

**FRANCES ALVES ANDRADE**

**EXTRATO PIROLENHOSO COMO PRESERVANTE DE MADEIRA E  
RETARDANTE DE CHAMA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Marcos Oliveira de Paula

Coorientadores:

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro  
Vinícius Resende de Castro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T	Andrade, Frances Alves, 1996-
A553e	Extrato pirolenhoso como preservante da madeira e
2022	retardante de chama em situação de incêndio / Frances Alves
	Andrade. – Viçosa, MG, 2022.
	1 dissertação eletrônica (79 f.): il. (algumas color.).
	Inclui anexo.
	Inclui apêndice.
	Orientador: Marcos Oliveira de Paula.
	Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
	Departamento de Engenharia Florestal, 2022.
	Referências bibliográficas: f. 65-74.
	DOI: <a href="https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.365">https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.365</a>
	Modo de acesso: World Wide Web.
	1. Madeira - Proteção contra o fogo. 2. Edifícios - Propriedades térmicas. I. Paula, Marcos Oliveira de, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.
	GFDC adapt. CDD 634.943216

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

**FRANCES ALVES ANDRADE**

**EXTRATO PIROLENHOSO COMO PRESERVANTE DE MADEIRA E  
RETARDANTE DE CHAMA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 07 de julho de 2022.

Assentimento:

Frances Alves Andrade

Frances Alves Andrade  
Autor



Marcos Oliveira de Paula  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

A minha mãe, mulher preta sertaneja, com a qual entendi o real significado do trecho da obra de Euclides da Cunha: “O Sertanejo é, antes de tudo, um forte”.

Aos meus avós, os quais vibram a cada conquista que eu alcanço.

Aos meus irmãos Bárbara, Luís Felipe e Mariana. E, ao meu sobrinho, João Guilherme. Por tudo que vocês me representam.

A toda minha família por acreditar que a educação muda e transforma realidades, obrigado por todo suporte e apoio.

A Luiz Inácio Lula da Silva, o presidente que mais investiu no ensino superior gratuito e de qualidade. As Políticas Públicas em seu governo ajudaram a expansão das universidades públicas e toda comunidade científica, e permitiu que vários estudantes, especialmente do Sertão Nordestino, ao ingressar em uma universidade e se tornarem mestres e doutores.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal e, em especial, a Alexandre e Dilson, por tudo que foi proporcionado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte e a concessão da bolsa de estudos.

Aos Laboratórios de Propriedades da Madeira e Painéis e Energia da Madeira, por tudo que foi proporcionado.

Ao meu orientador, Professor Marcos de Paula, pela gentileza e generosidade de sempre. Por ter me enxergado como pesquisador, ter acreditado e sonhado junto na ideia, mesmo quando ainda era um projeto de pesquisa. Obrigado por tudo e me apoiar naquilo que acredito, foi e continua sendo importante.

A minha coorientadora, Professora Cássia Carneiro, pela generosidade e grandeza das suas ações. Obrigado por tudo, seu apoio foi e continua sendo essencial. E foi o que me trouxe até aqui.

Ao meu coorientador, Professor Vinícius de Castro, por sempre ter sido solícito em compartilhar seus conhecimentos e acolher as dúvidas que surgiam pelo caminho. Obrigado pelo apoio.

A minha banca, Professor Ananias Dias, por me inspirar e ser exemplo de profissional. A Professora Iara Demuner, por todo apoio e suporte, gratidão por tudo.

Ao Professor Benedito Vital e a Professora Ana Márcia Ladeira, obrigado pelas orientações durante os primeiros momentos dessa pesquisa, foi muito importante.

Aos funcionários e técnicos, muito obrigado por todo apoio, carinho e amizade ao longo dessa trajetória. A importância de vocês é imensurável para realização dessa pesquisa.  
Braúlio, Eder, Edna, Fernanda, Lawrence, Leila, Paulinho, Sálvio e Wellington.

Aos meus amigos do LAPEM, por criarem um ambiente acolhedor e de amizade. Em especial, Nídia Niela, durante os dois anos da pandemia, sendo minha companhia diária de persistência e dedicação. Aos primeiros amigos da pós, Gabriel, Iara, Nayara, Raiana e Thamirys, por dividirem, obrigado pelo apoio e amizade nesse tempo. Bruna e Letícia, obrigado por todo apoio e por acreditarem no meu potencial, principalmente na etapa final, sou muito grato por tudo. Amanda, Emilly, Marlúcio, Sherellyn e Welliton, obrigado pelos compartilhamentos e momentos de escuta, foi bastante importante. Aos estagiários, Bárbara, Felipe, Francisco e Juliana, pelos bons momentos e por todo carinho, vocês foram importantes nessa jornada. Em especial, a Raquel, por toda ajuda e apoio durante seu estágio comigo, tem muito seu dentro dessa pesquisa, obrigado por tudo e estarei sempre torcendo pelo seu sucesso.

Aos meus amigos, Antônio e Ray, por tornarem Viçosa mais acolhedora quando a saudade de casa apertava.

Aos meus amigos que mesmo longe sempre se fazem presente. E especialmente, para os sergipanos, prometo que é o último São João que passo distante.

A Viçosa, que me acolheu tão bem, apesar do frio.

*“O Sertanejo é, antes de tudo, um forte”.*  
(Euclides da Cunha)

## RESUMO

ANDRADE, Frances Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2022. **Extrato pirolenhoso como preservante de madeira e retardante de chama em situação de incêndio.** Orientador: Marcos Oliveira de Paula. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Vinícius Resende de Castro.

O objetivo geral foi investigar a eficiência do extrato pirolenhoso e de um aditivo ignífugo (diamônio) como tratamento curativo e retardante de chama, visando suas aplicabilidades em madeiras estruturais. O estudo foi realizado em três etapas, na primeira etapa foi realizada a caracterização química do extrato pirolenhoso (EP). Foi identificado em maior área por CG-EM, o composto fenólico siringol (15,54%) e os ácidos carboxílicos, ácido butanoico (10,28%) e ácido acético (7,52%). O tratamento com 20% de EP apresentou maior redução de extractivos e lignina em relação à amostra controle, assim como maior perda de massa na análise termogravimétrica (TG). Não houve efeito significativo na resistência mecânica à compressão paralela às fibras e no módulo de ruptura (MOR) das madeiras sem e com tratamento. Na segunda etapa, foi realizado os ensaios microbiológicos simulando dois ambientes. A amostra controle e a com 10% de EP apresentaram atividades de microrganismos, enquanto para os tratamentos com 20% e 30% de EP não apresentaram. O mesmo comportamento foi observado para o ensaio com cupins. Com 20% e 30% de EP apresentaram uma mortalidade de 57,5% e 62,0%, com dano moderado e superficial, respectivamente. Por meio da técnica de densitometria de raios X para obtenção de imagens, foi possível observar a formação das galerias. No ensaio com fungos, as menores perdas de massa, foram observadas para os tratamentos com 20% (1,62%) e 30% (1,83%) do EP. Na terceira etapa, a resistência ao fogo foi realizado pelo método de propagação de chamas (*Schlyter modificado*) e a combustibilidade com tratamentos de 20% e 30% de EP com adição do diamônio em concentrações de 3% e 5%. Foi observado a alteração da cor com a aplicação dos tratamentos com EP, porém a mudança foi “muito apreciável” para o mercado. Para o teste de propagação de chamas, a testemunha teve perda de massa de 25,18%. Enquanto que entre os tratamentos com EP a maior perda de massa foi de 0,75% para a amostra com 20% de EP + 5% de aditivo. O aumento da temperatura média foi maior no tratamento testemunha, atingindo máximas de temperatura em 71,7 °C, 85,6 °C e 61,4 °C para altura superior, média e inferior dos termopares, respectivamente. Já os tratamentos com 20% e 30% de EP com as diferentes concentrações de aditivos, as máximas de temperatura não ultrapassaram 38 °C. Para a combustibilidade, o tratamento controle e com 20% de EP permaneceram ao final do ensaio com 20% de massa inicial, já o tratamento com

30% de EP, permaneceu com 40%. Ao aplicar o aditivo químico, os tratamentos com 20% e 30% de EP, permaneceram com cerca de 50% da massa inicial. Conclui-se que o EP foi eficaz e se mostrou um excelente aditivo contra agentes xilófagos e na formulação de retardante de chama. Mostrou-se uma alternativa ecologicamente correto e agregando valor a um coproducto carbonização da madeira, reduzindo a emissão de gases do efeito estufa.

**Palavras-chave:** Construção civil. Madeira tratada. Propagação superficial de chamas. Situação de incêndios.

## ABSTRACT

ANDRADE, Frances Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2022. **Pyroleneous extract as a wood preservative and flame retardant in fire.** Advisor: Marcos Oliveira de Paula. Co-advisors: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Vinícius Resende de Castro.

The general objective was to investigate the efficiency of the pyroleneous extract and a fire retardant additive (diammonium) as a curative and flame retardant treatment, aiming at its applicability in structural wood. The study was carried out in three stages, in the first stage the chemical characterization of the pyroleneous extract (PE) was performed. It was identified in greater area by GC-MS, the phenolic compound siringol (15.54%) and the carboxylic acids, butanoic acid (10.28%) and acetic acid (7.52%). The treatment with 20% PE showed greater reduction of extractives and lignin compared to the control sample, as well as greater mass loss in thermogravimetric analysis (TG). There was no significant effect in the mechanical resistance to fiber parallel compression and in the modulus of rupture (MOR) of the untreated and treated woods. In the second step, microbiological tests were performed simulating two environments. The control sample and the one with 10% PE showed microorganism activity, while the treatments with 20% and 30% PE did not. The same behavior was observed for the test with termites. With 20% and 30% PE they presented a mortality rate of 57.5% and 62.0%, with moderate and superficial damage, respectively. Using the X-ray densitometry technique to obtain images, it was possible to observe the formation of the galleries. In the fungus test, the lowest mass losses were observed for the treatments with 20% (1.62%) and 30% (1.83%) of EP. In the third stage, fire resistance was tested by the flame spread method (modified Schlyter) and combustibility with treatments of 20% and 30% of EP with the addition of diammonium in concentrations of 3% and 5%. A change in color was observed with the application of the EP treatments, but the change was "very appreciable" for the market. For the flame spread test, the control had a mass loss of 25.18%. While among the EP treatments the greatest mass loss was 0.75% for the sample with 20% EP + 5% additive. The increase in average temperature was greater in the control treatment, reaching maximum temperatures of 71.7 °C, 85.6 °C and 61.4 °C for the upper, middle and lower height of the thermocouples, respectively. For the treatments with 20% and 30% EP with the different additive concentrations, the maximum temperatures did not exceed 38 °C. For combustibility, the control treatment and the treatment with 20% PE remained at the end of the test with 20% of initial mass, while the treatment with 30% PE remained at 40%. When applying the chemical

additive, the treatments with 20% and 30% of EP remained with about 50% of the initial mass. We conclude that the EP was effective and proved to be an excellent additive against xylophagous agents and in the formulation of flame retardants. It proved to be an environmentally friendly alternative and added value to a co-product of wood carbonization, reducing the emission of greenhouse gases.

