

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

ANNA CLARA OLIVEIRA RUPF

EFEITOS DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COR E RESISTÊNCIA DA
MADEIRA JOVEM DE TECA A FUNGOS XILÓFAGOS

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2022

ANNA CLARA OLIVEIRA RUPF

EFEITOS DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COR E RESISTÊNCIA DA
MADEIRA JOVEM DE TECA A FUNGOS XILÓFAGOS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2022

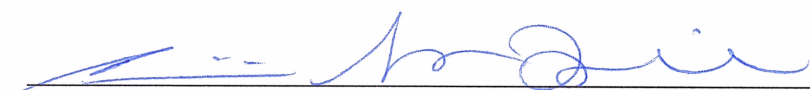
ANNA CLARA OLIVEIRA RUPF

EFEITOS DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COR E NA RESISTÊNCIA
DA MADEIRA JOVEM DE TECA A FUNGOS XILÓFAGOS

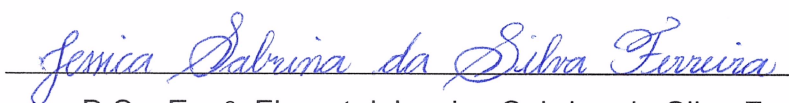
Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovada em 16 de agosto de 2022.

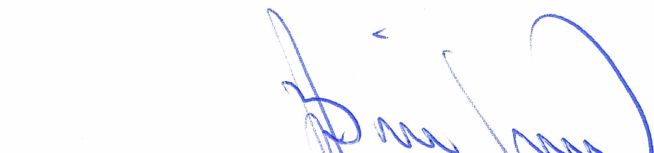
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Djeison Cesar Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



B.Sc. Eng^a. Florestal Jessica Sabrina da Silva Ferreira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora



Prof. Dr. Juarez Benigno Paes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Aos meus pais e irmãs.
Afetuosamente, dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

Aos meus pais, Josandra de Oliveira Rosa Rupf e Robson Rupf, e à minha avó Angela Maria de Oliveira, por todo o amor, carinho, incentivo e apoio incondicional.

Às minhas irmãs, Anna Carolina Oliveira Rupf e Anna Alice Oliveira Rupf, por todo amor, carinho, incentivo, companheirismo e por sempre me proporcionarem boas risadas mesmo em momentos difíceis.

À toda a minha família, por todo o incentivo.

Aos meus *pets*, Mel, Jorginho e Lineu, por sempre me trazerem conforto e tornarem os dias mais alegres.

Aos meus amigos, Amanda Paixão, André Orlandi, Clarisse Scolforo e Ronei Sllva, pelos trabalhos em grupo, pela parceria e companheirismo durante a graduação e por terem tornado o dia a dia mais divertido.

À Carla Martins e Élide Timóteo, por terem me acolhido e me feito sentir em casa nos anos em que moramos juntas em Alegre.

À Floema Jr. e a todos do Movimento Empresa Junior, por me proporcionarem uma vivência empresarial durante a graduação e por terem contribuído para o meu crescimento pessoal e profissional.

À Tamanhoni Agronegócios e seus funcionários, Tiago Tamanhoni, Eliete Pereira e Camila Buffon, pela oportunidade do estágio e por terem contribuído para a minha formação profissional.

Ao meu professor e orientador Djeison Cesar Batista, pela oportunidade de participar de uma pesquisa de iniciação científica, por me orientar também neste trabalho e ter compartilhado comigo os seus conhecimentos, contribuindo para a minha formação profissional.

Ao professor Juarez Paes e à mestranda Jessica Ferreira, por aceitarem participar da banca avaliadora deste trabalho.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES pela infraestrutura disponibilizada.

A todos os professores pelos conhecimentos transmitidos e por terem contribuído para a minha formação.

RESUMO

A teca (*Tectona grandis* L.f.) tem se destacado no setor florestal pela qualidade da sua madeira, que é indicada para múltiplos usos. Por ser uma espécie de rápido crescimento, ela possui grande proporção de cerne juvenil, conferindo características heterogêneas para a cor e a durabilidade da madeira. A modificação térmica pode ser uma alternativa para melhorar as propriedades e características da madeira juvenil de teca e torna-la mais valorizada economicamente. O objetivo geral deste trabalho foi analisar o efeito de processos de modificação térmica em sistema fechado (pressurizado) e em sistema aberto (não pressurizado) na madeira jovem de teca. Foram testadas a madeira não tratada (Controle) e modificada termicamente em sistema fechado a 160 °C (F160) e em sistema aberto a 185 °C e 210 °C (A185 e A210, respectivamente). Utilizou-se os fungos *Trametes versicolor* (podridão branca) e *Coniophora puteana* (podridão parda), testando-se 10 corpos de prova por tratamento e fungo. As análises colorimétricas foram realizadas com o sistema CIELAB, utilizando-se um espectrofotômetro portátil. As medições foram realizadas na face tangencial e transversal dos corpos de prova, antes e depois da exposição aos fungos citados. Foram medidas as coordenadas colorimétricas L*, a*, b*, e calculados os parâmetros C, h° e ΔE^* . Foram realizadas as correlações entre as medidas colorimétricas e a perda de massa causada pelos fungos. A modificação térmica escureceu o cerne juvenil de teca, com maior efeito no processo em sistema fechado (F160). A modificação térmica teve efeito nulo na resistência da madeira de teca à biodeterioração causada por ambos os fungos. Depois da exposição aos fungos, a cor da madeira modificada termicamente em sistema fechado (F160) foi mais estável do que em sistema aberto. Apesar de terem sido verificadas algumas correlações significativas, não foi possível estabelecer um método ótimo para a elaboração futura de modelos de predição da perda de massa, com base nas medidas colorimétricas.

Palavras-chave: Sistema fechado. Sistema aberto. Colorimetria. Biodeterioração.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo geral	2
2.2 Objetivos específicos	2
3 REVISÃO DE LITERATURA	3
3.1 <i>Tectona grandis</i> L. f.	3
3.2 Colorimetria aplicada à madeira.....	4
3.3 Resistência à biodeterioração por fungos	5
4 METODOLOGIA.....	7
4.1 Tratamentos estatísticos e caracterização do material de estudo	7
4.2 Modificação térmica da madeira	7
4.3 Produção de corpos de prova	8
4.4 Colorimetria.....	9
4.5 Resistência à biodeterioração por fungos	11
4.6 Cor da madeira depois do ensaio de biodeterioração.....	13
4.7 Análises estatísticas.....	13
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
5.1 Colorimetria.....	15
5.2 Resistência à biodeterioração por fungos	19
5.3 Efeito da biodeterioração na cor da madeira	21
5.4 Correlações.....	24
6 CONCLUSÕES	28
7 REFERÊNCIAS.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Médias dos parâmetros colorimétricos e da variação total da cor, por tratamento.	15
Tabela 2 - Médias de variação dos parâmetros colorimétricos e classificação da cor	16
Tabela 3 - Resultados de perda de massa (%) dos tratamentos por fungo utilizado	20
Tabela 4 – Códigos de cor obtidos no aplicativo “Análise de Cor” para cada tratamento, antes e depois da biodeterioração.	23
Tabela 5 – Correlação entre a perda de massa (PM) e os parâmetros colorimétricos antes e depois da exposição ao fungo <i>Trametes versicolor</i>	25
Tabela 6 – Correlação entre a perda de massa (PM) e os parâmetros colorimétricos antes e depois da exposição ao fungo <i>Coniophora puteana</i>	26

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação da variação total da cor da madeira (ΔE^*).....	11
Quadro 2 - Classificação da perda de massa em ensaio de resistência à biodeterioração por fungos.....	12
Quadro 3 - Classificação qualitativa do coeficiente de correlação (r).....	14

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema CIELAB.....	4
Figura 2 – Representação do corpo de prova e a posição de medição da cor.	10
Figura 3 – Frascos inoculados com fungos. A: <i>Trametes versicolor</i> . B: <i>Coniophora puteana</i>	12
Figura 4 – Representação da cor da madeira. Da esquerda para a direita: Controle, A185, A210 e F160.	16
Figura 5 – Médias dos parâmetros saturação (C*) e ângulo de tinta (h°).....	17
Figura 6 – Diagrama de luminosidade (L*) x saturação (C*). Controle: círculo laranja; F160: triângulo amarelo; A185: estrela azul; A210: retângulo verde.....	18
Figura 7 - Variação total da cor (ΔE^*) e dos parâmetros colorimétricos L*, a* e b* causados pela exposição ao fungo <i>Trametes versicolor</i>	21
Figura 8 - Variação total da cor (ΔE^*) e dos parâmetros colorimétricos L*, a* e b* causados pela exposição ao fungo <i>Coniophora puteana</i>	21
Figura 9 – Comparação da cor da madeira de teca antes da biodeterioração e depois da exposição aos fungos <i>Trametes versicolor</i> e <i>Coniophora puteana</i> . Da esquerda para a direita: Controle, A185, A210 e F160.	23

1 INTRODUÇÃO

A madeira de teca (*Tectona grandis* L.f.) tem se destacado no setor florestal, pela suas características estéticas, fácil trabalhabilidade e boa resistência natural, sendo indicada para múltiplos usos, como na indústria naval, construção civil e movelaria. Por ser uma espécie florestal de crescimento rápido, sua madeira possui grande proporção de lenho juvenil, considerado de qualidade inferior ao adulto. Além disso, ela é composta por maior proporção de alburno, conferindo características heterogêneas para a cor e a durabilidade natural (BELLON, 2013; MENEZES, 2017).

