



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

FELIPE DA SILVA GOMES

**EFEITO DE PROCESSOS DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA E NA COR DA MADEIRA JUVENIL DE *Tectona grandis* L.f.**

JÊRONIMO MONTEIRO – ES

2022

FELIPE DA SILVA GOMES

**EFEITO DE PROCESSOS DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA E NA COR DA MADEIRA JUVENIL DE *Tectona grandis* L.f.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Djeison Cesar Batista.

Coorientadores:

Prof. Dr. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori

Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto

JÊRONIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

G633e Gomes, Felipe da Silva, 1997-
EFEITO DE PROCESSOS DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA
NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NA COR DA MADEIRA
JUVENIL DE *Tectona grandis* L.f. / Felipe da Silva Gomes. -
2022.
66 f. : il.

Orientador: Djeison Cesar Batista.
Coorientadores: Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori,
Humberto Fantuzzi Neto.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias.

1. Produtos Florestais. 2. Modificação Térmica. 3. Química -
Madeira. 4. Colorimetria. 5. Teca (Árvore). I. Batista, Djeison
Cesar. II. Cademartori, Pedro Henrique Gonzalez de. III.
Fantuzzi Neto, Humberto. IV. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

**EFEITO DE PROCESSOS DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA E NA COR DA MADEIRA JUVENIL DE *Tectona grandis* L.f.**

Felipe da Silva Gomes

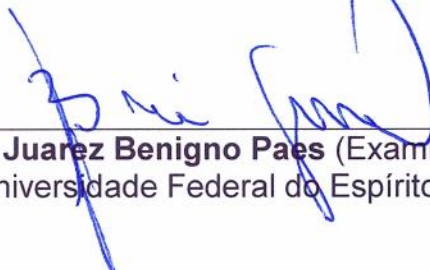
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 27 de maio de 2022.



Documento assinado digitalmente
FERNANDO WALLASE CARVALHO ANDRADE
Data: 27/05/2022 17:59:50-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Fernando Wallase Carvalho Andrade (Examinador externo)
Universidade Federal do Oeste do Pará



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



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

À minha querida vó, Rosângela Correia.

À minha mãe, Eliane Correia.

A mim, Felipe Gomes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda a minha família, em especial, à minha mãe, Eliane Correia da Silva Oliveira, pelo incentivo e condução por bons caminhos, pela ajuda em me tornar a pessoa de hoje. Por serem meus exemplos e por terem se esforçado para que eu pudesse chegar onde estou. Por torcerem e acreditarem no meu potencial, e me motivarem cada dia mais.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos durante esta trajetória, pelo carinho, auxílio, conselhos e oportunidades.

À minha psicóloga, Dra. Esther Rossi, cujo acompanhamento foi primordial para finalização deste trabalho. Agradeço por todo o exercício que temos feito até aqui, que tem me ajudado muito. Obrigado pela paciência e pelo comprometimento comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Djeison Cesar Batista, pela oportunidade de desenvolvimento deste estudo, pelo empenho, carinho, dedicação, comprometimento e motivação.

Aos meus coorientadores, Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto e Prof. Dr. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori, por aceitarem prontamente em participar desta pesquisa, contribuírem de forma muito significativa, e por se mostrarem dispostos e disponíveis em ajudar.

Ao meu querido Prof. Dr. Juarez Benigno Paes, por sua orientação, auxílio, conselhos, carinho e parceria formada.

Aos membros da banca, pela prontidão, dedicação e por todas as considerações.

A todos meus professores, aos técnicos laboratoriais, ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e ao Programa de Pós-Graduação em

Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES pela infraestrutura disponibilizada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos - Código de Financiamento 001, processo 88887.500121/2020-00.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo fomento à pesquisa, o qual custeou parte deste trabalho por meio da chamada MCTIC/CNPq N° 28/2018 – Universal/Faixa A, processo 422637/2018-1.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES, pelo fomento à pesquisa através do Edital FAPES N° 12/2020 - Estágio Técnico-Científico e Visita Técnico-Científica - 2ª Chamada, que possibilitou a execução de parte deste trabalho.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, à Universidade Federal do Paraná e à Embrapa Florestas, pela parceria, experiência e acolhimento durante o estágio técnico-científico.

A todos os demais amigos e profissionais que me auxiliaram por todo este caminho. Pelo apoio emocional, pela motivação, pelas experiências vividas e toda e qualquer outra forma de contribuição.

Obrigado!

*“Lessons continue to repeat not as a punishment, but
to make sure the understanding was complete.”*

@sistercody

RESUMO

GOMES, Felipe da Silva. **EFEITO DE PROCESSOS DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NA COR DA MADEIRA JUVENIL DE *Tectona grandis* L.f. 2022.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Djeison Cesar Batista. Coorientadores: Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto e Prof. Dr. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori.

Compreender o efeito de diferentes processos de modificação térmica em um mesmo material é importante para a tomada de decisões sobre as instalações industriais e para a escolha do uso dos produtos. O objetivo geral deste trabalho foi analisar o efeito de processos de modificação térmica em sistema fechado e sistema aberto na madeira juvenil de teca. Avaliou-se a madeira modificada termicamente em sistema fechado a 160 °C (CS160) e em sistema aberto a 185 °C e 210 °C (OS185 e OS210), além do Controle (madeira não tratada). Os processos foram analisados em termos de umidade final e perda de massa corrigida (PMC). Para a composição química da madeira, foram analisados os teores de alfa-celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos (totais, em acetona e diclorometano). Para avaliação da cor da madeira, utilizou-se o espaço de cor CIELab, com base em medições antes e depois da modificação térmica (amostras pareadas). O CS160 teve a maior PMC, e causou as maiores alterações na composição química da madeira em comparação ao Controle. Mesmo sendo processos distintos, houve correspondência entre os parâmetros colorimétricos do tratamento CS160 e do OS210. O tratamento OS185 foi o mais similar ao Controle, devido à baixa PMC desse processo (próxima de zero).

Palavras-chave: Teca; Sistema fechado; Sistema aberto; Análises químicas; CIELab.

ABSTRACT

GOMES, Felipe da Silva. **EFFECT OF THERMAL MODIFICATION PROCESSES ON THE CHEMICAL COMPOSITION AND COLOR OF JUVENILE *Tectona grandis* L.f. WOOD. 2022.** Dissertation (Master's in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Djeison Cesar Batista. Co-advisors: Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto and Prof. Dr. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori.

Understanding the effect of different thermal modification processes on the same material is important for decisions about industrial facilities and for choosing the use of products. The general objective of this work was to analyze the effect of closed-system and open-system thermal modification processes on juvenile teak wood. Thermally modified wood was evaluated in a closed system at 160 °C (CS160) and in an open system at 185 °C and 210 °C (OS185 and OS210), in addition to the Control (untreated wood). The processes were analyzed in terms of final moisture content and corrected mass loss (CML). For the chemical composition of the wood, the contents of alpha-cellulose, hemicelluloses, lignin, and extractives (total, in acetone and dichloromethane) were analyzed. The CIELab color space was used to evaluate the color of the wood, based on measurements before and after the thermal modification (paired samples). CS160 had the highest CML and caused the greatest changes in wood chemical composition compared to the Control. Even though the tested processes were different, there was correspondence between the colorimetric parameters of the CS160 and OS210 treatments. The OS185 treatment was the most similar to the Control, due to the low CML of this process (close to zero).

Keywords: Teak; Closed system; Open system; Chemical analyses; CIELab.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS..... | 3 |
| 2.1. Objetivo geral..... | 3 |
| 2.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1. <i>Tectona grandis</i> L.f. | 4 |
| 3.1.1. Composição química da madeira de teca | 5 |
| 3.1.2. Cor da madeira de teca..... | 7 |
| 3.2. Madeira modificada termicamente..... | 10 |
| 3.2.1. Composição química da madeira de teca modificada termicamente .. | 10 |
| 3.2.2. Cor da madeira de teca modificada termicamente..... | 11 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 13 |
| 4.1. Amostragem e tratamentos..... | 13 |
| 4.2. Modificação térmica..... | 14 |
| 4.2.1. Sistema fechado | 14 |
| 4.2.2. Sistema aberto | 15 |
| 4.2.2.1. Pré-testes..... | 15 |
| 4.2.2.2. Processo..... | 17 |
| 4.2.3. Controle de qualidade do processo..... | 18 |
| 4.4. Análises colorimétricas | 20 |
| 4.5. Análise estatística..... | 22 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 23 |
| 5.1. Umidade e perda de massa corrigida | 23 |
| 5.2. Composição química | 26 |
| 5.3. Colorimetria | 33 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 39 |
| 7. REFERÊNCIAS | 40 |
| APÊNDICE A - Resumo Análise Estatística de Alfa-Celulose..... | 51 |
| APÊNDICE B - Resumo Análise Estatística de Hemiceluloses..... | 52 |
| APÊNDICE C - Resumo Análise Estatística de Lignina Insolúvel | 53 |
| APÊNDICE D - Resumo Análise Estatística de Lignina Solúvel..... | 54 |
| APÊNDICE E - Resumo Análise Estatística de Lignina Total..... | 55 |

1. INTRODUÇÃO

Muitos estudos têm se concentrado no desenvolvimento de novos métodos para melhorar a qualidade e as características estéticas da madeira, para assim aumentar sua durabilidade e as possibilidades de uso. Um dos primeiros, mais simples e menos dispendiosos processos para melhorar as características da madeira é a modificação térmica (ARAÚJO, 2010; HULLER *et al.*, 2017).

Os principais processos industriais de modificação térmica encontram-se em amplo funcionamento na Europa, com destaque para o ThermoWood®, que é um processo em sistema aberto (não pressurizado). Também há processos industriais no Brasil, porém em menor escala de produção. A empresa *TWBrazil*, localizada em Ponta Grossa, Paraná, foi pioneira e iniciou as pesquisas nesse tema em 2006, buscando-se inicialmente o desenvolvimento do equipamento e o aprimoramento do processo. Isso resultou no desenvolvimento de um processo em sistema fechado (pressurizado).

No início dos anos 2010 foi realizada a primeira pesquisa que avaliou as principais propriedades da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente pelo processo da empresa *TWBrazil* (BATISTA, 2012). Desde então, outros estudos foram realizados com a madeira de *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* - teca (BELLON, 2013; BRITO, 2017; MENEZES, 2017).

Os estudos brasileiros sobre modificação térmica em sistema aberto, são mais antigos, iniciando-se por volta dos anos de 1990. (BRITO, 1993; PINCELLI, 1999) e têm se intensificado desde então (ANDRADE, 2021; ARAÚJO, 2010; CALONEGO, 2009; GOUVEIA, 2008; LOPES, 2012; MEDEIROS, 2021). Destaca-se que esses estudos foram realizados em escala laboratorial, diferentemente dos que utilizaram o processo da empresa *TWBrazil*.

As altas temperaturas empregadas na modificação térmica (140 °C a 230 °C) degradam seus constituintes químicos fundamentais, principalmente as hemiceluloses, que estão entre os mais sensíveis aos efeitos do calor (BRITO *et al.*, 2006). Como produto, a madeira possui propriedades distintas da original

(maior estabilidade dimensional e maior durabilidade contra o ataque de microrganismos), as quais podem ser úteis na diversificação das aplicações da madeira (MENEZES *et al.*, 2014).

A combinação das variáveis temperatura e duração do processo irá resultar em diferentes níveis de alteração na composição química da madeira. Por sua vez, essa alteração será a responsável pelas mudanças nas propriedades da madeira modificada termicamente. Além dessas variáveis, os diferentes tipos de atmosfera (presença de oxigênio ou nitrogênio) e sistemas (aberto, sem pressão e fechado, com pressão) também desempenham papel importante (ESTEVEZ; PEREIRA, 2009; GAŠPARÍK *et al.*, 2019; HILL, 2006; JONES; SANDBERG, 2020; MILITZ; ALTGEN, 2014; PRATIWI *et al.*, 2019).

A comparação de resultados de distintos processos de modificação térmica é dificultada por causa da interpretação da interação das variáveis. Outro fator que dificulta as comparações é a heterogeneidade do material, mesmo que de uma mesma espécie. Isso porque a madeira de diferentes trabalhos pode ter características distintas (idade, florestas plantadas x nativas, p.ex.), resultando em um efeito maior que o do próprio processo.

O problema dos estudos são que as variáveis adotadas nesses processos nem sempre correspondem àquelas utilizadas em grande escala, além do fato de que a análise dos resultados de diferentes processos é bastante dificultada, principalmente por causa do efeito do material e da espécie no produto final. Portanto, entender os processos de modificação em determinada madeira e compará-los exige cuidados importantíssimos para a confiabilidade e veracidade dos resultados obtidos.

Para solucionar essa dificuldade, neste trabalho foram avaliados diferentes processos, porém com o mesmo material. Levantou-se o seguinte problema de pesquisa: qual o efeito de processos de modificação térmica em sistema fechado e sistema aberto na madeira modificada termicamente de teca? Há correspondência entre os resultados dos diferentes processos?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar o efeito de processos de modificação térmica em sistema fechado e em sistema aberto na madeira juvenil de teca (*Tectona grandis* L.f.).

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o efeito dos processos com base na perda de massa e na umidade final da madeira.
- Analisar o efeito dos processos na composição química da madeira.
- Verificar o efeito dos processos na cor da madeira.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. *Tectona grandis* L.f.

A *Tectona grandis* L.f. é uma espécie arbórea latifoliada da família Lamiaceae, de grande porte, tronco retilíneo e rápido crescimento, popularmente conhecida como teca. É nativa do subcontinente Índico e sudeste asiático, dotada de alta adaptabilidade, podendo ser cultivada em diferentes regiões tropicais (ANGELI, 2003 apud LEONARDO, 2015; CHAVEZ; FONSECA, 1991). Pela alta adaptabilidade, a teca desenvolve-se em áreas tropicais de clima de monção com precipitações entre 1.300 e 2.500 mm.ano⁻¹ e temperaturas entre 2 °C e 48 °C. Porém, se desenvolve melhor com uma temperatura mínima de 13 °C a 17 °C e máxima de 39 °C a 43 °C e temporadas secas três a cinco meses (PANDEY, 2000; WEAVER, 1993).