**Keywords:** Civil construction. Treated wood. Surface flame propagation. Fire situation.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1 A MADEIRA E O SEU USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	15
2.2 NATUREZA INFLAMÁVEL, AÇÃO DO FOGO E O TRATAMENTO DA MADEIRA.....	17
2.3 RETARDADORES DE CHAMA .....	21
2.4 EXTRATO PIROLENHOSO .....	22
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
3.1 MATERIAL.....	26
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO PIROLENHOSO E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	27
3.2.1. Caracterização do extrato pirolenhoso.....	27
3.2.2. Aplicação do extrato pirolenhoso (EP) na madeira .....	28
3.2.3. Caracterização das madeiras após aplicação do extrato pirolenhoso .....	28
3.3. ENSAIOS BIOLÓGICOS COM FUNGOS E CUPINS NAS MADEIRAS TRATADAS COM O EXTRATO PIROLENHOSO.....	28
3.3.1. Teste para avaliar a atividade microbiana .....	29
3.3.2. Teste cupim de madeira seca .....	29
3.3.3. Ensaios com fungos apodrecedores .....	29
3.4. ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO SUPERFICIAL DE CHAMAS NA MADEIRA .....	30
3.4.1. Formulação do retardante de chamas a ser testado.....	30
3.4.2. Análise da cor da madeira – Colorimetria .....	30
3.4.3. Ensaio de propagação superficial de chama adaptado por Martins (2016) .....	31
3.4.4. Ensaio de combustibilidade da madeira.....	32
3.4.5. Caracterização da madeira após o ensaio de propagação de chama .....	32
3.5. Análise estatística dos dados .....	33
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO PIROLENHOSO E DA MADEIRA .....	34
4.1.1 Extrato Pirolenhoso .....	34
4.1.2 Efeito da aplicação do extrato pirolenhoso nas propriedades da madeira .....	35
4.2 EXTRATO PIROLENHOSO EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES COMO AGENTE TERMICIDA E FUNGICIDA.....	40

4.2.1 Ensaio de atividade microbiológica .....	40
4.2.2 Ensaio com cupins .....	43
4.2.3 Fungo .....	45
4.3 ENSAIOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIOS .....	48
4.3.1 Análise de cor .....	49
4.3.2 Ensaio superficial de propagação de chamas ( <i>Schlyter modificado</i> ) .....	50
4.3.3 Teste de combustibilidade .....	55
4.3.4 Efeito da propagação da chama nas propriedades da madeira.....	58
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE A - Notas .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO A - Normas .....</b>	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é provocado principalmente por ações antropogênicas, devido principalmente à dependência de combustíveis fósseis para atendimento a diferentes setores. Salienta que houve um acréscimo na temperatura do planeta, progressivamente, nos últimos séculos, de 1,2 °C em relação à temperatura na era pré-industrial. Logo, existe uma preocupação mundial, visto que o limite desse aumento é de 1,5 °C, portanto, cientistas alertam que as emissões de carbono devem ser reduzidas pela metade até 2030 e zeradas até 2050 (IPCC, 2021).

Neste sentido novas estratégias devem ser implementadas nos setores industriais de todo o mundo com o intuito de reverter o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) e consequentemente, o aquecimento global.

Estas mudanças são necessárias principalmente no setor da construção civil, um dos maiores emissores de GEE. Existem estudos que comprovam que até 2050 serão necessárias mais de 200 milhões de casas em todo o mundo. Este setor é responsável por cerca de 40% do consumo de energia global e por mais de 30% do total de emissões de GEE (LI et al., 2019).

Sendo assim, produtos de madeira de florestas plantadas são uma excelente opção para este setor, destacando-se a madeira laminada colada e madeira laminada cruzada.

Na construção civil, existem estruturas em madeiras edificadas, museus, igrejas e casas, que não passaram por nenhum tipo de tratamento (ou foram submetidas a tratamentos, porém de forma parcial). Essas estruturas estão susceptíveis ao risco de incêndios e/ou à ação de agentes biodeterioradores, como fungos e insetos.

Por serem estruturas já construídas e na maioria das vezes com acabamentos (pinturas ou verniz), fica difícil intervir com algum tipo tratamento *in loco*, com sinergias de retardamento de chamas e de agentes biológicos, que seja de fácil aplicação e não danifique, por exemplo, a pintura ou a coloração original da madeira.

Existem no mercado alguns produtos retardantes de chama que possuem em sua composição substâncias altamente tóxicas e/ou que violem os requisitos de segurança contra incêndio e, sem efeito aos agentes xilófagos. No entanto, um limitante seria o mecanismo de aplicação em estruturas já construídas, sem deixar de lado a questão da sustentabilidade, sendo necessário um produto seguro para o meio ambiente e acessível economicamente para construção.

O Extrato Pirolenhoso surge com a busca por produtos mais sustentáveis e ao mesmo tempo eficientes para construções de madeira já edificadas, com funções simultâneas de

retardante de chamas e proteção contra agentes xilófagos. Vale ressaltar que o Extrato Pirolenhoso, já é utilizado no mercado agrícola para tratamento de doenças fúngicas e bacterianas e em suplementos alimentares para animais ruminantes e monogástricos (MEDEIROS, 2018). Tem em sua composição mais de 200 substâncias que podem trazer a perspectiva de um novo produto para tratamentos de madeira ecologicamente correto, agregando valor a este coproduto.

O Extrato Pirolenhoso é um dos coprodutos gerados no processo de carbonização ou degradação térmica da madeira, separado da fração de alcatrão e óleos vegetais pela destilação e decantação. É uma das alternativas de produto com potencial econômico e ecologicamente correto para tratamentos em madeiras, reduzindo o impacto ocasionado por outros métodos que utilizam produtos tóxicos à saúde do ser humano e ao meio ambiente. Por ser obtido dos setores de produção de energia utilizando a biomassa, o mesmo tem grande potencial para uma transição energética utilizando fontes renováveis nos ciclos de produção industrial e amenizar o gargalo das emissões de GEE.

Diante da busca de usar produtos sustentáveis, uma alternativa de uso para o extrato pirolenhoso é a formulação de um retardante de chamas, pois carece de uma fonte ácida e um agente carbonizador, o qual pode ser utilizado um aditivo ignífugo. Nesse sentido utilizar os aditivos ignífugos visa diminuir o risco das chamas se propagarem e aumentar o tempo de resistência ao fogo. Um desses aditivos químicos é o fosfato diamônio, sua aplicação por pincelamento forma uma camada protetora na superfície da madeira, suficiente para reduzir a propagação das chamas e reduzir a emissão de fumaça.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a eficiência do extrato pirolenhoso e de um aditivo ignífugo (diamônio) como tratamento curativo e retardante de chama, visando suas aplicabilidades em madeiras estruturais.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter as propriedades físicas e químicas do extrato pirolenhoso;
- Caracterizar o extrato pirolenhoso pela técnica de CG-EM;
- Avaliar o efeito da aplicação do extrato pirolenhoso, em diferentes concentrações, nas propriedades da madeira de *Pinus elliottii*;
- Obter os grupos funcionais das madeiras antes e após aplicação do extrato pirolenhoso, em diferentes concentrações, por meio da técnica de FT-IR.
- Avaliar a decomposição de peças de madeira por ação de fungos e cupins, antes e após aplicação do extrato pirolenhoso em diferentes concentrações.
- Avaliar, as alterações da cor da madeira após aplicação do extrato pirolenhoso e do aditivo ignífugo (diamônio), por colorimetria;
- Avaliar a combustibilidade da madeira antes e após aplicação do extrato pirolenhoso e do aditivo ignífugo (diamônio);
- Avaliar o efeito da aplicação do extrato pirolenhoso e do aditivo ignifugos na ocorrência de propagação de chama na madeira (ensaio Schlyter modificado);
- Obter a resistência mecânica das madeiras após o ensaio de propagação de chamas em função dos tratamentos;
- Obter os grupos funcionais das madeiras, em função dos tratamentos, após o ensaio de propagação de chamas por meio da técnica de FT-IR.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A MADEIRA E O SEU USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira é um recurso natural sustentável e altamente variável e complexo. Anatomicamente, é composto por células dispostas longitudinalmente no caule. A parede celular dessas células são constituídas (por celulose, hemiceluloses e lignina). Além dos elementos químicos estruturais, a madeira tem em sua composição extrativos e cinzas. As madeiras mais utilizadas são as folhosas e as coníferas, conhecidas como madeiras duras e madeiras leves (ALI et al., 2019; WALSH-KORBS; AVÉNOUS, 2019; ZHU et al., 2020).

No que diz respeito a madeira como material de construção civil, a parte utilizável da árvore é o tronco, sendo este dividido em casca, câmbio vascular, lenho e raios lenhosos. As estruturas do lenho são formadas por vários tipos de células elementares distribuídos, em diferentes posições e nos três sentidos da madeira, transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial (RAMAGE et al., 2017; WALSH-KORBS; AVÉNOUS, 2019).

No ambiente construtivo, a madeira tem um papel importante em padrões estéticos e pela facilidade de processamento em diferentes formas (PARK et al., 2020). Além disso, atende as exigências ambientais e parâmetros ideais como material construtivo, como a elasticidade, relação entre peso e resistência, desempenho estrutural e alta sustentabilidade (MORGADO, 2011; PONDELAK et al., 2021). Portanto, o conhecimento da madeira para uso na construção civil é fundamental para aumentar a qualidade, a durabilidade e a estabilidade mecânica. O uso de madeiras provenientes das florestas de rápido crescimento é fundamental, maximizando a sustentabilidade da construção (LEE et al., 2018) e a utilização deste material para impulsionar a bioeconomia por meio das energias renováveis e material biológico (ZUBIZARRETA et al., 2019).