São amplamente conhecidos os benefícios que o processo de modificação térmica traz às propriedades da madeira. Dentre eles, destacam-se a redução da higroscopicidade, o aumento da estabilidade dimensional, o aumento da resistência à biodeterioração por organismos xilófagos, principalmente por fungos apodrecedores, e ainda o escurecimento da madeira (ESTEVES; PEREIRA, 2009; HILL, 2006; MILITZ; ALTGEN, 2014). Dessa forma a modificação térmica é uma alternativa para melhorar as propriedades e características da madeira jovem de teca e torna-la mais atrativa economicamente.

Os principais fatores relacionados ao processo que interferem nas propriedades da madeira modificada termicamente são temperatura, tempo de duração, tipo de sistema (aberto ou fechado) e tipo de gás na atmosfera dentro do equipamento. A combinação dessas variáveis irá resultar em diferentes níveis de alteração na composição química, que por sua vez, será a responsável pelas mudanças nas propriedades da madeira modificada termicamente (ESTEVES; PEREIRA, 2009; HILL, 2006; MILITZ; ALTGEN, 2014).

Assim, o seguinte problema de pesquisa foi levantado para este trabalho: qual o efeito de processos de modificação térmica em sistema fechado e sistema aberto na cor e na resistência à biodeterioração da madeira modificada termicamente de teca? Há correspondência entre os resultados?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o efeito de processos de modificação térmica em sistema fechado (pressurizado) e em sistema aberto (não pressurizado) na madeira jovem de teca.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar a cor da madeira não tratada com a modificada termicamente.
- Testar a resistência à biodeterioração causada por fungos de podridão branca e parda.
- Analisar a correlação entre os parâmetros colorimétricos antes e depois da exposição a fungos xilófagos e o efeito das direções estruturais na correlação.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 *Tectona grandis* L. f.

A teca (*Tectona grandis* L.f.) é uma espécie arbórea da família Lamiaceae, nativa de países do Sudeste Asiático, como Índia, Myanmar, Tailândia e Laos. Essa espécie pode chegar a até 35 m de altura e diâmetro a altura do peito (DAP) maior que 100 cm. Sua madeira é leve a moderadamente pesada, de dureza média, fácil trabalhabilidade, boa estabilidade dimensional e boa resistência mecânica (MOTTA et al, 2013; PAES et al., 2015). Além disso, o lenho de árvores adultas dessa espécie possui alta resistência natural a ação de fungos apodrecedores e insetos xilófagos, proporcionado pela tectoquinona contida nas células da madeira (GARCIA et al., 2014).

A espécie possui cerne e alburno distintos pela cor, em que a madeira do cerne é mais desejável industrialmente por ser escura e possuir maior durabilidade natural que a de alburno (LOPES, 2012). Suas principais aplicações estão na construção civil (portas, janelas, lambris, painéis, forros, assoalhos e *decks*), na fabricação de móveis, lâminas decorativas e em embarcações (coberturas, pisos e forros) (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2021).

De acordo com Leite et al. (2006), existem povoamentos comerciais de teca implantados em países da Ásia, Oceania, África e América. Os primeiros plantios comerciais de teca no Brasil foram implantados no final da década de 1960, no município de Cáceres – MT. Com as condições climáticas favoráveis, além de tratamentos silviculturais adequados e solo de melhor qualidade, foi possível reduzir o ciclo natural da espécie de 80 para 25 anos nos plantios da região (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003).

Em 2018, o Brasil possuía 93.957 hectares com plantios de teca (aumento de aproximadamente 44% em relação ao ano de 2010), o que equivalia a 1,2% da área total de florestas plantadas no País (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). Os valores de mercado da madeira de teca chegam a ultrapassar os do mogno (*Swietenia macrophylla*), com destaque no mercado mundial, principalmente pelas propriedades físicas e mecânicas e a diversidade de aplicações (FIGUEIREDO et al., 2005).

3.2 Colorimetria aplicada à madeira

A cor é um aspecto importante para a identificação, classificação e indicação de uso de espécies madeireiras. Essa característica, além dos aspectos de textura e desenho, afeta a aparência dos produtos de madeira (móveis, laminados decorativos e instrumentos musicais) e contribui para definir seus preços de comercialização (BARROS et al., 2014; LOPES, 2012). A cor pode ser alterada durante o processamento da madeira e também por fatores como umidade, radiação solar, temperatura e ataque de organismos xilófagos.

Segundo Lopes (2012), a determinação da cor pode ser realizada por métodos comparativos, que são ineficientes, principalmente ao comparar amostras de madeiras com cores muito parecidas; ou por métodos quantitativos, os quais são mais eficientes e medem a cor com o uso de equipamentos, como colorímetros e espectrofotômetros.

O método quantitativo mais utilizado para a medição da cor da madeira é aquele da Comissão Internationale de l'Eclairage (1976). Esse sistema se baseia na luminosidade, tonalidade (coordenadas vermelho-verde e amarelo-azul), saturação e ângulo de tinta, representados respectivamente pelas variáveis L^* , a^* , b^* , C^* e h° em um espaço de cor tridimensional (Figura 1).

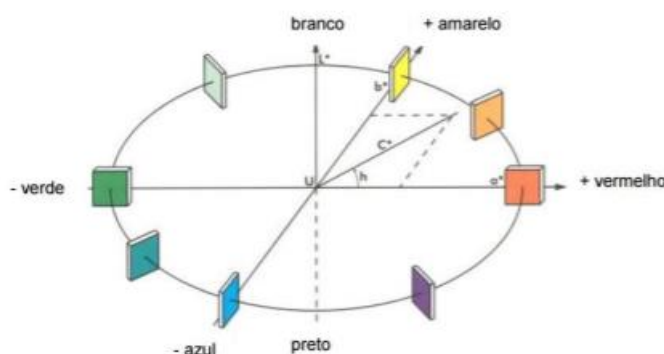


Figura 1 – Sistema CIELAB.

Fonte: Menezes (2017).

A luminosidade (L^*) varia do preto ao branco, com valores de zero (preto) a 100 (branco). As coordenadas cromáticas vermelho-verde (a^*) e amarelo-azul (b^*) variam de -60 a +60, em que o sinal positivo significa aumento na cor vermelha ($+a^*$) ou

amarela (+b*) e o sinal negativo significa aumento na cor verde (-a*) ou azul (-b*). A saturação (C*) é o desvio a partir do ponto que corresponde a cor cinza na escala de luminosidade (eixo L*) até a cor pura e seu valor varia de 0 a 60. O ângulo de tinta (variável h°) indica a dominância de alguma tonalidade (vermelho, amarelo, verde ou azul) na cor da madeira (BARROS et al., 2014; LOPES, 2012).

A modificação térmica é realizada com o objetivo de melhorar a estabilidade dimensional, aumentar a resistência à biodeterioração e possibilita também a alteração da cor da madeira (LOPES, 2012). De acordo com Moya e Berrocal (2010), a madeira jovem de teca, proveniente de plantações de ciclos inferiores a 20 anos, possui coloração castanho-clara e com grande variação, causada pelo contraste entre cerne e alburno. A madeira de coloração mais clara e a falta de uniformidade na cor resultam na redução do valor de mercado.

A modificação térmica é utilizada em países da Europa para modificar a coloração de madeiras claras, tornando-as mais escuras (processo chamado de “tropicalização”) e agregando valor ao produto final. A modificação térmica da madeira de teca é utilizada com o objetivo de obter coloração marrom-caramelo, semelhante ao cerne de árvores nativas dessa espécie (LOPES, 2012).

Nos estudos realizados por Lopes (2012) e Gasparik et al. (2019), a madeira de teca modificada termicamente tornou-se mais escura na medida em que os tratamentos térmicos se tornaram mais agressivos, obedecendo ao padrão relatado na literatura. A alteração da cor da madeira é causada pela modificação química dos grupos cromóforos que são responsáveis pela caracterização da cor da madeira (LOPES, 2012).

3.3 Resistência à biodeterioração por fungos

A resistência da madeira à deterioração é a capacidade que a espécie possui de resistir a ataques de agentes deterioradores, que podem ser biológicos, físicos e químicos (PAES, 2002). Por ser um material orgânico, a madeira está sujeita a degradação, que pode comprometer sua estrutura anatômica e composição química, além de alterar sua aparência (MENEZES, 2017).

Segundo Clausen (2010), os principais organismos capazes de degradar a madeira, chamados de organismos xilófagos, são os fungos, insetos, bactérias e

brocas marinhas. Os fungos, que estão entre os organismos xilófagos mais comuns, podem causar manchas ou até a decomposição total da madeira e são classificados em apodrecedores, emboloradores e manchadores (MOTTA et al., 2013).

De acordo com Brocco (2019), os fungos apodrecedores podem ser divididos em três grupos: fungos de podridão parda, podridão branca e podridão mole. Os fungos de podridão parda degradam apenas a celulose e as hemiceluloses da parede celular; aqueles de podridão branca atacam a celulose, as hemiceluloses e a lignina; e os causadores da podridão mole, geralmente menos agressivos em comparação aos demais, atacam os constituintes primários da parede celular, mas causam danos superficiais à madeira.

O processo de modificação térmica aumenta a resistência da madeira à biodeterioração por organismos xilófagos, substituindo os processos tradicionais, que utilizam produtos químicos tóxicos, nocivos ao meio ambiente (BRITO et al., 2006). Quatro hipóteses têm sido utilizadas para explicar o aumento da resistência da madeira pelos processos de modificação térmica, são eles: a redução da higroscopicidade; degradação das hemiceluloses, uma das principais fontes de nutrientes para os fungos; geração de novos extrativos tóxicos, que atuam como fungicidas; e modificação dos polímeros da parede celular (BRITO, 2017; MENEZES, 2017).