A teca é uma das madeiras tropicais mais valiosas do mundo, considerada nobre pela sua alta qualidade, porque sua madeira possui boas propriedades estéticas, de resistência, estabilidade dimensional e durabilidade natural, possibilitando ampla possibilidade de usos (CAMINO; MORALES, 2013; JEREZ-RICO; COUTINHO, 2017; KOLLERT; KLEINE, 2018; MACEDO *et al.*, 2005). Por sua madeira ter características apropriadas para o uso em pontes, embarcações, indústrias moveleiras e construções, ela se tornou uma das principais espécies plantadas em países tropicais (CAMINO; MORALES, 2013; LEMOS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020).

A redução do ciclo produtivo da teca de 80 anos para 25 anos em outras regiões, comparadas com sua região de origem, estimulou o plantio de teca. Por essa razão, a madeira de plantações tem cor pálida e maior quantidade de alburno (TSUKAMOTO FILHO *et al.*, 2003). A qualidade da madeira do alburno é inferior à do cerne (LEMOS *et al.*, 2019), em que o padrão amarelado e heterogêneo de coloração do alburno reduz sua aceitação no mercado (MONONEN *et al.*, 2002).

Atualmente, há plantios de teca em mais de 70 países tropicais, com área plantada estimada em 6,89 milhões de hectares (KOLLERT; KLEINE, 2018; VONGKHAMHO, 2020). De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (2019),

os plantios brasileiros de teca representavam cerca de 94 mil hectares em 2018, concentrados na Região Centro-Oeste do País. Ressalta-se que esses plantios apresentaram um grande aumento desde o ano de 2010, quando correspondiam a cerca de 65 mil hectares. No entanto, a área ainda pode ser considerada pequena, principalmente quando comparada ao eucalipto, principal espécie florestal plantada no Brasil, com cerca de 7,5 milhões de hectares (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2021).

A teca também demonstra potencial econômico na implantação de sistemas agrossilvipastoris, possibilitando aos produtores ganhos extras com o uso deste consórcio. Além disso, a conscientização ambiental dos consumidores (principalmente do mercado europeu) para reduzir a exploração de florestas nativas, aumentou a demanda por produtos madeireiros com certificação florestal, podendo ampliar a demanda da produção da teca (SOUZA *et al.*, 2019).

3.1.1. Composição química da madeira de teca

A madeira de teca tem boa qualidade e algumas propriedades estão relacionadas à composição química, o que inclui a quantidade, a distribuição e os tipos de extrativos. Isso faz com que a madeira possua um alto valor comercial, atendendo aos requisitos para ser considerada uma madeira durável. Segundo Gašparík *et al.* (2019) e Kokutse *et al.* (2006), dois compostos químicos são responsáveis pela cor marrom e a grande durabilidade do cerne da teca: o caucho, espécie de látex responsável pela boa repelência à água, e a tectoquinona, um conservante natural. Brocco (2019) afirmou que os principais extratos da madeira de teca são derivados de quinonas (35-37%), com destaque para a tectoquinona (26-29%), além de outros como o esqualeno (8-12%) e compostos fenólicos (6%). Quando aplicados em outras madeiras, esses extratos conferem escurecimento e elevada resistência a xilófagos, como os fungos causadores de podridão parda e branca.

Segundo Soerianegara e Lemmens (1993), a composição química média para a teca de plantios da Indonésia é 47,5% de celulose, 30% de lignina, 14,5% de pentosanas, 1,4% de cinzas e 0,4-1,5% de sílica; a solubilidade é de 4,6% em álcool-benzeno, 1,2% em água fria, 11,1% em água quente e 19,8% em solução de NaOH a 1%. Lopes (2018) analisou a composição química do cerne

e alburno da madeira juvenil de teca plantada no Brasil, de curta rotação, identificando, respectivamente, teores médios de extrativos totais de 6,86% e 3,82%; ou seja, o cerne possui quase o dobro de extrativos que o alburno. Por outro lado, Marinonio (2011) reportou menores médias de extrativos totais de 4,35% para o cerne e 1,55% para o alburno. Já para lignina insolúvel, holocelulose e alfa-celulose, Lopes (2018) reportou para o cerne, respectivamente, 30,3%, 63,6% e 45,4%. Enquanto no alburno, os teores foram, respectivamente, a 29,7%, 66,5% e 60,8%.

Os extrativos podem afetar a densidade da madeira e também são responsáveis pela durabilidade natural e a resistência à degradação fúngica. No caso da madeira de teca, a estabilidade dimensional e a resistência à água são propriedades conferidas, em parte, pela presença de ceras e óleos formados e depositados no cerne (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Estudos químicos mostraram que a presença de uma substância pertencente à classe das antraquinonas, a tectoquinona, atribui propriedades antifúngicas, bactericidas e repelentes a ataques de alguns insetos, sendo por isso, responsabilizada pela durabilidade natural da madeira (COSTA *et al.*, 1958; RANGANATHAN *et al.*, 1949; RUDMAN *et al.*, 1958; SANDERMANN; SIMATUPANG, 1966 apud SOUZA, 2019). Entretanto, de acordo com Archangelo (2019), o alburno é bem menos resistente à degradação que o cerne, sendo necessário o uso de preservativos conforme o uso que se queira empregar a madeira.

A constituição química da madeira de teca foi estudada por Qiu *et al.* (2019) utilizando-se cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (CG-MS). Foram verificadas substâncias solúveis em água, como taninos, pigmentos, carboidratos, alcaloide vegetal, ciclitol e alguns sais inorgânicos. A extração em hidróxido de sódio a 1% solubilizou não apenas os extrativos em água, mas também parte da lignina, pentosanas, hexosanas e ácidos de resina, além de ácido furfural. A solução de álcool-benzeno solubilizou gorduras, ceras, resinas, taninos e pigmentos. Já os extrativos em acetona foram compostos principalmente por gorduras, ceras, ácidos graxos, terpenóides e compostos fenólicos, em que foram detectados mais compostos no cerne (49) do que no alburno (26).

Os compostos majoritários identificados por Brocco (2019) nos extratos de resíduos de teca, também por meio de CG-MS, foram aproximadamente 70, identificados para o extrato em etanol, 80 em metanol e 100 em acetona. O principal composto identificado foi o 2-metil-antraquinona (tectoquinona), seguido do esqualeno e o composto fenólico 4-terc-butil-2-fenil-fenol, repetidos para os extratos em etanol, metanol e acetona.

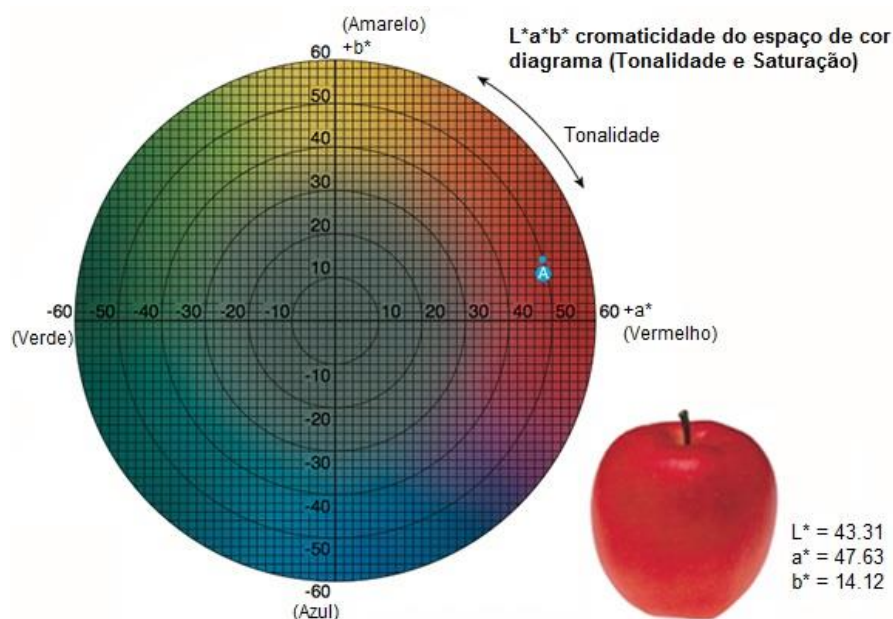
3.1.2. Cor da madeira de teca

Características como a cor e o desenho são importantes para os diferentes usos de uma espécie madeireira e também para o seu valor comercial, representando importantes índices de qualidade. A cor da madeira depende da composição química de seus constituintes (celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos) e sua interação com a luz. A cor é determinada mais pela distinção dos componentes individuais da madeira do que sua quantidade, e o melhor exemplo disso é a celulose, que é o composto mais abundante na madeira (GAŠPARÍK *et al.*, 2019).

A lignina e os extrativos (quantidade, distribuição e tipo) são os principais responsáveis pelas diferentes cores da madeira. O cerne da madeira de teca tem coloração castanho-amarelada, podendo atingir tonalidades mais escuras, como caramelo brilhoso, pela presença de extrativos semelhantes a um látex, o que propicia um aspecto brilhante até mesmo após o processamento (ARCHANGELO, 2019).

Para se determinar a cor da madeira, um dos métodos empregados segue a norma ISO 11.664-4:2008 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008), a qual utiliza o sistema *CIELab 1976*, caracterizado por três coordenadas (L^* , a^* e b^*) (Figura 1). A coordenada L^* representa a luminosidade ou claridade, variando de 0 (preto) a 100 (branco). Já as coordenadas a^* e b^* representam, respectivamente, as variáveis cromáticas presentes nos eixos verde-vermelho e azul-amarelo. Ambas variam de -60 a +60, nos quais os sinais representam o aumento na tonalidade vermelha ($+a^*$) e verde ($-a^*$), e amarela ($+b^*$) e azul ($-b^*$).

Figura 1 – Diagrama de cromaticidade $L^* a^* b^*$.

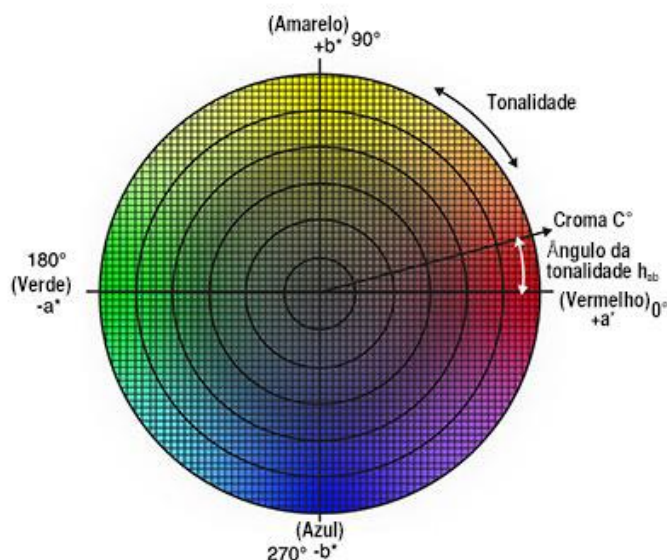


Fonte: Konica Minolta (1998).

Para se entender as diferenças colorimétricas, são realizadas comparações numéricas entre a amostra antes e depois, ou entre a amostra e o seu padrão, pelas diferenças absolutas entre suas coordenadas, chamadas de deltas (Δ). Os deltas para L^* (ΔL), a^* (Δa) e b^* (Δb) podem ser negativos (-) ou positivos (+). A diferença total da cor (ΔE), todavia, é sempre positiva. O ΔL^* representa a diferença em mais claro e escuro (+ significa mais claro, - significa mais escuro), o Δa^* indica a diferença em vermelho e verde (+ significa mais vermelho, - significa mais verde), já o Δb^* apresenta a diferença em amarelo e azul (+ significa mais amarelo, - significa mais azul) (KONICA MINOLTA, 1998).

Além desses deltas, também existem os referentes aos parâmetros de croma (ΔC^*), e tonalidade (Δh^*), que podem ser positivos (+) ou negativos (-). O ΔC^* indica a diferença de croma (+ significa mais saturada, - significa menos saturada), e o Δh^* corresponde à diferença de tonalidade (Figura 2).

Figura 2 – Diagrama de cromaticidade L^* , C^* e h^* .



Fonte: Konica Minolta (1998).

Mesmo presentes em uma pequena porcentagem, os extrativos desempenham um papel essencial para características de cor e aroma da madeira, uma vez que possuem substâncias como pigmentos, taninos e resinas. Qiu *et al.* (2019) correlacionaram a composição química com a cor da madeira de teca e sugeriram que a 2-metil-antraquinona seja a responsável pela cor. Nos extrativos em acetona, houve mais olefinas e fenóis no cerne do que no alburno, o que pode ser uma das razões pelas quais o cerne é mais escuro que o alburno. Com base nas diferenças das composições, supõe-se que fenóis, quinonas e cetonas sejam os principais extrativos que tornam o cerne mais escuro que o alburno.

Reportaram-se os seguintes valores para o alburno de teca, com elevados L^* (72,01-75,80) e b^* (20,03-22,09), e baixos valores de a^* (5,15-10,39) (LOPES *et al.*, 2014). Moya e Berrocal (2010) reportaram os seguintes valores para a madeira de cerne de teca de rápido crescimento na Costa Rica: L^* = 58,15, $+a^*$ = 10,4 e $+b^*$ = 25,91. Para lâminas de teca plantada no município de Juara – MT, Queiroz *et al.* (2016) verificaram os parâmetros L^* = 51,22, $+a^*$ = 11,14, $+b^*$ = 25,87, C^* = 28,17 e h^* = 65,88.