Comercialmente, a madeira é dividida em: (1) processada mecanicamente (madeira roliça, madeira serrada, madeira compensada e madeira laminada), (2) madeira reconstituída (MDP, MDF, HDF, chapa de fibra e OSB), (3) piso laminado, (4) CLT e (5) wood frame (IBÁ, 2021).

Walsh-Korbs e Avénous (2019), analisando os dados das ONU Habitat, relatou que 5 milhões de novas casas são necessárias mundialmente todos os anos e, a projeção é que mais de 200 milhões de casas serão necessárias até 2050, independente do material. Portanto, devida todas as pressões ambientais, a madeira de florestas plantadas torna-se o material de construção mais recomendado. Observando esta projeção, o mercado brasileiro poderá se destacar, uma

vez que é o líder mundial em produtividade de madeira e em 2012, foi líder mundial em madeira tratada na América Latina (TOMELERI et al., 2021).

Com a tendência global da sustentabilidade, a utilização da madeira tem ganhado destaque na construção civil como material de baixa pegada de carbono. Principalmente, pela busca por melhorias na eficiência das construções, utilizando tecnologias limpas e sustentáveis nesse setor, que é um dos principais consumidores de recursos materiais e energéticos em todo o ciclo de vida da construção (POPESCU; PFRIEM, 2020; ŠVAJLENKA; KOZLOVSKA, 2020b).

O setor da construção civil, globalmente, é responsável por cerca de 40% do consumo de energia, por mais de 30% do total de emissões de gases do efeito estufa, 50% dos materiais extraídos e 30% do consumo de água (HURMEKOSKI et al., 2017; LI et al., 2019; ALAPIETI et al., 2020). Desta forma, a utilização da madeira de florestas plantadas pode reverter esse quadro. Somente na China, até 2050 deverá representar 20% do consumo total de energia no setor de construção (GUO et al., 2019).

A madeira já é utilizada amplamente em construções em vários países. Nos Estados Unidos, os baixos edifícios civis correspondem a 95% e os edifícios comerciais a mais de 50% desse material (LU et al., 2021). Na União Europeia, os edifícios unifamiliares utilizam de 8 a 10% de estrutura em madeira, apesar disso, a fração de madeira representa somente 1,6% na construção de edifícios nesta região. Isto vem mudando com o surgimento de produtos de madeira, como a madeira laminada colada (MLC) e a madeira laminada cruzada (MLC) em construções de grande escala (HURMEKOSKI et al., 2017).

Soluções baseadas em madeira é uma tendência da sustentabilidade global, resgatando os valores da utilização em moradias como ao longo da existência da humanidade (ZUBIZARRETA et al., 2019; ŠVAJLENKA; KOZLOVSKA, 2020a). E mesmo que ainda não seja a solução como resposta global para fins estruturais em edifícios, recentemente foi construído o maior edifício em madeira, o Mjøstårnet, em Brumunddal na Noruega, com 85,4 metros de altura (REMADE, 2021). Porém, o Canadá quer ultrapassar essa posição, com a construção de um prédio de madeira de uso misto, de 120 metros de altura (AMATA, 2021).

Em contrapartida, no Brasil, faltam informações sobre o uso deste material, além dos estigmas de que são materiais de construção para pessoas de baixa e média renda. Sendo a tecnologia mais recente o sistema *wood frame*, não possui uma legislação/normatização específica levando aos profissionais da área utilizarem as normas europeias (RESENDE et al., 2021). Entretanto, em 2018, o projeto Moradias Infantis, em Formoso do Araguaia no

Tocantins, venceu o prêmio internacional RIBA 2018 – “*Royal Institute of British Architects*” (CAU/BR, 2021; RIBA, 2021), em que a estrutura é de madeira laminada cruzada.

O Brasil enfrenta escassez de moradias dignas em todo o seu território, 7,8% das moradias são irregulares o que aumenta a vulnerabilidade social e precisa de processos estruturais para tratar sobre o direito à moradia (SERAFIM et al., 2021). A madeira como elemento estrutural é uma alternativa de baixo custo e impacto (BUKAUSKAS et al., 2019), elevando o potencial de novos estudos e desenvolvimento para suprir esse déficit habitacional.

Segundo Figueiredo et al. (2020), o Brasil ainda emprega um baixo volume para este mercado e apresenta grande potencial de expansão, principalmente na construção civil, embalagens e linhas de transmissão. O setor de construção é o maior responsável das principais atividades econômicas que demandam produtos da indústria de madeira, representando 27% (IBÁ, 2020).

A utilização da madeira para fins construtivos é datada desde o início da civilização, mesmo com o emprego de novas tecnologias e materiais, o seu consumo ainda é crescente e tem sido a escolha natural há décadas. Porém, ainda existe o estigma da queima, assim como a biodeterioração afetando a sua vida útil, causada por fatores bióticos e abióticos como insetos, fungos, mofo, bactérias, algas e líquens, danos por água, luz UV e, ação do fogo (RYSZARD; MALGORZATA, 2016; LEE et al., 2018; ALI et al., 2019; THOMAS et al., 2020).

A presença de fungos apodrecedores da madeira, são os que apresentam problemas mais relevantes em suas estruturas. Devido ao acesso aos carboidratos da parede celular e a absorção de umidade da madeira, sustenta um ambiente propício para a deterioração biológica (BARBERO-LÓPES et al., 2018). Outro grupo de bastante destaque são os cupins. No entanto, mesmo causando grandes danos as estruturas de madeira, os consumidores cada vez mais escolhem este material para as construções (KADIR et al., 2021).

Além da biodeterioração, tem-se que levar em consideração a higroscopicidade da madeira. Esse fenômeno relacionado a hidrofilicidade dos componentes da parede celular e sua estrutura porosa, o que pode resultar na variação dimensional nos três eixos anatômicos. Isto acontece devido a capacidade de absorção ou de perda de água para o ambiente, acarretando a diminuição da estabilidade dimensional, causando riscos de rachaduras e deformações (LEE et al., 2018; FERREIRA et al., 2019; YONA et al., 2021).

## **2.2 NATUREZA INFLAMÁVEL, AÇÃO DO FOGO E O TRATAMENTO DA MADEIRA**

Um dos desafios para a utilização da madeira na construção civil é a sua combustibilidade (KUMAR et al., 2013; HAUTAMÄKI et al., 2020). Entretanto, existem tratamentos cujo objetivos é melhorar as propriedades da madeira em relação a essa propriedade. Estudos relatam três estratégias: (1) a modificação da parede celular, baseado em agentes de ligação com os grupos OH dos componentes químicos da madeira; (2) a impregnação e (3) o revestimento. Dentre as propriedades melhoradas pode-se citar a estabilidade dimensional, as propriedades mecânicas, a resistência à degradação biológica, aos raios UV e ao fogo (RAMAGE et al., 2017; THOMAS et al., 2020). O tratamento térmico, também, pode melhorar a estabilidade dimensional ocasionada pela diminuição da higroscopicidade e aumento a resistência aos agentes de biodeterioração (LEE et al., 2018; FERREIRA et al., 2019).

Levando em consideração construções e edifícios antigos de madeira, é necessário uma adequada preservação e manutenção com ações de proteção contra incêndio, biodeterioração, roubo e vandalismo. A preservação da arquitetura “*in situ*” é uma característica importante da proteção, e que requer cuidado, uma vez que não podemos alterar as características do material, sendo utilizados para aplicação métodos com pincel ou spray. É importante utilizar um retardante de chamas que também tenha ação contra fungos e insetos, visto que, os incêndios e outros desastres em estruturas antigas aumentam a cada ano (RYSZARD; MALGORZATA, 2016).

Por muito tempo a madeira foi tratada com biocidas tóxicos para saúde humana e meio ambiente. Daí a importância de se buscar e desenvolver tecnologias adequadas com componentes livres de toxicidade, que proporcione uma melhor resistência contra os agentes biodeterioradores e não seja inflamável.

Há um vasto campo de estudos a ser explorado para romper o preconceito da utilização da madeira em construção habitacional, em relação à durabilidade e resistência, tendo grandes avanços da engenharia madeireira. É importante salientar que não existe nenhuma construção totalmente resistente ao fogo, porém a madeira apresenta um melhor desempenho contra incêndio comparada a outros materiais estruturais, como o aço e o concreto (PINTO, 2001; VIANA et al., 2020). Principalmente, tendo em vista o crescimento da arquitetura na engenharia madeireiras e novos sistemas de construção, a mesma compete com estes materiais tradicionalmente utilizados na construção civil (ALAPIETI et al., 2020).

No entanto, os estudos do comportamento de queima da madeira ainda são incipientes, havendo necessidade de novos estudos para seu entendimento. Por ser um material inflamável, o seu tratamento é fundamental e uma medida de precaução (GAFF et al., 2019), devido o

rápido espalhamento das chamas. Na pirólise a madeira se converte em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis, fornecendo mais combustível para o crescimento do fogo, aumento da produção de monóxido de carbono, da toxicidade e da geração de fuligem. Geralmente, observa-se estes problemas quando a madeira é tratada com retardantes convencionais de fogo que incorporam grupos de heteroátomos ou de halogênios, os quais são substâncias tóxicas. Neste sentido, tem-se priorizado estudos com retardadores de chama utilizando substratos de origem biológica (RICHTER; REIN, 2020; THOMAS et al., 2020).

A ação dos incêndios nas estruturas afeta gradualmente a sua seção resistente. Inicialmente, ocorre a perda da rigidez e um aumento da resistência a temperaturas inferiores a 100°C, devido à perda de água adsorvida pela higroscopidade. Por outro lado, o aumento da temperatura e exposição ao fogo, diminui a resistência mecânica, devido à degradação significativa dos constituintes da madeira. A caracterização do incêndio se dá por meio da temperatura dos gases ao longo do tempo *versus* ação do fogo, podendo calcular a máxima temperatura atingida pelas peças e sua correspondente resistência à alta temperatura (AGUILAR FILHO, 1987; FONSECA; COELHO, 2011; MOLINA et al., 2012).

O risco de incêndio pode ser definido como o potencial que um determinado material contribui na formação de um incêndio, podendo ficar fora de controle, culminando em danos ao ambiente e ao ser humano (MORGAN; GILMAN, 2012). Entretanto, existem poucos estudos sobre as taxas de carbonização nesse tipo de situação, os quais são necessários para simular a resposta estrutural de um edifício em uma situação de incêndio, garantindo a segurança das pessoas e da construção (RICHTER; REIN, 2020).

