não tratada com um valor de 5,70, enquanto que as madeiras tratadas à 150°C durante 2 horas, o valor de ΔE foi de 2,73, correspondendo à uma diferença de 109% entre ambas.

Podemos afirmar ainda que, para todas as variações de cor (ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} , Δb^*_{UV} e $\Delta E^*_{ab_{UV}}$) da madeira de teca, os somatórios dos postos para a madeira não tratada do alburno foi sempre superior ao do cerne (Tabela 12). Isso quer dizer que a madeira não tratada do alburno sofreu uma maior alteração de cor após a radiação UV quando comparada à madeira não tratada do cerne. Após o envelhecimento, a madeira não tratada de alburno foi adquirindo uma coloração cada vez mais amarela ao longo do tempo, fato visualmente notável na peça, enquanto que a madeira não tratada de cerne não apresentou variações tão bruscas de cor, apresentando apenas um tom mais claro para a coloração marrom ao longo do tempo, fato pouco notável visualmente na peça. Isso pode ser observado nas Figuras 28, 29 e 30, as quais mostram a alteração da cor das madeiras não tratadas e tratadas do cerne e alburno após a radiação UV, para os três espaçamentos, respectivamente.

Tabela 12. Resultados obtidos pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para as variações das coordenadas de cor da madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis* após a radiação ultravioleta.

Tratamento	Cerne	Alburno	Valor de Z	p
Controle				
ΔL^*_{UV}	2,05 (4684)	10,66 (13844)	-11,89*	0,00
Δa^*_{UV}	1,16 (4692)	4,72 (13835)	-11,87*	0,00
Δb^*_{UV}	2,75 (4656)	11,78 (13872)	-11,96*	0,00
$\Delta E^*_{ab_{UV}}$	3,64 (4656)	16,48 (13872)	-11,96*	0,00
180°C				
ΔL^*_{UV}	4,94 (15190)	2,15 (8245)	7,56*	0,00
Δa^*_{UV}	1,22 (12116)	0,81 (11320)	0,86 ^{ns}	0,38
Δb^*_{UV}	3,95 (13806)	3,09 (9629)	4,54*	0,00
$\Delta E^*_{ab_{UV}}$	7,08 (15045)	3,37 (8391)	7,24*	0,00
200°C				
ΔL^*_{UV}	7,46 (6861)	6,41 (6179)	2,11*	0,03
Δa^*_{UV}	2,53 (6768)	2,18 (6273)	1,79 ^{ns}	0,07
Δb^*_{UV}	3,78 (6734)	2,22 (6306)	1,68 ^{ns}	0,09
$\Delta E^*_{ab_{UV}}$	9,54 (7336)	7,98 (5705)	3,71*	0,0002

ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} , Δb^*_{UV} : variação das coordenadas L*, a*, b* após a radiação ultravioleta (UV), respectivamente. $\Delta E^*_{ab_{UV}}$: variação total da cor da madeira após a radiação UV. Os valores entre parêntesis referem-se à média dos postos feitos pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. * Significativo à 95% de probabilidade. ^{ns} Não significativo.

A: Grupo I (cerne)

Tratamento	Tempo de exposição à radiação UV				
	0 h	42 h	84 h	126 h	168 h
Controle					
180°C					
200°C					

B: Grupo II (alburno)

Tratamento	Tempo de exposição à radiação UV				
	0 h	42 h	84 h	126 h	168 h
Controle					
180°C					
200°C					

Figura 28. Aspecto visual das madeiras não termorretificadas e termorretificadas de *Tectona grandis* proveniente do espaçamento 4 x 2 m, após exposição à radiação ultravioleta (UV) na câmara de envelhecimento acelerado QUV/Spray, Q-Lab.

A: Grupo I (cerne)

Tratamento	Tempo de exposição à radiação UV				
	0 h	42 h	84 h	126 h	168 h
Controle					
180°C					
200°C					

B: Grupo II (alburno)

Tratamento	Tempo de exposição à radiação UV				
	0 h	42 h	84 h	126 h	168 h
Controle					
180°C					
200°C					

Figura 29. Aspecto visual das madeiras não termorretificadas e termorretificadas de *Tectona grandis* proveniente do espaçamento 5 x 2 m, após exposição à radiação ultravioleta (UV) na câmara de envelhecimento acelerado QUV/Spray, Q-Lab.

A: Grupo I (cerne)

Tratamento	Tempo de exposição à radiação UV				
	0 h	42 h	84 h	126 h	168 h
Controle					
180°C					
200°C					

B: Grupo II (alburno)

Tratamento	Tempo de exposição à radiação UV				
	0 h	42h	84 h	126 h	168 h
Controle					
180°C					
200°C					

Figura 30. Aspecto visual das madeiras não termorretificadas e termorretificadas de *Tectona grandis* proveniente do espaçamento de 6 x 2 m, após exposição à radiação ultravioleta (UV) na câmara de envelhecimento acelerado QUV/Spray, Q-Lab.