No entanto, Brito (2017) reportou efeito negativo na resistência à biodeterioração da madeira modificada termicamente de *Tectona grandis* exposta a fungos de podridão branca e parda. O mesmo padrão já havia sido reportado por Bellon (2013) e Motta et al. (2013). Como a madeira de teca possui alta resistência natural a ação de fungos xilófagos, acredita-se que a modificação térmica não influencie significativamente na sua resistência à biodeterioração.

4 METODOLOGIA

4.1 Tratamentos estatísticos e caracterização do material de estudo

Para a realização deste trabalho utilizou-se a madeira juvenil de *Tectona grandis* L.f., e foram testados quatro tratamentos: Controle (madeira não tratada); F160: madeira modificada termicamente (MMT) a 160 °C em sistema fechado (pressurizado), perda de massa corrigida (PMC) = 18,5%; A185: MMT a 185 °C em sistema aberto (não pressurizado), PMC = 0,33%; A210: MMT a 210 °C em sistema aberto (não pressurizado), PMC = 2,44%. As médias da PMC foram calculadas em outro trabalho (GOMES, 2022), com base no teor de extrativos totais.

A madeira foi coletada no estoque da empresa *TWBrazil* (Ponta Grossa, Paraná), onde também foi realizado o processo de modificação térmica em sistema fechado. Foram selecionados 15 sarrafos tangenciais de 25 x 90 x 2250 mm (espessura x largura x comprimento), compostos predominantemente por cerne. Cada sarrafo foi serrado transversalmente, produzindo-se quatro amostras de 500 mm de comprimento, as quais foram distribuídas igualmente entre os quatro tratamentos. De acordo com informações da empresa, a madeira utilizada foi proveniente do primeiro desbaste, realizado com cerca de seis anos de idade, adquirida de um produtor do município de Cáceres, Mato Grosso.

4.2 Modificação térmica da madeira

4.2.1 Sistema fechado

O processo de modificação térmica em sistema fechado, adotado para este trabalho, é classificado como higrotérmico e pressurizado (HILL, 2006). O processo completo tem duração de 12 horas e foi realizado em uma autoclave de 6 m³ de capacidade nominal.

Adotou-se 160 °C por ser a temperatura comumente utilizada pela empresa em seu processo, que foi composto por sete fases: aquecimento inicial de 20 °C (temperatura ambiente) a 110 °C, a uma taxa de aquecimento nominal de 1,30 °C min⁻¹; temperatura constante por 30 minutos; aquecimento até 140 °C, a uma taxa de

aquecimento nominal de $0,50\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$; temperatura constante por 30 minutos; aquecimento até $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, a uma taxa de aquecimento nominal de $0,60\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$; temperatura constante ($160\text{ }^{\circ}\text{C}$) por 90 minutos; resfriamento até $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, a uma taxa nominal de resfriamento de $0,25\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$.

4.2.2 Sistema aberto

O processo de modificação térmica em sistema aberto foi realizado no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (DCF/UFES), localizado em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. Foi utilizado um forno elétrico (Linn Elektro Therm, Alemanha), com dimensões internas de $600\text{ x }600\text{ x }700\text{ mm}$, equipado com controlador programável de tempo e temperatura.

O programa utilizado foi similar ao de Lopes et al. (2014), que trabalhou com a mesma espécie e um equipamento do mesmo modelo. O programa do processo foi composto por três fases: aquecimento inicial de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente) até $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma taxa de aquecimento nominal de $0,50\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$; aquecimento de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ até a temperatura de modificação térmica ($185\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $210\text{ }^{\circ}\text{C}$) com uma taxa de aquecimento nominal de $2,60\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$; manutenção da temperatura de modificação térmica por 3 horas. Encerrada a fase 3, o equipamento era imediatamente desligado, e as peças eram retiradas do equipamento.

O processo completo teve duração de 6 horas e 2 minutos para a temperatura de $185\text{ }^{\circ}\text{C}$, e 6 horas e 12 minutos para $210\text{ }^{\circ}\text{C}$. As temperaturas escolhidas para o processo em sistema aberto, $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $210\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondem, respectivamente, aos padrões Thermo-S (inchamento/contração tangencial entre 6% e 8%, classe de durabilidade 3) e Thermo-D (inchamento/contração tangencial entre 5% e 6%, classe de durabilidade 2) do processo ThermoWood® para madeira de folhosas (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

4.3 Produção de corpos de prova

Das 15 amostras iniciais de cada tratamento, foram selecionadas 10 para a produção de corpos de prova. De cada amostra, produziu-se um corpo de prova de $25\text{ x }25\text{ x }9\text{ mm}$ (tangencial x radial x longitudinal), dimensões estabelecidas pela

American Wood Protection Association - AWP A E30-16 (2016). Os mesmos corpos de prova foram utilizados nos ensaios de colorimetria e biodeterioração por fungos.

4.4 Colorimetria

As análises colorimétricas foram realizadas pelo sistema CIELAB (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, 1976), com um espectrofotômetro portátil CM 2600d, versão 1.41, da Konica Minolta Sensing, Inc. Utilizou-se iluminante padrão D65, ângulo de observação de 10° e luz especular incluída. O aparelho foi calibrado com o padrão preto e branco, com a placa CM-A145. Foram medidos os parâmetros colorimétricos L^* (luminosidade), a^* (coordenada do eixo vermelho-verde) e b^* (coordenada do eixo amarelo-azul). Os parâmetros C^* (saturação) e h° (ângulo de tinta) foram calculados pelas Equações 1 e 2 (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, 1976).

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

$$h^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (2)$$

As medições foram tomadas em dois pontos, pelo contato direto entre a superfície dos corpos de prova e a área de iluminação do aparelho (Figura 2). Contudo, para a análise do efeito da modificação térmica na cor da madeira, foram considerados apenas os dados coletados na face tangencial dos corpos de prova.

A cor da madeira foi classificada segundo o agrupamento de cores proposto por Camargo e Gonzalez (2001). Para isso, as médias dos parâmetros colorimétricos, foram enquadradas em intervalos propostos para as classes de cor, realizando-se aproximações quando necessário. Adicionalmente, empregou-se o aplicativo “Análise de Cor” para obter uma representação da cor da madeira, o qual utiliza as médias de L^* , a^* e b^* do sistema CIELAB e as converte para o sistema de cores RGB (*red*, *green*, *blue*), gerando-se um código de cor.

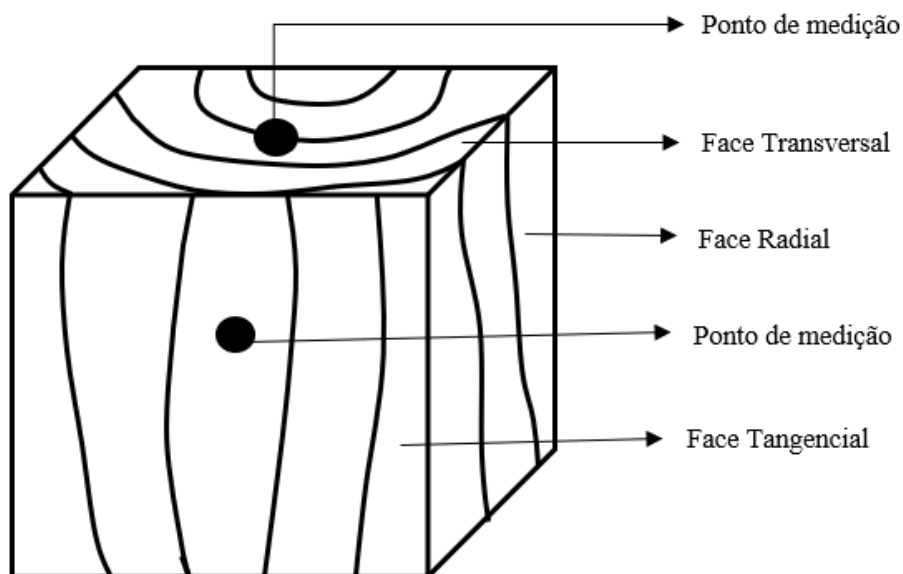


Figura 2 – Representação do corpo de prova e a posição de medição da cor.

Fonte: O autor.

As diferenças de cor, conhecidas como deltas (Δ), foram calculadas para mostrar as diferenças absolutas nas coordenadas de cor entre as amostras modificadas termicamente e o Controle. Os deltas para L^* (ΔL), a^* (Δa) e b^* (Δb) podem ter resultados negativos (-) ou positivos (+). A variação total de cor, resultado do delta E (ΔE), é sempre positiva. Em que: ΔL^* = diferença em mais claro e mais escuro (+ = mais claro, - = mais escuro); Δa^* = diferença em vermelho e verde (+ = mais vermelho, - = mais verde); Δb^* = diferença em amarelo e azul (+ = mais amarelo, - = mais azul); ΔE^* = variação total da cor.

Para a determinação do ΔE^* entre as coordenadas utilizou-se a Equação 3 (KONICA MINOLTA, 1998). Posteriormente, o ΔE^* da madeira foi categorizado qualitativamente de acordo com os níveis de percepção visual (Quadro 1), proposto por Hikita et al. (2001).

