

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

ANA PAULA SOARES DA SILVA

INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA E NA RESISTÊNCIA BIOLÓGICA DA MADEIRA DE MELINA

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2022

ANA PAULA SOARES DA SILVA

INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA E NA RESISTÊNCIA BIOLÓGICA DA MADEIRA DE MELINA

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Djeison Cesar Batista.

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2022


ANA PAULA SOARES DA SILVA

INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NA RESISTÊNCIA BIOLÓGICA DA MADEIRA DE MELINA


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

Aprovada em 22 de agosto de 2022.


COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente:
 DJEISON CESAR BATISTA
Data: 22/08/2022 14:53:46-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

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

Documento assinado digitalmente:
 PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SILVARES
Data: 22/08/2022 15:06:14-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

B.Sc. Ciências Biológicas Paulo Henrique dos Santos Silves
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Documento assinado digitalmente:
 FERNANDO NUNES GOUVEIA
Data: 23/08/2022 11:00:19-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Dr. Fernando Nunes Gouveia
Laboratório de Produtos Florestais/Serviço Florestal Brasileiro
Examinador

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.”
Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que tem me proporcionado.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo, ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias e ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, e todo seu corpo docente, que me proporcionaram a base necessária para todo conhecimento e aprendizado adquirido nesses anos de graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Djeison Cesar Batista, pela dedicação em guiar e transmitir o conhecimento para a realização deste trabalho. Aos Professores Dr. Juarez Paes e Fabrício Gonçalves, ao técnico do Laboratório de Química da Madeira Luciano Dias, às colegas de laboratório Jaqueline Medeiros e Fernanda Maffioletti e ao colega de curso Miquéias Reis, por todo o suporte técnico para a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Evaldo Silva e Ilzabeth Silva, ao meu irmão Paulo André Silva e à minha tia Ivanete Silva, por serem minha base e suporte familiar e emocional em toda minha vida.

A todos os meus colegas de turma e curso, em especial, Jair Rogério Colares Neto, Clara Gaspar Fossi de Souza, Katiúcia de Araújo, Gabriel Zuqui Passamani e Flávia Souza.

Aos meus amigos da “República do Surfe”, por me acolherem no momento em que mais precisei.

À cidade de Alegre – ES, meus amigos da cidade e da universidade, obrigada por me acolherem e fazerem com que me sentisse em casa, mesmo estando longe da minha. Aos meus melhores amigos Ellen Brierre Silva, Rafaela Musiello, Marcela Coutinho e Lucas Guimarães, por sempre estarem presentes e me darem suporte em todos os momentos.

À empresa Ambev, por fazer parte de toda minha graduação, proporcionando boas lembranças com seus produtos e o melhor estágio que poderia desejar.

E a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho de conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira, deixo o meu imenso sentimento de gratidão.

RESUMO

A madeira de melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.) tem sido plantada em muitos países das regiões tropical e subtropical da Ásia, América Latina e África, dado o seu rápido crescimento e por apresentar fuste com boas dimensões para exploração. A modificação térmica pode ser uma alternativa viável para a melhoria das propriedades da madeira juvenil de melina oriunda de plantios. O objetivo geral deste trabalho foi analisar o efeito da modificação térmica na composição química e na resistência à biodeterioração da madeira de melina. Analisou-se a madeira do cerne juvenil oriunda de um plantio experimental com 40 anos localizado em Abofour, Gana. A modificação térmica foi realizada a 180 °C, 200 °C e 220 °C em um reator-piloto utilizando-se um programa que simulou o processo industrial ThermoWood®. Para comparação dos resultados, analisou-se também a madeira não tratada (Controle). Analisou-se a composição química (teores de lignina, pentosanas e extrativos – totais, em acetona e em diclorometano) e a resistência à biodeterioração da madeira aos seguintes organismos xilófagos: *Trametes versicolor* (fungo de podridão branca), *Coniophora puteana* (fungo de podridão parda), *Nasutitermes corniger* (cupim arborícola) e *Cryptotermes brevis* (cupim de madeira seca). A modificação térmica alterou a composição química da madeira de melina, exceto o teor de extrativos em diclorometano. O efeito da modificação térmica foi positivo no aumento da resistência da madeira de melina à biodeterioração por *Trametes versicolor*, *Coniophora puteana* e *Nasutitermes corniger*. Por outro lado, o efeito do processo foi nulo na resistência à biodeterioração por *Cryptotermes brevis*. Recomenda-se a modificação térmica da madeira de melina em sistema aberto a 200 °C, por representar a melhor combinação entre resultados satisfatórios e o menor consumo energético.

Palavras-chave: *Gmelina arborea*; química da madeira; biodeterioração; cupins; fungos apodrecedores.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE QUADROS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo geral	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. <i>Gmelina arborea</i>	3
3.2. Modificação térmica.....	4
3.3. Composição química	5
3.4. Resistência à biodeterioração.....	6
3.4.1. Fungos apodrecedores.....	6
3.4.2. Cupins xilófagos	7
4. METODOLOGIA.....	9
4.1. Material e modificação térmica	9
4.2. Análises químicas.....	10
4.3. Ensaio de biodeterioração	12
4.3.1. Ensaio de resistência à biodeterioração por fungos xilófagos.....	12
4.3.2. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins arborícolas.....	13
4.3.3. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins de madeira seca.....	16
4.4. Análises estatísticas	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	18
5.1. Análises químicas.....	18
5.2. Ensaio de resistência à biodeterioração por fungos xilófagos.....	23
5.3. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins arborícolas.....	25
5.4. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins de madeira seca	26
6. CONCLUSÕES.....	29
7. REFERÊNCIAS	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Árvore de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. ex Sm.....	3
Figura 2 – Representação do programa do processo de modificação térmica.....	10
Figura 3 – Amostras de serragem classificada para as análises químicas. Da esquerda para a direita: Controle, 180 °C, 200 °C e 220 °C.....	10
Figura 4 – Montagem do reservatório para a coleta de cupins arborícolas: a) Reservatório. b) Fundo do reservatório com areia e papelão umedecido.....	14
Figura 5 – Interior do frasco do ensaio com cupins arborícolas.....	14
Figura 6 – Interior do recipiente do ensaio com cupins de madeira seca.....	16
Figura 7– Resultados dos teores de lignina solúvel e lignina insolúvel.....	19
Figura 8 – Resultado do teor de pentosanas.....	20
Figura 9 – Resultado de ensaios de extração em acetona e extrativos totais.....	21
Figura 10 - Representação das médias absolutas das notas de desgaste para cada tratamento.....	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo das análises químicas	11
Quadro 2 – Classificação da perda de massa dos corpos de prova submetidos ao ataque de fungos xilófagos	13
Quadro 3 – Classificação do desgaste e mortalidade de cupins arborícolas.....	15
Quadro 4 – Avaliação do desgaste provocado por cupins de madeira seca	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Médias dos teores de lignina e pentosanas	18
Tabela 2 – Médias dos teores de extrativos de acordo com os diferentes solventes	21
Tabela 3 – Perda de massa causada por fungos xilófagos.....	23
Tabela 4 – Perda de massa e desgaste causados pelos cupins arborícolas.....	25
Tabela 5 – Perda de massa, mortalidade e desgaste causado pelos cupins de madeira seca	26

1. INTRODUÇÃO

A melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm., família Lamiaceae) é uma espécie arbórea que tem boa adaptação em países de climas tropical e subtropical, e fuste com dimensões adequadas para exploração, mesmo em rotações curtas (BROWN, 2000). Da mesma forma que outras espécies tradicionais empregadas na silvicultura brasileira, ela possui potencial para ser plantada em larga escala no País. No entanto, a madeira de melina possui baixa durabilidade natural e mesmo o cerne é classificado com durabilidade “moderada” (CHUDNOFF, 1984; PLANT RESOURCES OF TROPICAL AFRICA, 2022).

A modificação térmica da madeira de florestas plantadas vem sendo utilizada como recurso de inovação tecnológica para aumentar a resistência biológica dessas madeiras. O processo de aquecimento das camadas externas da madeira já era aplicado há muitos anos, por exemplo, na civilização nórdica, a fim de melhorar sua resistência biológica e utilizá-la em ambientes externos e úmidos (THERMOWOOD ASSOCIATION, 2021).

A modificação térmica é um processo físico de proteção da madeira que altera a sua composição química, dificultando o ataque de agentes xilófagos, porém sem a impregnação de substâncias químicas tóxicas ao ser humano ou ao meio ambiente (LOWDEN; HULL, 2013; MILITZ; ALTGEN, 2014; OSTMAN; TSANTARIDIS, 2006; SUN et al., 2012). Conforme Batista (2012), o tema deve ser abordado com maior atenção, principalmente em relação ao objetivo de melhorar a resistência biológica da madeira juvenil de florestas plantadas, bem como de outras espécies com baixa resistência à biodeterioração.