Durante a queima ou carbonização é formado uma camada isolante na estrutura da madeira, dificultando a transmissão de calor e a gradual progressão do fogo para as camadas internas. O núcleo, entretanto, pode permanecer a baixas temperaturas e manter as suas propriedades inalteradas, em função do tempo de exposição ao fogo e das dimensões do elemento (FONSECA; COELHO, 2011; VIANA et al., 2020).

O avanço da frente de carbonização pode ser caracterizado de duas maneiras. A primeira tem relação com a taxa de queima por meio da perda de massa (g/s) e a segunda, por meio da taxa de carbonização obtido pelo aumento da espessura da camada carbonizada (mm/min) (MARTINS, 2016; FERNANDES, 2018).

Há uma variedade de substâncias que reduzem a perda de massa da madeira e proporcionam o retardamento das chamas, dentre elas, destacam-se os produtos químicos em dispersões moleculares, as soluções coloidais e os que são aplicados na forma de revestimentos. A forma de revestimento é a mais utilizada e adequada para construções em madeira antiga,

devido ao seu baixo peso, e sua rápida e fácil aplicação. O revestimento é projetado para expandir e formar uma barreira isolante, entre o fogo e o substrato subjacente (KANDOLA et al., 2015; MORYS et al., 2020).

O tratamento químico da madeira com produtos retardadores de combustão ou de chama para retardar a evolução do incêndio é a forma mais usual de melhorar o desempenho da madeira em reação ao fogo. Estes são classificados como intumescentes e não intumescentes. O primeiro grupo é aplicado em forma de recobrimento (tintas e vernizes), originando uma camada resistente ao calor e termicamente isolante. Enquanto os produtos não intumescentes se aplicam na madeira por meio da impregnação (PINTO, 2001; LARANJEIRA et al., 2013).

Grande parte dos revestimentos intumescentes, incluem em sua composição uma fonte de ácido, um agente carbonizador e de expansão (ALI et al., 2019). A intumescência é um fenômeno que envolve reações químicas de decomposição e reticulação (*crosslinking*), termicamente ativadas, e afeta as propriedades físicas, como a viscosidade e a formação da espuma. A ação dos revestimentos intumescentes envolve a interrupção física do calor e do oxigênio, fazendo com que não aconteça penetração na madeira (KANDOLA et al., 2015; TIAN et al., 2018; MORYS et al., 2020).

Quando a madeira é aquecida pelos incêndios, inicia-se os fenômenos físico-químicos de transferência de calor e de massa e, consequentemente, a secagem do material. Nesse processo ocorre reações químicas endotérmicas e exotérmicas. A condução térmica é o parâmetro físico que descreve a efetividade da proteção dos revestimentos intumescentes, quanto menor a condutividade térmica indica uma boa proteção, fornecendo uma barreira contra a ação do fogo. Por isso, a importância da profundidade da penetração do produto ignífugo, que pode ser avaliado por meio da densitometria de raios x, da sua distribuição e da quantidade do produto retido pela madeira (PAES et al., 2008; KONDOLA et al., 2015; MORYS et al., 2020).

A furfuralação é promissora no tratamento da madeira, pois faz uso de substância química não tóxica e não inflamável, apresentando melhorias nas propriedades higroscópicas da madeira. Essas melhorias proporcionam aumento na estabilidade dimensional, aumento das propriedades mecânicas, diminuição da inflamabilidade e atua na resistência ao intemperismo e à biodeterioração (ACOSTA et al., 2020), além de ser um potente pesticida natural (BOER et al., 2021).

Porém, atualmente o que vem sendo discutido como substâncias retardantes de fogo são os compostos de fósforo e fósforo-nitrogênio, ecologicamente correto como o polifosfato de amônio e polifosfato de melamina, que garantem uma melhora da retardação de chama e estabilidade térmica, mesmo aplicado cargas baixas (PHAM et al., 2019).

Além desses produtos, pode-se ser utilizado o fosfato de diamônio ou diamônio, como retardador de chama. Isto porque é um agente carbonizador, que forma uma camada de carvão na superfície da madeira quando essa é exposta ao fogo evitando a propagação das chamas e da de gases tóxicos. Neste sentido, aumento a resistência ao fogo de estruturas em madeira melhorando seu desempenho estrutural, atendendo os requisitos de segurança contra incêndio.

### **2.3 RETARDADORES DE CHAMA**

Os compósitos de madeira são classificados como inflamáveis e, para melhorar o desempenho, é necessário tratamentos com os retardadores de chama sintética ou natural (LU et al., 2021; SCHIRP; SCHWARZ, 2021). Pode-se adotar três medidas: (1) mecanismos de engenharia, como escudo de proteção; (2) uso de polímeros de baixa liberação de calor e (3) aditivos retardantes de chama (MORGAN; GILMAN, 2012), sendo o último o foco deste estudo. Diante a busca por soluções tecnológicas limpas e sustentáveis, recomenda-se retardantes de chama que utilizam minerais inorgânicos em sua composição (PONDELAK et al., 2021).

Segundo Morgan e Gilman (2012), existem seis classes gerais de produtos químicos retardadores de chama. Esses produtos podem ser enquadrados em três mecanismos de ação retardante: (1) retardantes de chama de fase gasosa, o halogênio e fósforo; (2) retardantes de chama endotérmicos, incluindo hidróxidos de metal e carbonatos e; (3) retardantes de chama formadores de carvão, podendo ser representados pelos intumescentes e nanocompósitos. Sendo este último mecanismo o foco do atual estudo.

Embora o mecanismo seja o intumescente, pode-se combinar com os compostos de fósforos para aumentar a formação de carvão ou com minerais inorgânicos usados para preencher as lacunas/falhas, como boratos e silicatos, principalmente aqueles que são reativos e copolimerizam com o polímero (MORGAN; GILMAN, 2012). Como já comentado, na composição dos revestimentos intumescentes, estão inclusos uma fonte de ácido, um agente carbonizador e de expansão. E estes tem chamado a atenção devido ao aumento de incêndios urbanos (WANG; ZHAO, 2020). Entretanto, os retardantes de chama, podem somente incluir em sua composição a fonte ácida e o agente carbonizador, não sendo necessário o agente de expansão, e por isso, não são classificados como intumescentes (SOLIS-POMAR et al., 2021).

É importante ressaltar que todas as substâncias utilizadas como retardadores de chama na madeira, apresentam desvantagens em relação as condições de umidade, como a lixiviação e durabilidade. Isto acontece devido a solubilidade em água dos componentes utilizados na

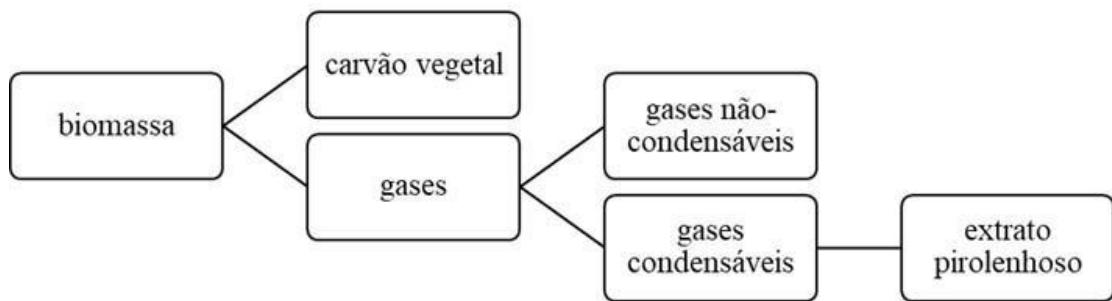
composição do retardante, sendo contornada quando estes reagem com estrutura da madeira e formam substâncias mais complexas e insolúveis (POPESCU; PFRIEM, 2020).

Atualmente os retardadores ecológicos mais utilizados são os compostos contendo fósforos, como o diamônico. Esse produto é muito utilizado na indústria europeia, devido o mecanismo que as partículas inorgânicas tem de aumentar o tempo de ignição e diminuir o pico de liberação de calor (MANTANIS et al., 2019; LU et al., 2021).

## 2.4 EXTRATO PIROLENHOSO

Há milênios o homem vem utilizando o licor pirolenhoso para tratamento de doenças fúngicas e bacterianas, bem como na coloração do linho. A produção em larga escala só iniciou em 1813, na Inglaterra e as pesquisas em 1874, no Japão (ARAÚJO, 2018). Estudos recentes vêm objetivando tanto a utilização deste extrato como suplemento alimentar de animais ruminantes e monogástricos, como também o interesse em análises de seus constituintes químicos e propriedades, as quais devem ser cuidadosamente avaliadas (ARAÚJO et al., 2018) para conhecimento da sua composição e possíveis aplicabilidades.

O extrato pirolenhoso (EP) é um substrato de origem biológica, com diversas definições na literatura sendo denominado como licor pirolenhoso, alcatrão pirolenhoso, vinagre da madeira ou ácido pirolenhoso (SOUZA et al., 2012). É obtido por meio da decomposição térmica da madeira, sob condições de alta temperatura e ausência (ou em baixas concentrações) de oxigênio. Nestas condições também são gerados outros coprodutos, como carvão vegetal (sólido), alcatrão (líquido), fumaça e produtos gasosos (Figura 1) (ORAHAMI e YOSHIMURA, 2013; GREWAL et al., 2018).



**Figura 1** - Esquema dos produtos da pirólise da biomassa vegetal, adaptado de Grewal et al. (2018).

O licor pirolenhoso é uma mistura do extrato pirolenhoso (fase central) com rendimento de 60% a 75%, alcatrão (fase inferior) representando 20% a 30% e óleos vegetais (superior) com 10%, os quais podem ser separados pelos métodos de destilação e da decantação, e caracterizados quimicamente por meio da cromatografia gasosa acoplado a espectrometria de massas, sendo essa uma análise de alto custo (SOUZA et al., 2012; SENA et al., 2014). O extrato pirolenhoso tem em sua composição mais de 200 substâncias, as quais variam de acordo com as espécies, a temperatura utilizada no processo e a forma de obtenção. Essas substâncias possuem uma vasta aplicação no mercado agrícola, sendo bastante utilizado em combate a ação dos fungos e microrganismos por sua ação antifúngica e microbiana (SILVA et al., 2017; MEDEIROS, 2018), após diluições adequadas para cada utilidade.

Embora tenha esta vasta aplicação no mercado agrícola, há poucos estudos que detalham a sua caracterização química para o estabelecimento de outros usos. Sendo conhecido que o extrato pirolenhoso contém substâncias químicas orgânicas com propriedades bactericidas, fungicidas e termicidas (YATAGAI et al., 2002; WITITSIRI et al., 2011). Entre os principais componentes químicos identificados estão os compostos fenólicos, aldeídos e os ácidos orgânicos (ALMEIDA et al., 2019).