Os diferentes comportamentos observados entre as madeiras de cerne e alburno de teca, podem ser explicados pelo teor de extrativos. Barreto & Pastore (2009) avaliaram o efeito da presença dos extrativos na variação da cor e no processo de fotodecomposição das superfícies das madeiras de quatro espécies tropicais e verificaram que a quantidade de cromóforos amarelos e vermelhos formados na superfície do marupá (*Simarouba amara*), madeira caracterizada pela cor branca e pelo baixo teor de extrativos (1,91%), foi superior à da madeira de itaúba (*Mezilaurus itauba*), a qual possui cor marrom-avermelhada escura e maior teor de extrativos (7,24%). Provavelmente, os extrativos da itaúba exerceram a função de proteção, fotodegradando-se prioritariamente e evitando a degradação da lignina. A amostra de marupá apresentou maior formação de cromóforos amarelos e vermelhos nas amostras sem extrativos do que nas amostras com extrativos, indicando uma menor resistência do marupá à ação dos raios UV. Isso sugere que a participação dos extrativos no processo de fotodecomposição das madeiras depende da sua natureza química.

Em se tratando das diferenças entre as madeiras termorretificadas de cerne e alburno para as variações colorimétricas (ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} , Δb^*_{UV} e $\Delta E^*_{ab_{UV}}$) após a radiação UV (Tabela 12), podemos afirmar que o tratamento à 180°C apresentou diferenças significativas entre cerne e alburno para todas as variáveis, exceto para Δa^*_{UV} . Neste caso, podemos afirmar que o cerne apresentou valores superiores para o somatório dos postos quando comparado ao alburno. Para o tratamento à 200°C foram encontradas diferenças significativas entre cerne e alburno somente para a luminosidade (ΔL^*_{UV}). Isso quer dizer que para o tratamento termorretificador menos agressivo (180°C), a alteração de cor após a radiação UV foi mais evidente entre cerne e alburno. Além disso, esses resultados mostram que, após a termorretificação, o alburno apresentou maior resistência à alteração da cor em relação ao cerne.

4 CONCLUSÕES

O espaçamento não afetou a alteração da cor da madeira de teca após a radiação UV.

A madeira não tratada do alburno sofreu alterações mais bruscas de cor em relação à madeira não tratada do cerne após a radiação UV.

Após os tratamentos termorretificadores, o comportamento foi inverso, ou seja, a madeira do cerne sofreu maiores alterações de cor após a radiação UV que a madeira do alburno.

A madeira do alburno quando termorretificada, tornou-se mais resistente à alteração de cor com o envelhecimento.

A termorretificação à 180°C proporcionou uma maior estabilidade à cor da madeira de alburno quando exposta à radiação UV após 168 horas.

CONCLUSÕES GERAIS

O espaçamento afetou as propriedades físicas da madeira de teca assim como sua cor original antes e após a termorretificação, porém não causou efeito na alteração da cor da madeira após a radiação ultravioleta (UV) em condições de envelhecimento acelerado.

A termorretificação provocou um decréscimo na densidade e no teor de umidade de equilíbrio da madeira de teca.

A termorretificação promoveu alterações significativas na cor na madeira de teca, sendo que os tratamentos termorretificadores causaram um efeito maior na alteração da cor da madeira do alburno em relação à madeira do cerne.

Os tratamentos termorretificadores proporcionaram uma maior uniformidade às peças de madeira contendo cerne e alburno, sendo o tratamento à 200°C o mais efetivo.

A termorretificação à 180°C proporcionou uma maior estabilidade à cor da madeira de alburno após a radiação UV.

Os resultados obtidos neste estudo mostram o potencial da termorretificação para a obtenção de produtos com características diferenciadas em termos de uniformidade e estabilidade da cor, e conseqüentemente com maior valor agregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHAJJI, A.; DIOUF, P. N.; ALOUI, F.; ELBAKALI, I.; PERRIN, D.; MERLIN, A.; GEORGE, B. Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. **Wood Science and Technology**, v. 43, p. 69-83, 2009.
- ALÉN, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. **Wood Science and Technology**, v. 36, n. 2, p. 163-171, 2002.
- ARAÚJO, H. J. B. **Agrupamentos das espécies madeiras 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.
- 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.
- AVAT, F. **Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois (200-300°C): transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques**. 1993. 237 p. Thèse de doctorat – École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France, 1993.
- AYADI, N.; LEJEUNE, F.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 61, p. 221-226, 2003.
- BARRETO, C. C. K.; PASTORE, P. T. C. M. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 1, p. 23-30, 2009.
- BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce. **Holzforschung**, v. 57, p. 539-546, 2003.
- BHAT, K. M. Natural decay resistance of juvenile teak wood grown in high input plantations. **Holzforschung**, v. 57, n. 5, p. 453-455, 2003.
- BHAT, K. M.; OKUYAMA, T. Action plan for hardwood plantation management vis-à-vis sustainability of tropical forest resources; a concept note, Unpublished Doc., 1997. In: BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, v. 34, p. 517-532, 2001.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, v. 34, p. 517-532, 2001.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982, 712 p.