Baseando-se nas pesquisas realizadas para a elaboração deste trabalho, e concluindo a escassez em banco de dados acadêmicos, nos últimos anos, poucos estudos foram realizados com a madeira de melina modificada termicamente, o que abre grandes possibilidades de estudo do efeito do processo para essa espécie. Com isso, foi possível chegar ao problema de pesquisa: Qual a influência do processo térmico na composição química e resistência biológica na madeira de melina?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi analisar o efeito da modificação térmica, em sistema aberto, na composição química e na resistência à biodeterioração da madeira de melina.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar três temperaturas finais de processo: 180 °C, 200 °C e 220 °C.
- Verificar o efeito do processo na composição química da madeira.
- Testar a resistência à biodeterioração por fungos apodrecedores (podridão branca e parda) e por cupins (arborícolas e de madeira seca).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. *Gmelina arborea*

A melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm., Verbenaceae) é uma espécie arbórea (Figura 1) originária do sudeste asiático. Na silvicultura brasileira, ela está conectada à história do Projeto Jari, na região do Baixo Amazonas (Pará), onde foi plantada para suprir uma indústria de celulose no final da década de 1960. Contudo, a espécie não se adaptou à região (ÉPOCA NEGÓCIOS, 2009) e o seu plantio foi interrompido.



Figura 1 - Árvore de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.

Fonte: Laboratório de Manejo Florestal - Unicentro (<https://sites.unicentro.br/wp/manejoflorestal/11752-2/>).

No entanto, um estudo sobre a seleção de espécies promissoras para implantação em Iranduba (Amazonas), para fornecer lenha às olarias, apontou a madeira de melina entre as três mais promissoras (AZEVEDO; LIMA; NEVES, 1998). Outro estudo indica a melina como uma das três espécies com maior potencial produtivo (12 a 19 m³/ha/ano) em nível mundial para a implantação nas regiões tropical e subtropical, incluindo o Brasil (BROWN, 2000). Em estudo mais recente, a

melina teve crescimento e produtividade satisfatórios no sudoeste do Paraná. Porém, mesmo com o potencial indicado, até o momento, não há informações sobre plantios em larga escala com a espécie no Brasil (SOUZA, 2018).

Dvorak (2004) reportou que não havia dados precisos sobre a área de florestas plantadas de melina no mundo, mas a estimativa era de 700 mil hectares, distribuídos entre Índia (53 %), África (36 %) e América Latina (11 %). A projeção era de 800 mil hectares em 2020, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais.

Espitia, Murillo e Castillo (2016) reportaram que o Departamento de Córdoba, na Colômbia, planejava plantar 200 mil hectares de melina até 2025, dada sua alta produtividade em ciclos curtos. Em Gana, as plantações de melina totalizam cerca de 5 mil hectares e o governo local a elencou entre as espécies potenciais para florestas plantadas no planejamento 2016-2040.

Segundo Florido (2002), a madeira de melina pode ser utilizada para carpintaria geral, elementos na construção civil, componentes de mobiliário e é ideal para instrumentos musicais e para o convés de barcos. Espera-se que a modificação térmica possa trazer benefícios à madeira de melina para alguns desses usos, principalmente aqueles que não demandam elevada resistência mecânica.

3.2. Modificação térmica

A modificação térmica é um processo em que o calor é aplicado à madeira em temperaturas que provocam o início da degradação de seus componentes químicos fundamentais, sobretudo as hemiceluloses, que são os mais sensíveis à ação do calor (DUBEY; PANG; WALKER, 2012). O processo vem sendo desenvolvido em escala industrial na Europa nos últimos 20 anos, por exemplo, na Finlândia, França, Alemanha e Holanda (DUBEY, 2010). Como principais vantagens deste processo, mencionam-se a melhoria das características estéticas e da resistência biológica da madeira, permitindo maior vida útil (DILIK; HIZIROGLU, 2012).

Entretanto, o processo também tem efeitos negativos. Minkah et al. (2021) reportaram redução da resistência à flexão estática (módulo de ruptura e módulo de elasticidade) e aumento da friabilidade da madeira de melina modificada termicamente, principalmente nas maiores temperaturas testadas (200 °C e 220 °C)..

A modificação térmica é realizada entre as temperaturas de 140 °C e 230 °C. Temperaturas inferiores a 140 °C resultam apenas em poucas alterações nas propriedades do material, e temperaturas mais elevadas resultam em degradação não desejada, impossibilitando o uso da madeira na forma maciça. (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

O processo ThermoWood®, utilizado neste trabalho, foi desenvolvido pela empresa VTT (Finnish State Research Center) em parceria com a indústria madeireira finlandesa. A modificação térmica nesse processo é aplicada à madeira serrada e é realizado em equipamentos similares a câmaras de secagem, onde a madeira é protegida por meio de vapor, que também influencia em mudanças permanentes na madeira (THERMOWOOD HANDBOOK, 2021). Este processo pode ser dividido em três fases principais (FINNFOREST IBÉRICA, 2010):

- Fase 1 - Aumento da temperatura e secagem a alta temperatura: A temperatura de secagem é elevada rapidamente, próxima aos 100 °C e, após esse ponto, a temperatura é aumentada regularmente até os 130 °C (secagem de alta temperatura), quando o teor de umidade chega a quase zero;
- Fase 2 – Modificação térmica: Simultaneamente à secagem de alta temperatura, a temperatura da câmara é elevada até a temperatura final pretendida. Quando esta temperatura é alcançada, ela é mantida constante durante duas ou três horas;
- Fase 3 - Arrefecimento e acondicionamento da umidade: Consiste na fase final do processo, utilizado para baixar a temperatura da madeira com um sistema de água atomizada e para a madeira retomar a umidade em níveis aceitáveis.

3.3. Composição química

A composição química é um fator importante que influencia nas propriedades da madeira e na indicação de uso. A madeira é composta por celulose, hemiceluloses, lignina, pectina e amido como elementos principais. Além desses, há uma quantidade variada de extrativos e uma parcela mínima de matéria inorgânica, como cálcio, magnésio e potássio (HILL, 2006). Minkah et. al (2021) reportaram que a composição

química da madeira de melina possui 55,9% de alfa-celulose, 19,2% de hemiceluloses, 34,9% de lignina e 7,9% de extrativos.

A influência da modificação térmica na composição química da madeira é devida a diversos fatores, tais como a taxa de aquecimento, pressão, temperatura, atmosfera, e resistência térmica da espécie (ARAÚJO et al., 2012). Esse processo de alteração da composição é iniciado com a degradação das hemiceluloses (constituintes menos resistentes termicamente), resultando no aumento aparente dos teores de lignina e extrativos (MOURA; BRITO; SILVA JÚNIOR, 2012).

A desacetilação, que causa forte degradação de alguns componentes da madeira, é responsável pelo início da alteração química dos carboidratos. Ao mesmo tempo em que ocorre essa degradação, ocorre também a diminuição do grau de polimerização resultante da liberação dos ácidos carboxílicos produzidos (WENTZEL et al., 2019a). Enquanto alguns componentes são degradados de forma mais simples e rápida, como por exemplo, os extrativos, outros suportam temperaturas mais altas, como a lignina (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Minkah et al. (2021) avaliaram o efeito do processo de modificação térmica ThermoWood® na composição química da madeira de melina. Concluiu-se que houve diminuição no percentual dos teores de hemiceluloses e aumento do percentual dos teores de extrativos e lignina, que é um padrão recorrente na literatura.

3.4. Resistência à biodeterioração

3.4.1. Fungos apodrecedores

Os fungos xilófagos são os organismos responsáveis pelos maiores danos em estruturas de madeira, principalmente aquelas que estão em contato ou expostas à ambientes úmidos. Os fungos apodrecedores são comumente divididos em podridão branca e podridão parda, de acordo com o aspecto físico do ataque à madeira (PAES; MORAIS; LIMA, 2005).

Os fungos de podridão parda degradam preferencialmente a celulose e as hemiceluloses. Com isso, a lignina (que possui coloração escura) fica intacta, resultando na coloração parda do material atacado (SCHMIDT, 2006).

Já os efeitos causados pelos fungos de podridão branca podem ser percebidos pelas suas características macroscópicas que, dependendo da espécie do fungo, espécie da madeira e condições ecológicas, pode causar manchas, bolsas ou tiras esbranquiçadas. A maioria desses fungos degrada a lignina, hemiceluloses e celulose; e alguns removem a lignina seletivamente deixando a celulose e as hemiceluloses, ao passo que outros degradam ambas ao mesmo tempo e ritmo (CARLILE; WATKINSON, 1996; SCHMIDT, 2006).