Mundialmente, o EP é amplamente utilizado, porém no Brasil as aplicações se restringem às pequenas operações na agricultura orgânica, devido ao fato que ainda acreditam que o composto pode causar doenças por conter vestígios do alcatrão da madeira. Esse alcatrão é relacionado ao alcatrão do carvão mineral, o qual é tóxico e cancírogênico. Entretanto, o alcatrão da madeira decanta para o fundo do recipiente depois de meses. Trabalhos consultados na literatura não informam exatamente o método mais adequado para remoção dos vestígios do alcatrão (YATAGAI et al., 2002; ARAÚJO et al., 2018; PIMENTA et al., 2018).

Pensando nesta relação de composição química e compostos tóxicos, estudos buscam modificar quimicamente substratos comuns à base de carboidratos realizando reação de condensação simples. Com isso, obtém-se ligações covalentes entre o grupo fósforo e os grupos hidroxilas dos substratos dos carboidratos, com isso obter maiores teores de resíduos de carvão e teores baixos de combustíveis voláteis.

Os estudos trazem a perspectiva do extrato pirolenhoso como um novo produto ecologicamente correto para o tratamento de madeira. Assim, evita-se a poluição ambiental e os problemas residuais causados pelos produtos sintéticos existentes no mercado, os quais são tóxicos e violam os requisitos de segurança contra incêndios (ORAHAMI e YOSHIMURA, 2013). Esta perspectiva de utilização do extrato pirolenhoso é ponto central da nova geração de produtos químicos para proteção de madeira e um desafio para a indústria da química mundial para os próximos 50 anos (ARAÚJO et al., 2010; KADIR et al., 2021).

A gestão estratégica em usar e promover o uso da biomassa vegetal é uma das abordagens para enfrentar as problemáticas de meio ambiente e saúde, e a conversão da biomassa em combustível líquido e uma alternativa para substituição de fontes fósseis (GREWAL et al., 2018; BOER et al., 2021). O extrato pirolenhoso, e o setor energético o qual é obtido, tem grande potencial para uma transição energética que utilize fontes renováveis nos ciclos de produção indústria e resolver os gargalos das emissões de gases do efeito estufa. Nos últimos anos a quantidade de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera tem aumentado exponencialmente, com grande influência, devido ao consumo de combustíveis fósseis.

Sendo assim, o extrato pirolenhoso torna-se um coproducto com potencial econômico e de sustentabilidade no setor energético. O mesmo representa rendimento de cerca de 35% da pirólise da madeira (SENA et al., 2014), o que é perdido é lançado para atmosfera caso não seja condensado e recuperado no processo de carbonização. Uma das soluções desenvolvidas atualmente é o Projeto Siderurgia Sustentável, focado na siderurgia brasileira, e implementado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o qual já obteve resultados

como a redução média de emissões de 1.415 kg CO<sub>2</sub>eq/t CV, cinco vezes mais do que a meta (PNUD, 2021).

Ainda existem os problemas relacionados tanto a utilização quanto aos descartes das madeiras tratadas com substâncias tóxicas como o cobre cromado (CCA), creosoto, entre outros químicos que são nocivos à saúde do ser humano e ao meio ambiente devido a possibilidade de lixiviação para o solo e a água (BARBERO-LÓPEZ et al., 2018; SANTOS et al., 2020). Por isso a importância de mais estudos sobre o extrato pirolenhoso, para aplicações em sistemas de preservação de madeira e o impacto ambiental ocasionado pela utilização e descartes dos resíduos contendo elementos tóxicos (BOER et al., 2021).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

O extrato pirolenhoso utilizado no experimento foi doado pela empresa Extrato Pirolenhoso do Brasil, e segundo dados do fabricante o mesmo é comercializado filtrado, decantado e estabilizado, e sem aditivos.

O aditivo químico, diamônio, foi adquirido no mercado, é solúvel em água, tem um pH em torno de 7,7 a 8,1.

Foi utilizado madeira de *Pinus elliottii*, com densidade aparente a 12% de umidade, base seca, de 0,56 g/cm<sup>3</sup>, proveniente da serraria e marcenaria da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. A madeira foi acondicionada no pátio de secagem do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) até atingirem umidade de equilíbrio higroscópico, próximo de 12%.

Depois, as tábuas foram seccionadas para retiradas de corpos de prova, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1** – Dimensão dos corpos de prova

Ensaio	Espessura, largura e comprimento (cm)	Nº de corpos de prova
Compressão paralela às fibras	2 x 2 x 6	15
Ensaio biológico com cupins	0,6 x 2,3 x 7	48
Ensaio biológico com fungos de podridão	0,5 x 2 x 2	12
Propagação de Chama	4 x 25 x 60	30
Combustibilidade	2 x 2 x 2	25

Fonte: O Autor.

O experimento foi conduzido em etapas: (1) a caracterização química do extrato pirolenhoso e os efeitos nas propriedades da madeira; (2) os ensaios biológicos com fungos e cupins nas madeiras tratadas com extrato pirolenhoso; (3) os ensaios propagação de chama e seus impactos na resistência mecânica da madeira.

### **3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO PIROLENHOSO E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA**

#### **3.2.1. Caracterização do extrato pirolenhoso**

O EP foi adquirido da empresa Extrato Pirolenhoso do Brasil, para corroborar com o relatório técnico e os resultados da composição química da própria empresa, foram realizados as análises de cromatografia gasosa de espectrometria de massas (CG-EM), composição química elementar, viscosidade, densidade, teor de água, poder calorífico, composição química imediata e índice de acidez para calcular o teor de ácidos orgânicos totais.

A composição química elementar foi realizada em analisador Universal Elementar® (modelo Vario Micro Clube), quantificando os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, descontando-se as cinzas. O teor de oxigênio foi obtido por diferença.

O extrato pirolenhoso foi liofilizado para as análises, nesse processo as amostras foram congeladas por 72 horas no Liofilizador Enterprise I, com vácuo de 160 µHg e condensador com temperatura de -45 °C. Passado o tempo, as amostras foram retiradas sendo necessário armazenamento em recipientes de plástico para não pegarem umidade.

Na análise das amostras de extrato pirolenhoso foi empregado um cromatógrafo a gás acoplado a um espectrômetro de massas SHIMADZU modelo CGSMS-QP2010 Ultra, equipado com uma coluna capilar Ultra SPB® 5 (30m de comprimento, 0,25mm de diâmetro interno e 0,25 µm de espessura de filme), 5% difenil e 95% dimetilpolisiloxano. O volume de amostra injetado foi de 1 µL e as condições de análise foram: temperatura do forno do cromatógrafo a gás foi mantida a 40°C por 5 minutos, elevada a 200°C a uma taxa de 3°C min<sup>-1</sup>, permanecendo nessa temperatura por 2 minutos; temperatura do injetor igual a 220 °C; temperatura do detector igual a 240 °C, e o modo de ionização por impacto de elétrons a 70 eV. O hélio de alta pureza foi utilizado como gás de arraste com fluxo de 1,8 mL min<sup>-1</sup>. O espectrômetro de massas foi empregado com faixa de m/z = 35-500. A identificação dos compostos foi realizada por comparação dos espectros de massas com dados da biblioteca NIST14.

O poder calorífico superior foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma NBR 8633 (ABNT, 1984). A composição química imediata, para determinar os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, seguiu os procedimentos prescritos na norma NBR 8112 (ABNT, 1986). Para ambas as análises as amostras de extrato pirolenhoso foram, primeiramente, liofilizadas.

O Índice de acidez do extrato pirolenhoso foi obtido seguindo os procedimentos descritos na norma ASTM – D664 (2018). Posteriormente, calculado o teor de ácidos orgânicos totais com base na fração mássica de ácido acético.

### **3.2.2. Aplicação do extrato pirolenhoso (EP) na madeira**

O método de aplicação do EP na madeira foi por pincelamento nas concentrações de 10%, 20% e 30% em água deionizada. A aplicação foi realizada com auxílio do pincel, sendo três demãos com intervalo de uma hora, repetindo o procedimento mais duas vezes, em intervalos de 24 horas.

Após as aplicações, as madeiras foram acondicionadas em sala climatizada, temperatura de 20 °C e umidade relativa de 65, até atingirem massa constante, para posterior caracterização.

### **3.2.3. Caracterização das madeiras após aplicação do extrato pirolenhoso**

Para avaliar os efeitos da aplicação do EP nas propriedades da madeira, determinou-se a composição química imediata seguindo as diretrizes da NBR 8112 (ABNT, 1986) e composição química estrutural pelo método descrito por Goldschimid (1971), Gomide e Demuner (1986) e TAPPI (1996).

A análise termogravimétrica antes e após aplicação do EP na madeira foi realizada em um aparelho DTG-60H Shimadzu, em atmosfera de gás nitrogênio com vazão constante de 50 ml.min<sup>-1</sup> e taxa de aquecimento de 10 °C.min<sup>-1</sup> até temperatura máxima de 900 °C. Foram utilizadas amostras de madeiras reduzidas a partículas e selecionadas entre os conjuntos sobrepostos de peneiras de 40 e 60 *mesh*, sendo utilizada a fração que ficou retida na peneira de 60 *mesh*.

Também foi realizada a espectrometria na região do infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) das madeiras utilizando o espetrômetro de modelo Varian FT-IR 660, por reflectância total atenuada (ATR) e os espectros de 256 varreduras, com resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e faixa de comprimento de onda de 400 – 4000 cm<sup>-1</sup>.

A resistência à compressão paralela às fibras da madeira foi obtida seguindo os procedimentos da NBR 7190 (ABNT, 1997).

## **3.3. ENSAIOS BIOLÓGICOS COM FUNGOS E CUPINS NAS MADEIRAS TRATADAS COM O EXTRATO PIROLENHOSO**

As 10, 20 e 30% de EP em água deionizada foram utilizadas para os ensaios de atividade microbiológica e dos ensaios biológicos com cupins e fungos.

### **3.3.1. Teste para avaliar a atividade microbiana**

A atividade microbiológica foi utilizado placa de petri com tampa e sem tampa com BDA, para simular dois ambientes. Foi realizado três repetições para testemunha e para os tratamentos (10%, 20% e 30% do EP) e o acompanhamento realizado por fotografias. As placas sem tampas foram umedecidas, duas vezes por semana.