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. 182-188, 2006.

BROWNE, F. L.; SIMONSON, H. C. The penetration of light into wood. **Forest Products Journal**, v. 7, n.10, p. 303-314, 1957.

BRYCE, J. M. **Mechanical properties of Tanzania-grown teak**. Technical Note No. 34. School of Forestry Division, Moshi, United Republic of Tanzania, 1966.

CAMARGOS, J. A. A. **Colorimetria quantitativa aplicada na elaboração de um catálogo de cores de madeiras tropicais**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1999.

CARRILO-PARRA, A. **Technological Investigation of *Prosopis Laevigata* wood from northeast Mexico**. 2007. 137 p. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of Göttingen, Göttingen, 2007.

CHANG, H.-T.; CHANG, S.-T. Correlation between softwood discoloration induced by accelerated light fastness testing and by indoor exposure. **Polymer Degradation and Stability**, v. 72, p. 361-365, 2001.

CHANG, S.-T.; HON, D. N.-S.; FEIST, W. C. Photodegradation and photoprotection of wood surfaces. **Wood and Fiber Science**, v. 14, n. 2, p. 104-107, 1982.

COSTA, J. A.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e taurai (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 133-139, 2011.

CUCUI, I.; NEGRI, M.; TESSADRI, B. Mid-term colour change of finished and non-finished temperature hardwood due to natural and artificial ageing. In: 2nd INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON HARDWOOD PROCESSING, 2009, Paris, France. **Proceedings...** Paris: ISCHP, 2009. 8 p.

DA COSTA, E. W. B. Natural decay resistance of wood. In: LIESE, W. (Ed.). Biological transformation of wood by microorganisms. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF PLANT PATHOLOGY, 2, 1975, New York. **Proceedings...** New York: Springer-Verlag, 1975. 203p.

DAVIDSON, R. S. The photodegradation of some naturally occurring polymers. **J. Photochem. Photobiol. B: Biology**, v. 33, n. 1, p. 3-25, 1996.

DAVIS, T. C.; BEALS, H. O. **Color in sweetgum wood**. Auburn Alabama: Agricultural experiment station. Auburn University, 1977, circular 231, 15 p.

DEKA, M.; HUMAR, M.; REP, G.; KRIČEJ, B.; ŠENTJURc, M.; PETRIČ, M. Effects of UV light irradiation in colour stability of thermally modified copper ethanolamine treated and non-modified wood: EPR and DRIFT spectroscopic studies. **Wood Science and Technology**, v. 42, p. 5-20, 2008.

DEKA, M.; PETRIČ, M. Photo-degradation of water borne acrylic coated modified and non-modified wood during artificial light exposure. **BioResources**, v. 3, n. 2, p. 346-362, 2008.

DUBEY, M. K.; PANG, S.; WALKER, J. Effect of oil heating age on colour and dimensional stability of heat treated *Pinus radiata*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, p. 255-262, 2011.

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

ESTEVEES, B.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Pine wood modification by heat treatment in air. **BioResources**, v. 3, n. 1, p. 142-154, 2008.

FAO. **Reforestación y plantaciones forestales**. 2000. v. 12, 64 f. Disponível em: <http://www.fao.org/montes/foda/wforcong/PUBLI/PDF/V3S_T12.PDF> Acesso em: 10/03/2009.

FEIST, W. C. Weathering and protection of wood. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION, 1983, Kansas. **Proceedings...** Kansas, v. 79, p. 195-205, 1983.

FEIST, W. C.; HON, D. N. S. Chemistry of weathering e protection. In: ROWELL, R.M. **The chemistry of solid wood**. Washington, U.S.A.: Am. Chem. Soc., 614 p., 1984.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry ultrastructure reactions**. Berlin: Walter de Gruyter & Co, 1984.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® Handbook**. Finland: Helsinki, 66 p, 2003.

FLOT, J. L. **La couler du chêne de tranchage française. Méthodologie de la mesure, variabilité géographique, classement industriel et incidences économiques**. 1988. 89 p. Mémoire de 3^{ème} année – INRA\ENITEF, Nancy, France, 1988.