O aumento da durabilidade da madeira modificada termicamente ao ataque de fungos se dá pelos seguintes razões: modificação de extrativos, que podem atuar como fungicidas; degradação das hemiceluloses, constituídas por carboidratos que são os elementos mais suscetíveis ao ataque dos fungos por serem detectadas como fonte de alimento; e alteração dos percentuais da composição química da madeira, podendo haver um aumento de propriedades hidrofóbicas, que reduz a absorção de água e a umidade da madeira, desfavorecendo o desenvolvimento de algumas espécies de fungos xilófagos (BELLON et al., 2014; SILVA, 2012). De acordo com o Plant Resources of Tropical Africa (2022), a durabilidade natural da madeira de melina contra fungos xilófagos pode ser considerada de “baixa” a “moderada”.

Em estudo realizado com as madeiras modificadas termicamente de *Gmelina arborea* e *Tectona grandis*, oriundas de florestas plantadas, em ambas espécies, a resistência biológica ao ataque de fungos foi maior para os tratamentos realizados com temperaturas elevadas (200 °C). A madeira de melina modificada termicamente foi classificada como “altamente resistente” e “resistente”, respectivamente ao ataque dos fungos *Trametes versicolor* (podridão branca) e *Lenzites acuta* (podridão parda) (MÉNDEZ-MEJÍAS; MOYA, 2018).

3.4.2. Cupins xilófagos

Os cupins são insetos pertencentes à ordem Blattodea, subordem Isoptera, e ocorrem em regiões tropicais e subtropicais e são representados por mais de 2.000 espécies catalogadas (BRITO, 2015). São conhecidos como insetos que vivem em grupo, com um sistema hierárquico bem desenvolvido e com indivíduos diferentes morfofisiologicamente entre si (CARNEIRO; SILVA, 1999).

Os cupins da família *Termitidae* têm preferência por locais úmidos e em contato com o solo, e grande parte das espécies dessa família constroem ninhos que hospedam uma riqueza considerável de fauna (outros cupins, artrópodes e alguns vertebrados). Na busca pelo alimento, esses cupins constroem uma espécie de túnel no substrato para manter a umidade elevada, já que são muito suscetíveis à desidratação quando expostos ao ar. Eles decompõem a celulose em amido com a ajuda de protozoários presentes em seu aparelho digestivo (RENTOKIL, 2022).

Já a família *Kalotermitidae* é composta por cupins primitivos, que vivem em madeira seca, sem contato com o solo. Eles não necessitam de umidade, não constroem galerias e, exceto os alados que saem no período de revoada e reprodução, permanecem nos ninhos (BRITO, 2015).

A deterioração da madeira acontece porque os organismos xilófagos reconhecem os carboidratos das paredes celulares da madeira como fonte de alimentação. O grau de suscetibilidade à deterioração depende, dentre outros fatores, das condições climáticas, da espécie madeireira e do local de uso da madeira (BELLON et al., 2014; PAES; MELO; LIMA, 2007).

4. METODOLOGIA

4.1. Material e modificação térmica

Este estudo foi realizado em parceria com a Universidade de Ciência e Tecnologia Kwame Nkrumah (Gana) e a Universidade Georg-August (Alemanha). Informações detalhadas do material e da modificação térmica podem ser verificadas no trabalho de Minkah et al. (2021), que forneceram a madeira que foi analisada.

Estudou-se a madeira do cerne juvenil de melina, oriunda de um plantio experimental de 40 anos localizado em Abofour, Gana. Além do Controle (madeira não tratada), três tratamentos foram analisados, conforme a temperatura final de modificação térmica:

- i) 180 °C, temperatura final similar ao padrão Thermo-S, ThermoWood® (INTERNATIONAL THERMOWOOD ASSOCIATION, 2021);
- ii) 200 °C, temperatura intermediária entre os padrões Thermo-S e Thermo-D;
- iii) 220 °C, temperatura similar ao padrão Thermo-D, ThermoWood® (INTERNATIONAL THERMOWOOD ASSOCIATION, 2021).

A modificação térmica foi realizada em um reator-piloto de 65 L, utilizando-se sarrafos tangenciais de 20 x 50 x 650 mm, com umidade inicial média de 15%. Antes da modificação térmica, os sarrafos foram pesados, amostrando-se aqueles sem defeitos e entre 300 e 400 g, com o objetivo de diminuir a variabilidade do lote e minimizar o efeito da densidade nos resultados.

Adotou-se um programa que simulou o processo industrial ThermoWood® (Figura 2): i) aquecimento a 12 °C.h⁻¹ até 100 °C; ii) aquecimento a 2 C.h⁻¹ até 130 °C; iii) aquecimento a 12 °C.h⁻¹ até a temperatura final de processo; iv) manutenção da temperatura final por 180 minutos; v) resfriamento a -20 °C.h⁻¹ até 65 °C, quando o processo é finalizado e o reator é imediatamente descarregado.

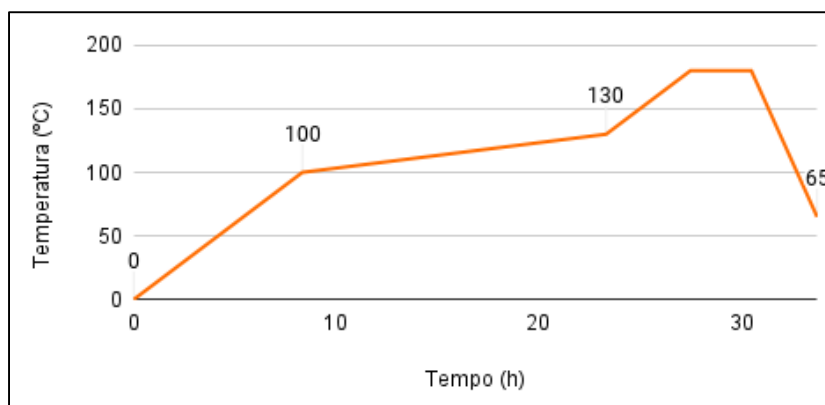


Figura 2 – Representação do programa do processo de modificação térmica

Fonte: A autora (2022).

A duração média dos processos foi de 38h30min, 41h45min e 45h, respectivamente para os tratamentos a 180 °C, 200 °C e 220 °C. Da mesma forma, a perda de massa média da madeira foi de respectivamente 5,44%, 10,08% e 15,13%. Encerrada esta etapa, foram amostrados dez sarrafos por tratamento, que foram utilizados nas análises químicas e nos ensaios de biodeterioração.

4.2. Análises químicas

Cada sarrafo foi destopado, produzindo-se uma amostra de 20 mm de comprimento, resultando em um grupo de dez amostras por tratamento. Esse material foi moído em um moinho de martelos, seguido por um moinho de facas e peneirado utilizando-se peneiras de 40 e 60 mesh, utilizando-se o material retido na última peneira (Figura 3).

O material foi climatizado em câmara a 20 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa (UR) por cerca de 60 dias. Em seguida, foram realizadas as análises químicas para a determinação do percentual dos teores de extrativos (totais, acetona e diclorometano), lignina (solúvel e insolúvel) e pentosanas (Quadro 1).



Figura 3 – Amostras de serragem classificada para as análises químicas. Da esquerda para a direita: Controle, 180 °C, 200 °C e 220 °C

Fonte: A autora (2021).

Quadro 1 – Resumo das análises químicas

Análise	Observação	Referência	Número de réplicas
Extrativos totais	Utilização de tolueno em vez de benzeno	T 264 cm-97 (TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY, 1997b)	4
Extrativos	Extração com acetona e diclorometano	T 204 cm-97 (TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY, 1997a)	3
Lignina	Lignina Klason insolúvel	Gomide e Demuner (1986)	3
	Lignina solúvel em ácido	Goldschmid (1971)	3
Pentosanas	-	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel C8/70 (1968)	3

Fonte: A autora (2022).

4.3. Ensaios de biodeterioração

4.3.1. Ensaio de resistência à biodeterioração por fungos xilófagos

A resistência à biodeterioração por fungos foi avaliada com base na norma E30-16 (AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION, 2016b), em que foram utilizados dois fungos apodrecedores, o *Coniophora puteana* (podridão parda, código Mad 515) e o *Trametes versicolor* (podridão branca, código Mad 697).

Foram utilizados dez corpos de prova (um por sarrafo) por tratamento e fungo, nas dimensões de 25 x 25 x 9 mm (radial, tangencial e longitudinal). Dez corpos de prova adicionais de *Pinus* sp. foram utilizados como referência para o ensaio com *Coniophora puteana*, para verificar o vigor da cepa dos fungo. Todos os corpos de prova foram previamente secos em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,001 g de precisão) para a determinação da massa anidra inicial.

Coletou-se solo do horizonte B, sem matéria orgânica, que foi peneirado e seco ao ar e determinou-se a umidade e a capacidade de retenção do solo. Frascos de vidro transparente de 600 mL, com tampa metálica rosqueável, foram preenchidos com 73,5 mL de água destilada (atingindo 130% da capacidade de retenção de água) e $300 \text{ g} \pm 0,005 \text{ g}$ de solo. Foram adicionadas duas placas alimentadoras de madeira de *Pinus* sp. por frasco, de 3 x 29 x 35 mm (longitudinal). Em seguida, os frascos foram esterilizados em autoclave vertical a 121 ± 2 °C e 103 kPa por 30 minutos.