3.2. Madeira modificada termicamente

3.2.1. Composição química da madeira de teca modificada termicamente

As principais alterações na composição química decorrentes do processo de modificação térmica são a decomposição das hemiceluloses e lignina, a despolimerização de carboidratos e a formação de ácidos acético e fórmico. Como resultados, ocorrem o aumento da estabilidade dimensional e da resistência à biodeterioração causada por microrganismos, além do escurecimento e da homogeneização da cor na madeira. Também são verificadas alterações na resistência mecânica (ESTEVES; PEREIRA, 2009; HILL, 2006; JONES; SANDBERG, 2020; LENGOWSKI, 2021; MENEZES, 2017; MILITZ; ALTGEN, 2014).

Alguns autores reportaram os efeitos da modificação térmica a 160 °C em sistema fechado na composição química da madeira de teca. Conforme Lengowski *et al.* (2021), houve aumento dos teores de extrativos totais (5,36 p.p.) e lignina insolúvel (9,81 p.p.) e redução no teor de holocelulose (12,15 p.p.) em comparação à madeira não tratada. Brito (2017) também reportou aumento nos teores de extrativos totais (7,24 p.p.) e lignina total (2,79 p.p.), e redução no teor de hemiceluloses (9,43 p.p.). Ainda, houve aumento nos teores de extrativos em acetona e diclorometano de 8.05 p.p. e 2.61 p.p, respectivamente. Por fim, Menezes (2017) relatou um aumento médio de 9,61 p.p. no teor de extrativos totais, e diminuição no teor de hemiceluloses (13,05 p.p.).

Para a madeira de teca modificada termicamente em sistema aberto (processo ThermoWood®), Gašparík *et al.* (2019) concluíram que os teores de extrativos, celulose e lignina aumentaram, mas o teor de hemiceluloses diminuiu significativamente. Em relação à madeira não tratada, o teor de hemiceluloses reduziu 9.4 p.p. para a temperatura de 160° C, e atingiu 17.6 p.p. para 210° C. O material modificado em temperaturas de 160° C, 180° C e 210° C apresentou um aumento no teor de extrativos totais, respectivamente, de 1,0 p.p., 1,3 p.p. e 3,9 p.p. O mesmo ocorreu com os teores de celulose, com 2.5 p.p., 3.3 p.p e 4.5 p.p, e de lignina, com 3,9 p.p., 4,1 p.p. e 5.1 p.p., respectivamente.

A madeira de teca de curta e longa rotação avaliada por Pratiwi *et al.* (2019) foi modificada termicamente em sistema aberto (estufa) a 220 °C, por 20 h, em atmosfera de nitrogênio. Independentemente da condição de crescimento da madeira, ocorreu degradação de hemiceluloses (entre 15,55 p.p. e 18,00 p.p.) e aumento aparente do teor de lignina (entre 6,80 p.p. e 10,68 p.p.), em comparação à madeira não tratada.

Para a modificação térmica da madeira de teca em sistema aberto (mufla) nas temperaturas finais de 180 °C e 200 °C, Lopes *et al.* (2018) observaram que o processo afetou significativamente o teor de extrativos totais do cerne, os quais aumentaram gradativamente com o aumento da temperatura, com uma diferença de 3,6 p.p. a 180 °C e de 8,35 p.p. a 200°C, em comparação à madeira não tratada. Também foi verificado o aumento aparente do teor de lignina (1,00 p.p. a 180 °C; 5,5 p.p. a 200°C), e a queda nos teores de holocelulose (6,6 p.p. a 180 °C; 16,3 p.p. a 200 °C) e de alfa-celulose (2,8 p.p. a 180 °C; 5,8 p.p. a 200 °C).

3.2.2. Cor da madeira de teca modificada termicamente

O escurecimento é uma das características mais marcantes da madeira modificada termicamente em comparação à madeira não tratada. A magnitude do escurecimento é proporcional à duração e à temperatura do processo (ESTEVES; PEREIRA, 2009; HILL, 2006; MILITZ; ALTGEN, 2014).

Os diferentes processos de modificação térmica podem ser usados para regular os tons da cor da madeira. A cor, componente ligado ao potencial estético e decorativo, pode aumentar o valor do produto final. O elemento estético desempenha um papel essencial para facilitar o uso consciente e adequado dos produtos lignocelulósicos, refletindo as características da superfície da matéria-prima (CARVALHO *et al.*, 2021).

A modificação térmica é uma das melhores formas de aumentar a durabilidade do alburno e homogeneizar a cor da madeira de teca (GARCIA *et al.*, 2014; GAŠPARÍK *et al.*, 2019; GEORGE *et al.*, 2005; LOPES, 2012). Esse processo é uma alternativa ambientalmente amigável para se alterar a cor da madeira, sem a utilização de revestimentos, bem como as desvantagens que esses produtos acarretam ao meio ambiente.

Thermo-S e Thermo-D são os dois tipos de tratamento disponíveis através do processo ThermoWood®. Na primeira, a madeira é tratada a temperaturas mais baixas (185–190°C), criando uma madeira marrom clara que pode ser utilizada em ambientes internos ou em locais onde não entrará em contato direto com a água por um longo período de tempo. O Thermo-D envolve o tratamento da madeira em temperaturas mais altas (200–212°C), o que produz uma madeira mais dimensionalmente estável, de cor marrom escura e resistente ao ataque microbiano. (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

Foi verificado que o incremento da temperatura causou o aumento da variação total da cor (ΔE^*) do alburno de teca modificada termicamente em sistema aberto (processo ThermoWood®, equipamento-piloto). Verificaram-se ΔE^* de 33,8, 36,1 e 40,9, respectivamente para 210 °C, 215 °C e 220 °C. Além do escurecimento gradativo com o aumento da temperatura, também foi reportado que a cor da madeira apresentou uma tendência à uniformidade (MÉNDEZ-MEJÍAS; MOYA, 2016).

Os mesmos efeitos para a madeira modificada termicamente de teca, foram reportados por Cuccui *et al.* (2017) para temperaturas de 170°C, 180°C, 190 °C, 200°C e 210°C, em um processo de termovácuo realizado em um equipamento-piloto. A madeira modificada termicamente escureceu, apresentando uma queda média de luminosidade (L^*) de 70 para 50 (alburno) e de 50 para 40 (cerne). Os autores concluíram que o processo melhorou a aparência do alburno, tornando-o mais parecido com o cerne natural.

O efeito positivo no escurecimento de peças de madeira de teca, em termos de homogeneização da cor entre o cerne e alburno, também foi reportado por Lopes *et al.* (2014), em que os autores realizaram a modificação térmica em sistema aberto a 180 °C e 200 °C, e concluíram que o processo a 200 °C foi o mais eficaz. Para a madeira produzida em espaçamento de 4 x 2m, a luminosidade (L^*) antes da modificação foi de 68,01, reduzindo-se para 23,36 após o processo. O valor da coordenada b^* para o cerne do mesmo espaçamento foi de 26,61 para madeira não tratada, e de 21,99 no tratamento de 180 °C e 19,70 no tratamento de 200 °C. Os valores da coordenada a^* foi de 8,65 para a madeira não tratada, enquanto após a modificação térmica a 180 °C e 200 °C foram de, respectivamente, 8,55 e 10,26.

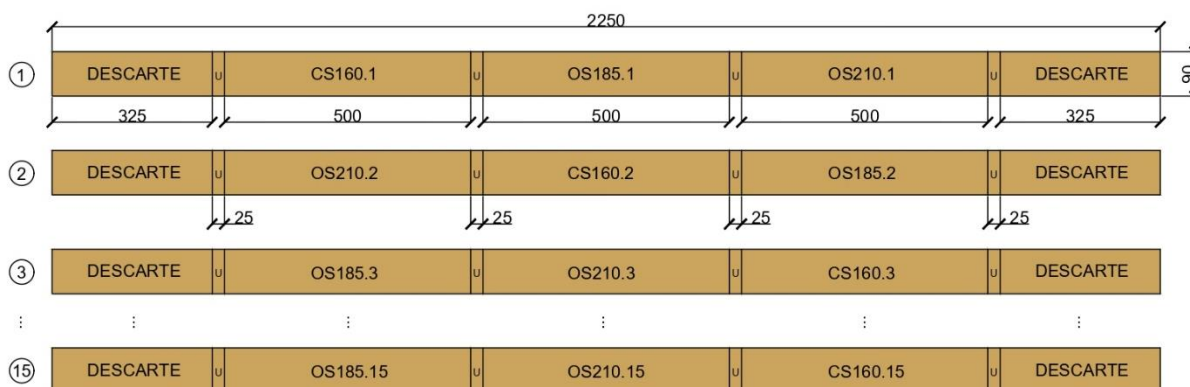
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Amostragem e tratamentos

Foi estudada a madeira juvenil de teca (*Tectona grandis* L.f.). O material foi amostrado de uma pilha do estoque da empresa, em que foram selecionados 15 sarrafos tangenciais com dimensões nominais de 25 x 90 x 2.250 mm (espessura x largura x comprimento), compostos predominantemente por cerne. Conforme informação da empresa, a madeira foi adquirida de um produtor de Cáceres, Mato Grosso, oriunda do primeiro desbaste, com cerca de seis anos.

Cada sarrafo foi serrado transversalmente em três amostras de 500 mm de comprimento, que foram distribuídas homoganeamente entre os três tratamentos de modificação térmica, com o objetivo de se minimizar o efeito do material nos resultados. Foram produzidos corpos de prova de umidade (método gravimétrico) de 25 mm de comprimento entre cada amostra e nos topos da amostra (Figura 3). A umidade inicial média da madeira na amostragem foi de 12,8% (coeficiente de variação de 6,0%), ou seja, apropriada para modificação térmica.

Figura 3 – Esquema de amostragem do material – vista superior.



Fonte: O Autor (2022).

Para este estudo, os seguintes tratamentos foram avaliados:

- Controle (madeira não tratada);
- CS160: madeira modificada termicamente em sistema fechado (pressurizado), higrotérmico, a 160 °C.

- OS185: madeira modificada termicamente em sistema aberto (não pressurizado) a 185 °C.
- OS210: madeira modificada termicamente em sistema aberto (não pressurizado) a 210 °C.

Adotou-se 160 °C para o processo em sistema fechado por ser a temperatura comumente utilizada pela empresa *TWBrazil* (Ponta Grossa, Paraná), onde o processo foi realizado. Para os processos em sistema aberto, foram escolhidas as temperaturas de 185 °C e 210 °C por corresponderem, 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).

4.2. Modificação térmica

4.2.1. Sistema fechado

O processo de modificação térmica utilizado para verificar os efeitos do sistema fechado foi realizado em uma autoclave industrial com capacidade para 6 m³ de madeira. O processo foi realizado em 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 (110 °C) por 30 minutos;
- aquecimento até 140 °C, a uma taxa de aquecimento nominal de 0,50 °C min⁻¹;
- temperatura constante (140 °C) por 30 minutos;
- aquecimento até 160 °C, a uma taxa de aquecimento nominal de 0,60 °C min⁻¹;
- temperatura constante (160 °C) por 90 minutos;
- resfriamento até 60 °C, a uma taxa nominal de resfriamento de 0,25 °C min⁻¹.

As amostras do tratamento CS160 foram carregadas na autoclave juntamente com a madeira de processo da empresa (Figura 4). O processo

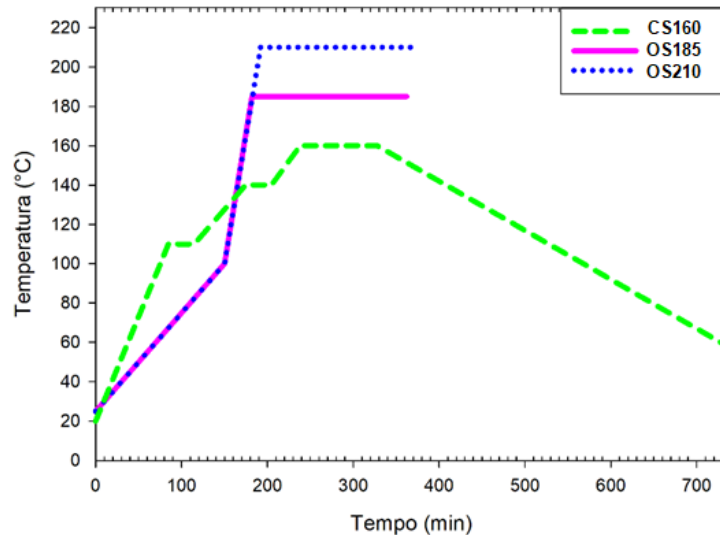
completo levou cerca de 720 minutos (12 horas) (Figura 5).

Figura 4 – Autoclave de propriedade da empresa carregada com o material.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 5 – Programas adotados nos processos de modificação térmica em escala industrial (CS160) e em escala laboratorial (OS185 e OS210).



Fonte: O Autor (2022).

4.2.2. Sistema aberto

4.2.2.1. Pré-testes

O processo de modificação térmica em sistema aberto foi realizado em

um forno elétrico (Linn Elektro Therm, Alemanha), com dimensões internas de 600 x 600 x 700 mm (250 L), equipado com controlador programável de tempo e temperatura. Anteriormente à modificação térmica do material do estudo, foram realizados testes com o objetivo de se verificar o funcionamento do equipamento e encontrar as dimensões ideais da pilha e das amostras.

Inicialmente, foram testadas amostras de madeira de eucalipto, com teor de umidade abaixo de 12%, dimensões de 25 x 120 x 500 mm (espessura x largura x comprimento), formando uma pilha com 10 camadas de amostras (cinco peças por camada) e 10 camadas de tabiques. Foram utilizados dois tabiques de pinus por camada, com 20 x 20 x 500 mm (espessura x largura x comprimento). Esse teste foi realizado a 155 °C, obtendo-se resultados negativos: i) as amostras das bordas ao redor da pilha (mais próximas do sistema de aquecimento) foram carbonizadas; ii) as amostras das duas camadas superiores foram carbonizadas; iii) para todas as amostras, o topo mais próximo ao fundo do equipamento foi carbonizado.