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

GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F.; MATOS, J. L. M.; SANTOS, W. A.; SILVA, R. F. M. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, v. 46, p. 41-52, 2012.

GARCIA, R. A.; CLOUTIER, A.; RIEDL, B. Dimensional stability of MDF panels produced from heat-treated fibres. **Holzforschung**, v. 60, n. 3, p. 278-284, 2006.

GARCIA, R.; LIMA, I. L.; LONGUI, E. L.; FLORSHEIM, S. M. B. Influência do espaçamento e da posição radial na variação de elementos anatômicos da madeira de *Tectona grandis* Linn. **IF Ser. Reg.**, São Paulo, n. 40, p. 51-56, 2009.

GEORGE, B.; SUTTIE, E.; MERLIN, A.; DEGLISE, X.; Photo-degradation and photostabilization of wood (State of art). COST E 18 Final Seminar, p. 1-9, 2004.

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

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

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.; BREDÁ, L. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G. COSTA, A. F.; VALE, A. T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

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.

GONZÁLEZ-PENA, M. M.; HALE, M. D. C. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine Part 1: Colour evolution and colour changes. **Holzforschung**, v. 63, p. 385-393, 2009.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétricas de madeiras tropicais**. 2008. 130 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

GREENBERG, A. D.; GREENBERG, S. **PhotoShop - Versão 3.0**. São Paulo: Makron Books, 1995.

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

HANSMANN, C.; DEKA, M.; WIMMER, R.; GINDL, W. Artificial weathering of wood surfaces modified by melamine formaldehyde resins. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 64, p. 198-203, 2006.

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

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, 8 p.

HON, D. N.-S. Photochemical degradation of lignocellulosic materials. In: GRASSIE, N. (Ed). **Developments in polymer degradation**. London: Applied Science Publishers, 1981.

HON, D. N.-S. Weathering and photochemistry of wood. In: HON, D. N.-S.; SHIRAIISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. New York: Marcel Dekker, 2001, p. 513-546.

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

ITG. Glossário sobre cor e colorimetria. Disponível em: <http://www.itgcom.com/cor_colorimetria.html>. Acesso em: 06/06/2006.

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

JANIN, G. La mesure de la couler du bois. Intérêts agronomique, techonologique et économique. In: **Mesure instrumentation - contrôle-automatisme (MICA)**. Séminaire couleurs et lumière, MICA, Montreuil, 1988.

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**, v. 3, p. 3-13, 2001.

JOHANSSON, D. **Strength and colour response of solid wood to heat treatment**. 2005. 85 f. Thesis (Doctor in Wood Technology) – Luleå University of Technology, Skellefteå, Sweden, 2005.

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

KEOGH, R. M. Does teak have a future in tropical America? **Unasyuva**, v. 31, n. 126, p. 13-19. 1996.

KJAER, E. D.; FOSTER, G. S. **Theeconomics of tree improvement of teak (*Tectona grandis* L.)**. Humlebaek, Denmark: DANIDA Forest Seed Centrev. Moshi No. 34, 1996.

KJAER, E. D.; KAJORNSRICHON, S.; LAURIDSEN, E. B. Heartwood, calcium and silica content in five provenances of Teak (*Tectona grandis*). **Silvae Genetica**, v. 48, p. 1-3, 1999.

KOCAEFE, D.; YOUNSI, R.; PONCSAK. S.; KOCAEFE Y. Comparision of different models for high-temperature heat treatment of wood. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, n. 7, p. 707-716, 2007.

KOKUTSE, A. D. **Analyse de la qualité du bois de teck (*Tectona grandis* L. f.) en plantation au Togo: formation du bois de coeur, propriétés mécaniques et durabilité**. 2002. 133 p. Thèse de Doctorat – Université Bordeaux I, France, 2002.

KOKUTSE, A. D.; STOKES, A.; BAILLÈRES, H.; KOKOU, K.; BAUDASSE, C. Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* L. f.) heartwood and relationship with colour. **Trees**, v. 20, p. 219-223, 2006.

KONICA MINOLTA SENSING Inc. Comunicação precisa da cor. 1998. 57 p.

KRZISNIK, N. **Influence of UV light on wood, impregnated with copper based preservatives**. 2001. 56 p. Graduation thesis – Department of Wood Science and Technology, Biotechnical Faculty, University of Ljubljana, Ljubljana, 2001.

KUO, M.-L.; HU, N. Ultrastructural changes of photodegradation of wood surfaces exposed to UV. **Holzforschung**, v. 45, p. 347-353, 1991.

LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de Preservação de Madeiras**. São Paulo. IPT/Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Divisão de Madeiras, SICCT/Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, v. 2, 1986, 708 p.