Depois do resfriamento, as placas alimentadoras foram inoculadas com cerca de 1cm² de micélio dos fungos preparados em meio de cultura, com maior crescimento ativo, utilizando-se 1000 mL de água destilada, 20 g de malte e 15 g de ágar. Os frascos de vidro com os inóculos foram acondicionados em sala climatizada (28 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa), no escuro, por 21 dias, período suficiente para que os fungos pudessem colonizar completamente as placas alimentadoras e o solo.

Decorrido esse período, os corpos de prova foram esterilizados da mesma forma que os frascos, adicionando-se dois corpos de prova (de tratamentos distintos) por frasco (um por placa alimentadora). Em seguida, os frascos retornaram para a sala climatizada por 12 semanas.

Finalizado o ensaio, os corpos de prova foram removidos dos frascos e cuidadosamente lavados em água corrente com o auxílio de uma escova macia, com

o objetivo de remover o micélio do fungo e porções de solo aderidas aos mesmos. Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,001 g de precisão) para a determinação da massa anidra final.

A resistência de cada corpo de prova à deterioração pelos fungos apodrecedores foi avaliada em termos de perda de massa – PM, em %. A resistência da madeira foi categorizada qualitativamente conforme a Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação da perda de massa dos corpos de prova submetidos ao ataque de fungos xilófagos

Perda de massa (%)	Massa residual (%)	Classe de resistência
0 - 10	90 - 100	Altamente resistente
11 - 24	76 - 89	Resistente
25 - 44	56 - 75	Moderadamente resistente
> 45	< 55	Não resistente

Fonte: American Wood Protection Association (2016b).

4.3.2. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins arborícolas

O ensaio de alimentação forçada com cupins arborícolas (*Nasutitermes corniger* Motsch.) foi realizado conforme a norma E1-16 (AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION, 2016a), em que foram testados dez corpos de prova por tratamento (um por sarrafo), nas dimensões de 6,4 x 25 x 25 mm (radial x tangencial x longitudinal). Adicionalmente, foram testados seis corpos de prova de madeira de *Pinus* sp., utilizados como referência. Todos os corpos de prova foram previamente secos em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,001 g de precisão) para a determinação da massa anidra inicial.

Frascos de vidro transparente de 600 mL, com tampa metálica rosqueável, foram preenchidos com $200 \text{ g} \pm 0,005 \text{ g}$ de areia lavada, e esterilizados em estufa a 130 ± 2 °C por 48 horas. Em seguida, foram adicionados 39 mL de água destilada por frasco, conforme a capacidade de retenção da areia.

Coletou-se uma colônia de cupins arborícolas fixada a um arbusto de café (Coffea sp.), na cidade de Jerônimo Monteiro/ES. A colônia foi instalada no Laboratório de Biodeterioração e Proteção da Madeira, conforme a Figura 4, para facilitar a coleta.

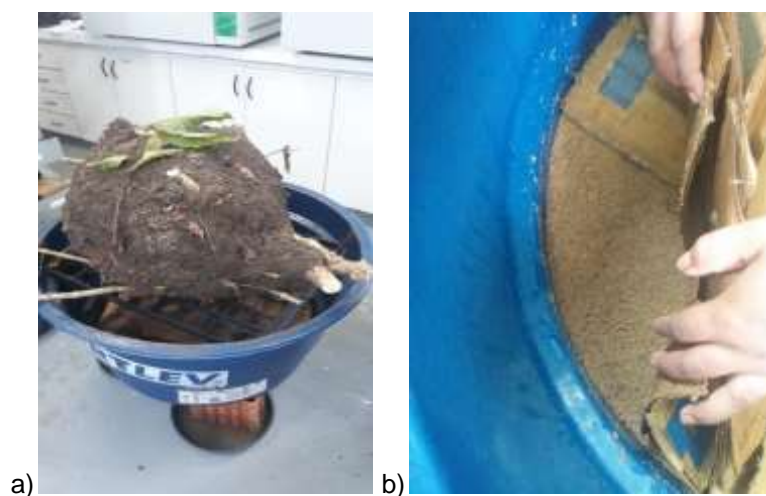


Figura 4 - Montagem do reservatório para a coleta de cupins arborícolas: a) Reservatório e b) Fundo do reservatório com areia e papelão umedecido

Fonte: A autora (2021).

Decorridos três dias, os cupins foram coletadas do reservatório para a montagem do experimento. Foi adicionado um corpo de prova por frasco, parcialmente enterrado na areia e apoiado em uma das paredes do frasco (Figura 5). Adicionou-se $1,32 \pm 0,02$ g de cupins arborícolas por frasco (média de 400 cupins) com proporção de 12% soldados e 88% operários.

Os frascos foram armazenados em sala climatizada (28 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) durante 28 dias. Decorrido o prazo, o ensaio foi desativado e os corpos de prova foram retirados dos frascos e limpos com o auxílio de um pincel, determinando-se a massa anidra final, conforme procedimento inicial. Cada corpo de prova foi avaliado em termos de desgaste (notas) e também foi calculada a mortalidade dos cupins de cada frasco (Quadro 3).

Para a avaliação do tempo (dias) para a morte dos cupins foi realizada de acordo com Paes (2002). A perda de massa (%) dos corpos de prova foi calculada e corrigida pela perda de massa operacional, conforme a norma D 1413 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007).



Figura 5 - Interior do frasco do ensaio com cupins arborícolas

Fonte: A autora (2021).

Quadro 3- Classificação do desgaste e mortalidade de cupins arborícolas

Notas de desgaste		Mortalidade	
Nota	Classificação	(%)	Classificação
10	Sadio, com escarificações superficiais	0 - 33	Baixa
9	Ataque superficial	34 - 66	Moderada
7	Ataque moderado, havendo penetrações	67 - 99	Alta
4	Ataque intenso	100	Total
0	Falha, havendo ruptura da amostra	-	-

Fonte: Adaptado de American Wood Protection Association (2016a).

4.3.3. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins de madeira seca

O ensaio foi realizado conforme o método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1980). Foram ensaiados dez corpos de prova por tratamento (um por sarrafo), nas dimensões de 70 x 23 x 6 mm (longitudinal x radial x tangencial), que foram submetidos à ação de cupins de madeira seca *Cryptotermes brevis* Walker. O teste também foi realizado em dez corpos de prova de madeira de *Pinus* sp., como referência para verificar o vigor dos cupins. Todos os corpos de prova foram previamente secos em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante, e pesados em balança analítica (0,001 g de precisão) para a determinação da massa anidra inicial.

Para cada tratamento, os corpos de prova foram agrupados em pares, formando cinco conjuntos por tratamento e referência, fixando-se sobre cada par um recipiente de PVC (policloreto de vinila) de 35 mm de diâmetro x 40 mm de altura, utilizando-se parafina. Dentro de cada recipiente foram introduzidos 40 cupins, sendo 39 operários e um soldado. Depois de montados, cada par foi disposto em uma placa de Petri e coberto por um pedaço de tecido de filó para evitar a entrada de outros insetos (predação) (Figura 6). Os conjuntos foram armazenados em uma sala climatizada (28 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) durante 45 dias.



Figura 6 - Interior do recipiente do ensaio com cupins de madeira seca

Fonte: Medeiros (2021).

Ao término do experimento, os cupins remanescentes foram retirados e contados para avaliação da porcentagem de mortalidade; também foi avaliado o desgaste causado e o número de orifícios produzidos nos corpos de prova (Quadro

4). A medição da massa anidra final dos corpos de prova foi realizada de acordo com o procedimento inicial. A perda de massa foi calculada e corrigida pela perda de massa operacional, conforme a norma D 1413 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007).

Quadro 4- Avaliação do desgaste provocado por cupins de madeira seca

Nota	Desgaste provocado pelos cupins
0	Nenhum
1	Superficial
2	Moderado
3	Acentuado
4	Profundo

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1980).

4.4. Análises estatísticas

O nível de significância adotado foi de 5% para todos os testes e o experimento foi realizado em um delineamento inteiramente casualizado. A homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett. Confirmada a hipótese nula ($P \geq 0,05$), o efeito dos tratamentos foi verificado pela Análise de Variância (ANOVA), utilizando-se o teste de Tukey para diferenciação das médias. Rejeitada a hipótese nula ($P < 0,05$), o efeito dos tratamentos foi verificado pelo teste H de Kruskal-Wallis, utilizando-se o teste de Bonferroni para a diferenciação das medianas dos escores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análises químicas

Conforme os resultados da Tabela 1, as variâncias foram homogêneas ($P > 0,05$) para os resultados dos teores de lignina solúvel e pentosanas, possibilitando a ANOVA. O mesmo não ocorreu para o teor de lignina insolúvel, utilizando-se o teste H, que foi significativo ($P < 0,05$).