Para o segundo teste, reduziu-se para sete a quantidade de camadas da pilha e aumentou-se a temperatura para 185 °C. Os resultados foram semelhantes aos do primeiro teste.

Utilizou-se madeira de pinus no terceiro teste, com amostras menores: 20 x 80 x 400 mm (espessura x largura x comprimento). A pilha foi diminuída para seis camadas e a temperatura aumentada para 210 °C. Os resultados foram satisfatórios, em que não ocorreu a carbonização das amostras das bordas, tampouco dos topos. Ressalta-se que a resina da madeira de algumas amostras se liquefez e pingou nas amostras de camadas inferiores, resultando em focos de carbonização superficial.

Utilizaram-se amostras extras de teca no quarto teste (Figura 6), adotando-se as mesmas dimensões de peças e da pilha do teste anterior, porém a 155 °C. As amostras ao redor da pilha foram de madeira de pinus do teste anterior, escolhidas dentre as que não exsudaram resina. Os resultados foram satisfatórios, determinando-se o padrão de empilhamento que foi seguido na modificação térmica em sistema aberto.

Figura 6 – Empilhamento para o processo em sistema aberto. Destaque em verde para as peças de interesse (teca) e em vermelho as peças utilizadas para proteção (pinus).



Fonte: O Autor (2022).

4.2.2.2. Processo

O programa de modificação térmica utilizado para o processo em sistema aberto foi similar ao de Lopes *et al.* (2014), que trabalhou com a mesma espécie e um equipamento do mesmo modelo. O programa foi dividido em três fases:

- i) Aquecimento inicial de 20 °C (temperatura ambiente) até 100 °C, com uma taxa de aquecimento nominal de 0,50 °C min⁻¹;
- ii) Aquecimento de 100 °C até a temperatura de modificação térmica (185 °C ou 210 °C) com uma taxa de aquecimento nominal de 2,60 °C min⁻¹;
- iii) Manutenção da temperatura de modificação térmica por 3 horas.

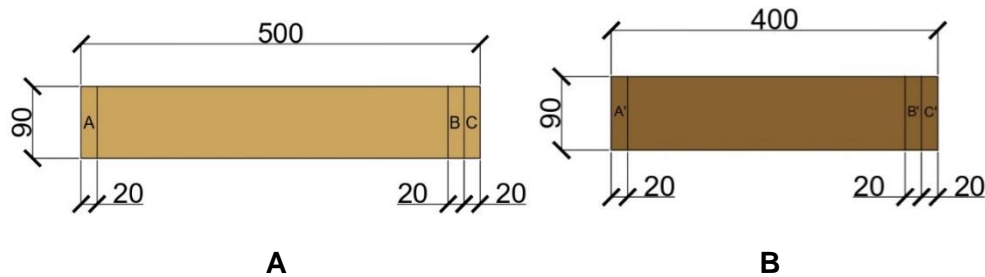
O processo completo levou cerca de 362 minutos (6 horas e 2 minutos) e 372 minutos (6 horas e 12 minutos), respectivamente para o OS185 e OS210 (Figura 5). Encerrada a fase 3, o equipamento foi imediatamente desligado e descarregado e as amostras foram embaladas em filme plástico para evitar a absorção de umidade do ambiente antes das etapas de pesagem para a determinação da umidade final.

4.2.3. Controle de qualidade do processo

Para o controle da qualidade do processo de modificação térmica, foram avaliadas a umidade inicial da madeira (previamente à modificação térmica), a umidade final (posteriormente ao processo) e a perda de massa corrigida (PMC). Essas análises foram realizadas de acordo com o método descrito por Wentzel *et al.* (2018), com as 15 amostras de cada tratamento.

Anteriormente à modificação térmica, ambos os topos de cada amostra foram cortados, resultando em dois corpos de prova (“A” e “B”) de umidade (20 mm de comprimento) por peça. Adicionalmente, de um dos topos de cinco amostras de cada tratamento (oriundas de sarrafos originais diferentes), foi produzido outro corpo de prova de 20 mm (C), que foi usado para as análises químicas do Controle (Figura 7A).

Figura 7 – Amostragem para umidade e análises químicas – vista superior.



Fonte: O Autor (2022).

A umidade dos corpos de prova A e B foi determinada pelo método gravimétrico e a média deles foi usada como estimativa da umidade inicial (U_i , em %) de cada amostra. Em seguida, as amostras foram pesadas em balança semianalítica digital (0,01 g) para a determinação da massa inicial (M_i , em g). A massa anidra estimada inicial (MAE_i , em g) das amostras foi calculada com a Equação 1.

$$MAE_i = \frac{(100 \times M_i)}{(100 + U_i)} \quad (1)$$

Imediatamente após a modificação térmica, as amostras foram pesadas para a determinação da massa modificada termicamente (M_{mt} , em g), produzindo-se outros três corpos de prova (A', B' e C') por amostra de cada tratamento (Figura 7B). A umidade dos corpos de prova A' e B' foi determinada pelo método gravimétrico e a média deles foi usada como estimativa da umidade

modificada termicamente (U_{mt} , em %) de cada amostra (ou umidade final). A massa anidra estimada modificada termicamente (MAE_{mt} , em g) das amostras foi calculada com a Equação 2.

$$MAE_{mt} = \frac{(100 \times M_{mt})}{(100 + U_{mt})} \quad (2)$$

A umidade inicial da madeira de cada tratamento foi calculada com base na média da U_i de cada amostra; o mesmo foi empregado para a umidade final, tomando-se como base a U_{mt} . A perda de massa de cada amostra (PM, em %) foi calculada pela Equação 3 e a perda de massa corrigida (PMC) foi calculada conforme as Equações 4 a 6. Para a PMC, considerou-se o teor de extrativos totais.

$$PM = \frac{(MAE_i - MAE_f)}{MAE_i} \times 100 \quad (3)$$

$$PMC = \frac{(MAE_{i'} - MAE_{mt'})}{MAE_{i'}} \times 100 \quad (4)$$

Em que – PMC: perda de massa corrigida (%); $MAE_{i'}$: massa anidra estimada inicial corrigida (g); $MAE_{mt'}$: massa anidra estimada modificada termicamente corrigida (g).

$$MAE_{i'} = MAE_i - (MAE_i \times E_i) \quad (5)$$

Em que – $MAE_{i'}$: massa anidra estimada inicial corrigida (g); MAE_i : massa anidra estimada inicial (g); E_i : média do teor de extrativos totais do tratamento Controle (%).

$$MAE_{mt'} = MAE_{mt} - (MAE_{mt} \times E_{mt}) \quad (6)$$

Em que – $MAE_{mt'}$: massa anidra estimada modificada termicamente corrigida (g); MAE_{mt} : massa anidra estimada modificada termicamente (g); E_{mt} : média do teor de extrativos totais do respectivo tratamento modificado termicamente (%).

4.3. Análises químicas da madeira

As análises químicas foram realizadas conforme as normas e métodos indicados no Quadro 1. Os corpos de prova C, descritos anteriormente (Figura 7A) foram usados para o Controle, ao passo que para os tratamentos modificados termicamente foram usados os corpos de prova C' (Figura 7B) respectivos a cada tratamento.

Esses corpos de prova foram agrupados por tratamento, moídos em moinho de martelos (peneira de 1 mm) e moinho de Wiley, dando origem a uma amostra composta. A serragem foi classificada em peneiras de 35 e 60 mesh, coletando-se o material retido na peneira de 60 mesh.

Quadro 1 – Resumo das análises químicas

| Característica química avaliada | Observação | Referência |
|--|--|--------------------------------|
| Extrativos totais | Utilização de tolueno em vez de benzeno | T 264 cm-97 (TAPPI, 1997b) |
| Extrativos | Extração com acetona e diclorometano | T 204 cm-97 (TAPPI, 1997a) |
| Lignina | Lignina Klason insolúvel | Gomide e Demuner (1986) |
| | Lignina solúvel em ácido | Goldschmid (1971) |
| Holocelulose | Reação com clorito de sódio e ácido acético | Wise, Murphy e Daddieco (1946) |
| Alfa-celulose | Reação com hidróxido de sódio a 17,5% | T 203 cm-99 (TAPPI, 1999) |
| Hemiceluloses | Obtidas por diferença entre a holocelulose e a alfa-celulose | |

Fonte: O Autor (2022).

Anteriormente às análises químicas, o material foi climatizado (20 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) por cerca de 28 dias. As análises foram realizadas em triplicata, exceto as análises de extrativos, que foram realizadas em cinco réplicas.

4.4. Análises colorimétricas

A cor foi medida com um espectrofotômetro portátil Konica-Minolta CM-2500D, conforme o espaço de cor $L^*a^*b^*$, também conhecido como CIELAB. Foram medidos os parâmetros colorimétricos L^* (luminosidade), a^* (coordenada colorimétrica vermelho-verde) e b^* (coordenada colorimétrica amarelo-azul).

A configuração do equipamento foi a seguinte: diâmetro de abertura de 8 mm para a área de iluminação (MAV – *Medium Area View*); iluminante padrão D65; e ângulo de observação de 10° e luz especular incluída. A calibração foi realizada com a própria placa calibradora do equipamento, nos padrões preto e branco, e também em uma superfície branca com a iluminação natural no ambiente de análise.

A coordenada C^* (saturação) representa a distância do eixo L^* e pode ser interpretada como o brilho da madeira. A coordenada C^* foi calculada com a

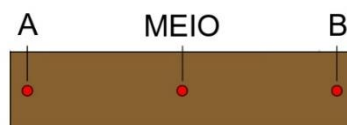
Equação 7, de acordo com o proposto pela Comissão Internationale de l'Eclairage (1976).

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0,5} \quad (7)$$

Em que – C*: saturação; a*: coordenada vermelho-verde; b*: coordenada amarelo- azul.

As 15 amostras de cada tratamento foram previamente aplainadas e medidas antes e depois da modificação térmica. A cor da madeira do Controle foi avaliada com base nas amostras dos tratamentos CS160, OS185 e OS210 antes da modificação térmica. Assim, cada amostra foi medida antes e depois da modificação térmica em três pontos da face da tangencial (largura) mais próxima à casca, que é a região de interseção entre cerne e alburno: na metade do comprimento e nos extremos, a 25 mm dos topos (Figura 8).

Figura 8 – Esquema do posicionamento das leituras colorimétricas – vista superior.



Fonte: O Autor (2022).

A variação dos parâmetros colorimétricos (ΔL^* , Δa^* e Δb^*) foi calculada, com base nas leituras antes e depois da modificação térmica. A variação total foi calculada com a Equação 8 (KONICA MINOLTA, 2022).

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (8)$$

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

A variação total da cor (ΔE^*) foi classificada qualitativamente de acordo com Carvalho *et al.* (2021), representando níveis de percepção visual (Quadro 2).

Quadro 2 – Classificação da percepção de variação total da cor (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 | Muito apreciável |

Fonte: Carvalho *et al.* (2021).

4.5. Análise estatística

A análise estatística foi realizada em delineamento inteiramente casualizado e o nível de significância adotado foi de até 5% de probabilidade para todos os testes. Os resultados de umidade inicial, umidade final e perda de massa corrigida foram comparados e discutidos com base na média e no desvio padrão dos tratamentos.

A análise de variância (ANOVA) foi adotada para se verificar o efeito dos tratamentos nos resultados das análises químicas. Para a validação da ANOVA, aplicou-se previamente o teste de Bartlett, que verifica a homogeneidade das variâncias entre os tratamentos (RIBEIRO JUNIOR, 2001). Simultaneamente, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk para verificar se o conjunto de dados da variável aleatória possui distribuição normal. Verificada a homogeneidade das variâncias e a normalidade da distribuição, aplicou-se a ANOVA. Nos casos de rejeição da hipótese nula, aplicou-se o teste de Tukey ($p < 0,05$) para a diferenciação das médias.

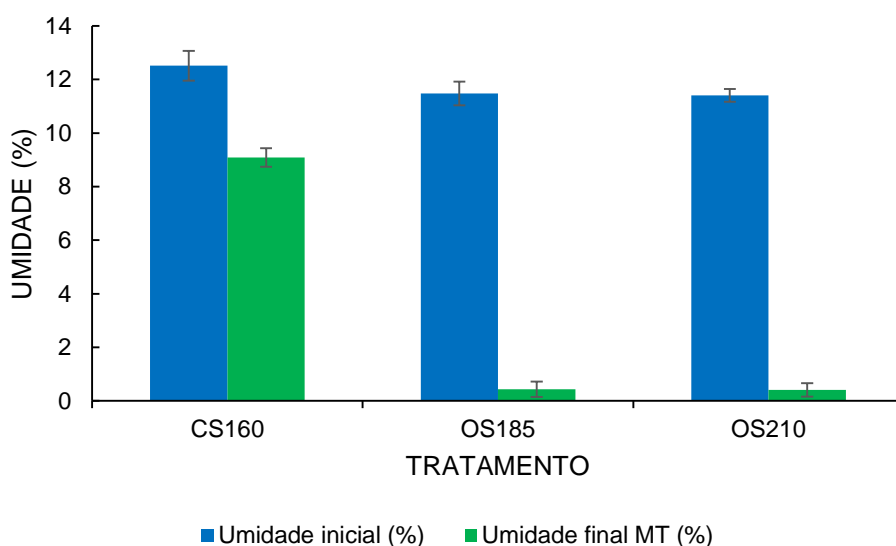
Para os casos em que não houve homogeneidade das variâncias e normalidade dos dados, aplicou-se o teste H de Kruskal-Wallis, que fornece um método não-paramétrico para a ANOVA. Para os casos em que pelo menos uma das medianas diferiu estatisticamente das demais, aplicou-se o teste de Bonferroni para a diferenciação das medianas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Umidade e perda de massa corrigida

Na Figura 9 encontram-se os resultados (médias) de umidade inicial e final da madeira por tratamento. Considerando-se um cenário industrial ao qual todos os tratamentos tenham um grande número de peças a serem modificadas termicamente, a umidade inicial das peças dos tratamentos pode ser considerada semelhante, uma vez que a amplitude foi de apenas 1,11 p.p. Esse resultado indica a homogeneidade da umidade inicial do material amostrado e que essa característica não exerceu efeito no processamento.