O método para aplicar o EP foi por gotejamento, com pinceta no BDA solidificado e o ensaio teve duração de cerca de seis semanas.

### **3.3.2. Teste cupim de madeira seca**

O teste de cupins de madeira seca, seguiu os procedimentos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT 1157 (1980) adaptada, com a utilização de 39 operários e um soldado. Foram realizadas seis repetições para o teste controle e para a madeira tratada nas concentrações de 10%, 20% e 30% com extrato pirolenhoso.

As amostras foram agrupadas em conjuntos de dois corpos de prova, unidos por fita adesiva e fixadas com parafinas em um recipiente de polivinila (PVC) com diâmetros de 3,5 cm e 4,0 cm de altura. Para cada recipiente foram inseridos 40 cupins, sendo utilizado uma placa de petri em cada recipiente para evitar a fuga dos cupins. O experimento foi mantido por 45 dias, em laboratório, a  $25 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  de umidade relativa (CASTRO et al. 2019). Transcorrido 45 dias, avaliou-se a quantidade de furos, a mortalidade dos cupins e o desgaste causado pelos mesmos, com base na seguinte classificação. Nenhum desgaste (0), dano superficial (1), dano moderado (2), dano acentuado (3) e dano profundo (4).

Para corroborar com a norma do IPT 1157 (1980) e melhor avaliar os danos causados internamente, foi utilizado a densitometria de raios X, utilizando o aparelho Faxitron modelo LX 6, com tensão de 60 Kv e tempo de exposição de 19 segundos.

### **3.3.3. Ensaios com fungos apodrecedores**

Os ensaios de fungos apodrecedores foram realizados seguindo as diretrizes da ASTM D-2017 (2017), exposto ao fungo de podridão branca, o *Trametes versicolor*.

A madeira tratada e não tratada (testemunha) foram autoclavadas antes de terem sido submetidas à colonização fúngica, em placas de petri por seis semanas.

Ao final desse período, retirou-se as amostras, as quais foram levadas em estufa à 105 °C para obtenção da massa seca, e a partir dessa foi calculada a perda de massa.

### **3.4. ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO SUPERFICIAL DE CHAMAS NA MADEIRA**

Para a terceira etapa, foram utilizados como base os ensaios de atividade microbiológica e os biológicos, os quais foram avaliados quanto à eficácia no combate a fungos e cupins. Com isto, foram utilizadas somente as concentrações de 20% e 30% do extrato pirolenhoso (EP), para etapa de avaliação da resistência da madeira ao fogo.

#### **3.4.1. Formulação do retardante de chamas a ser testado**

As formulações testadas para retardar a propagação das chamas nas madeiras foram compostas pelo extrato pirolenhoso e o aditivo fosfato de amônio dibásico (diamônio), utilizados como fonte ácida e agente carbonizador, respectivamente, em diferentes proporções, conforme descrito na Tabela 2. Os tratamentos foram denominados de revestimentos para melhor compreensão.

**Tabela 2 – Caracterização dos tratamentos avaliados no experimento**

<b>Tratamento</b>	<b>Descrição</b>
Testemunha	Madeira <i>In natura</i>
Revestimento 1	20% EP e 3% do diamônio
Revestimento 2	20% EP e 5% do diamônio
Revestimento 3	30% EP e 3% do diamônio
Revestimento 4	30% EP e 5% do diamônio

Fonte: O Autor.

#### **3.4.2. Análise da cor da madeira – Colorimetria**

Antes da realização dos ensaios de propagação de chama e teste de combustibilidade foi realizado o ensaio de cor por meio da Análise de Colorimetria.

Foi utilizado o colorímetro portátil Konica CM-2500D em contato direto com as madeiras tratadas e não tratadas na umidade de equilíbrio higroscópico.

O sistema operacional deste aparelho é o CIELab por meio dos índices L (Luminosidade: escuro-claro); a\* (coordenada verde-amarelo) e b\* (coordenada azul-amarelo). O valor de L indica a luminosidade ou claridade. O valor de C representa a saturação da cor, diretamente ligada à concentração do pigmento. E o h é a tonalidade, conhecida como ângulo da tinta.

### **3.4.3. Ensaio de propagação superficial de chama adaptado por Martins (2016)**

O ensaio de propagação superficial de chama (*Schlyter modificado*) foi realizado com duas amostras por vez, ajustadas para que as superfícies ficassem paralelas e separadas entre si de 5 cm, com a base 10 cm distante da mesa de apoio. O bico de gás tipo Meker nº 4, foi instalado com um adaptador de latão construído no formato de T, com 13 cm de comprimento com as extremidades fechadas e duas fileiras de 6 furos. O ensaio foi finalizado após 20 minutos de exposição.

Durante o ensaio foi avaliado a perda de massa, o início do tempo visível da chama, a propagação da chama, e realizado uma adaptação para aferir a temperatura no centro da peça de madeira e as temperaturas máximas e acréscimos de temperatura na face oposta da propagação da chama. Para tanto, foi feito uma adaptação, utilizou-se termopares tipo K, instalados em três alturas do corpo de prova (inferior, médio e superior) com 2 cm de profundidade, conforme Figura 2.



**Figura 2** – Aparato do ensaio de propagação superficial de chamas adaptado com termopares tipo K em diferentes alturas do corpo de prova.

#### 3.4.4. Ensaio de combustibilidade da madeira

O teste de combustibilidade foi adaptado de Quirino e Brito (1991), utilizando um recipiente metálico de inox com uma grade suspensa e a queima em leito fixo, conforme Figura 3.

Foi utilizado abaixo do leito fixo um cadinho de porcelana com 15 gramas de álcool para ignição, o qual está suspenso. Este aparato foi posicionado acima de uma balança modelo Shimadzu UX200H, um termopar Ecil WK-2 na parte superior, onde ocorre a queima da biomassa, ligado a um termômetro de contato e infravermelho Fluke 568 com o programa aquisitor de dados do aparelho, e sendo ensaiado dentro de uma capela ligada durante todo o teste.

No leito fixo foi posicionado 1 corpo de prova para cada tratamento e a massa e temperaturas foram monitoradas desde o tempo zero. O início da ignição da ignição se dá pela queima do álcool e o teste terminou quando os valores da temperatura caíram abaixo de 100 °C.



**Figura 3** – Aparato do teste de combustibilidade.

#### 3.4.5. Caracterização da madeira após o ensaio de propagação de chama

Para avaliar o efeito da aplicação do extrato pirolenhoso juntamente com o aditivo ignífugo, diamônio, nas propriedades da madeira, determinou-se a resistência à compressão paralela e realizou as análises termogravimétricas e de FT-IR.

A resistência à compressão paralela às fibras da madeira foi obtida e seguindo procedimentos da NBR 7190 (ABNT, 1997).

A análise termogravimétrica antes e após aplicação na madeira foi realizada em um aparelho DTG-60H Shimadzu, em atmosfera de gás nitrogênio, com vazão constante de 50 ml.min<sup>-1</sup> e taxa de aquecimento de 10 °C.min<sup>-1</sup> até temperatura máxima de 900 °C. Foram utilizadas amostras de madeiras reduzidas a partículas e selecionadas entre os conjuntos sobrepostos de peneiras de 40 e 60 *mesh*, sendo utilizada a fração que ficou retida na peneira de 60 *mesh*.

A espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das madeiras, utilizando o espectrômetro de modelo Varian FT-IR 660, por reflectância total atenuada (ATR) e os espectros de 256 varreduras, com resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e faixa de comprimento de onda de 400 – 4000 cm<sup>-1</sup>.

### **3.5. Análise estatística dos dados**

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software SISVAR 5.8 (FERREIRA, 2011).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO PIROLENHOSO E DA MADEIRA

#### 4.1.1 Extrato Pirolenhoso

**Tabela 3** – Valores médios dos parâmetros do extrato pirolenhoso

Parâmetro	Valor médio	Valor de referência epb106
Acidez (mg ácido acético/L)	7,8	3 – 7
Poder calorífico superior (Kcal/kg)	5.154	NI
Carbono (%)	55,90	NI
Hidrogênio (%)	5,29	NI
Nitrogênio (%)	1,67	NI
Enxofre (%)	0,125	NI
Carbono fixo (%)	29,97	NI
Materiais voláteis (%)	63,18	NI
Cinzas (%)	7,85	NI
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	NI
Viscosidade (cP)	1,00	NI
Teor de água (%)	87,0	NI
pH	3,49	2,5 - 4,5

Legenda: NI – não informado ou não realizado pela empresa

Fonte: O Autor.

Os valores dos parâmetros, daqueles informados pela empresa, estão de acordo com o relatório da composição química do extrato pirolenhoso, epb106. O epb106 é um produto 100% natural e sustentável, com processo de estabilização de 6 meses, utilizado para equalização e estabilização das moléculas orgânicas (EPB, 2020), garantindo a utilização adequada para proteção da madeira.

Na cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas foram os compostos orgânicos. Em maior área (%) foram observados o Siringol (2,6-dimetoxifenol), com 15,54%,

e os ácidos carboxílicos (ácido butanóico e o ácido acético), com 10,28% e 7,52%, respectivamente. Os compostos identificados do extrato pirolenhoso pelo método de CG-EM podem ser observados na tabela 1 contida no Anexo 1.

Há carência de informações técnico-científicas sobre o extrato pirolenhoso produzido no Brasil, principalmente no que diz respeito ao acondicionamento ao longo do tempo para sua equalização e estabilização (ALMEIDA et al., 2019).

Barbero-López et al. (2021), por exemplo, relatam diferentes níveis de ecotoxicidade em três extratos pirolenhosos obtidos a partir da madeira da espécie *Populus tremula*, coletados em diferentes temperaturas. A toxicidade pode ser atribuída a presença do alcatrão, apresentando propriedades como cheiro forte e coloração escura. Segundo o Relatório da Composição do EPB106 (2020), o uso do extrato pirolenhoso em relação ao produto bruto, ou seja, todos os condensáveis do processo da pirólise, atende as especificações e os teores de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) não detectados. Utilizado na agricultura, após a lavagem dos produtos, reduz os possíveis teores de HPAs presentes e, rapidamente, são degradados pela luz UV.

Mmojieje e Hornung (2015) verificaram que o extrato pirolenhoso, em concentrações acima de 20%, em água, tem propriedades biopesticidas, porém sem o efeito fitotóxico observado quando este é aplicado na forma concentrada.