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

Em que – ΔE^* : variação total da cor da madeira; ΔL^* , Δa^* e Δb^* : diferença entre as medições de L^* , a^* e b^* antes (Controle) e depois da modificação térmica.

Quadro 1 - Classificação da variação total da cor da madeira (ΔE^*).

Varição total da cor (ΔE^*)	Classificação colorimétrica
0,0 – 0,5	Insignificante
0,6 – 1,5	Ligeiramente perceptível
1,6 – 3,0	Notável
3,1 – 6,0	Apreciável
6,1 – 12,0	Muito apreciável

Fonte: Hikita et al. (2001).

4.5 Resistência à biodeterioração por fungos

O ensaio de biodeterioração foi conduzido conforme a norma AWPA E-30-16 (2016), com os fungos apodrecedores *Trametes versicolor* (podridão branca) e *Coniophora puteana* (podridão parda), ao serem utilizados 10 corpos de prova por situação (tratamento por fungo). Corpos de prova de *Gmelina arborea* e *Pinus elliottii* foram utilizados como referência para, respectivamente, os fungos *T. versicolor* e *C. puteana*.

Inicialmente, os corpos de prova foram colocados em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,0001 g) para a determinação da massa anidra inicial ($M_{0\%i}$). Foram utilizados frascos de vidro transparente de 600 mL, com boca larga e tampa rosqueável, preenchidos com 300 g de solo com pH de 7,3 e capacidade de retenção de água igual de 22%. O solo de cada frasco foi umedecido com 70 mL de água destilada e, adicionadas duas placas alimentadoras de madeira de *Pinus elliottii*, de dimensões 3 x 28 x 35 mm (tangencial x radial x longitudinal), por frasco. Depois, os frascos foram esterilizados em autoclave a 103 kPa e 121 °C por 30 minutos.

Após o resfriamento, porções de culturas puras dos fungos foram inoculadas nas placas alimentadoras e os frascos foram mantidos em sala climatizada (27 ± 2 °C e $70 \pm 4\%$ de umidade relativa) por quatro semanas. Após o desenvolvimento dos fungos nas placas e a colonização dos mesmos no solo, adicionaram-se dois corpos de prova por frasco. O ensaio foi conduzido em mesma sala climatizada por um período de 12 semanas (Figura 3).

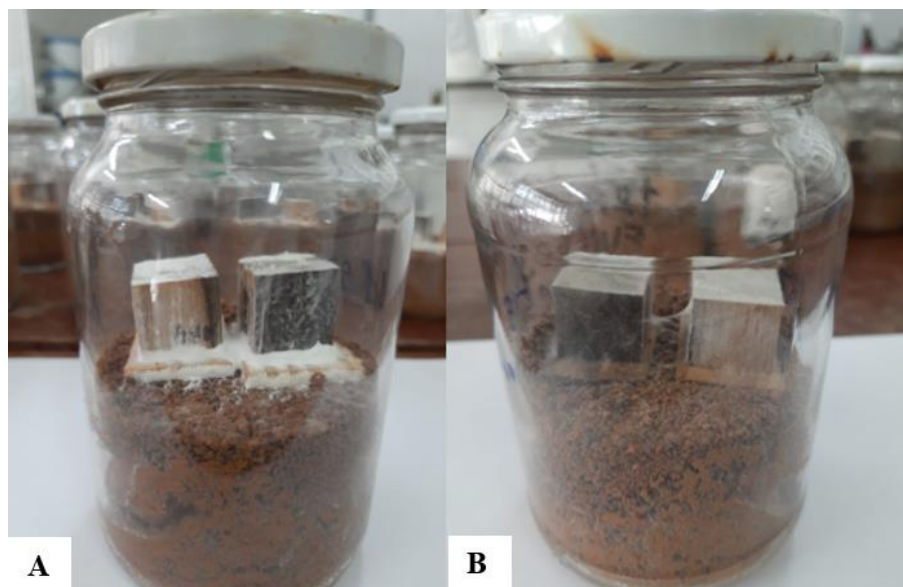


Figura 3 – Frascos inoculados com fungos. A: *Trametes versicolor*. B: *Coniophora puteana*.

Fonte: O autor.

Ao término do ensaio, os corpos de prova foram retirados dos frascos e, cuidadosamente, o micélio dos fungos foi removido com o uma escova de cerdas macias e água corrente. Após a remoção do micélio do fungo, obteve-se a massa anidra final ($M_{0\%f}$) dos corpos de prova com o mesmo procedimento utilizado para a massa anidra inicial. A perda de massa (PM, %) foi calculada e a resistência da madeira foi categorizada qualitativamente de acordo com os critérios de perda de massa (AWPA E30-16, 2016) apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação da perda de massa em ensaio de resistência à biodeterioração por fungos.

Perda de Massa (%)	Massa Residual (%)	Classes de Resistência
0 – 10	90 – 100	Muito resistente
11 – 24	76 – 89	Resistente
25 – 44	56 – 75	Moderadamente resistente
≥ 45	≤ 55	Não resistente

Fonte: AWPA E30-16 (2016).

4.6 Cor da madeira depois do ensaio de biodeterioração

A cor da madeira foi analisada novamente depois da realização do ensaio de biodeterioração. Os corpos de prova foram medidos, ao adotar o mesmo procedimento citado anteriormente (seção 4.4), ao serem consideradas as duas faces de medição – tangencial e transversal (Figura 2).

A variação total da cor da madeira (ΔE^*) de cada situação (tratamento e fungo) foi calculada com a Equação 3. Foram considerados no cálculo de ΔE^* os parâmetros colorimétricos medidos na face tangencial antes e depois do ensaio de biodeterioração. Da mesma forma, os resultados de ΔE^* foram classificados de acordo com o disposto no Quadro 1.

4.7 Análises estatísticas

A análise estatística foi realizada em delineamento inteiramente casualizado (DIC) e o nível de significância adotado foi de até 5% de probabilidade para todos os testes. Utilizou-se o teste de Bartlett para a verificação da homogeneidade das variâncias. O efeito dos tratamentos nas propriedades analisadas foi verificado pela análise de variância (ANOVA) e aplicou-se o teste de Tukey para diferenciação das médias. Quando o teste de Bartlett indicou variâncias não homogêneas, utilizou-se o teste não-paramétrico H de Kruskal-Wallis e o teste de Bonferroni para a diferenciação das medianas dos escores do teste H.

A correlação entre todos os parâmetros colorimétricos e a perda de massa foi calculada com a Equação 4. Foram considerados para as correlações os parâmetros colorimétricos mensurados nas faces tangencial e transversal dos corpos de prova, antes e depois do ensaio de biodeterioração. Foi realizado o teste de significância (teste t) para o coeficiente da correlação (Equação 5). Adotou-se uma escala proposta por Appolinário (2006) para a avaliação qualitativa do coeficiente de correlação (r) (Quadro 3).

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \cdot \sum Y}{n}}{\sqrt{\left[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}\right] \cdot \left[\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}\right]}} \quad (4)$$

Em que – r: coeficiente de correlação; X e Y: variáveis dependentes; n: número de amostras.

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (5)$$

Quadro 3 - Classificação qualitativa do coeficiente de correlação (r).

Coeficiente de correlação (r)	Classificação
0,00	Nula
0,01 – 0,10	Muito fraca
0,11 – 0,30	Fraca
0,31 – 0,59	Moderada
0,60 – 0,80	Forte
0,81 – 0,99	Muito forte
1,00	Absoluta

Fonte: Appolinário (2006).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Colorimetria

Na Tabelas 1 observam-se as médias dos parâmetros colorimétricos e na Tabela 2 seus respectivos deltas com as classificações qualitativas. Na Figura 4 encontra-se a cor da madeira de cada tratamento, conforme obtido no aplicativo “Análise de Cor” com base nos parâmetros colorimétricos L*, a* e b*. O aplicativo gerou os códigos #9f7e60, #95785c, #866a50 e #6e5542, respectivamente para o Controle, A185, A210 e F160.

Tabela 1 - Médias dos parâmetros colorimétricos e da variação total da cor, por tratamento.

Tratamento	Médias								
	L*	a*	b*	Escore médio	C	Escore médio	h°	ΔE*	Escore médio
Controle	55,33 a (11%)	8,53 a (23%)	21,14 (8%)	57,25 A	22,87 (8%)	59,15 A	68,13 a (7%)	-	-
F160	38,52 c (9%)	7,71 ab (21%)	14,79 (26%)	18,35 B	16,70 (24%)	20,95 B	62,10 b (5%)	18,67 (39%)	45,35 A
A185	52,80 a (11%)	6,90 b (26%)	19,57 (13%)	43,90 A	20,83 (12%)	41,30 A	70,54 a (7%)	6,32 (64%)	19,50 B
A210	47,33 b (12%)	7,37 ab (17%)	19,14 (15%)	42,50 A	20,56 (13%)	40,60 A	68,71 a (6%)	10,03 (78%)	26,65 B
Teste H	-	-	-	29,14**	-	27,06**	-	-	23,37**
Fc	38,51**	3,36*	-	-	-	-	14,52**	-	-

Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade. n.s.: não significativo (P > 0,05). *: significativo a 5% de probabilidade (P < 0,05). **: significativo a 1% de probabilidade (P < 0,01).

Fonte: O autor.

Tabela 2 - Médias de variação dos parâmetros colorimétricos e classificação da cor

Tratamentos	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Varição total*	Classificação da cor**
F160	- 16,81	- 0,82	- 6,35	18,67	Muito apreciável	Marrom-escuro
A185	- 2,53	- 1,63	- 1,57	6,32	Muito apreciável	Oliva
A210	- 8,00	- 1,16	-2,00	10,03	Muito apreciável	Oliva

*Hikita et al. (2001). **Camargo e Gonzalez (2001).