Figura 9 - Umidade inicial e final da madeira por tratamento.



Fonte: O Autor (2022).

Para todos os tratamentos, a umidade final da madeira foi menor que a umidade inicial, indicando que ocorreu secagem durante o processo de modificação térmica. Inicialmente, a umidade que se encontrava em 12,51%, 11,48% e 11,40%, respectivamente aos tratamentos CS160, OS185 e OS210, reduziu após o processo para 9,09%, 0,43% e 0,41%.

Nota-se que os diferentes processos produziram efeito diferente na umidade final. O tratamento CS160 teve a maior umidade final (9,09%), indicando uma secagem de apenas 3,42 p.p em relação à umidade inicial. Por outro lado, a umidade final dos tratamentos em escala laboratorial foi próxima de 0%. Essa diferença está principalmente associada aos tipos de aquecimento e

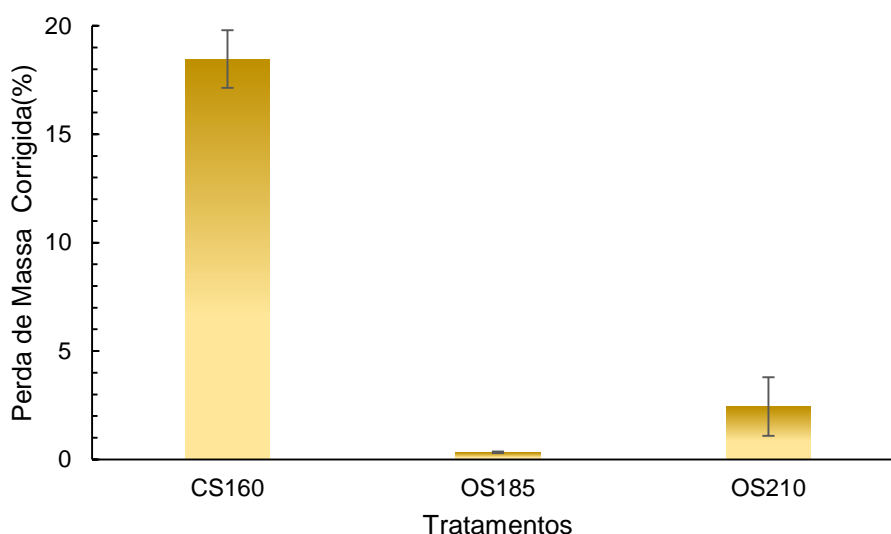
equipamento, em que no tratamento CS160 o sistema é fechado e não há eliminação dos gases decorrentes do processo. Além disso, o aquecimento é realizado com a injeção de vapor no interior da autoclave, o que faz com que o ambiente tenha maior massa de água disponível para troca com a madeira. Nos tratamentos OS185 e OS210 os gases decorrentes da modificação térmica são continuamente eliminados, resultando em pouca massa de água disponível no ambiente.

Para os tratamentos em sistema aberto, as médias de umidade final foram semelhantes e próximas de 0%, independentemente da temperatura (185 °C e 210 °C) de tratamento. Isso indica que, para esse tipo de processo, o efeito da diferença de temperatura (25 °C) não impactou na umidade final. Compreende-se que, nesses casos, o equipamento funcionou de forma similar a uma câmara de secagem.

Para Boonstra *et al.* (2007), a menor umidade final pode ser um efeito positivo para o processo em sistema aberto. Por exemplo, quanto menor a umidade final, maior a resistência mecânica da madeira, o que pode compensar, ainda que parcialmente, o efeito da redução da resistência mecânica decorrente da perda de massa ocasionada pelo processo. Por outro lado, a madeira mais seca se torna mais difícil de usinar, exatamente por causa do aumento da resistência mecânica.

Na Figura 10 encontram-se os resultados de perda de massa corrigida (PMC) por tratamento, que foi calculada com base no teor de extrativos totais. A modificação térmica causa a degradação de constituintes da parede celular, que podem ser contabilizados como extrativos durante a extração em Soxhlet. Ainda, de acordo com o tipo de processo, a modificação térmica também pode causar a volatilização de extrativos e demais moléculas decorrentes da degradação da parede celular. Assim, a PMC é uma ferramenta útil, por neutralizar o efeito dos extrativos da madeira nos resultados de perda de massa.

Figura 10 - Perda de massa corrigida (%) para cada tratamento analisado.



Fonte: O autor (2022).

Da mesma forma que a umidade final, o efeito dos diferentes processos de modificação térmica influenciou nos resultados de PMC. Para o tratamento OS185, a PMC foi próxima de zero (0,33%), indicando que este tratamento foi incapaz de causar algum efeito nos constituintes da madeira, mesmo os mais frágeis termicamente. Como a perda de massa é um indicador da eficácia da modificação térmica, pode-se dizer que o tratamento OS185 foi ineficaz, significando basicamente um processo de secagem drástica da madeira. Com base nesse resultado, espera-se que haja pouco efeito do processo na composição química e na cor da madeira.

O tratamento OS210 apresentou uma PMC um pouco maior (2,44%) que o OS185, indicando o efeito do aumento da temperatura na perda de massa. Contudo, ainda pode ser considerado um processo de baixa perda de massa, em que também é esperado pouco efeito na composição química e na cor da madeira. Os processos em sistema aberto são realizados a pressão atmosférica e dependem basicamente da ação do calor como indutor da perda de massa. Apesar das elevadas temperaturas (185 °C e 210 °C), as baixas perdas de massa podem estar associadas aos ciclos curtos de modificação térmica, destacando-se não apenas a duração da manutenção da temperatura máxima, mas do ciclo como um todo (Figura 5). Esses resultados de PMC põem em dúvida a eficácia dos programas adotados, uma vez que os principais benefícios

do processo estão associados à perda de massa, sendo eles o escurecimento da madeira, homogeneização da cor, e aumento da estabilidade dimensional e da resistência à biodeterioração por fungos.

Em contraponto, o tratamento CS160 apresentou uma PMC de 18,47%, a maior entre todos os tratamentos. Além do calor, o processo em sistema fechado possui a pressão e uma atmosfera saturada como indutores da perda de massa, o que explica a maior PMC, mesmo a uma temperatura inferior. Esse resultado também foi reportado por Wentzel *et al.* (2018) para a modificação térmica da madeira de eucalipto em sistemas fechado e aberto.

Wangaard (1950), citado por Modes *et al.* (2017), já notava que por causa da atmosfera circundante o comportamento da degradação da madeira é diferenciado conforme o meio de aquecimento utilizado. O sistema fechado (utilizado no tratamento CS160) permite a presença de vapor, o que facilita a degradação da madeira, que apenas o uso da temperatura. As hemiceluloses e a celulose são despolimerizadas via hidrólise, na presença de água, sendo esta a principal causa da perda da resistência à degradação por estes polímeros.

Tanto Modes *et al.* (2017), quanto Severo e Tomaselli (2003), afirmaram que a madeira exposta à alta umidade relativa degrada predominantemente por hidrólise ácida, em que essa taxa de degradação é maior que a degradação meramente térmica ou pirolítica. A água é responsável pela quebra dos grupos acetilas, com formação de ácido acético, responsável pela degradação da madeira.

Mais uma vez, a perda de massa é um indicador da eficácia da modificação térmica. Assim, com base nos resultados de PMC, espera-se maior efeito na composição química e na cor da madeira do tratamento CS160, seguido pelo OS210. Por outro lado, espera-se que o tratamento OS185 tenha resultados semelhantes ao Controle.

5.2. Composição química

Os resultados das análises químicas dos componentes estruturais da parede celular se encontram na Tabela 1. Para os teores de alfa-celulose, hemiceluloses e lignina solúvel, houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre as

médias de pelo menos um tratamento. Destaca-se que foi utilizado o teste H de Kruskal-Wallis na análise dos teores de alfa-celulose, lignina insolúvel e lignina total, porque os dados não tiveram distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk, $p < 0,05$) e nem variâncias homogêneas (teste de Bartlett, $p < 0,05$).

Tabela 1 – Médias dos componentes estruturais da madeira por tratamento.

| Tratamentos | Alfa-Celulose (%) | Hemiceluloses (%) | Lignina Insolúvel (%) | Lignina Solúvel (%) | Lignina Total (%) |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| Controle | 48,21 AB | 24,24 a | 32,34 A | 1,89 a | 34,23 A |
| | (0,74) | (2,10) | (2,48) | (0,45) | (2,34) |
| CS160 | 53,01 A | 8,90 c | 33,36 A | 1,61 b | 34,97 A |
| | (4,15) | (6,36) | (9,76) | (5,40) | (9,57) |
| OS185 | 46,04 AB | 24,55 a | 32,29 A | 1,88 a | 34,17 A |
| | (0,27) | (1,57) | (0,52) | (2,32) | (0,42) |
| OS210 | 45,72 B | 21,20 b | 33,55 A | 1,72 b | 35,27 A |
| | (0,59) | (4,93) | (1,26) | (3,32) | (1,32) |
| Teste de Shapiro-Wilk | 0,0065* | 0,41 ns | 0,0356* | 0,8384 ns | 0,0359* |
| Teste de Bartlett | 0,0034* | 0,59 ns | 0,0058* | 0,0642 ns | 0,0046* |
| Teste F | - | 239,3 | - | 14,94 | - |
| Hc | 9,8421 | - | 3,2051 | - | 3,2051 |

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula ou maiúscula nas colunas não diferem entre si em nível de 5%, respectivamente de acordo com os testes de Tukey e Bonferroni. n.s.: não significativo em nível de 5%. *: significativo em nível de 5%. Resultados entre parênteses são o coeficiente de variação (%).

Fonte: O autor (2022).

Comparando-se os resultados obtidos para o teor de alfa-celulose entre o Controle e os demais tratamentos, nota-se que o tratamento CS160 apresentou maior média absoluta que o Controle. Por outro lado, os tratamentos em sistema aberto ficaram abaixo do Controle. Contudo, nenhuma média diferiu significativamente do Controle, indicando que a modificação térmica não teve efeito sobre o teor de alfa-celulose da madeira, reforçando a elevada estabilidade térmica desse constituinte da parede celular (SUNDQVIST, 2004).

O efeito da modificação térmica foi diferente no teor de hemiceluloses de acordo com o tipo de processo. O tratamento CS160 apresentou a menor média (8,90%) de teor de hemiceluloses, o que representa uma diferença de 15,34 p.p. em relação ao Controle. A média do tratamento OS185 não diferiu estatisticamente do Controle, ao passo que a média do OS210 foi apenas 3 p.p. inferior ao Controle, porém significativa.

Os resultados do teor de hemiceluloses expressaram o que foi verificado na perda de massa corrigida (PMC), uma vez que as hemiceluloses são os componentes termicamente mais frágeis da parede celular (CANDELIER *et al.* 2013; ESTEVES; PEREIRA, 2009; FIGUEROA; MORAES, 2009; SIVONEN *et al.* 2002). Assim, a maior PMC verificada para o tratamento CS160 foi decorrente da maior degradação das hemiceluloses. Da mesma forma, como a PMC do tratamento OS185 foi próxima de zero, implicou em baixa degradação térmica, resultado expresso pela diferença não significativa entre este tratamento (24,55%) e o Controle (24,24%).

A madeira de teca tem muitas substâncias em seus vasos, que se solubilizam durante as análises e, segundo Lengowski *et al.* (2021), a maioria dos extrativos desaparece ou se degrada durante o tratamento térmico, principalmente os mais voláteis. No entanto, durante a degradação dos componentes estruturais da parede celular, novos compostos que podem ser extraídos da madeira são formados. A degradação das hemiceluloses pela aplicação de elevadas temperaturas forma ácido acético, que atua como um catalisador para a despolimerização, aumentando ainda mais a quebra do polímero, levando à formação de formaldeído, furfural e outros aldeídos. Além disso, parte do material orgânico pode ser degradado e solubilizado, justificando uma queda dos valores de hemiceluloses para a teca.

Não houve diferença estatística entre os valores de lignina total e lignina insolúvel, indicando que as diferenças de perda de massa se devem principalmente, à degradação das hemiceluloses. Menezes (2017) também notou, para um processo em sistema fechado, que os teores de lignina dos tratamentos não diferiram estatisticamente entre si, e nem em relação ao Controle. Inclusive, Alé *et al.* (2002), citados por Menezes (2017), informaram que a degradação da lignina inicia em 250 °C, temperatura acima das utilizadas neste estudo.

Entretanto, houve redução no teor de lignina solúvel entre os tratamentos CS160 e OS210, quando comparados ao Controle. Embora tenha sido constatada a diferença estatística, a diferença entre a maior média (Controle) e a menor média (CS160) foi de apenas 0,28 p.p. De fato, essa diferença não foi grande o suficiente para impactar nos resultados do teor de lignina total, que não

diferiram significativamente entre os tratamentos, conforme mencionado anteriormente.

Alguns autores (LENGOWSKI *et al.*; 2021, LOPES, 2018; MENEZES, 2017; PRATIWI *et al.*; 2019) indicaram um aumento no teor de lignina, que não foi verificado nos tratamentos testados. A justificativa para o aumento no teor de lignina é aparente (não real), pois não há formação desse polímero durante o tratamento, e sim uma condensação em sua estrutura pela degradação de outros componentes químicos da madeira, principalmente das hemiceluloses. Assim como também Pratiwi *et al.* (2019) sustentaram que, especialmente quando a temperatura está acima de 200 °C, as amostras resultam em mais disponibilidade de produtos da degradação das hemiceluloses, o que pode contribuir para a reação de condensação da lignina, e que normalmente podem ser contabilizados como extrativos.