Barbero-López et al. (2021) ressaltam que se deve atentar, também, a ecotoxicidade dos produtos, de base biológica, pois os efeitos ao meio ambiente e ao ser humano podem ser piores do que produtos encontrados comercialmente, pois a qualidade desses dependem da temperatura de obtenção, da matéria-prima utilizada e da fração do extrato obtido.

#### **4.1.2 Efeito da aplicação do extrato pirolenhoso nas propriedades da madeira**

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios da composição química estrutural e elementar da madeira em função dos tratamentos.

**Tabela 4** – Composição química da madeira (%) em função dos tratamentos

Tratamento	Madeira Testemunha	Madeira + 10% EP	Madeira + 20% EP	Madeira + 30% EP
Extrativos totais (%)	12,60 a	9,98 b	5,71 c	6,48 c
Lignina total (%)	28,91 a	28,70 a	27,50 a	29,92 a
Holocelulose (%)	58,49 c	61,32 b	66,78 a	63,59 b

Carbono (%)	53,1 a	52,9 a	50,7 b	51,0 b
Nitrogênio (%)	6,11 a	6,25 a	6,14 a	6,11 a
Hidrogênio (%)	0,12 a	0,14 a	0,12 a	0,13 a
Enxofre (%)	0,10 a	0,10 a	0,11 a	0,11 a
Oxigênio (%)	40,6 b	40,6 b	42,9 a	42,6 a

Legenda: EP (Extrato pirolenhoso)

Valores médios seguidos de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Tukey a 95% de probabilidade.

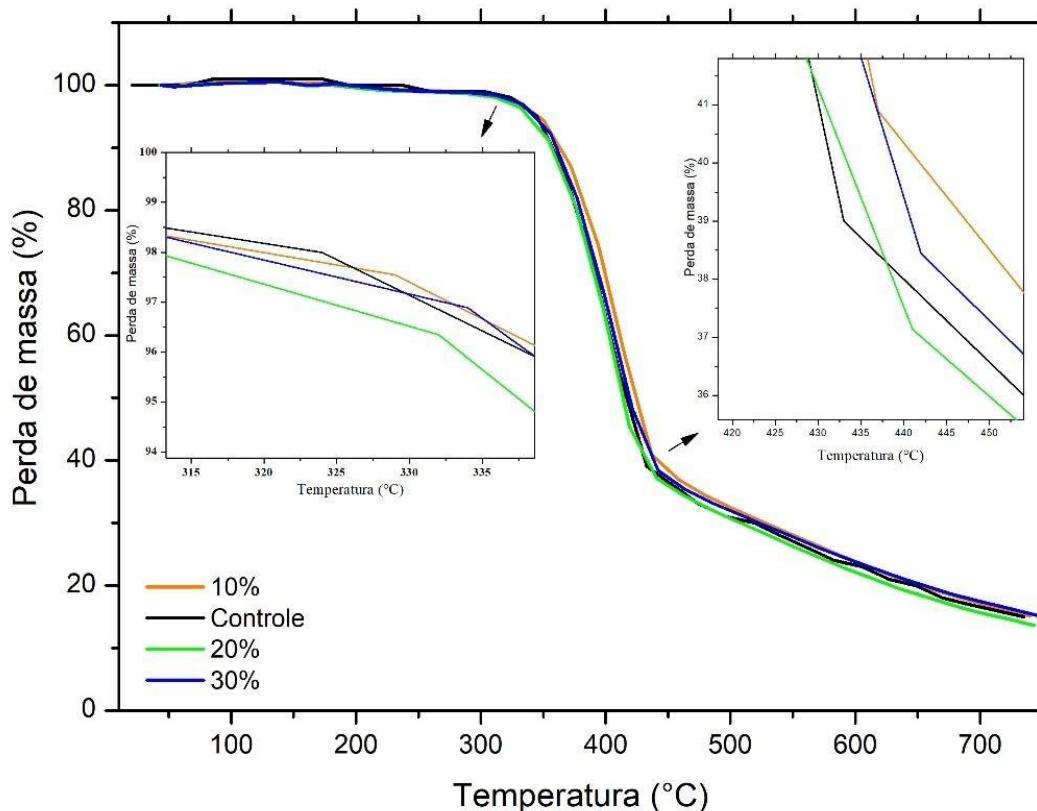
O teor de extractivos totais dos tratamentos com extrato pirolenhoso reduziu em relação à amostra controle. O teor de extractivos de madeira com 20% de extrato pirolenhoso, reduziu, em média, 54,7% em relação à amostra controle. Nota-se que não houve efeito significativo do percentual de extrato pirolenhoso no teor de lignina total das madeiras. O teor de holoceluloses aumentou, sendo o maior no tratamento 20% de EP com acréscimo, em média, de 14,2%, decorrente da redução do teor de extractivos totais, visto que essa variável foi obtida por diferença.

O alto valor de extractivos totais na amostra controle pode ter sido devido às peças de madeira terem apresentado alta concentração de nós e bolsas de resina, característico da espécie estudada.

A aplicação de 20% e 30% de extrato pirolenhoso reduziu os teores de carbono na madeira, provavelmente deve a maior quantidade de cinzas e também de compostos com maiores teores de oxigênio presentes no extrato. Os teores de hidrogênio, nitrogênio e enxofre não foram afetados significativamente pelas diferentes concentrações do extrato pirolenhoso aplicado sobre a madeira.

Os termogramas das amostras de madeira contendo o extrato pirolenhoso podem ser observados na Figura 4. Nota-se que até, aproximadamente, 300 °C as amostras se mantiveram estável termicamente, iniciando as maiores perdas de massa somente após essa temperatura, sendo expressiva para as madeiras contendo o extrato pirolenhoso.

**Figura 4** – Análise termogravimétrica da madeira *in natura* e com aplicação de diferentes concentrações de extrato pirolenhoso



Controle – Madeira *in natura*; 10% – Madeira tratada na concentração de 10%; 20% – Madeira tratada na concentração de 20%; 30% – Madeira tratada na concentração de 30%.

Fonte: O Autor.

As curvas de TG mostram uma semelhança entre as faixas de degradação térmica. Contudo, na faixa de 340 °C observou-se uma perda de massa maior para as madeiras com maiores percentuais de extrato pirolenhoso. A degradação térmica da madeira (controle) foi maior em relação as contendo o extrato pirolenhoso, exceto quando se aplicou 20%. Provavelmente, devido aos compostos fenólicos presentes no extrato pirolenhoso, os quais são mais estáveis e resistentes à degradação térmica nessa faixa de temperatura. Além disso, a amostra com 20% de extrato pirolenhoso apresentou menor teor de lignina, o que pode explicar essa maior perda de massa na faixa de 425 °C a 500 °C, que corresponde a degradação da mesma (COSTA et al., 2020)

Os espectros FTIR do controle e das madeiras tratadas com extrato pirolenhoso nas diferentes concentrações estão apresentados na Figura 5. O pico de 3322 cm<sup>-1</sup> representa a vibração do estiramento da ligação O-H correspondente, principalmente, de água, fenóis e ácidos carboxílicos (KUBOVSKÝ et al., 2020; BOER et al., 2021).

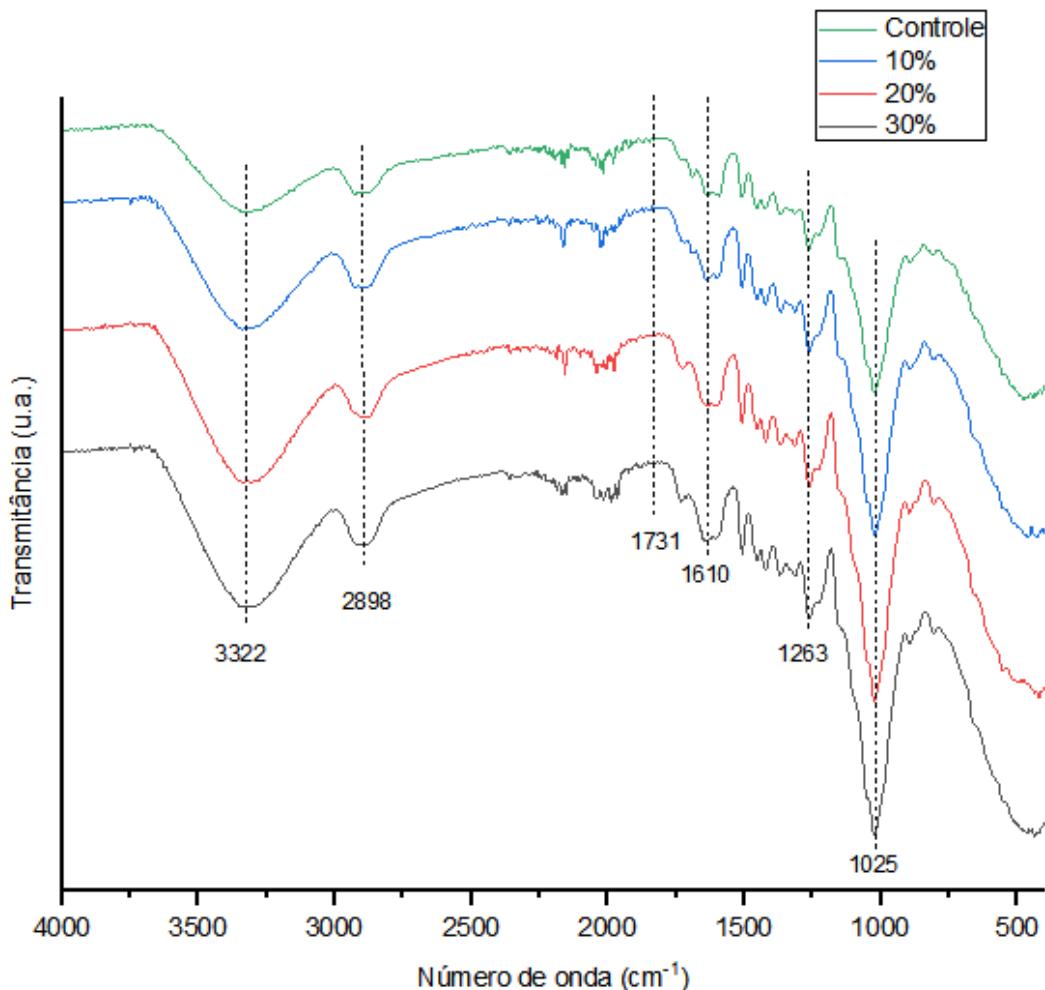
Foi observado um aumento nessa banda com o aumento da concentração do extrato pirolenhoso, que pode ser explicado pela presença de compostos fenólicos, como o 2,6-dimethoxyphenol, e compostos carboxílicos como ácido acético e ácido butanoico.