Fonte: O autor.

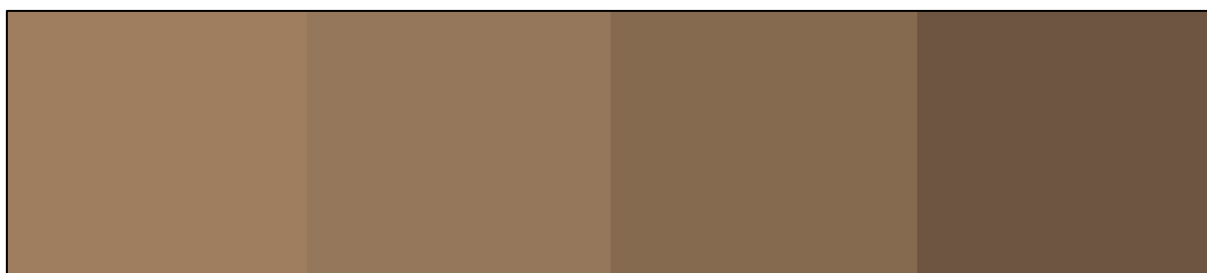


Figura 4 – Representação da cor da madeira. Da esquerda para a direita: Controle, A185, A210 e F160.

Fonte: O autor.

Ao observar os resultados da variação da luminosidade (ΔL^*) (Tabela 2), nota-se que a variação foi negativa para os três tratamentos, indicando o escurecimento da madeira. Conforme o teste F, houve diferença significativa entre os tratamentos ($P < 0,05$). E para os resultados de b^* , C^* e ΔE^* , houve diferença significativa entre os tratamentos ($P < 0,05$) de acordo com o teste não-paramétrico H de Kruskal-Wallis.

A maior variação em módulo foi verificada para o F160, sendo assim o tratamento que causou maior escurecimento na cor original da madeira. A variação da luminosidade para A185 foi a menor entre os tratamentos, indicando que, apesar de ter escurecido, a cor obtida foi a mais clara entre os tratamentos. A análise do parâmetro L^* indicou que quanto mais agressivo o processo (maior perda de massa),

maior foi o escurecimento da madeira, confirmando o padrão relatado na literatura (CUCCUI et al., 2017; GASPARIK et al., 2019; LOPES et al., 2014).

O efeito da modificação térmica no parâmetro a^* é dependente do tipo de extrativo presente na madeira. Mészáros et al. (2007) e Pincelli et al. (2012) avaliaram a madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* e atribuíram a redução do matiz vermelho (a^*) com a volatilização dos extrativos polares, decorrente do aumento da temperatura.

A variação do parâmetro a^* foi negativa para os três tratamentos (Tabela 2), indicando que houve aumento da tonalidade verde na cor da madeira. No entanto, dentre todos os parâmetros colorimétricos, verificou-se as menores variações entre a madeira modificada termicamente e o Controle para a^* , indicando que a modificação térmica afetou pouco essa variável. Esse padrão também foi reportado por Gasparik et al. (2019) para a madeira de teca modificada termicamente em sistema aberto a 160 °C, 180 °C e 210 °C.

A variação do parâmetro b^* também foi negativa para os três tratamentos (Tabela 2), indicando que houve aumento da tonalidade azul na cor da madeira. A variação nessa coordenada foi maior para F160 e, assim como ocorreu para o parâmetro a^* , não foi tão expressiva para os demais tratamentos.

As médias de saturação (C^*) (Figura 5) foram baixas para todos os tratamentos, o que pode ser explicado pelos valores utilizados no seu cálculo (Equação 1), que são as coordenadas a^* e b^* , resultando em baixa saturação de cor.

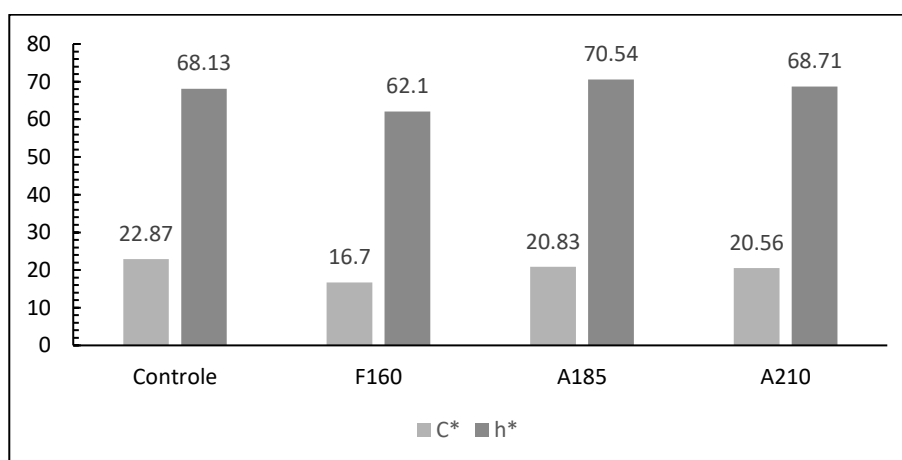


Figura 5 – Médias dos parâmetros saturação (C^*) e ângulo de tinta (h°).

Fonte: O autor.

A associação dos ângulos de tinta mais próximos de 90° e os valores mais altos para a coordenada b^* (em relação a coordenada a^*), evidenciam a tonalidade “marrom-amarelada” da madeira de teca. Com base nos resultados do Controle, a cor da madeira de teca pode ser considerada próxima a uma tonalidade neutra (Figura 6). Após a modificação térmica, a cor da madeira foi alterada, tornando-se mais acinzentada e escura à medida em que os tratamentos se tornam mais agressivos (maior perda de massa). Essa alteração é explicada pela redução nos valores dos parâmetros luminosidade (L^*) e saturação de cor (C^*).

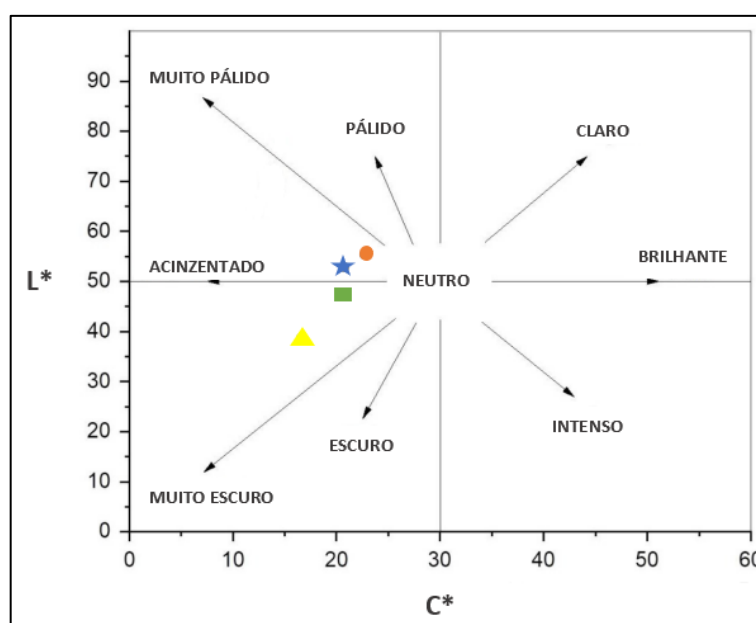


Figura 6 – Diagrama de luminosidade (L^*) x saturação (C^*). Controle: círculo laranja; F160: triângulo amarelo; A185: estrela azul; A210: retângulo verde.

Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2021).

De acordo com os resultados da Tabela 1, o tratamento F160 teve a maior média de variação total da cor ($\Delta E^* = 18,67$) e diferiu significativamente dos tratamentos A185 e A210 (médias iguais a 6,32 e 10,03 respectivamente). Esse resultado reforça o que consta na Figura 6, em que o tratamento F160 foi o mais distante do Controle no diagrama $L^* \times C^*$. Destaca-se que o ΔE^* do tratamento F160 foi maior que o limite superior (12,0) da escala de classificação colorimétrica de Hikita et al. (2001).

Esse resultado difere do reportado por Garcia et al. (2014), que analisaram o processo de modificação térmica da madeira de teca em sistema aberto para as

temperaturas de 180 °C e 200 °C, e reportaram maiores variações na maior temperatura. Isso indica que o tipo de processo (sistema aberto e fechado) também deve ser considerado no efeito da modificação da cor da madeira, e não apenas a temperatura adotada.

No entanto, o ΔE^* de todos os três tratamentos foi classificado como “muito apreciável” (Tabela 2), segundo a classificação de Hikita et al. (2001) (Quadro1). Ou seja, mesmo tendo um menor efeito, a alteração da cor da madeira modificada termicamente do tratamento A185 também foi sensorialmente perceptível em relação ao Controle. A cor da madeira de teca está no grupo de cor “oliva-amarelado” (Tabela 2), segundo a classificação de Camargo e Gonzalez (2001). Seguindo a mesma classificação, a madeira do tratamento F160 está no grupo “marrom-escuro” e a dos tratamentos A185 e A210 está no grupo de cor “oliva”.

5.2 Resistência à biodeterioração por fungos

Na Tabela 3 encontram-se os resultados de perda de massa do ensaio de biodeterioração. Conforme o teste F houve diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$). Conforme o teste não-paramétrico H de Kruskal-Wallis, utilizado para os resultados do teste com o fungo *Trametes versicolor*, houve diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$).