Os resultados do teor de extrativos nos diversos solventes por tratamento podem ser vistos na Tabela 2. Para os extrativos totais, o tratamento CS160 foi o que apresentou o maior teor; de fato, este tratamento teve a maior média de teor de extrativos, independentemente do solvente utilizado. Já as médias dos tratamentos em sistema aberto (OS185 e OS210), foram próximas às do Controle, embora tenha havido diferença significativa entre as médias de todos os tratamentos.

Comparando-se o Controle com os dois tratamentos realizados em sistema aberto, nota-se que as médias foram similares, respectivamente 0,74 p.p. menor e 0,30 p.p. maior para OS185 e OS210. Apesar de as médias terem diferido significativamente umas das outras, na prática, nota-se uma diferença pouco expressiva no teor de extrativos totais entre esses tratamentos, o que pode ser melhor verificado na Figura 11.

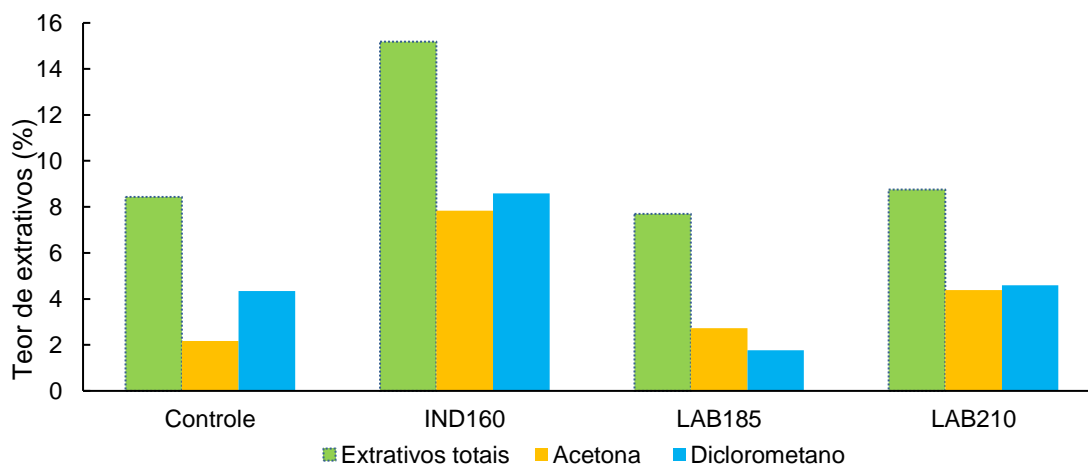
Tabela 2 – Médias de teor de extrativos de acordo com o solvente.

| Tratamentos | Extrativos Totais (%) | Extrativos em Acetona (%) | Extrativos em Diclorometano (%) |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Controle | 8,44 c (2,11) | 2,17 d (1,52) | 4,34 b (5,07) |
| CS160 | 15,19 a (0,55) | 7,84 a (1,21) | 8,59 a (2,84) |
| OS185 | 7,70 d (0,79) | 2,72 c (0,83) | 1,77 c (2,83) |
| OS210 | 8,76 b (1,09) | 4,38 b (3,91) | 4,59 b (3,11) |
| Teste de Shapiro-Wilk | 0,88 ns | 0,14 ns | 0,57 ns |
| Teste de Bartlett | 0,54 ns | 0,08 ns | 0,33 ns |
| Teste F | 2806,7* | 4020,1* | 728,02* |

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula em uma coluna não diferem entre si em nível de 5%, de acordo com o teste de Tukey. n.s.: não significativo em nível de 5%. *: significativo em nível de 5%. Resultados entre parênteses são o coeficiente de variação (%).

Fonte: O autor (2022).

Figura 11 – Gráfico de barras dos teores de extrativos por tratamento.



Fonte: O autor (2022).

A tendência dos tratamentos em sistema aberto foi diferente em relação ao Controle, quando analisados os teores de extrativos em acetona e diclorometano. Para o teor de extrativos em acetona, as médias do Controle e do OS185 foram similares, com uma diferença de 0,55 p.p., ao passo que a média do OS210 foi pouco maior que o dobro do Controle. O inverso ocorreu para os extrativos em diclorometano, em que as médias do Controle e do OS210

foram similares, com uma diferença de 0,25 p.p., ao passo que a média do OS185 foi menor que a metade do Controle.

No caso da extração em acetona, sugere-se que o processo do OS185 não foi suficiente para volatilizar os extrativos polares, ao passo que a perda de massa do OS210 foi suficiente para aumentar o teor de extrativos em relação ao Controle. Por outro lado, no caso da extração em diclorometano, o processo do OS185 foi suficiente para volatilizar os extrativos apolares; e a perda de massa do OS210 foi suficiente para produzir novas substâncias e compensar a fração volatilizada.

Essa tendência verificada para a extração em diclorometano está de acordo com o reportado na literatura para processos em sistema aberto (ESTEVES *et al.* 2008, ESTEVES; PEREIRA 2009). À vista disto, o teor de extrativos da madeira modificada termicamente pode variar, aumentando ou reduzindo em relação ao original (Controle), dependendo do processo e da temperatura, que conseqüentemente afetam as reações químicas que ocorrem durante a modificação térmica, formando então, diferentes tipos de substâncias.

Vale mencionar que a extração realizada com a sequência etanol:tolueno, etanol e água quente, contabilizada como extrativos totais, foi a que apresentou as maiores médias quando comparadas aos demais solventes (Figura 11), uma vez que a extração sequencial utiliza uma mistura de solventes possibilitando a remoção de várias classes de extrativos, com diversos pesos moleculares (TAPPI, 1997).

Comparando-se os solventes acetona (polar) e diclorometano (apolar), nota-se, de forma geral, maior capacidade extratora deste último (Figura 11). Gomide *et al.* (2005) e Lopes (2008) afirmaram que o diclorometano pode ser mais vantajoso quando se objetiva extrair apenas compostos lipofílicos da madeira. Segundo Baptista (2015) e TAPPI (1997), esses compostos não polares (apolares), são conhecidos como gorduras, ceras, terpenos, esteróis, resinas, e hidrocarbonetos não voláteis.

Com a análise qualitativa dos extrativos por CG-MS para madeira de teca de curta rotação, Pratiwi *et al.* (2019) apontaram o esqualeno como o principal componente em extrativos solúveis em diclorometano de teca não tratada. O

outro composto encontrado foi a 2-metilantraquinona (tectoquinona), podendo ser identificado também em acetona. Após o tratamento térmico, o teor de esqualeno diminuiu ao ponto de não poder mais ser detectado. Enquanto a porcentagem relativa de tectoquinona diminuiu no extrato de acetona e etanol-tolueno, enquanto aumentou no de diclorometano. Este comportamento pode ser causado pela maior estabilidade térmica da tectoquinona em comparação com outros componentes do extrato diclorometano.

Numa lista composta por 92 metabólitos secundários presentes na madeira de teca, já isolados e que desempenham diversas funções fitotóxicas (VYAS *et al.*, 2018), os metabólitos mais presentes foram as quinonas. Elas se apresentam na forma de naftoquinonas e antraquinonas, além de outros fitoquímicos, como os terpenóides, apocarotenóides, compostos fenólicos e flavonóides, esteróides/saponinas, fenilpropanóides e alguns ésteres e compostos diversos.

A durabilidade natural da madeira de teca é atribuída à presença de seus extrativos tóxicos, como as antraquinonas e naftoquinona, bem como a tectoquinona. Esses extrativos não apenas determinam a durabilidade da madeira, mas também podem afetar sua cor, característica essa que é um fator de qualidade importante, pois influencia o valor comercial e a adequação do produto ao uso final (YANG *et al.*, 2020). Na análise cromatográfica realizada por Qiu *et al.* (2019), tendo a acetona como solvente, as diferentes substâncias mais presentes no extrator foram 4-terc-butil-2-fenil-fenol, 2-metil-antraquinona e 2,3-dimetil-1,4,4a,9a-tetrahidro-9,10-antracenediona, que pode ser a principal composição para a característica cromática da teca.

Os extrativos solúveis em água quente presentes no cerne da madeira de teca, mesmo em baixas quantidades, não estão associados à resistência natural da madeira, se comparados aos extrativos solúveis em etanol ou outros solventes. Porém, possuem efeito fungicida em fungos de podridão branca e parda. A análise cromatográfica (CG-MS) dos extratos de teca revelou aproximadamente 70 compostos químicos em etanol, 80 em metanol e 100 em acetona. Os compostos majoritários se repetiram para os extratos em etanol, metanol e acetona, atingindo o mesmo tempo de retenção. Entre eles, foram

identificados principalmente os compostos 2-metil-antraquinona (ou tectoquinona, pico de maior intensidade), seguido do esqualeno e o 4-terc-butil-2-fenil-fenol (BROCCO *et al.*, 2017).

5.3. Colorimetria

Inicialmente, as médias dos parâmetros colorimétricos L*, a* e b* da madeira de teca antes da modificação térmica foram, respectivamente, iguais a 53,87, 11,52 e 23,41. Esses resultados foram calculados (média) com base nos dados das 45 amostras dos tratamentos modificados termicamente antes do processo (Figura 3). Chávez-Salgado *et al.* (2022) e Qiu *et al.* (2019) afirmaram que os metabólitos secundários influenciam na cor e no cheiro da madeira de teca. Os extrativos contêm compostos cromáticos, como grupos hidroxila fenólicos, grupos carbonila e ligações duplas, que dão cor à madeira. Entretanto, destacam que a madeira de teca tem uma tonalidade única promovido pela 2-metil-antraquinona.

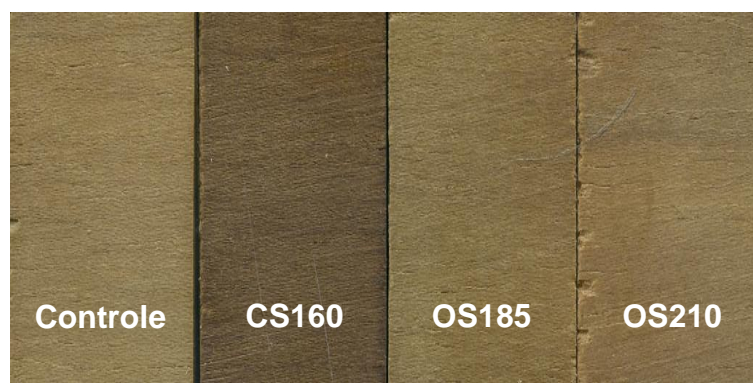
Na Tabela 3 encontram-se os resultados dos parâmetros colorimétricos e na Figura 12 encontram-se amostras de madeira exemplificando as cores obtidas em cada tratamento.

Tabela 3 – Médias dos parâmetros colorimétricos da madeira antes e depois da modificação térmica.

| Tratamentos | Antes | | | Modificação térmica | | |
|--------------|-------|-------|-------|---------------------|------|-------|
| | L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| CS160 | 54,84 | 13,84 | 25,47 | 39,45 | 8,37 | 14,81 |
| OS185 | 54,07 | 9,96 | 22,29 | 43,84 | 8,72 | 17,84 |
| OS210 | 52,42 | 10,32 | 22,05 | 39,40 | 8,10 | 14,48 |

L*: luminosidade; a*: coordenada vermelho-verde; b*: coordenada amarelo-azul.

Figura 12 – Cor da madeira obtida por cada processo testado.

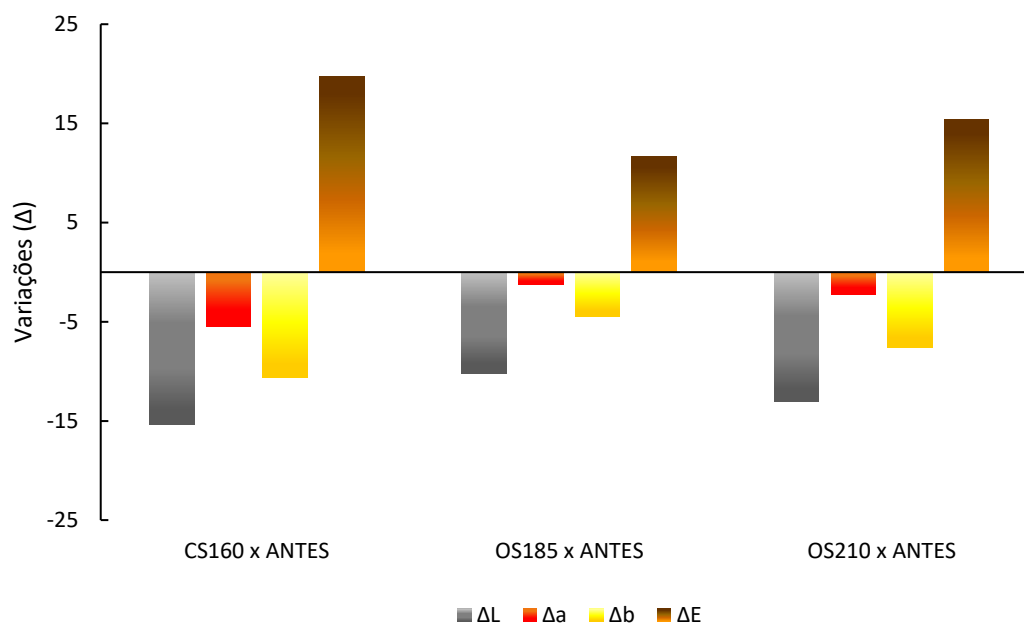


Fonte: O autor (2022).

Destaca-se que, após a modificação térmica, a coordenada cromática a^* variou pouco entre os tratamentos, indicando um efeito similar da temperatura e dos diferentes processos no pigmento vermelho-verde. Contudo, para todos os tratamentos, o valor de a^* foi reduzido em relação à madeira não tratada (antes, Tabela 3), indicando perda do pigmento vermelho, principalmente para o CS160.