LINCOLN, W. A. (Ed.). **World woods in colour**. Hertford: Stobart Davies. 1986. 322 p.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira: informações sobre 90 espécies comerciais**. Manaus: SEBRAE/AM/ Programa de Desenvolvimento Empresarial e Tecnológico, 2000, 212 p.

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

MARTINS, S. B.; SANTOS, C. M.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. Envelhecimento artificial acelerado por radiação ultravioleta de madeiras de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 87-96, 2011.

MCDONALD, A.; FERNANDEZ, M.; KREBER, B. Chemical and UV–VIS spectroscopic study on kiln brown stain formation in Radiata pine. In: 9th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 1997, Montréal. **Proceedings...** Montréal, v. 70, 1997, p. 1-5.

MERLIN, A.; DEGLISE, X. Comportement photochimique du bois non traité. In: DIROL, D.; DEGLISE, X. Durabilité des bois et problèmes couplés. Paris: Hermès Science Publications, 2001. 415 p.

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

MILITZ, R. Heat treatment technologies in Europe: Scientific Background and technological state-of-art. In: CONFERENCE ON ENHANCING THE DURABILITY OF LUMBER AND ENGINEERED WOOD PRODUCTS, 2002, Kissimmee, Orlando. **Proceedings...** Kissimmee, Orlando: Forest Products Society, Madison, US, 2002.

MILLER, R. B; QUIRK, J. T.; CHRISTENSEN, D. J. Identifying white oak logs with sodium nitrite. **Forest Products Journal**, v. 35, n. 2, p. 33-38, 1985.

MIRANDA, I.; SOUZA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, v. 57, n. 3, p. 171-178, 2011.

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

MITSUI, K.; MURATA, A.; TOLVAJ, L. Investigation of the change in the DRIFT spectra of light-irradiated wood with heat treatment. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 61, p. 82, 2003.

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

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

MITSUI, K.; TOLVAJ, L. Color changes in acetylated wood by the combined treatment by light and heat. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 63, n. 5, p. 392-393, 2005.

MITSUI, K. TSUCHIKAWA, S. Low atmospheric temperature dependence on photodegradation of wood. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**. v. 81, p. 84-88, 2005.

MOMOHARA, I.; OHMURA, W.; KATO, H.; KUBOJIMA, Y. Effect of high-temperature treatment on wood durability against the Brown-rot fungus, *Fomitopsis palustris*, and the termite, *Coptotermes formosanus*. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 2003. s.l. **Proceedings...** s.l., 2003. p. 284-287.

MORI, C. L. S. O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2005.

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

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**, v. 17, p. 179-191, 2002.

MOYA, R.; PÉREZ, D. Processing and marketing of teakwood products from fast-grown teak plantations in Costa Rica. In: REGIONAL WORKSHOP PRODUCTS AND MARKETING OF TEAK WOOD PRODUCTS OF PLANTED FOREST, 2007. **Proceedings...** Peechi, India: KFRI, 2007, p. 24-32.

NUOPPONEN, M.; VUORINEN, T.; JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman Spectroscopies. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 24, p. 13-26, 2005.

OKUYAMA, T.; YAMAMOTO, H.; WAHYUDI, I.; HADI, Y. S.; BHAT, K. M. Growth stresses and some wood quality attributes in planted teak. In: PROCEEDINGS OF THE IUFRO CONGRESS, Kuala Lumpur, Malaysia, 2000. **Proceedings...** Kuala Lumpur, Malaysia, 2000.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying – a review. **BioResources**, v. 2, n. 4, p. 789-811, 2007.

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

OLIVEIRA, R. P. R. P. E. **Desempenho silvicultural de *Tectona grandis* L. f., em diferentes espaçamentos, no município de Cáceres, MT.** 2008. 19 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

OLIVEIRA, B. R. U. **Dendrocronologia e análise da variação radial da densidade do lenho de árvores de *Tectona grandis* L.f., do município de Cáceres, MT.** 2011. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

OYARCE, C. D. B. **Modification of wood color via electroheating technology.** 2006. 56 f. Dissertação (Master of Science) – University of Idaho, Idaho, 2006.

PANDEY, K. K. A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 87, p. 375-379, 2005.

PANDEY, K. K.; PITMAN, A. J. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Birmingham, v. 52, n. 3, p. 151-160, 2002.

PASSOS, C. A. M.; BUFULIN Jr., L.; GONÇALVES, M. R. Avaliação silvicultural de *Tectona grandis* L.f., em Cáceres – MT, Brasil: Resultados preliminares. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 225-232, 2006.