As espécies de referência (*Gmelina arborea* e *Pinus elliottii*) tiveram perda de massa maior do que 20% (respectivamente, 29,36% e 39,35%), indicando que os fungos utilizados no ensaio possuíam boa capacidade de biodeterioração (“Moderadamente resistente”).

Para o fungo *T. versicolor*, os tratamentos com madeira de teca não diferiram significativamente entre si. Apenas o tratamento F160 não diferiu significativamente da Referência. Conforme a classificação qualitativa da AWPA E-30-16 (2016), Quadro 2, tanto o Controle quanto a madeira modificada termicamente foram classificados na melhor categoria, “muito resistente”, com perda de massa inferior a 10%. Para o fungo *C. puteana*, todos os tratamentos com a madeira de teca diferiram significativamente da Referência. Porém, aqueles tratamentos não diferiram significativamente entre si.

Tabela 3 - Resultados de perda de massa (%) dos tratamentos por fungo utilizado

Tratamento	Médias		
	<i>Trametes versicolor</i>	Escore médio	<i>Coniophora puteana</i>
Controle	2,00 (98%)	15,40 B	7,58 b (70%)
F160	4,04 (33%)	30,50 AB	5,22 b (59%)
A185	2,71 (82%)	20,55 B	5,13 b (63%)
A210	1,76 (56%)	15,55 B	4,27 b (81%)
<i>Pinus elliottii</i>	-	-	39,35 a (13%)
<i>Gmelina arborea</i>	29,36 (37%)	45,50 A	-
Teste de Bartlett		69,11**	4,98 ^{ns}
Teste H		30,62**	-
F _c		-	131,78**

Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem (teste de Tukey, $p > 0,05$). n.s.: não significativo ($p > 0,05$). *: significativo ($p < 0,05$). **: significativo ($p < 0,01$).

Fonte: O autor.

Em suma, para ambos os fungos apodrecedores, o efeito do processo de modificação térmica foi nulo na resistência da madeira de teca. O mesmo padrão ocorreu no trabalho de Brito (2017) com os fungos *Trametes versicolor* (podridão branca) e *Postia placenta* (podridão parda). Resultados semelhantes também foram reportados por Bellon (2013), no entanto para outros fungos de podridão branca (*Lentinula edodes* e *Pleurotus djamor*).

Para todas as situações testadas (tratamentos e fungos), a madeira de teca (Controle e modificada termicamente) recebeu a melhor classificação qualitativa da AWPA E-30-16 (2016), Quadro 2, sendo “muito resistente”, com perda de massa inferior a 10%. Destaca-se que foram verificadas maiores médias de perda de massa causadas por *C. puteana* (podridão parda) que por *T. versicolor* (podridão branca). Brito (2017) também reportou esse mesmo padrão com os fungos *Postia placenta* (podridão parda) e *Trametes versicolor* (podridão branca).

5.3 Efeito da biodeterioração na cor da madeira

Nas Figuras 7 e 8 encontram-se os resultados da variação total da cor (ΔE^*), respectivamente depois do ataque dos fungos *T. versicolor* e *C. puteana*. Reforça-se que para o cálculo de ΔE^* foram considerados os parâmetros colorimétricos medidos na face tangencial dos corpos de prova antes e depois do ensaio de biodeterioração. Essa alteração foi mais evidente para o ataque de *C. puteana*. Esses resultados podem ser verificados pela variação total da cor (ΔE^*) (Figuras 8 e 9).

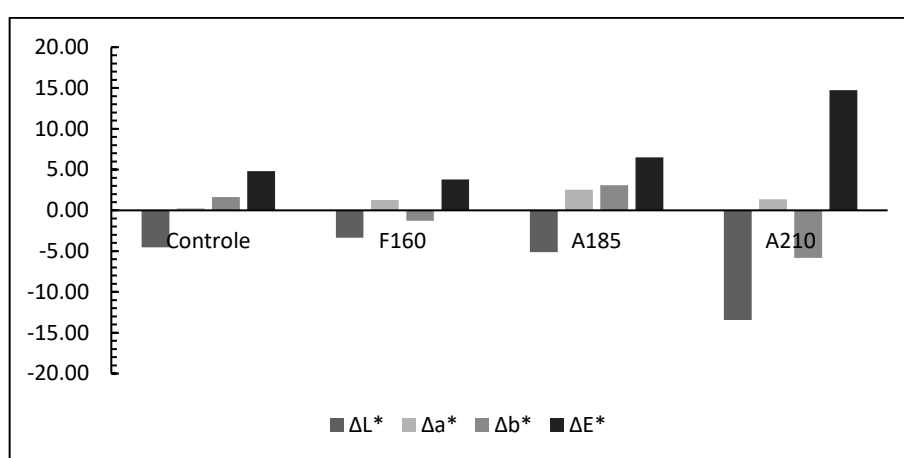


Figura 7 - Variação total da cor (ΔE^*) e dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* causados pela exposição ao fungo *Trametes versicolor*.

Fonte: O autor.

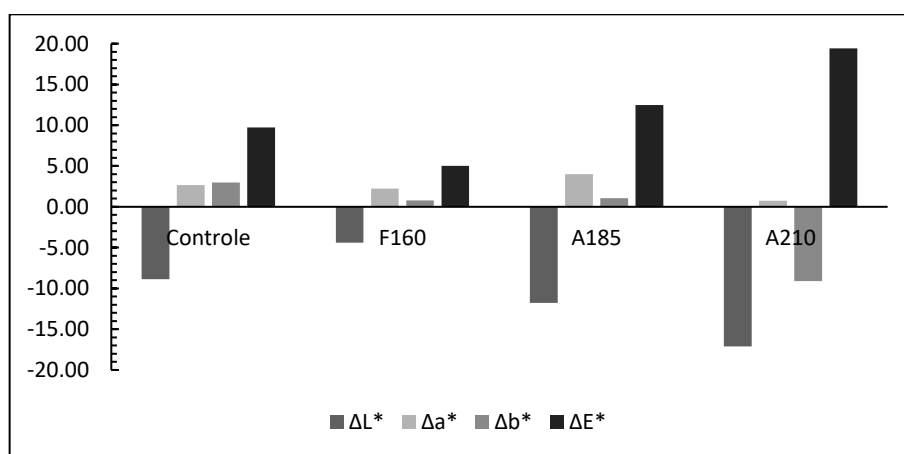


Figura 8 - Variação total da cor (ΔE^*) e dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* causados pela exposição ao fungo *Coniophora puteana*.

Fonte: O autor.

O ataque dos fungos causou maior variação no parâmetro luminosidade (L^*) em todos os tratamentos, indicando o escurecimento da madeira. Para a madeira modificada termicamente, o ΔL^* aumentou continuamente do tratamento F160 para o A 210, em que este teve os maiores ΔL^* (em módulo, 13,44 e 17,12 para *T. versicolor* e *C. puteana*, respectivamente).

Assim como ocorreu para os processos de modificação térmica (Figura 5), a coordenada vermelho-verde (a^*) também não foi expressivamente afetada pela biodeterioração. Os maiores Δa^* foram do tratamento A185, que foi o único em que a coordenada a^* diferiu significativamente do Controle na análise do efeito da modificação térmica na cor da madeira (Tabela 1). A variação da coordenada amarelo-azul (b^*) também não foi tão expressiva quanto ocorreu para L^* . Os maiores Δb^* (em módulo) para ambos os fungos foram do tratamento A210.

As variações de todos os parâmetros colorimétricos foram maiores para o fungo *Coniophora puteana* (Figura 8), que causou mais perda de massa que o *T. versicolor* (Tabela 2). Esse resultado corrobora com o trabalho de Stangerlin et al. (2013), que relataram maior variação total da cor da madeira de três espécies amazônicas causada pelo ataque de *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda) do que por *T. versicolor*.

Para ambos os fungos a maior variação total da cor foi do tratamento A210, o que também pode ser visto na Figura 9. A classificação colorimétrica foi “muito apreciável” e maior que o limite superior (12,0) da escala de Carvalho et al. (2021). A maior variação total da cor desse tratamento pode ser explicada, principalmente, pela variação dos parâmetros L^* e b^* . Na Tabela 4 encontram-se os códigos de cor gerados no aplicativo “Análise de Cor” e que deram origem à Figura 9.

A classificação colorimétrica do tratamento A185 também foi “muito apreciável” para ambos os fungos, com valor maior que 12,0 depois do ataque de *C. puteana*. Apenas o tratamento F160 não foi classificado como “muito apreciável” depois do ataque desse fungo; de fato, a mudança de cor do F160 foi classificada como “apreciável” depois do ataque dos fungos.