Com base nos resultados da Tabela 3, nota-se que a cor da madeira modificada termicamente dos tratamentos CS160 e OS210 ficou parecida após o processo. Para melhor interpretação dos resultados da Tabela 3, foram calculadas as diferenças dos parâmetros colorimétricos, antes e depois da modificação térmica, que foram usadas como base para o cálculo da variação total da cor (ΔE) (Figura 12). A análise do ΔE é particularmente importante porque não considera apenas o resultado final da cor causada pelo processo (Tabela 3), mas traduz um comparativo entre o material na condição inicial (antes) e na condição final (modificação térmica), compreendendo a variação das coordenadas cromatográficas.

Figura 12 – Variações dos parâmetros colorimétricos por tratamento.



Fonte: O autor (2022).

Para a verificação do efeito da modificação térmica na cor da madeira, particularmente, foi analisado valor de ΔE , que expressa a variação total da cor com base nos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* . O maior ΔE foi do tratamento CS160 (19,74), seguido por OS210 (15,37) e OS185 (11,65). Este resultado confirmou as expectativas de perda de massa corrigida (Figura 10), demonstrando que as alterações químicas decorrentes do processo foram as mais drásticas entre os processos testados, podendo-se notar o reflexo nos resultados obtidos nas coordenadas colorimétricas.

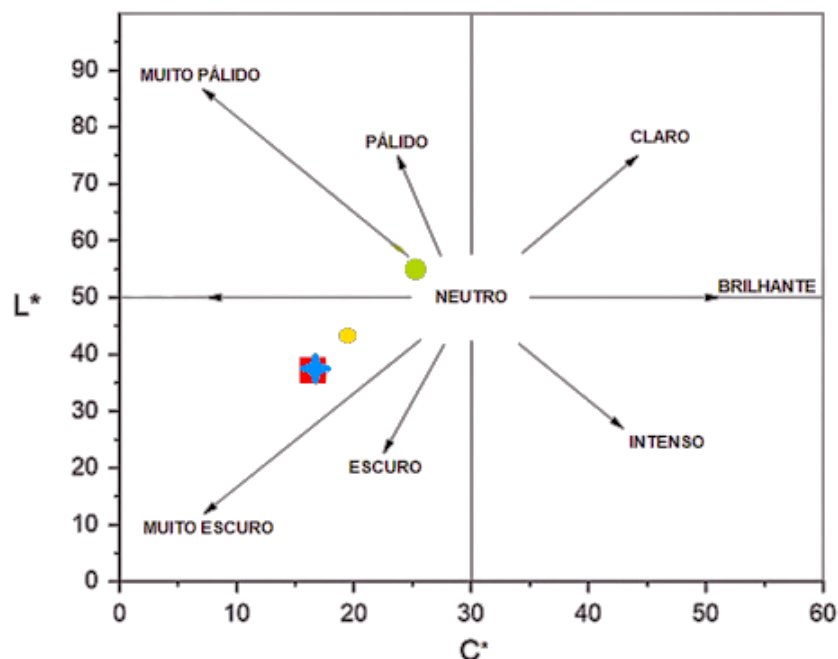
As variações das coordenadas L^* , a^* e b^* seguiram a mesma tendência do ΔE , sempre com maior variação (em módulo) do tratamento CS160 e menor variação do tratamento OS185. Reforça-se o menor efeito do processo na pigmentação vermelho-verde (a^*) em comparação à amarelo-azul (b^*). Destaca-se que, de acordo com a classificação de Carvalho *et al.* (2021) (Quadro 2), a variação total da cor de todos os tratamentos foi qualitativamente “muito apreciável”, que é a maior classificação ($\Delta E > 12,0$).

Na Figura 13 encontra-se um diagrama, elaborado com base nas coordenadas L^* e C^* , que auxilia na compreensão de como a cor da madeira mudou por causa do efeito da modificação térmica. Inicialmente, destaca-se que os três tratamentos de madeira modificada termicamente ficaram em um mesmo

quadrante, diferente do quadrante da madeira não tratada. Esse resultado reforça a mudança da cor original da madeira de teca causada pela modificação térmica, conforme discutido anteriormente sobre a classificação qualitativa proposta por Carvalho *et al.* (2021).

A madeira modificada termicamente teve a luminosidade reduzida (abaixo da linha de 50), o que significa que o processo escureceu a madeira. Cuccui *et al.* (2017) explicaram que, embora possa ocorrer uma variação nas coordenadas a^* e b^* , a variação de cor mais relevante relacionada à modificação térmica é a redução da luminosidade (L^*). Da mesma forma que a luminosidade, o processo tornou a madeira mais opaca (ou menos brilhante), com resultados de saturação (C^*) mais próximos de zero em comparação à madeira não tratada.

Figura 13 – Diagrama colorimétrico $L^* \times C^*$.



L^* : luminosidade; C^* : saturação; círculo verde: madeira antes da modificação térmica; quadrado vermelho: CS160; losango azul: OS210; círculo amarelo: OS185.
 Fonte: O autor (2022), adaptado de Carvalho *et al.* (2021).

O tratamento OS185 foi que ficou mais próximo da madeira não tratada, indicando a menor alteração na cor. Esse resultado está de acordo com o discutido anteriormente para o valor de ΔE (Figura 12). No entanto, com base nos resultados de perda de massa corrigida, esperava-se que o tratamento OS185 ficasse no mesmo quadrante que a madeira não tratada.

Com base nos resultados das análises químicas, acredita-se que a redução no teor de extrativos em diclorometano tenha sido o principal responsável pela mudança da cor do tratamento OS185, uma vez que foi a única propriedade química que mudou de forma mais expressiva em relação ao Controle. Também não se pode desprezar o efeito da secagem causado pelo processo, uma vez que a umidade final da madeira do OS185 atingiu média próxima a zero.

Alguns autores destacam que a natureza da mudança de cor é complexa, pois todos os componentes da madeira, incluindo os extrativos, podem contribuir para a mudança. A cor mais escura da madeira modificada termicamente pode ser atribuída, além da formação de produtos de degradação das hemiceluloses (não é o caso do OS185), à mudanças nos extrativos e à formação de produtos de oxidação como quinonas e também pela percolação de extrativos para a superfície das peças (BEKHTA; NIEMZ, 2003; GAŠPARÍK *et al.*, 2019).

Destaca-se a proximidade dos tratamentos CS160 e OS210 no diagrama (Figura 13), em consonância com o que foi notado nos resultados da Tabela 3. Esse resultado foi inesperado, porque foram realizados com temperaturas e processos diferentes, o que resultou em resultados diferentes de perda de massa corrigida (Figura 10) e composição química (Tabelas 1 e 2), conforme discutido anteriormente.

O valor de ΔE dos dois tratamentos também variou pouco, com 15,39 e 13,03 (Figura 12), respectivamente para CS160 e OS210. Ou seja, em relação à condição inicial da madeira, o processo CS160 foi capaz de escurecê-la um pouco mais em relação a sua condição original. Carvalho *et al.* (2021) concluíram que, para um mesmo tipo de processo de modificação térmica, que a temperatura mais elevada causa maior proximidade dos tons de cinza, pela diminuição da saturação (C^*), tornando a madeira menos brilhante. Contudo, mesmo a uma menor temperatura, o tratamento CS160 teve resultados de cor similares ao OS210, com maior temperatura. Isso reforça a hipótese inicial do trabalho da influência de diferentes processos (sistema aberto e fechado) nas propriedades da madeira modificada termicamente.

Com base nos resultados do tratamento OS185, acredita-se que um processo em sistema aberto a 160 °C (mais ameno) resultaria em madeira com

cor ainda mais parecida com a madeira não tratada. Segundo Gašparík *et al.* (2019), os fatores espécie e temperatura de modificação térmica são os mais importantes que afetam a cor final da madeira. Contudo, os resultados deste trabalho apontam que essa afirmação é válida apenas quando se considera a madeira modificada termicamente em um mesmo tipo de processo, o que implica na utilização das mesmas condições de pressão, taxa de aquecimento, umidade e temperatura.

Para melhor entendimento das mudanças provenientes dos tipos de processos e das diferentes temperaturas, sugere-se a realização de mais estudos com esse material. Dentre eles, a identificação dos extrativos obtidos nos diferentes solventes, bem como a realização de ensaios de higroscopicidade, estabilidade dimensional e resistência à biodeterioração.

6. CONCLUSÕES

A perda de massa corrigida (PMC) foi maior no processo de modificação em sistema aberto a 160 °C (18,47%), classificando-o como drástico. A PMC foi menor em sistema aberto, em que a 185 °C foi próxima a zero (0,33%), elevando com o aumento da temperatura para 210 °C (2,44%). Assim, o efeito do tipo de processo (sistema fechado x aberto) foi maior do que a temperatura na PMC.

Os processos em sistema fechado e sistema aberto tiveram efeitos diferentes na composição química da madeira, quando comparados à madeira não tratada. Essas diferenças foram decorrentes das diferentes PMC. A madeira modificada termicamente em sistema fechado a 160 °C teve menor teor de hemiceluloses e maiores teores de extrativos.

A composição química da madeira modificada termicamente em sistema aberto a 185 °C foi similar à da madeira não tratada, exceto o teor de extrativos em diclorometano. A similaridade entre os tratamentos está relacionada à baixa PMC (próxima de zero).

Todos os processos alteraram a cor original da madeira, em que a madeira modificada termicamente se tornou mais escura (menor L*), com menos brilho (menor C*) e teve os resultados das coordenadas colorimétricas a* (vermelho-verde) e b* (amarelo-azul) reduzidos.

Apesar das diferenças dos resultados de PMC e composição química, as coordenadas colorimétricas da madeira modificada termicamente a 160 °C em sistema fechado e a 210 °C em sistema aberto foram similares, indicando correspondência entre os processos com relação a cor.

7. REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. W. C. **Eficiência de métodos não destrutivos para classificação e predição de propriedades de madeira modificada termicamente.** 2021. 131 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.

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

ARCHANGELO, A. **Fabricação e caracterização dos painéis homogêneos com partículas de madeira teca (*Tectona grandis* L. f.) e a adição da casca de arroz.** 2019. 211 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

BAPTISTA, I.; MIRANDA, I.; QUILHÓ, T.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Characterisation and fractioning of *Tectona grandis* bark in view of its valorisation as a biorefinery raw-material. **Industrial Crops and Products**, [S.l.], v. 50, p. 166-175, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.004>

BATISTA, D.C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme®.** 2012. 339 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. **Holzforschung**, [S.l.], v. 57, n. 5, p. 539-546, 2003. DOI: 10.1515/HF.2003.080

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.

BOONSTRA, M. J.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA, B. F.; KEGEL, E. V. Strength

properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, [S.l.], v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.

BRITO, J. O. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: **Congresso Florestal Brasileiro**. Anais, p.774. Curitiba. 1993.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO, 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**, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006. Disponível em: http://www.dcf.ufla.br/cerne/artigos/10-0220094432v12_n2_artigo%2009.pdf.

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.

BROCCO, V. F.; PAES, J. B.; COSTA, L. G.; BRAZOLIN, S.; ARANTES, M. D. C. Potential of teak heartwood extracts as a natural wood preservative. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 142, p. 2093-2099, 2017.

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

CAMINO, R; MORALES, J. P. **Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades**. Série Técnica: Informe Técnico, 397, p. 392. Turrialba: CATIE, 2013.

CANDELIER, K.; DUMARÇAY, S.; PÉTRISSANS, A.; DESHARNAIS, L.; GÉRARDIN, P.; PÉTRISSANS, M. Comparison of chemical composition and decay durability of heat-treated wood cured under different inert atmospheres: nitrogen or vacuum. **Polymer Degradation and Stability**, [S.l.], v. 98, n. 2, p.

677-681, 2013.

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.

CHAVEZ, E.; FONSECA, W. **Teca: *Tectona grandis* L.f., uma espécie arbórea com múltiplos usos na América Central**. Projeto de Cultivo de Árvores de Uso Múltiplo (Madeleña). CATIEROCAP. Série Técnica, Relatório Técnico 179, p. 47, 1991.

CHÁVEZ-SALGADO, L. P.; VANDENBOSSCHE, V.; VILAREM, G. *Tectona grandis* Linn. f. secondary metabolites and their bioactive potential: a review. **iForest: Biogeosciences and Forestry**, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 112-120, 2022.

COSTA, E. W. B.; RUDMAN, P.; GAY, F. J. Investigations on the durability of *Tectona grandis*. **Empire Forestry Review**, [S.l.], p. 291-298, 1958.

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.

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

ESTEVEES, B.M.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H.M. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, [S.l.], v. 62, n. 3, p. 344-351, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1515/HF.2008.057>

FIGUEROA, M. J. M., MORAES, P. D. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, p. 157-174, 2021.

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

FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook: wood as an engineering material. **General Technical Report FPL-GTR-190**. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI: U.S., 2010.

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.

GAŠPARÍK, M.; GAFF, M.; KAČÍK, 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.

GEORGE, B.; SUTTIE, E.; MERLIN, A.; DEGLISE, X. Fotodegradação e fotoestabilização da madeira - o estado da arte. **Polymer Degradation and Stability**, [S.l.], v. 88, n. 2, p. 268- 274, 2005. DOI: 10.1016/j. polymdegradstab.2004.10.018

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**, v. 1, p. 241-266, 1971.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. D.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica para produção de celulose da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 1, n. 299, p. 129-137, 2005.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. 2018. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

HILL, C. **Wood modification**: chemical, thermal and other processes. West

Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

HULLER, L. A. S.; HASELEIN, C. R.; SILVEIRA, A. G.; MENEZES, W. M.; TALGATTI, M.; SOUZA, J. T.; SANTINI, E. J. Modificação térmica e propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 183-188, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual IBÁ 2019**. 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2022.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual IBÁ 2020**. 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **11664-4:2008: colorimetry: part 4: CIE 1976 L*a*b*: colour space**. Geneva: ISO, 2008. Available from: <https://www.iso.org/standard/52497.html>

JEREZ-RICO, M.; COUTINHO, S. Establishment and management of planted teak forests. **The Global Teak Study: Analysis Evaluation and Future Potential of Teak Resources**, Kollert, W. and Kleine, M. IUFRO (International Union of Forestry Research Organizations), Vienna, Austria, v. 36, p. 49-70, 2017.