PASTORE, T. C. M. **Estudos do efeito da radiação ultravioleta em madeiras por espectroscopias RAMAN (FT-RAMAN), de refletância difusa no infravermelho (DRIFT) e no visível (CIE-L*a*b*).** 2004. 131 p. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

PAULSSON, M.; RAGAUSKAS, A. J. Chemical modification of lignin-rich paper. Light induced changes of softwood and hardwood chemithermomechanical pulps: the effect of irradiation source. **Chem. Abstract**, v. 132, p. 824, 2000.

PEDROSA, I. **Da cor à cor inexistente**. Rio de Janeiro: Léo Christiano - Universidade de Brasília. 1989. 224 p.

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.

POUBEL, D. S. **Efeito da termorreificação nas propriedades tecnológicas da madeira normal e de compressão de *Pinus caribaea* Morelet**. 2011. 29 p. Monografia (Curso de Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, 68 p.

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.

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

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.; PERRÉ, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 62, n. 2, p. 113-119, 2004.

SANCHÉZ, D.S. Estudio físico de suelos de dos sitios para determinar la factibilidad del los establecimiento de caboa (*Swietenia humilis* Zucc.) y teca (*Tectona grandis* L.f) – Honduras, dezembro, 2002.

SANWO, S. K. Intra-tree variation of strength properties in plantation grown teak (*Tectona grandis* L.f.) and techniques for their systematic sampling. Occasional Paper. Oxford Forestry Institute 31, 1986.

SANWO, S. K. The characteristics of the crown-formed and stem-formed wood in plantation grown teak (*Tectona grandis* L. f.) in Nigeria. **J. Inst. Wood Science**, v. 11, p. 85-88, 1987.

SCHNABEL, T.; ZIMMER, B.; PETUTSCHNIGG, A. J.; SCHÖNBERGER, S. An approach to classify thermally modified hardwoods by color. **Forest Products Journal**, v. 57, n. 9, p. 105-110, 2007.

SEHLSTEDT-PERSSON, M. **Properties of Solid Wood: Responses to Drying and Heat Treatment**. 2005. 142 f. Thesis (Doctor in Wood Science and Technology) – Luleå University of Technology, Skellefteå, Sweden, 2005.

SHIMIZU, J. Y.; KLEIN, H.; OLIVEIRA, J. R. V. de. Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso. Cuiabá, MT: **Central de Texto**, 2007.

SI-FLORESTA. Sistema de Informações Florestais. Teca jovem, a nova sensação do mercado. Disponível em: < <http://www.ciflorestas.com.br/conteudo.php?id=833>> , Acesso em: 2009.

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

SOUZA, M. T. **Influência do espaçamento e da posição radial nas dimensões das fibras da madeira de *Tectona grandis* L. f.** 2010. 22 f. Monografia (Curso de Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

SUNDQVIST, B. **Colour Changes and acid formation in wood during heating.** 2004. 154 f. Thesis (Doctor in Wood Material Science) – Luleå University of Technology, Skellefteå, Sweden, 2004.

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

SYRJÄNEN, T. Production and classification of heat treated wood in Finland. In: RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001, Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.11-20.

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

THIAM, M.; MILOTA, M. R.; LEICHTI, R. J. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of Western Hemlock lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 52, n. 4, p. 64-68, 2002.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M. Chemical extractive compounds determining the brown-rot decay resistance of teakwood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 65, p. 121-124, 2007.

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**, v. 18, n. 1, p. 51-54, 2006.

TJIERDSMA, B.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; TEKELY, P.; MILITIZ, A. Two-steps heat timber: molecular level reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 56, p. 149-153, 1998.

TOLVAJ, L.; HORVÁTH-SZOVÁTI, E.; SAFAR, C. Colour modification of black locust by steaming. **Wood Research**, v. 45, n. 2, p. 25-32, 2000.

TOLVAJ, L.; MOLNÁR, S. Colour homogenisation of hardwood species by steaming. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, v. 2, p. 105-112, 2006.

TOLVAJ, L.; VARGA, D.; KOMÁN S. Colour modification of dried black locust and beech woods by steaming. In: 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM WOOD STRUCTURE AND PROPERTIES, 2002, Slovakia. **Proceedings...** Slovakia, 2002. p. 109-113.

TRIBOULOT, M. C. **Photostabilisation de la couleur du matériau bois**. 1993. 148 p. Thèse de doctorat (Doctorat en Sciences du Bois) – Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 1993.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 487-494, 2003.

VARGA, D.; VAN DER ZEE, M. Influence of steaming on selected wood properties of four hardwood species. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 66, p. 11-18, 2008.

VEIT, L. F. Plante seu fundo de aposentadoria. **Silvicultura**, São Paulo, v. 17, n. 68, p. 20-22. 1996.

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France: state of the art. In: RAPP, A. O. 2001, Review on Heat Treatments of Wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION OF WOOD PROTECTION, 2001, Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001. 68 p.