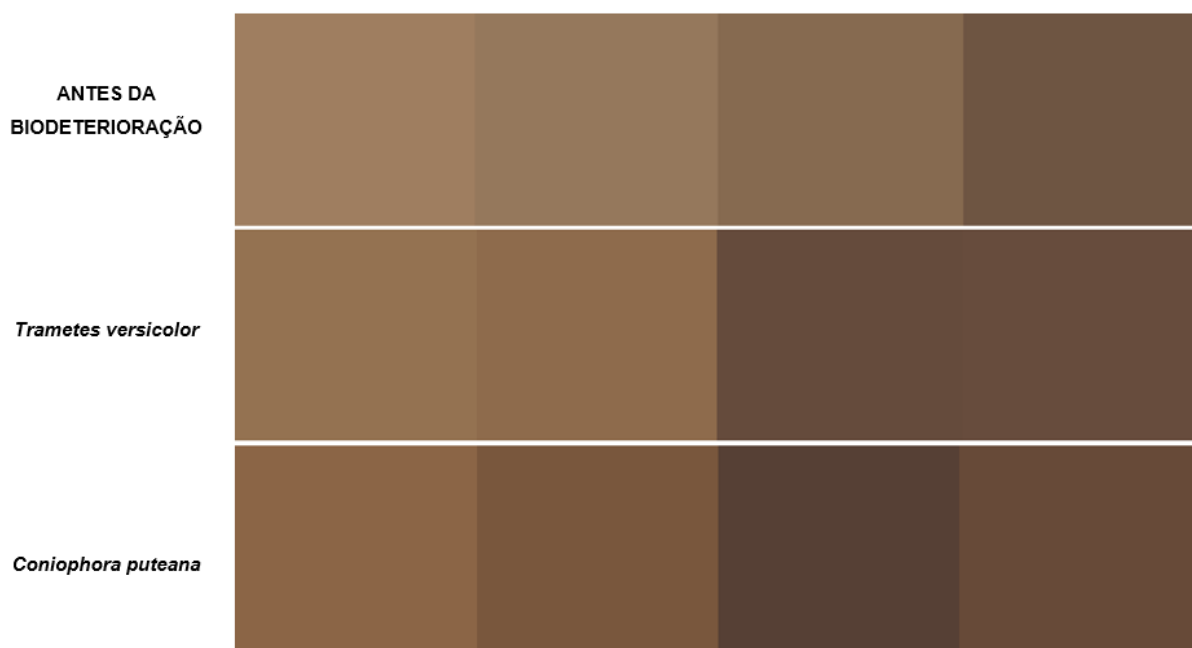


Figura 9 – Comparação da cor da madeira de teca antes da biodeterioração e depois da exposição aos fungos *Trametes versicolor* e *Coniophora puteana*. Da esquerda para a direita: Controle, A185, A210 e F160.

Fonte: O autor.

Tabela 4 – Códigos de cor obtidos no aplicativo “Análise de Cor” para cada tratamento, antes e depois da biodeterioração.

Tratamentos	Antes da biodeterioração	Depois da biodeterioração	
		<i>Trametes versicolor</i>	<i>Coniophora puteana</i>
Controle	#9f7e60	#947251	#8b6546
F160	#6e5542	#674c3d	#674a38
A185	#95785c	#8e6b4c	#79573d
A210	#866a50	#654b3c	#564035

Fonte: O autor.

5.4 Correlações

Nas Tabelas 5 e 6 encontram-se os resultados das correlações entre os parâmetros colorimétricos L^* , a^* , b^* , C^* e h° e a perda de massa. O objetivo inicial era verificar como os parâmetros colorimétricos (mensurações rápidas e baratas) se correlacionavam com a perda de massa (ensaio longo e caro), como uma análise exploratória para a elaboração futura de modelos de predição da durabilidade da madeira com base na colorimetria. Como se tratava de uma análise exploratória, foram realizadas as correlações antes e depois da exposição aos fungos, porém, vislumbrando-se a modelagem, o enfoque principal será para as correlações antes da biodeterioração.

Também foram realizadas as correlações entre ΔE^* e a perda de massa depois da exposição aos fungos, porém, para todas as condições testadas (tratamentos, faces e fungos), as correlações foram não significativas ($p > 0,05$). Por isso esses resultados não foram mostrados nas Tabelas 5 e 6. Como foram muitas correlações, para simplificar a discussão, o enfoque foi direcionado apenas os coeficientes de correlação significativos ($p > 0,05$) e classificados qualitativamente como “forte” (0,60-0,80) e “muito forte” (0,81-0,99), conforme Appolinário (2006).

Para as condições testadas, o tratamento A210 foi o único em que todas as correlações não foram significativas. O mesmo ocorreu para o tratamento A185 considerando-se as correlações dos dados antes da exposição ao fungo *C. puteana* (podridão parda).

Tabela 5 – Correlação entre a perda de massa (PM) e os parâmetros colorimétricos antes e depois da exposição ao fungo *Trametes versicolor*.

Tratamento	Face	PM x L*	PM x a*	PM x b*	PM x C*	PM x h°
Colorimetria antes da biodeterioração						
Controle	x	0,85 (4,66**)	-0,68 (2,63*)	0,05 (0,16 ^{ns})	-0,12 (0,34 ^{ns})	0,69 (2,70*)
	t	0,76 (3,29*)	-0,85 (4,60**)	-0,46 (1,48 ^{ns})	-0,69 (2,66*)	0,80 (3,77**)
F160	x	0,71 (2,89*)	0,55 (1,87 ^{ns})	0,67 (2,58*)	0,66 (2,48*)	0,61 (2,18 ^{ns})
	t	0,32 (0,94 ^{ns})	0,25 (0,73 ^{ns})	0,30 (0,90 ^{ns})	0,30 (0,90 ^{ns})	0,21 (0,59 ^{ns})
A185	x	0,97 (10,54**)	-0,22 (0,63 ^{ns})	0,77 (3,42**)	0,71 (2,87*)	0,81 (3,87**)
	t	0,80 (3,78**)	-0,72 (2,97*)	0,00 (0,01 ^{ns})	-0,23 (0,66 ^{ns})	0,71 (2,86*)
A210	x	-0,01 (0,03 ^{ns})	0,41 (1,27 ^{ns})	0,16 (0,47 ^{ns})	0,22 (0,62 ^{ns})	-0,12 (0,35 ^{ns})
	t	0,27 (0,79 ^{ns})	-0,53 (1,76 ^{ns})	0,07 (0,20 ^{ns})	0,00 (0,01 ^{ns})	0,48 (1,56 ^{ns})
Colorimetria depois da biodeterioração						
Controle	x	0,87 (4,94**)	-0,30 (0,87 ^{ns})	0,56 (1,89 ^{ns})	0,50 (1,64 ^{ns})	0,81 (3,87**)
	t	0,93 (7,09**)	0,30 (0,88 ^{ns})	0,89 (5,44**)	0,88 (5,27**)	0,75 (3,18*)
F160	x	0,22 (0,63 ^{ns})	0,08 (0,22 ^{ns})	0,15 (0,43 ^{ns})	0,14 (0,40 ^{ns})	0,16 (0,46 ^{ns})
	t	0,66 (2,48*)	0,50 (1,64 ^{ns})	0,67 (2,55*)	0,64 (2,38*)	0,71 (2,82*)
A185	x	0,83 (4,29**)	0,48 (1,56 ^{ns})	0,77 (3,40**)	0,76 (3,30*)	0,60 (2,11 ^{ns})
	t	0,87 (5,06**)	0,04 (0,11 ^{ns})	0,64 (2,34*)	0,59 (2,07 ^{ns})	0,82 (4,00**)
A210	x	0,57 (1,97 ^{ns})	0,09 (0,24 ^{ns})	0,53 (1,77 ^{ns})	0,52 (1,71 ^{ns})	0,54 (1,82 ^{ns})
	t	0,17 (0,48 ^{ns})	0,60 (2,14 ^{ns})	0,31 (0,93 ^{ns})	0,37 (1,13 ^{ns})	0,07 (0,21 ^{ns})

Valores entre parênteses correspondem ao valor calculado para o teste t de Student. x: face transversal; t: face tangencial. n.s.: não significativo ($p > 0,05$). *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$).

Fonte: O autor.

Tabela 6 – Correlação entre a perda de massa (PM) e os parâmetros colorimétricos antes e depois da exposição ao fungo *Coniophora puteana*.

Tratamento	Face	PM x L*	PM x a*	PM x b*	PM x C*	PM x h*
Colorimetria antes da biodeterioração						
Controle	x	0,53 (1,76 ^{ns})	-0,38 (1,16 ^{ns})	-0,08 (0,24 ^{ns})	-0,16 (0,45 ^{ns})	0,24 (0,71*)
	t	0,36 (1,09 ^{ns})	-0,64 (2,33*)	-0,10 (0,29 ^{ns})	0,57 (1,95 ^{ns})	0,28 (0,81 ^{ns})
F160	x	0,71 (2,81*)	0,72 (2,94*)	0,77 (3,44**)	0,66 (2,51*)	0,61 (2,17 ^{ns})
	t	0,54 (1,83 ^{ns})	0,69 (2,70*)	0,55 (1,88 ^{ns})	-0,18 (0,52 ^{ns})	0,66 (2,52*)
A185	x	0,59 (2,09 ^{ns})	-0,33 (0,98 ^{ns})	0,32 (0,96 ^{ns})	0,63 (2,28 ^{ns})	0,47 (1,52 ^{ns})
	t	0,31 (0,94 ^{ns})	-0,63 (2,29 ^{ns})	-0,44 (1,39 ^{ns})	0,29 (0,87 ^{ns})	0,63 (2,27 ^{ns})
A210	x	0,34 (1,02 ^{ns})	0,07 (0,21 ^{ns})	0,29 (0,85 ^{ns})	0,12 (0,34 ^{ns})	0,03 (0,10 ^{ns})
	t	0,23 (0,68 ^{ns})	-0,31 (0,93 ^{ns})	0,01 (0,03 ^{ns})	0,28 (0,82 ^{ns})	0,18 (0,51 ^{ns})
Colorimetria depois da biodeterioração						
Controle	x	0,45 (1,44 ^{ns})	0,23 (0,67 ^{ns})	0,53 (1,78 ^{ns})	0,50 (1,65 ^{ns})	0,63 (2,30 ^{ns})
	t	0,28 (0,81 ^{ns})	0,68 (2,66**)	0,71 (2,84*)	0,78 (3,49**)	0,03 (0,08 ^{ns})
F160	x	0,61 (2,17 ^{ns})	0,76 (3,36**)	0,76 (3,35*)	0,77 (3,41**)	0,55 (1,87 ^{ns})
	t	0,66 (2,52*)	0,68 (2,62*)	0,78 (3,55**)	0,76 (3,34*)	0,79 (3,65**)
A185	x	0,47 (1,52 ^{ns})	0,50 (1,62 ^{ns})	0,65 (2,41*)	0,68 (2,59*)	0,32 (0,96 ^{ns})
	t	0,63 (2,27 ^{ns})	0,35 (1,07 ^{ns})	0,66 (2,48*)	0,63 (2,28 ^{ns})	0,75 (3,24*)
A210	x	0,03 (0,10 ^{ns})	0,23 (0,66 ^{ns})	0,15 (0,43 ^{ns})	0,17 (0,48 ^{ns})	-0,04 (0,12 ^{ns})
	t	0,18 (0,51 ^{ns})	0,05 (0,14 ^{ns})	0,14 (0,39 ^{ns})	0,12 (0,34 ^{ns})	0,18 (0,51 ^{ns})