JONES, D.; SANDBERG, D. A review of wood modification globally—updated findings from COST FP1407. **Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment**, [S.l.], v. 1, 2020.

KOKUTSE, A. D.; STOKES, A.; BAILLÈRES, H.; KOKOU, K.; BAUDASSE, C. Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* Lf) heartwood and relationship with colour. **Trees**, [S.l.], v. 20, n. 2, p. 219-223, 2006.

KOLLERT, W., KLEINE, M. Global teak study: analysis, evaluation and future potential of teak resources. **IUFRO World Series**, v. 36, 2018.

KONICA MINOLTA. Comunicação precisa da cor: controle de qualidade da

percepção à instrumentação. **Seoul: Konica Minolta**. p. 57, 1998.

LEMOS, J.A.S.; MENDES, M.C.S.; MADI, J.P.S.; PEREIRA, B.L.C.; OLIVEIRA, A.C. Influence of the propagation method on the production and quality of *Tectona grandis* wood. **Advances in Forestry Science**, [S.l], v. 6, n. 3, p. 761-765, 2019. <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v6i3.8183>

LENGOWSKI, E.C.; NISGOSKI, S.; KLOCK, U. Properties of thermally modified teakwood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Concepción, v.23, p.1–26, 2021. DOI: 10.4067/S0718-221X2021005XXXXXX.

LEONARDO, F. V. S.; ROCHA, H. F.; MENDOZA, Z. M. S. H. Compostos químicos em teca. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 315-322, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.83.816>

LOPES, J. O.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. de. 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. **Caracterização físico-química e molhabilidade da superfície da madeira juvenil de teca modificada termicamente**. 2018. 111 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

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

LOPES, O. R. **The influence of extractives and heartwood/sapwood ratio on near infrared evaluation of wood for pulp production**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

MACEDO, R. L. G.; GOMES, J. E.; VENTURIN, N.; SALGADO, B. G. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f. (teca) em diferentes

espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 61-69, 2005.

MARINONIO, G. B. **Efeito da densidade e do teor de extrativos na variação da cor da madeira de *Tectona grandis* L. f.** 2011. 29 f. Monografia - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

MEDEIROS, J. R. **Efeito da modificação térmica na resistência biológica da madeira de eucalipto.** 2021, 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2021.

MÉNDEZ-MEJÍAS, L. D.; MOYA, R. Effects on density, shrinking, color changing and chemical surface analysis through FTIR of *Tectona grandis* thermo-treated. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 112, p. 811-820, 2016.

MENEZES, W. M.; SANTINI, E. J.; SOUZA, J. T.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Thermal modification on the physical properties of wood. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 1019-1025, 2014.

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.

MILITZ, H.; ALTGEN, M. Processes and properties of thermally modified wood manufactured in Europe. **Deterioration and protection of sustainable biomaterials**. American Chemical Society, p. 269-285, 2014.

MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A.; HASELEIN, C. R. Efeito da termorreificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, p. 291-302, 2017.

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

MONONEN, K.; ALVILA, L.; PAKKANEN, T. T. CIEL* a* b* measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood. **Scandinavian Journal of Forest Research**, [S.I.], v. 17, n. 2, p. 179-191, 2002. <https://doi.org/10.1080/028275802753626827>

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**, [S.I.], v. 67, n. 1, p. 109, 2010.

NUNES, C. S. **Propriedades tecnológicas e qualidade de adesão de madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* termorretrificadas**. 2012. 56f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012

PANDEY, D.; BROWN, C. Teak: a global overview. **Unasylva**, v. 51, n. 201, p. 3-13, 2000.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Efeito da termorretrificação no envernizamento, colagem e cor da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1999.115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

PRATIWI, L. A.; DARMAWAN, W.; PRIADI, T.; GEORGE, B.; MERLIN, A.; GÉRARDIN, C.; GÉRARDIN, P. Characterization of thermally modified short and long rotation teaks and the effects on coatings performance. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 21, n. 2, p. 209-222, 2019.

QIU, H.; LIU, R.; LONG, L.. Analysis of chemical composition of extractives by acetone and the chromatic aberration of teak (*Tectona grandis* L. f.) from China. **Molecules**, [S.I.], v. 24, n. 10, p. 1989, 2019.

QUEIROZ, F. L. C.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H.; RIBEIRO, E. S.; LIMA, C. M. Intemperismo artificial em lâminas de *Tectona grandis* tratadas com produtos de acabamento. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 573-581. 2016.

RANGANATHAN, S. K.; KOSHI, T.; SITARAMAN, N. L. Methyl anthraquinone (tectoquinone)—a synergist for 2, 2-bis-(p-chlorophenyl)-1, 1, 1-trichloroethane (DDT). **Nature**, [S.I.], v. 164, n. 4182, p. 1095-1095, 1949.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. Análises estatísticas no SAEG. **Viçosa: UFV**, p. 301. 2001.

RUDMAN, P.; COSTA, E. W. B.; GAY, F. J.; WETHERLY, A. H. Relationship of tectoquinone to durability in *Tectona grandis*. **Nature**, [S.I.], v. 181, n. 4610, p. 721-722, 1958.

SANDERMANN W.; SIMATUPANG M. H. Zur chemie und biochemie des Teakholzes (*Tectona grandis* L.). **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 24, n. 5, p. 190-204, 1966.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito do tratamento de vaporização em toras e madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* sobre a flexão estática. **Floresta**, Curitiba, v. 29, n. 3, p. 37-51, 2003.

SILVA, C. C.; SOUZA, A. P.; BOUVIÉ, L.; FERNEDA, B. G.; NETO, A. L.; MONTEIRO, E. B. Modelos alométricos para estimar a área do limbo foliar de teca. **Nativa**, [S.I.], v. 8, n. 1, p. 129-136, 2020.

SIVONEN, H.; MAUNU, S. L.; SUNDHOLM, F.; JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. **Holzforschung**, [S.I.], v. 56, n. 6, p. 648-653, 2002.

SOERIANEGARA, I.;LEMMENS, R. H. M. Plant resources of South-East Asia. **Timber trees: major commercial timbers**, [S.I.], . v. 5, n. 1, p. 384-391, 1993.

SOUZA, H. S.; TSUKAMOTO FILHO, A. A.; ARRIEL, D. A. A.; MEDEIROS, R. A. Produtividade de teca em sistema agroflorestal com milho e gado. **Advances in Forestry Science**, [S.I.], v. 6, n. 4, p. 827-834, 2019.

SOUZA, R. S. **Propriedades tecnológicas de *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos**. 2019. xix, 147 f., il. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)—Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 2004. 50 f. Tese de Doutorado. Luleå Tekniska Universitet. 2004.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 203 cm-99**: Alpha-, beta- and gama-cellulose in pulp. Norcross, 1999a.

_____. **T204 cm**: Solvent extractives of wood and pulp. Norcross, 1997a.

_____. **T264 cm**: Preparation of wood for chemical analysis. Norcross, 1997b.

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

VOVELLE, C.; MELLOOTTEE, H. Modeling of oxidizing or non-oxidizing pyrolysis of wood or vegetable waste from their components. **Energy from Biomass**, v. 2, p. 925-929, 1982.

VONGKHAMHO, S.; IMAYA, A.; TAKENAKA, C.; YAMAMOTO, K.; YAMAMOTO, H. Correlations among tree quality, stand characteristics, and site characteristics in plantation teak in mountainous areas of Lao PDR. **Forests**, [S.I.], v. 11, n. 7, p. 777, 2020.

VYAS, P.; YADAV, D. K.; KHANDELWAL, P. *Tectona grandis* (teak) – A review on its phytochemical and therapeutic potential. **Natural product research**, [S.I.], v. 33, n. 16, p. 2338-2354, 2019. DOI:10.1080/14786419.2018.1440217

WEAVER, P. L. *Tectona grandis* L.f., teak. Res. **Note SO-ITF-SM-64**. New Orleans: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1993.

WENTZEL, M.; FLECKENSTEIN, M.; HOFMANN, T.; MILITZ, H. Relation of chemical and mechanical properties of *Eucalyptus nitens* wood thermally modified in open and closed systems. **Wood Material Science and Engineering**, [S.I.], v. 14, n. 3, p. 165-173, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1450783>.

WISE, L. E.; MURPHY M.; D'ADDIECO A. A. Chlorite holocellulose, its

fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. **Paper Trade**, [S.l.], v. 122, p. 35-43, 1946.

YANG, G.; LIANG, K.; ZHOU, Z.; WANG, X.; HUANG, G. UPLC-ESI-MS/MS-based widely targeted metabolomics analysis of wood metabolites in teak (*Tectona grandis*). **Molecules**, [S.l.], v. 25, n. 9, p. 2189, 2020.

APÊNDICE A - Resumo Análise Estatística de Alfa-Celulose

Delimitação Inteiramente Casualizado – DIC Estatística Experimental ANOVA – Teste de Tukey

Quadro da análise de variância - Teor de Alfa-celulose (%)

| | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|---------|--------|--------|------------|
| Tratamento | 3 | 101.744 | 33.915 | 17.863 | 0.00066316 |
| Residuo | 8 | 15.189 | 1.899 | | |
| Total | 11 | 116.933 | | | |

CV = 2.86 %

Teste de normalidade dos residuos (Shapiro-wilk)

Valor-p: 0.0064843

ATENCAO: a 5% de significancia, os residuos nao podem ser considerados normais!

Teste de homogeneidade de variancia

valor-p: 0.003439352

ATENCAO: a 5% de significancia, as variancias nao podem ser consideradas homogeneas!

Teste de Tukey

| Grupos | Tratamentos | Medias |
|--------|-------------|----------|
| a | Ind160 | 53.00667 |
| ab | Controle | 48.20667 |
| ab | Lab185 | 46.04333 |
| b | Lab210 | 45.71667 |

APÊNDICE B - Resumo Análise Estatística de Hemiceluloses

Delimitação Inteiramente Casualizado – DIC Estatística Experimental ANOVA – Teste de Tukey

Quadro da análise de variância - Teor de Hemiceluloses (%)

Quadro da análise de variância

| | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|--------|---------|-------|------------|
| Tratamento | 3 | 489.47 | 163.157 | 239.3 | 3.6142e-08 |
| Resíduo | 8 | 5.45 | 0.682 | | |
| Total | 11 | 494.92 | | | |

CV = 4.19 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-wilk)

Valor-p: 0.4118866

De acordo com o teste de Shapiro-wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.5880722

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Tukey

| Grupos | Tratamentos | Medias |
|--------|-------------|----------|
| a | Lab185 | 24.55333 |
| a | Controle | 24.24333 |
| b | Lab210 | 21.2 |
| c | Ind160 | 8.896667 |

APÊNDICE C - Resumo Análise Estatística de Lignina Insolúvel

Delimitação Inteiramente Casualizado – DIC Estatística Experimental ANOVA – Teste de Tukey

| Quadro da análise de variância - Teor de Lignina Insolúvel (%) | | | | | |
|--|----|---------|--------|---------|---------|
| | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
| Tratamento | 3 | 3.9231 | 1.3077 | 0.45628 | 0.72021 |
| Resíduo | 8 | 22.9282 | 2.8660 | | |
| Total | 11 | 26.8513 | | | |

CV = 5.15 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-wilk)

Valor-p: 0.0356574

ATENÇÃO: a 5% de significância, os resíduos não podem ser considerados normais!

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.005867039

ATENÇÃO: a 5% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas!

De acordo com o teste F, as médias não podem ser consideradas diferentes.

| | Níveis | Médias |
|---|----------|----------|
| 1 | Controle | 32.34333 |
| 2 | Ind160 | 33.35667 |
| 3 | Lab185 | 32.29000 |
| 4 | Lab210 | 33.54667 |

CONTROLE = 160 = 185 = 210

APÊNDICE D - Resumo Análise Estatística de Lignina Solúvel

Delimitação Inteiramente Casualizado – DIC Estatística Experimental ANOVA – Teste de Tukey

Quadro da análise de variância - Teor de Lignina Solúvel (%)

| | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|---------|----------|--------|-----------|
| Tratamento | 3 | 0.15689 | 0.052297 | 14.942 | 0.0012133 |
| Resíduo | 8 | 0.02800 | 0.003500 | | |
| Total | 11 | 0.18489 | | | |

CV = 3.33 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-wilk)

Valor-p: 0.8383279

De acordo com o teste de Shapiro-wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.06429368

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Tukey

| Grupos | Tratamentos | Medias |
|--------|-------------|----------|
| a | Controle | 1.886667 |
| a | Lab185 | 1.88 |
| b | Lab210 | 1.723333 |
| b | Ind160 | 1.613333 |

APÊNDICE E - Resumo Análise Estatística de Lignina Total

Delimitação Inteiramente Casualizado – DIC Estatística Experimental ANOVA – Teste de Tukey

Quadro da análise de variância - Teor de Lignina Total (%)

| | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Tratamento | 3 | 2.6894 | 0.89647 | 0.29646 | 0.82712 |
| Resíduo | 8 | 24.1919 | 3.02398 | | |
| Total | 11 | 26.8813 | | | |

CV = 5.02 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-wilk)

Valor-p: 0.03594448

ATENÇÃO: a 5% de significância, os resíduos não podem ser considerados normais!

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.004671057

ATENÇÃO: a 5% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas!

De acordo com o teste F, as médias não podem ser consideradas diferentes.

| Níveis | Medias |
|------------|----------|
| 1 Controle | 34.23000 |
| 2 Ind160 | 34.97000 |
| 3 Lab185 | 34.16667 |
| 4 Lab210 | 35.27000 |

CONTROLE = 160 = 185 = 210

Análise descritiva dos dados Quadro 1 – Visualização dos dados