VIEIRA, A. H; MARTINS, E .P; PEQUENO, P. L. L; LOCATELLI, M. **Aspectos silviculturais da teca em Rondônia**. Embrapa CPAF – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Documentos 68). 2002, 8p.

VIITANIEMI, P.; JÄMSÄ, S. Modification of wood with heat treatment. VTT Research Report Publications 814, Espoo, Finland, 1994. In: NUOPPONEN, M.; VUORINEN, T.; JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. **Wood Science and Technology**, v. 37, p. 109-115, 2003.

WASKETT, P.; SELMES, R. E. **Opportunities for UK grown timber: wood modification state of the art review**. Building Research Establishment LTD, proj. n. 203-343, 2001, 83p.

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

WILLIAMS, R. S. Weathering of Wood. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Florida: CRC Press, 2005. p. 139-185.

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.

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

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. **Wood variation: its causes and control**. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 361 p.

ANEXOS

Anexo A - Valores médios obtidos para a luminosidade (L^*_{UV}) da madeira de *Tectona grandis* após ciclos de radiação ultravioleta.

Espaçamento (m)	Tempo de radiação UV (h)	Grupo I			Grupo II		
		Controle	180°C	200°C	Controle	180°C	200°C
4 x 2	0	62,75	54,96	40,64	79,33	61,81	42,59
	42	62,46	60,42	47,06	72,48	61,85	48,62
	84	61,92	58,58	48,00	69,74	60,49	48,36
	126	61,89	60,26	48,59	68,08	60,15	47,89
	168	60,49	58,90	48,48	68,63	61,78	48,87
5 x 2	0	58,67	49,78	40,00	79,34	62,69	41,83
	42	59,83	54,97	45,68	71,49	62,51	45,87
	84	58,61	354,85	47,83	69,90	61,18	47,56
	126	57,83	53,74	47,55	69,45	60,68	47,99
	168	58,86	54,23	47,31	68,58	61,18	47,68
6 x 2	0	58,37	46,99	44,98	74,99	64,36	40,89
	42	58,69	51,14	49,61	67,70	62,50	48,30
	84	58,44	52,03	50,67	67,39	63,41	48,53
	126	57,30	52,05	50,28	66,10	61,81	49,15
	168	58,13	51,94	51,56	64,77	62,78	49,43

I e II: cerne e alburno, respectivamente.

Anexo B - Valores médios obtidos para a tonalidade vermelha (a^*_{UV}) da madeira de *Tectona grandis* após ciclos de radiação ultravioleta.

Espaçamento (m)	Tempo de radiação UV (h)	Grupo I			Grupo II		
		Controle	180°C	200°C	Controle	180°C	200°C
4 x 2	0	9,29	8,55	10,06	5,33	9,55	9,72
	42	10,27	8,58	7,71	9,13	8,92	8,16
	84	10,40	7,93	6,80	9,87	9,25	6,79
	126	11,00	9,22	8,55	10,82	9,74	8,57
	168	10,72	8,74	9,31	11,87	10,45	8,72
5 x 2	0	9,27	8,94	10,08	5,61	9,45	9,07
	42	9,65	8,14	6,54	9,11	8,97	6,64
	84	10,05	7,79	8,08	9,99	8,84	7,03
	126	10,43	8,84	7,20	11,1	9,10	7,23
	168	11,18	9,13	7,59	11,36	9,98	8,56
6 x 2	0	9,93	7,72	9,76	6,25	9,65	10,38
	42	9,50	7,61	8,39	9,41	9,02	8,60
	84	9,88	7,78	8,94	10,19	9,55	7,90
	126	10,61	8,34	9,49	11,29	10,38	8,90
	168	10,72	8,74	9,31	11,87	10,45	8,72

I e II: cerne e alburno, respectivamente.

Anexo C - Valores médios obtidos para a tonalidade amarela (b^*_{UV}) da madeira de *Tectona grandis* após ciclos de radiação ultravioleta.

Espaçamento (m)	Tempo de radiação UV (h)	Grupo I			Grupo II		
		Controle	180°C	200°C	Controle	180°C	200°C
4 x 2	0	28,01	22,65	19,07	20,63	26,35	20,09
	42	30,08	27,21	18,14	34,80	28,14	20,03
	84	29,10	23,57	16,35	33,89	27,69	15,73
	126	29,56	26,83	21,93	34,13	28,54	19,53
	168	29,05	25,48	18,95	34,36	29,41	20,92
5 x 2	0	25,02	21,15	18,64	21,48	26,87	16,64
	42	27,94	24,01	14,58	34,44	28,69	14,78
	84	27,32	22,08	19,62	34,15	27,23	16,95
	126	27,08	24,18	17,57	35,55	27,43	17,65
	168	27,15	25,94	15,26	34,78	28,29	16,73
6 x 2	0	24,63	17,82	20,36	23,57	27,91	19,22
	42	28,51	21,78	22,33	33,96	29,14	20,95
	84	27,63	22,14	22,98	34,38	30,73	19,31
	126	27,94	23,54	24,41	35,16	31,08	22,65
	168	28,36	24,06	24,58	34,79	31,33	22,49

I e II: cerne e alborno, respectivamente.