Valores entre parênteses correspondem ao valor calculado para o teste t de Student. x: face transversal; t: face tangencial. n.s.: não significativo ($p > 0,05$). *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$).

Fonte: O autor.

No geral, melhores correlações foram verificadas para o fungo *T. versicolor* (10 correlações “muito fortes” e 23 “fortes”) do que para o *C. puteana*, que não teve nenhuma correlação “muito forte” e 22 “fortes”. Destaca-se que o *T. versicolor* causou menor perda de massa que o *C. puteana* para todos os tratamentos testados.

Ao avaliar a resistência natural da madeira de teca, Kokutse et al. (2006) relataram correlações significativas entre os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* e a perda de massa causada pelos fungos *Pycnoporus sanguineus* e *Coriolus* (\approx *Trametes*) *versicolor* (podridão branca), e *Antrrodia* sp. e *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda).

Para o *T. versicolor*, a luminosidade (L^*) foi o parâmetro colorimétrico que melhor se correlacionou com a perda de massa, com seis correlações “muito fortes” e quatro “fortes”, seguida do ângulo de tinta (h°). A maior correlação (0,97**) com a perda de massa foi verificada para a luminosidade obtida na face transversal (x) do tratamento A185 antes da exposição. De forma geral, as melhores correlações, tanto antes quanto depois da exposição ao fungo, ocorreram no tratamento A185.

Para o *C. puteana*, os parâmetros colorimétricos a^* e b^* foram os que melhor se correlacionaram com a perda de massa, ambos com seis correlações “fortes”. No entanto, a maior correlação (0,79**) com a perda de massa foi verificada para o ângulo de tinta (h°) obtido na face tangencial (t) do tratamento F160. De forma geral, as melhores correlações, tanto antes quanto depois da exposição ao fungo, ocorreram no tratamento F160.

Sobre o efeito da face de medição dos parâmetros colorimétricos, foi possível identificar alguns padrões. Para o Controle, independentemente do tipo de fungo e momento da análise (antes ou depois da exposição), as melhores correlações foram obtidas na face tangencial (t). O mesmo ocorreu para o tratamento F160, apenas para as correlações depois da biodeterioração; para as correlações antes da exposição os melhores resultados foram da face transversal (x). Para o tratamento A185, as melhores correlações foram na face transversal (x) para o *T. versicolor* (antes e depois da exposição). Por outro lado, para o *C. puteana*, não houve correlações significativas antes da exposição e não houve definição da melhor face de análise (x ou t) nas correlações depois da exposição ao fungo.

6 CONCLUSÕES

A modificação térmica escureceu o cerne jovem de teca, com maior alteração no processo em sistema fechado (pressurizado). Em sistema aberto (não pressurizado), houve pequena alteração da cor de 185 °C para 210 °C.

Ambos os fungos escureceram e causaram o amarelecimento da madeira de teca. Maior variação na cor e maior perda de massa ocorreram no ataque do *Coniophora puteana* (podridão parda).

A madeira modificada termicamente em sistema fechado teve baixa variação na cor após a exposição aos fungos apodrecedores.

Ambos os processos de modificação térmica tiveram efeito nulo na resistência da madeira de teca à biodeterioração por fungos apodrecedores. Tanto a madeira do Controle quanto as modificadas termicamente foram classificadas como “muito resistentes” a ambos os fungos apodrecedores.

Houve correlações significativas “fortes” e “muito fortes” entre os parâmetros colorimétricos L*, a*, b*, C* e h° para ambos os fungos. Contudo, não foi possível estabelecer um método para a elaboração futura de modelos de predição da biodeterioração com base na colorimetria.

Para todas as condições testadas, não houve correlações significativas para a madeira modificada termicamente em sistema aberto a 210 °C. As correlações não foram significativas em sistema aberto a 185 °C para o fungo *Coniophora puteana*.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION. AWPA. **E30-16**: Standard method for evaluating natural decay resistance of woods using laboratory decay tests. AWPA Book of Standards, Birmingham, p. 494-499, 2016.

APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da ciência**: filosofia e prática da pesquisa. São Paulo: Editora Thomson, 2006.

BARROS, S. V. S.; MUNIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 3, p. 337-342, 2014.

BELLON, K. R. R. **Modificação térmica da madeira de três espécies de florestas plantadas pelo processo VAP Holzsysteme®**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BRITO, T.M. **Efeito da modificação térmica nas propriedades da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis***. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.

BROCCO, V. F. **Extratos de resíduos industriais da madeira de teca para proteção da madeira a organismos xilófagos**. 2019. 90 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.

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

CARVALHO, D. E.; ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J.; CADEMARTORI, P. H. G. Colour changes and equilibrium moisture content on thermomechanical densified wood. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 93, 2021.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of wood. In: **Wood handbook**: wood as an engineering material. Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. cap. 14, p. 1-15 (General Technical Report, FPLGTR-190).

CUCCUI, I.; NEGRO, F.; ZANUTTINI, R.; ESPINOZA, M.; ALLEGRETTI, O. Thermo-vacuum modification of teak wood from fast-growth plantation. **BioResources**, Raleigh, v. 12, n. 1, p. 1903-1915, 2017.

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

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

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

GARCIA, R. A.; LOPES, J. O.; NASCIMENTO, A. M.; LATORRACA, J. V. F. Color stability of weathered heat-treated teak wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 16, n. 4, p. 453-462, 2014.

GASPARIK, M.; GAFF, M.; KACIK, F.; SIKORA, A. Color and chemical changes in teak (*Tectona grandis* L. f.) and meranti (*Shorea* spp.) wood after thermal treatment. **BioResources**, Raleigh, v. 14, n. 2, p. 2667-2683, 2019.

GOMES, F. S. **Efeito de processos de modificação térmica na composição química e na cor da madeira juvenil de *Tectona grandis* L.f.** 2022. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2022.

HIKITA, Y.; TOYADA, T.; AZUMA, M. Weathering testing of timber: discoloration. In: Imamura, Y. (Ed.). **High performance utilization of wood for outdoor uses.** Kyoto, FU: Press-Net, 2001. p. 27-32.

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

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual de 2019.** Brasília: Studio 113, 2019. 80 p. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2019-final.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. **Informações sobre madeiras.** Disponível em: <https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/78-teca.htm>. Acesso em: 04 set. 2021.

KOKUTSE, A. D.; STOKES, A.; BAILLÉRES, 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. **Comunicação precisa da cor:** controle de qualidade da 45 percepção à instrumentação. Seoul: Konica Minolta. p. 57, 1998.

LEITE, H. G. Um modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 89-98, 2006.

LOPES, J. O.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. F.; NASCIMENTO, A. M. D. Alteração da cor da madeira de teca por tratamento térmico. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, p. 521-534, 2014.

LOPES, J. O. **Uniformidade e estabilidade da cor da madeira termorretrificada de *Tectona grandis* L.f.** 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

MENEZES, W.M. **Efeito da modificação térmica em escala industrial na qualidade da madeira de *Tectona grandis* Linn. F.** 2017. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

MÉSZÁROS, E.; JAKAB, E.; VÁRHEGYI, G. TG/MS, Py-GC/MS and THM-GC/MS study of the composition and thermal behavior of extractive components of *Robinia pseudoacacia*. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.79, n.1, p.61-70, 2007.

MILITZ, H.; ALTGEN, M. Process and properties of thermally modified wood manufactured in Europe. In: SCHULTZ, T. P.; GOODELL, B.; NICHOLAS, D.D. (Orgs.). **Deterioration and protection of sustainable biomaterials**. Washington, D.C.: American Chemical Society, 2014. Cap. 16, p. 269-285.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, R. C.; DAMBROZ, G. B. V. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 8, p. 1393-1398, 2013.

MOYA, R.; BERROCAL, A. Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 67, n. 1, p. 109-109, 2010.

PAES, J. B. Resistência natural da madeira de *Corymbia maculata* (Hook.) K. D. Hill. & L. A. S. Johnson a fungos e cupins xilófagos, em condições de laboratório. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 6, p. 761-767, 2002.

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

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

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; PASTORE, T. C. M.; GARLET, A. Monitoramento da biodeterioração da madeira de três espécies amazônicas pela técnica da colorimetria. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 43, n. 4, p. 429-438, 2013.

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