Tabela 1 – Médias dos teores de lignina e pentosanas

Tratamento	Lignina solúvel (%)	Lignina Insolúvel		Pentosanas (%)
		Média (%)	Escore médio	
Controle	2,22 a (6,35%)	22,71	22,6 B	10,86 a (8,39%)
180 °C	2,03 a (0,48%)	22,07	25,6 B	8,32 b (3,01%)
200 °C	1,69 b (5,61%)	30,06	29,9 AB	3,63 c (11,78%)
220 °C	1,59 b (4,93%)	39,47	33,5 A	2,09 d (11,97%)
Teste Bartlett	0,86 ns	913,53 **		151,47 ns
Teste H	-	4,92 *		-
Fc	30,23 **	-		174,81**

Médias seguidas da mesma letra minúscula ou maiúscula nas colunas não diferem significativamente ($p > 0,05$), respectivamente de acordo com o teste de Tukey e o teste de Bonferroni. n.s.: não significativo ($p > 0,05$). *: significativo ($p < 0,05$). **: significativo ($p < 0,01$). Os números entre parênteses são o coeficiente de variação (%).

Para o teor de lignina solúvel, as maiores médias foram do Controle e tratamento a 180 °C, e as menores médias foram dos tratamentos 200 °C e 220 °C. O efeito foi o contrário para o teor de lignina insolúvel, em que a maior média foi do tratamento a 220 °C, as menores médias foram do Controle e do tratamento 180 °C e a média do tratamento a 200 °C foi intermediária e não diferenciou-se estatisticamente

dos demais tratamentos. Na Figura 7 podem ser verificadas as linhas de tendência dos resultados do teor de lignina.

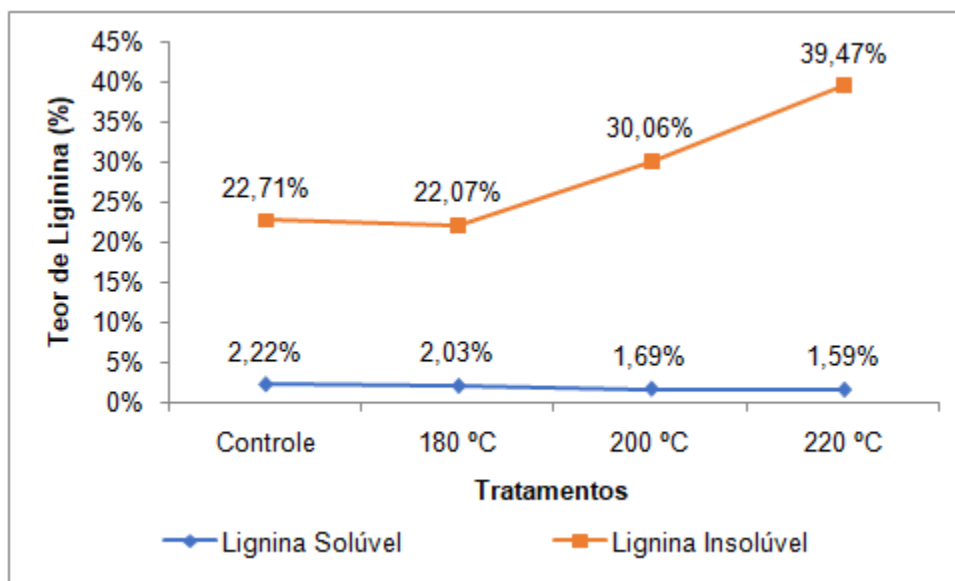


Figura 7 – Resultados dos teores de lignina solúvel e lignina insolúvel

Fonte: A autora (2022).

Notou-se uma tendência na Figura 6 que quanto maior a temperatura de modificação térmica, menor é o teor de lignina solúvel, ao passo que o inverso ocorre para o teor de lignina insolúvel. De acordo com Klock (2013a), a lignina solúvel é composta por ligações fenil-propano, tendo vários grupos metoxílicos e hidroxílicos ligados aos anéis benzênicos. Esses grupos hidroxílicos geralmente são de natureza fenólica ou alcoólica, que são mais suscetíveis às altas temperaturas, causando degradação com o aumento da temperatura de tratamento.

Minkah et al. (2021) avaliaram o teor de lignina total e reportaram o mesmo comportamento do teor de lignina insolúvel, obtendo a maior média no tratamento 220 °C (44,16%) e a menor média no Controle (34,86%). Wentzel et al. (2019b) explicam que esse aumento aparente do teor de lignina insolúvel ocorre pelas alterações no balanço de massa nas paredes celulares da madeira, relacionadas à degradação das hemiceluloses. E também por causa das reações de esterificação, que influenciam nas transformações químicas da lignina.

Foi observada a formação de uma grande quantidade de espuma na vidraria durante a análise do teor de lignina. Esse fenômeno pode ser explicado pela presença ou formação de componentes acidentais chamados saponinas (derivados dos

triterpenos tetracíclicos e esteroides). A capacidade das saponinas de formação de espuma é decorrente dos açúcares solúveis ligados a esteróides lipofílicos, que são extraídos com solventes apolares (KLOCK, 2014).

O teor de pentosanas foi reduzido gradativamente com o aumento da temperatura de modificação térmica, em que todos os tratamentos diferiram entre si (Tabela 1). Esse padrão pode ser visto claramente na Figura 8.

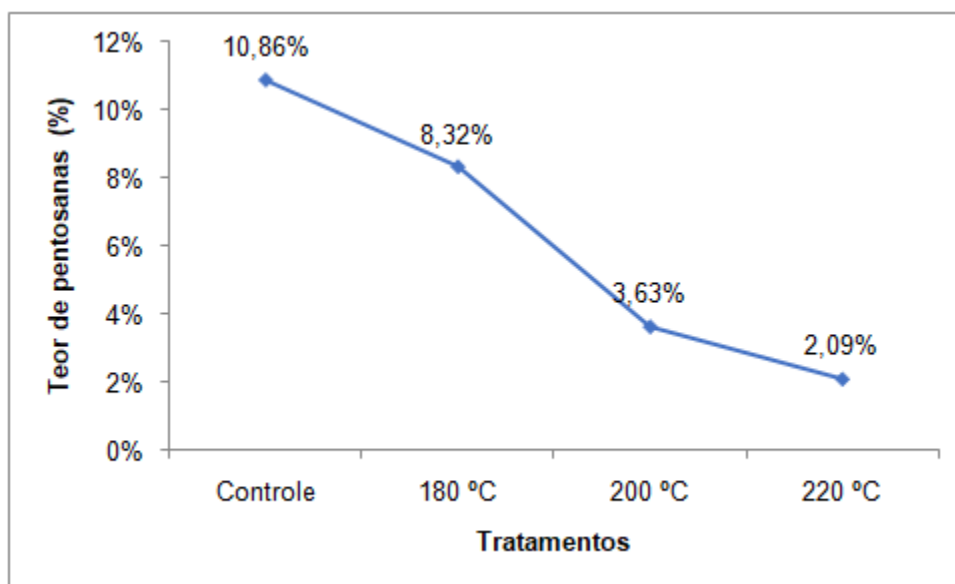


Figura 8 – Resultado do teor de pentosanas

Fonte: A autora (2022).

Essa tendência ocorreu por conta da alta susceptibilidade das hemiceluloses às altas temperaturas, ou seja, quanto maior a temperatura do tratamento maior a sua degradação (ESTEVES; GRAÇA; PEREIRA, 2008; SILVA, 2012; WENTZEL et al., 2019). Como as hemiceluloses têm função estrutural e representam de 20 a 30% do peso da madeira (KLOCK, 2013b), conclui-se que a perda de massa causada pelo processo (seção 4.1) está diretamente relacionada com a queda do teor de pentosanas, havendo uma relação direta entre a temperatura de processo e a perda de massa da madeira.

Esteves, Graça e Pereira (2008) observaram o mesmo comportamento para o teor de hemiceluloses da madeira de *Eucalyptus globulus*. Ainda explicam que a degradação térmica da madeira começa pelas hemiceluloses, principalmente dos componentes xilose e arabinose, seguida da despolimerização de polissacarídeos catalisados pelo ácido acético liberado. Por isso as hemiceluloses são mais

degradadas termicamente em comparação aos outros componentes químicos da madeira.

Conforme os resultados da Tabela 2, as variâncias dos dados dos teores de acetona e diclorometano foram homogêneas ($P > 0,05$), possibilitando a aplicação da ANOVA. O mesmo não ocorreu para o teor de extrativos totais, utilizando-se o teste H, que foi significativo ($P < 0,01$).

Tabela 2– Médias dos teores de extrativos de acordo com os diferentes solventes.