Anexo D - Valores médios obtidos para as variações das coordenadas colorimétricas da madeira de *Tectona grandis* após ciclos de radiação ultravioleta.

Variável	Espaçamento (m)	Tempo de radiação UV (h)	Grupo I			Grupo II		
			Controle	180°C	200°C	Controle	180°C	200°C
ΔL^*_{UV}	4 x 2	42	1,88	5,46	6,41	6,85	1,13	6,00
		84	2,40	3,67	7,36	9,59	2,16	5,76
		126	1,44	5,30	7,94	11,25	1,99	5,30
		168	3,38	3,94	7,84	10,70	0,74	6,27
	5 x 2	42	1,66	5,18	5,67	7,85	1,07	4,03
		84	1,17	5,07	7,82	9,44	2,42	5,72
		126	1,24	4,45	7,54	9,89	2,44	6,16
		168	1,30	4,7	7,30	10,76	1,52	5,85
	6 x 2	42	1,51	4,23	6,74	7,29	2,02	7,41
		84	1,30	5,05	7,75	8,49	1,66	7,64
		126	2,78	5,47	7,86	25,62	2,65	8,26
		168	1,19	6,87	9,39	10,22	2,87	8,54
Δa^*_{UV}	4 x 2	42	0,99	3,55	2,6	3,79	0,58	2,18
		84	1,11	0,91	3,49	4,53	1,32	3,44
		126	1,71	1,04	1,88	5,48	0,67	2,69
		168	1,89	0,86	2,80	6,03	0,61	1,26
	5 x 2	42	0,55	0,80	3,54	3,50	0,49	2,53
		84	0,86	1,14	2,22	4,38	0,78	2,47
		126	1,16	1,09	2,87	5,49	0,50	2,00
		168	1,25	0,54	3,78	5,73	0,52	2,22
	6 x 2	42	0,72	1,16	2,09	3,16	0,71	1,78
		84	0,95	1,08	1,86	3,94	0,90	2,48
		126	1,35	1,20	1,42	5,04	1,16	1,48
		168	1,39	1,34	1,82	5,62	1,55	1,66
Δb^*_{UV}	4 x 2	42	2,07	4,55	4,73	14,17	1,88	2,42
		84	1,16	2,15	4,48	13,26	2,19	4,86
		126	3,31	5,72	4,05	11,58	3,17	3,43
		168	2,13	4,18	4,28	13,72	2,39	2,37
	5 x 2	42	2,91	2,86	4,80	12,96	1,91	3,80
		84	4,86	2,29	1,58	3,82	12,66	1,43
		126	1,55	4,18	4,28	13,50	2,39	2,37
		168	2,13	4,10	3,95	13,29	1,20	3,69
	6 x 2	42	3,88	5,00	2,65	10,38	1,99	2,33
		84	3,00	5,12	2,72	10,81	2,73	2,37
		126	2,29	1,58	3,82	12,66	1,43	2,63
		168	3,73	5,72	4,07	11,22	3,17	3,43
ΔE^*_{abUV}	4 x 2	42	3,13	9,17	9,34	16,32	2,62	6,97
		84	3,16	4,61	11,47	17,10	4,05	8,87
		126	2,89	7,06	9,65	18,45	3,62	7,09
		168	4,67	6,15	9,85	18,48	2,71	7,22
	5 x 2	42	3,76	6,12	9,07	15,62	2,47	7,00
		84	2,90	5,54	9,31	16,47	3,13	7,13
		126	2,91	6,52	9,50	18,07	3,00	7,96
		168	3,12	6,59	9,89	18,12	2,48	7,94
	6 x 2	42	4,40	7,35	7,78	13,16	3,25	8,12
		84	3,75	7,62	8,80	14,42	3,59	8,74
		126	4,78	8,49	9,20	15,28	4,56	9,29
		168	4,29	9,83	10,68	16,28	4,99	9,54

ΔL^*_{UV} , Δa^*_{UV} , Δb^*_{UV} : variação das coordenadas L^* , a^* e b^* , respectivamente, após ciclos de radiação ultravioleta (UV). ΔE^*_{abUV} : variação total da cor da madeira após ciclos de radiação UV. I e II: cerne e alborno, respectivamente.