Tratamento	Totais (%)		Acetona (%)	Diclorometano (%)
	Média (%)	Escore médio		
Controle	12,12	12,1 C	5,88 b (2,26%)	3,93 a (2,42%)
180 °C	12,80	13,1 B	4,70 c (2,05%)	3,78 a (7,00%)
200 °C	14,12	14,2 A	6,49 a (4,04%)	3,98 a (2,31%)
220 °C	13,08	13,1 B	6,19 ab (1,58%)	3,71 a (1,73%)
Teste Bartlett	6,68*		0,482 ns	0,243 ns
Teste H	34,81**		-	-
Fc	-		69,817 **	2,15 ns

Médias seguidas da mesma letra minúscula ou maiúscula nas colunas não diferem significativamente ($p > 0,05$), respectivamente de acordo com o teste de Tukey e o teste de Bonferroni. n.s.: não significativo ($p > 0,05$). *: significativo ($p < 0,05$). **: significativo ($p < 0,01$). Os números entre parênteses são o coeficiente de variação (%).

A maior média do teor de extrativos totais foi do tratamento a 200 °C, superior a do Controle. Para a extração em acetona, as maiores médias foram dos tratamentos a 200 °C e 220 °C, superiores à média do Controle. A menor média foi do tratamento 180 °C. Esses resultados também podem ser verificados na Figura 9.

Minkah et al. (2021) avaliaram o teor de extrativos em água quente e verificaram o mesmo padrão, em que a maior média foi do tratamento a 200 °C (9,11%). De fato, o comportamento (em termos de médias absolutas) do teor de extrativos em acetona foi similar ao reportado por Minkah et al. (2021), com redução do teor de extrativos em relação ao Controle a baixas temperaturas (decorrente de volatilização), aumento do teor de extrativos a 200 °C (decorrente dos produtos da degradação térmica), seguido por nova redução na temperatura máxima (220 °C).

Wentzel et al. (2019b) também observaram esse mesmo padrão, respectivamente para as madeiras modificadas termicamente de *Eucalyptus nitens*.

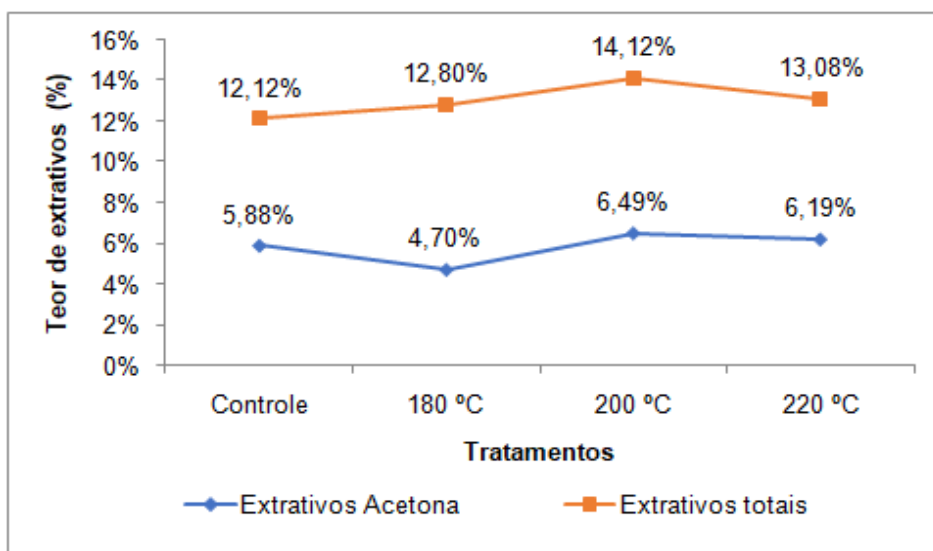


Figura 9 – Resultado de ensaios de extração em acetona e extrativos totais
Fonte: A autora (2022).

Como esperado, as médias do teor de extrativos totais foram maiores do que aquelas obtidas com os outros solventes. As médias das porcentagens aumentaram continuamente do Controle ao tratamento a 200 °C, por conta da modificação dos componentes causada pela degradação, principalmente das pentosanas (Figura 8). Entretanto, em temperaturas mais elevadas, a velocidade de volatilização se torna maior do que a velocidade da formação de novos compostos, por isso a queda do teor a 220 °C.

Por outro lado, não houve diferença significativa entre os tratamentos para a solubilidade em diclorometano. Destaca-se que esse foi o solvente com a menor capacidade extratora. Isso pode ser explicado pelo fato de o solvente realizar a extração de frações lipofílicas (p.ex., resinas e gorduras) e apolares, diferentemente da acetona (KLOCK, 2014a). Sugere-se que o processo de modificação térmica não tenha efeito na fração lipofílica da madeira de melina.

5.2. Ensaio de resistência à biodeterioração por fungos xilófagos

Conforme os resultados da Tabela 3, as variâncias não foram homogêneas ($P < 0,05$) no ensaio de resistência à biodeterioração por fungos apodrecedores, impossibilitando a ANOVA. Utilizou-se o teste H, que foi significativo ($P < 0,05$) para ambos os fungos.

Tabela 3 – Perda de massa causada por fungos xilófagos

Tratamento	<i>Trametes versicolor</i>		<i>Coniophora puteana</i>	
	Média (%)	Escore médio	Média (%)	Escore médio
Controle	29.37	35.2 A	7.81	34.0 A
180 °C	6.07	23.3 AB	2.20	26.8 AB
200 °C	2.89	14.5 BC	0.96	14.5 BC
220 °C	1.67	9.1 C	0.55	7.2 C
<i>Pinus sp.</i>	-	-	48.00	45.0 A
Teste Bartlett	26.37 **		140.67 **	
Teste H	28.66 **		42.83 **	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas colunas não diferem significativamente (teste de Bonferroni; $p > 0,05$). **: Significativo ($p < 0,01$).

Para ambos os fungos, o Controle obteve as maiores médias absolutas de perda de massa, não diferenciando significativamente do tratamento 180 °C. Apenas para o fungo de podridão parda (*Coniophora puteana*), a perda de massa do Controle também não diferiu significativamente da referência (*Pinus sp.*). Ao observar as médias do Controle e da referência, respectivamente para o *Trametes versicolor* e o *Coniophora puteana*, foi possível verificar vigor satisfatório das cepas dos fungos.

Conforme Soares (1998), os fungos de podridão parda têm preferência para deteriorar a madeira de coníferas. Curling, Winandy e Clausen (2000) citam que os fungos de podridão branca deterioram a madeira de folhosas com grande vigor. Isso explica a diferença da média absoluta da Referência (*Pinus sp.*) em comparação aos tratamentos com madeira de melina no ensaio com o fungo de podridão parda. A madeira de melina (Controle) foi classificada como “moderadamente resistente” e “altamente resistente” ao ataque dos fungos *Trametes versicolor* e *Coniophora puteana*, respectivamente.

Notou-se para ambos os fungos que quanto maior a temperatura de modificação térmica, menor a perda de massa, em que os melhores resultados foram dos tratamentos 200 °C e 220 °C (não diferiram significativamente entre si). Também foi observado que a média de perda de massa de todos os tratamentos foi maior para o ensaio realizado com o *Trametes versicolor* do que para o *Coniophora puteana*.

Sivrikaya et al. (2015) reportaram comportamento parecido para a madeira modificada termicamente de *Fraxinus* spp., em que, para o ensaio com o *Trametes versicolor*, o Controle (45,3%) teve a maior média de perda de massa e o tratamento a 210 °C teve a menor média (6,9%). Da mesma forma, para o ensaio com o *Coniophora puteana*, a maior média foi do tratamento Controle (12,0%) e a menor foi do tratamento a 210 °C (0,50%).

De acordo com Schmidt (2006), os fungos de podridão parda metabolizam os carboidratos, deixando a lignina quase intacta. Como a modificação térmica reduziu significativamente o teor de pentosanas (Figura 7), os tratamentos com temperaturas mais elevadas tiveram maior resistência ao *Coniophora puteana*, pois parte desses carboidratos já havia sido degradada pelo processo. Por outro lado, alguns fungos de podridão branca conseguem degradar todos os constituintes primários da parede celular (SCHMIDT, 2006), implicando em menor efeito do processo com relação a esses tipos de fungos.

Ainda assim, a modificação térmica foi muito eficaz na madeira de melina. Após as análises, foi possível classificar a eficácia dos tratamentos com base na média de perda de massa (AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION, 2016b). A madeira de melina modificada termicamente foi classificada como “altamente resistente” (perda de massa de 0 a 10%) ao ataque de ambos os fungos.

Analisando-se a classificação qualitativa, foi possível notar para o fungo de podridão branca que, mesmo que as médias absolutas do Controle e do tratamento 180 °C não tenham diferido estatisticamente, a classificação de ambos foi diferente, por causa da grande discrepância entre as médias de perda de massa. Isso pode ser explicado pelo coeficiente de variação dos dados destes tratamentos, que foram de 37% para o Controle e 32% para o tratamento 180°C, caracterizando dados de alta dispersão.

5.3. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins arborícolas

Conforme os resultados da Tabela 4, as variâncias não foram homogêneas ($P < 0,05$) no ensaio de resistência à biodeterioração por cupins arborícolas, impossibilitando a ANOVA. Utilizou-se o teste H, que foi significativo ($P < 0,05$). Não foi realizado teste de homogeneidade de variâncias para as notas de desgaste porque naturalmente são dados discretos.

Tabela 4 - Perda de massa e desgaste causados pelos cupins arborícolas

Tratamento	Perda de massa (%)		Notas de desgaste	
	Média (%)	Escore médio	Média (%)	Escore médio
Controle	3.98	33.8 AB	9.5	36.8 A
180 °C	2.60	21.4 BC	8.6	22.2 AB
200 °C	1,79	12.2 C	8.6	21.6 AB
220 °C	2.07	14.6 C	8.4	18.3 B
<i>Pinus</i> sp.	9.58	43.5 A	8.2	15.4 B
Teste Bartlett	11.89 **		-	
Teste H	30.94 **		16.27 **	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas colunas não diferem significativamente (teste de Bonferroni; $p > 0,05$). **: Significativo ($p < 0,01$).

Decorridos 14 dias do início do experimento, a mortalidade dos cupins chegou a 100% para todos os tratamentos, exceto para o *Pinus* sp., o qual atingiu essa marca aos 21 dias. Reforça-se que, conforme o método (AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION, 2016a), o ensaio deveria ter duração de 28 dias. Isso levantou a hipótese do baixo vigor da colônia.

Medeiros (2021) estudou clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e utilizou cupins do mesmo ninho. Foi reportada maior porcentagem de perda de massa (média de 22,9%) e menor mortalidade (média de 52,38%) ao final do ensaio. Assim, foi descartada a hipótese de baixo vigor da colônia de cupins. Destaca-se que a madeira de melina teve um elevado teor de extrativos totais (12,12%), sugerindo que contenha ou formou-se alguma substância tóxica para esses cupins, ocasionando a mortalidade total antes do fim do ensaio.

A menor média absoluta de perda de massa foi do tratamento 200 °C, não se diferenciando significativamente dos tratamentos 180 °C e 220 °C. Porém, para as

notas de desgaste, a maior média absoluta (menor desgaste) foi atribuída ao Controle, mas o mesmo não diferiu significativamente dos tratamentos 180 °C e 200 °C. Assim, após as análises visuais de desgaste, foi possível classificar o ataque dos corpos de prova apenas como “superficiais” e “sadios com escarificações superficiais”, por causa da mortalidade total dos cupins.

5.4. Ensaio de resistência à biodeterioração por cupins de madeira seca

Conforme os resultados da Tabela 5, as variâncias não foram homogêneas ($P < 0,05$) no ensaio de resistência à biodeterioração por cupins de madeira seca, impossibilitando a ANOVA. Utilizou-se o teste H, que foi significativo ($P < 0,05$). Não foi realizado teste de homogeneidade de variâncias para as notas de desgaste porque naturalmente são dados discretos. Já para mortalidade foi observada homogeneidade das variâncias entre os tratamentos ($P > 0,05$), possibilitando a aplicação da ANOVA.

Tabela 5 - Perda de massa, mortalidade e desgaste causado pelos cupins de madeira seca

Tratamento	Perda de massa (%)		Notas de desgaste		Mortalidade (%)
	Média (%)	Escore médio	Média (%)	Escore médio	Escore médio
Controle	0.51	27.4 AB	1.1	24.0 AB	60.5 ab (9.0 %)
180 °C	0.37	29.3 AB	1.1	23.2 AB	57.5 ab (16.9 %)
200 °C	0.20	21.8 AB	0.8	20.9 B	71.0 a (13.8 %)
220 °C	0.07	13.7 B	0.9	19.1 B	68.0 a (15.0 %)
<i>Pinus sp.</i>	1.80	35.4 A	2.5	40.5 A	43.0 b (53.4 %)
Teste de Bartlett	90.91 **		-		8.29 ns
Teste H	12.73 **		15.46 **		-
Fc	-		-		3.54 *

Médias seguidas da mesma letra minúscula ou maiúscula nas colunas não diferem significativamente ($p > 0,05$), respectivamente de acordo com o teste de Tukey e o teste de Bonferroni. n.s.: não significativo ($p > 0,05$). *: significativo ($p < 0,05$). **: significativo ($p < 0,01$). Os números entre parênteses são o coeficiente de variação.

Para a perda de massa, a maior média absoluta foi do *Pinus* sp. (Referência), e a menor foi do tratamento 220 °C. Nas notas de desgaste, a menor média absoluta (menor desgaste) foi do tratamento a 200 °C, em conformidade com a maior mortalidade absoluta. Destaca-se que, para todos os índices analisados no ensaio com cupins de madeira seca, não houve diferença significativa entre os tratamentos com a madeira de melina.

Para as médias absolutas de perda de massa, notam-se resultados decrescentes de acordo com o aumento da temperatura de modificação térmica. Entretanto, analisando as notas de desgaste e mortalidade, observou-se que o tratamento 200 °C obteve a menor média absoluta.

Em um estudo com clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* modificados termicamente, Medeiros (2021) reportou médias absolutas de mortalidade inferiores (55,74 %) em relação aos resultados deste estudo. Entretanto, a perda de massa foi superior, podendo chegar a 1,47%. Batista (2012) reportou médias maiores de mortalidade (79,44%) no ensaio com madeira de *Eucalyptus grandis* modificado termicamente. Porém, as médias de perda de massa foram superiores.

Tanto Batista (2012) quanto Medeiros (2021) obtiveram maiores médias absolutas para as notas de desgaste, classificadas entre “moderado” e “acentuado”. Ressalta-se que Silva et al. (2004) informaram que as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* foram muito suscetíveis ao ataque dos cupins de madeira seca, tanto quanto a madeira de *Pinus* sp. Logo, deduz-se que a madeira de melina possui maior resistência à biodeterioração ao ataque desses cupins que a dos eucaliptos analisados.

Calonego (2017) também reportou que a modificação térmica não teve efeito significativo da perda de massa da madeira modificada termicamente de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake exposta ao ataque de cupins de madeira seca. Porém, ao observar as médias absolutas, foi possível notar menor perda de massa para o tratamento a 220 °C em comparação à madeira não tratada.

Associando-se os resultados de ambos os ensaios com cupins, depreende-se que a madeira de melina tem boa durabilidade ao ataque desses agentes xilófagos. Sugere-se que sejam realizados outros estudos sobre os extrativos para a identificação da causa da durabilidade da madeira de melina.

Na Figura 10 é possível visualizar os corpos de prova que representam a média absoluta da nota de desgaste de cada tratamento. O desgaste dos corpos de prova provocado pelos cupins de madeira seca foi classificado de acordo com a Tabela 3, entre “nenhum desgaste” (nota 0) e “desgaste acentuado” (nota 3). Assim, nenhum corpo de prova dos tratamentos foi classificado com a pior nota de desgaste (nota 4).






Tratamentos	CONTROLE	180 °C	200 °C	220 °C	<i>Pinus</i> sp.
Corpos de prova representativos					
Média absoluta das notas de desgaste	1.1	1.1	0.8	0.9	2.5

Figura 10 – Representação das médias absolutas das notas de desgaste para cada tratamento

Fonte: A autora (2021).

6. CONCLUSÕES

- A modificação térmica alterou significativamente a composição química da madeira de melina, exceto para o teor de extrativos em diclorometano.
- O teor de pentosanas foi gradativamente reduzido com o aumento da temperatura de 180 °C a 220°C. A partir dos 200 °C houve redução do teor de lignina solúvel e aumento do teor de lignina insolúvel.
- O teor de extrativos totais aumentou em todas as temperaturas testadas, quando comparado ao Controle. Verificou-se volatilização de parte dos extrativos em acetona a 180 °C, seguida por aumento a 200 °C e nova redução do teor de extrativos a 220 °C. Essa redução à maior temperatura também foi verificada no teor de extrativos totais.
- O efeito da modificação térmica foi positivo no aumento da resistência da madeira de melina à biodeterioração por *Trametes versicolor* (fungo de podridão branca), *Coniophora puteana* (fungo de podridão parda) e *Nasutitermes corniger* (cupins arborícolas). Por outro lado, o efeito do processo foi nulo na resistência à biodeterioração por *Cryptotermes brevis* (cupins de madeira seca).
- Recomenda-se a modificação térmica da madeira de melina em sistema aberto a 200 °C, por representar a melhor combinação entre resultados satisfatórios e menor consumo energético.
- Indica-se para próximos estudos a avaliação do consumo energético em cada temperatura analisada, para se verificar a viabilidade do processo em relação aos resultados encontrados.

7. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 1413**: wood preservatives by laboratory soil-block cultures. Philadelphia, 2007.

AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION. **AWPA E1-16**: Laboratory methods for evaluating the termite resistance of wood-based materials: choice and no-choice tests. AWPA Book of Standards, Birmingham, p 379-384, 2016a.

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

ARAÚJO, S. O.; VITAL, B. R.; MENDOZA, Z. M. S. H.; VIEIRA, T. A.; CARNEIRO, A. C. O. Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e sp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 327-336, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas de ensaio**. São Paulo, 1968. Não paginado.

AZEVEDO, C.P. de; LIMA, R.M.B. de; NEVES, E.J.M. **Seleção e manejo de espécies florestais para fins energéticos na região de Iranduba – AM**. Manaus: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental. Pesquisa em andamento, N° 41, p. 1-6, 1998.

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

BELLON, K. R. R.; LOIOLA, P.L.; JUÍZO, C. G. F.; MARCHESAN, R.; SAKOWIEZ, E.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. The effect of the thermal modification temperature in the resistance to the parallel compression of fiber for *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* and *Tectona grandis* wood. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, West Jordan, v. 8, n. 18, p. 512-520, 2014.

BRITO, M. B. **Resistência ao ataque de cupins em painéis compensados confeccionados com paricá (*Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke)**. 2015.

69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

BROWN, C. The global outlook for future wood supply from forest plantations. Working Paper Number GFPOS/WP/03. Roma: **FAO**, 2000. Disponível em: <http://www.fao.org/3/X8423E/X8423E00.htm#TopOfPage>. Acesso em: 03 mar. 2021.

CALONEGO, F. W. **Caracterização tecnológica da madeira de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake modificada termicamente**. 2017. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.

CARLILE, M. J., WATKINSON, S. C. **The fungi academic press**, v. 3, n. 4, p.87, 251-252, 1996.

CARNEIRO, J. S.; SILVA, P. H. S. **Cupins: biologia e controle**. Teresina: Embrapa: Meio-Norte, 1999.

CHUDNOFF, M. 1984. *Tropical Timbers of the World*. Madison, Wisconsin: **USDA Forest Service**. Disponível em: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/TechSheets/Chudnoff/SEAsian_Oceanic/htmlDocs_SEAsian/Gmelina_arborea.html. Acesso em: 10 jun. 2022.

CURLING, S.; WINANDY, J. E.; CLAUSEN, C. A. An experimental method to simulate incipient decay of wood by basidiomycete fungi. In: The International Research Group on Wood Preservation; Section 2, Test methodology and assessment 31, 2000, Kona, USA. **Proceedings Kona: IRG**, 2000. 13p.

DILIK, T.; HIZIROGLU, S. Bonding strength of heat treated compressed Eastern redcedar wood. **Materials and Design**, Oklahoma, v. 42, p. 317-320, 2012. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.050.

DVORAK, W.S. World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. **New Forests**, [S.l.], v. 28, p. 111-126, 2004.

DUBEY, M. K. **Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil**. 2010. 211 f. (Doutorado) - Universidade de Canterbury, Canterbury.

DUBEY, M. K.; PANG, S.; WALKER, J. Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of *Pinus radiata* D. Don wood with oil heat-treatment. **Holzforschung**, Berlin, v. 66, n. 1, p. 49, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270218229_Changes_in_chemistry_color_dimensional_stability_and_fungal_resistance_of_Pinus_radiata_D_Don_wood_with_oil_heat-treatment. Acesso em: 18 maio 2022.

ÉPOCA NEGÓCIOS. Reportagem/sustentabilidade. O desafio de salvar o Jari. **Época Negócios**, Editora Globo, 2009. Disponível em <http://epocanegocios.globo.com/Revista/Common/0,,EMI22123-16642,00-O+DESAFIO+DE+SALVAR+O+JARI.html>. Acesso em: 02 jun. 2022.

ESPITIA, M.; MURILLO, O.; CASTILLO, C. Ganancia genética esperada em melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba (Colombia). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 40, n. 1, 2016.

ESTEVEES, B.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 62, p. 344-351, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/232167516_Extractive_composition_and_summative_chemical_analysis_of_thermally_treated_eucalypt_wood. Acesso em: 18 maio 2022.

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

FINNFOREST IBERICA. THERMOWOOD: Manual de revestimento exterior. Barcelona: **Finnforest Ibérica SL**, 2010. 16 p. Disponível em: <https://www.jular.pt/pdf/Revestimento-exterior-madeira-Thermowood.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2022.

FLORIDO, L. V., CORNEJO, A. T., PALAYPAYON, C. M.; BATALON, J. M. Yemane: *Gmelina arborea* (Roxb.). **Research Information Series on Ecosystems**, v. 14, n. 3, p.3, 2002. Disponível em: <https://erdb.dentr.gov.ph/2015/05/27/rise-volume-14-no-3-yemane-gmelina-arborea-roxb-issues-and-facts-on-yemane/>. Acesso em: 26 jul. 2022.

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

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.

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

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS/DIVISÃO DE MADEIRA. **IPT/DIMAD - D2: Ensaio acelerado de laboratório da resistência natural ou madeira preservada ao ataque de térmitas do gênero *Cryptotermes***. São Paulo: IPT/ DIMAD, 1980. 1p.

INTERNATIONAL THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® handbook**. Helsink: [s.n.], 2021.

KLOCK, U. **Lignina: disciplina Química da Madeira**. Universidade Federal do Paraná, 2013a. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/lignina20132.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2022.

_____. **Polioses (Hemiceluloses)**. Universidade Federal do Paraná, 2013b. Disponível em: <http://www.engenhariaflorestal.ufpr.br/disciplinas/at113/polioses.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2022.

_____. **Componentes acidentais da Madeira**. Universidade Federal do Paraná, 2014. Disponível em: <http://www.engenhariaflorestal.ufpr.br/disciplinas/at113/Extrativos.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2022.

LOWDEN, L. A.; HULL, T. R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. **Fire Science Reviews**, Heidelberg, v.2, n.4, p. 1-19, 2013.

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

MÉNDEZ-MEJÍAS, L. D.; MOYA, R. Effect of thermo-treatment on the physical and mechanical, color, fungal durability of wood of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from forest plantations. **Materials Science**, Cartago, v. 24, n. 1, p. 10, 2018.

MINKAH, M. A.; AFRIFAH, K. A.; D. C.; MILITZ, H. Chemical and mechanical characterization of thermallymodified *Gmelina arborea* wood. **Les/wood**, [S.l.], v. 70, n. 1, p. 31-44, mar. 2021. Disponível em: <https://www.leswood.si/index.php/leswood/article/view/108>. Acesso em: 24 jul. 2022.

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

MOURA, L. F. de; BRITO, J. O.; SILVA JÚNIOR, F. G. da. Effect of thermal treatment on the chemical characteristics of wood from *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden under different atmospheric conditions. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 449-455, 2012.

OSTMAN, B.; TSANTARIDIS, L. **Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications**. Final report for Vinnova-Tekes project InnoFireWood, Wood Technology. Stockholm: SP Swedish National Research Testing and Institute, 2006. 94p. (SP Rapport 2006:30).

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

PAES, J. B.; MORAIS, V. M.; LIMA, C. R. Resistência natural de nove madeiras do semi-árido brasileiro a fungos causadores da podridão-mole. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 29, n. 3, p. 365-371, 2005.

PAES, J. B.; MELO, R. R.; LIMA, C. R. Resistência natural de sete madeiras a fungos e cupins xilófagos em condições de laboratório. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 160-169, 2007. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74413205>. Acesso em: 26 jul. 2022.

RENTOKIL. Espécies de térmitas. **Rentokil**, 2022. Disponível em: <https://www.rentokil.com/pt/blog/especies-de->

SUN, Q. F.; LU, Y.; XIA, Y. Z.; YANG, D. J.; LI, J.; LIU, Y. X. Flame retardancy of wood treated by TiO₂/ZnO coating. **Surface Engineering**, London, v.28, n.8, p.555- 559, 2012.

TAPPI, TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **T204 cm**: Solvent extractives of wood and pulp. Norcross, 1997a.

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

THERMOWOOD HANDBOOK. Helsinki, Finland: **International Thermowood Association**, 2021. 56 p. Disponível em: https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/tiedostot/web_thermowood_handbook.pdf. Acesso em: 27 jul. 2022.

UNICENTRO - LABORATÓRIO DE MANEJO FLORESTAL. **Gmelina arborea Roxb. ex Sm. Guemelina**. Disponível em: <https://sites.unicentro.br/wp/manejoflorestal/11752-2/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

WENTZEL, M.; C. BRISCHKE; H. MILITZ. Dynamic and static mechanical properties of *Eucalyptus nitens* thermally modified in an open and closed reactor system. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, vol. 21, n. 2, p. 52-141, 2019a. Disponível em: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/3340>. Acesso em: 25 fev. 2022.

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 & Engineering**, v. 14, n. 3, p. 165-173, 2019b. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323882694_Relation_of_chemical_and_mechanical_properties_of_Eucalyptus_nitens_wood_thermally_modified_in_open_and_closed_systems. Acesso em: 23 maio 2022.