A banda próxima a  $2989\text{ cm}^{-1}$  indica estiramento de C-H de ligação CH e  $\text{CH}_2$  da celulose e hemiceluloses (KUBOVSKÝ et al., 2020). Nessa banda foi observado um leve aumento com aplicação do extrato pirolenhoso em relação à amostra controle, indicando aumento dos carboidratos da madeira, o que também foi observado na análise química estrutural.

Foi observado um aumento na banda de  $1731\text{ cm}^{-1}$  correspondente de C=O com a aplicação do extrato pirolenhoso, indicando o aumento de vários grupos funcionais contendo oxigênio, como grupos carboxílicos, carbonila e éster (SIKORA et al., 2018; HU et al., 2022). Esse aumento de oxigênio também foi observado pela análise elementar.

A banda de  $1610\text{ cm}^{-1}$  corresponde ao estiramento C=C. Observa-se um aumento nesse estiramento, o que pode ser explicado pela presença de componentes fenólicos do extrato pirolenhoso. Os picos entre  $1263\text{ cm}^{-1}$  e  $1025\text{ cm}^{-1}$  apresentam a vibração do estiramento C-O e de deformação angular de O-H, podendo ser a formação de novos álcoois, ácidos carboxílicos e ésteres, como o etanol e carboidratos. Foi observado um ligeiro aumento dessas bandas com aumento da concentração do extrato pirolenhoso.

**Figura 5** – Espectros de absorção na região do Infravermelho por Transformada de Fourier da madeira de *Pinus elliottii* em função dos tratamentos com 10%, 20% e 30% de extrato pirolenhoso

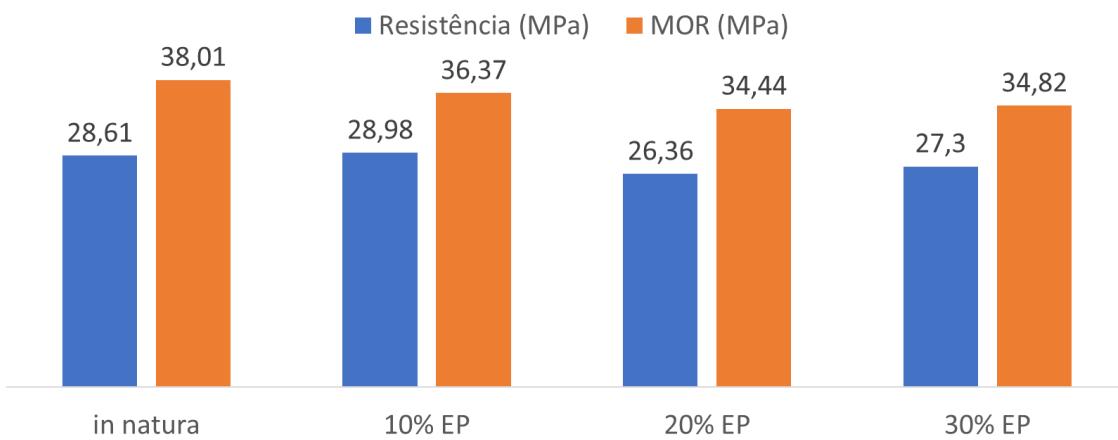


Fonte: O Autor.

Na figura 6 são apresentados os valores médios da resistência mecânica à compressão paralela as fibras e o módulo de ruptura das madeiras sem e com tratamento (extrato pirolenhoso).

A aplicação de 10% ocasionou um aumento médio de 1,29% em relação à testemunha, enquanto os tratamentos com 20 e 30% de EP um decréscimo de 7,84% e 4,6%, respectivamente. A redução da resistência mecânica pode ser explicada pela formação residual de ácido acético, o componente majoritário do extrato pirolenhoso. Em alguns casos a leve diminuição da resistência mecânica pode ser devido a redução da quantidade de fibras por volume (fibras de suporte de carga) e possivelmente a diminuição do comprimento das cadeiras de celulose (HUANG et al., 2018; BAUFLEUR, 2019).

**Figura 6** – Resistência à compressão paralela (MPa) e Módulo de ruptura (MOR) da madeira (in natura) e tratada com extrato pirolenhoso em diferentes concentrações



Legenda: EP – Extrato pirolenhoso

Fonte: O Autor.

Schulz et al. (2018) verificaram ligeiro aumento da resistência mecânica da madeira pra menores aplicações de uma solução do álcool furfurílico (álcool furfurílico, álcool etílico, água e ácido cítrico) sendo 4,52% e 12,83%, respectivamente para 15% e 25%, enquanto que na concentração mais elevada de 50% o acréscimo foi e apenas de 0,48%.

Valores médios do módulo de ruptura (MOR) apresentados (Figura 4), como esperado, seguindo a tendência da resistência à compressão paralela, não houve efeito significativo da aplicação do extrato pirolenhoso.

Estudos de Huang et al. (2018) com anídrico acético e vinagre comercial (ácido acético a 10%) como pré-tratamento para tratamentos térmicos da madeira, visando reduzir a higroscopicidade da madeira, mostraram que a acetilação não alterou as propriedades mecânicas da madeira, no entanto promoveram aumento da estabilidade dimensional. Chao et al. (2020), também, não encontraram diferenças significativas no módulo de ruptura da madeira tratada pelo método de acetilação.

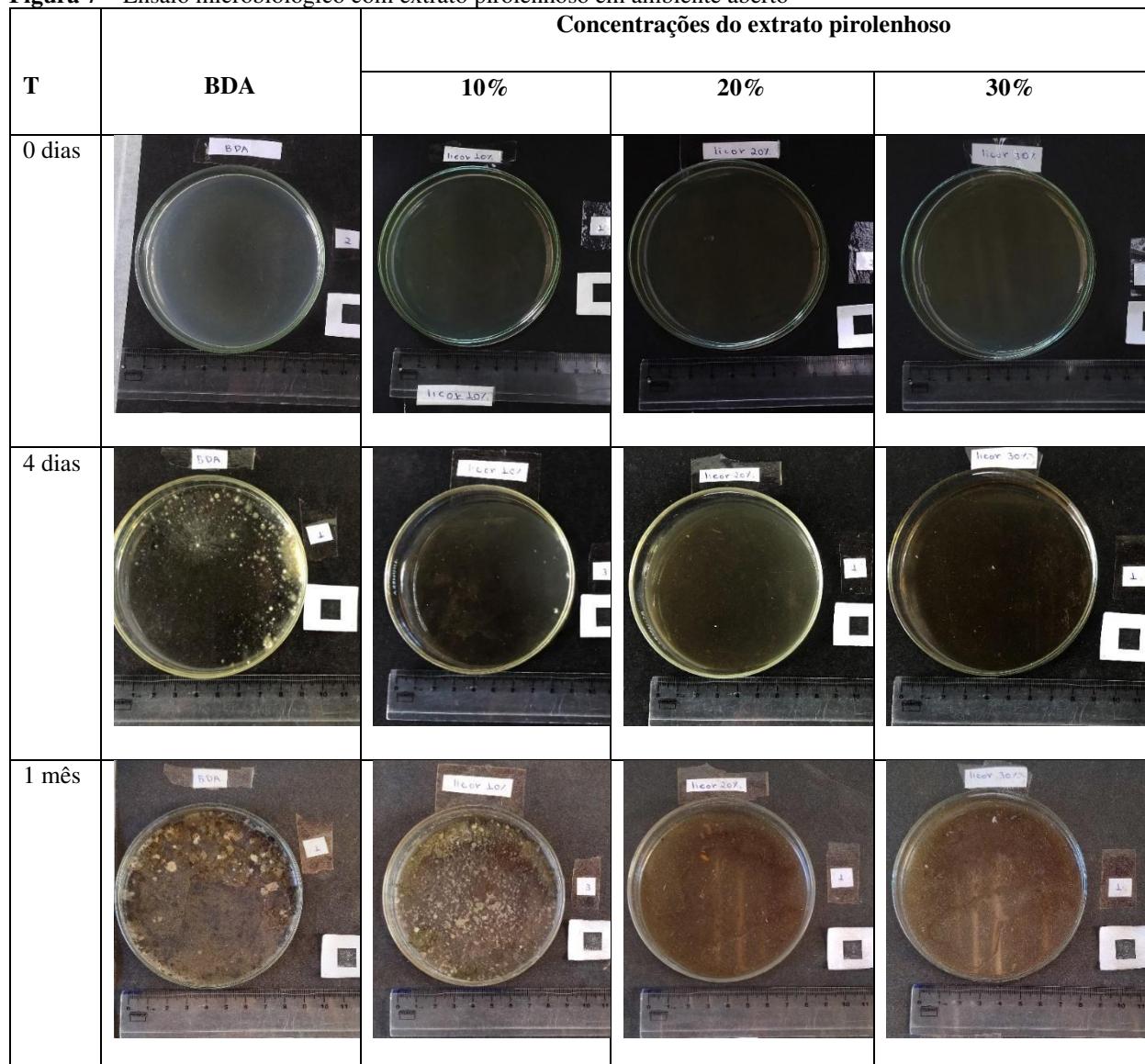
## **4.2 EXTRATO PIROLENHOSO EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES COMO AGENTE TERMICIDA E FUNGICIDA**

### **4.2.1 Ensaio de atividade microbiológica**

Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os potenciais antimicrobianos do extrato pirolenhoso nas diferentes concentrações (10, 20 e 30%), em duas condições de ambiente (aberto e fechado), em função do tempo de exposição.

Nota-se que após trinta dias que as madeiras tratadas com 20% e 30% de extrato pirolenhoso tiveram pouca ou nenhuma atividade microbiana, independente do ambiente. Por outro lado, as madeiras com 10% de extrato pirolenhoso tiveram alta atividade microbiana já nos primeiros 4 dias de exposição, nos dois ambientes.

**Figura 7** – Ensaio microbiológico com extrato pirolenhoso em ambiente aberto



Legenda: T – Tempo

BDA: amostra pura; 10%: concentração de 10% de EP; 20% concentração de 20% de EP; 30% concentração de 30% do EP.

Fonte: O Autor.

**Figura 8** – Ensaio microbiológico com extrato pirolenhoso em ambiente fechado

Concentrações do extrato pirolenhoso		

T	BDA	10%	20%	30%
0 dias				
4 dias				
1 mês				

Legenda: T – Tempo de exposição

BDA: amostra pura; 10%: concentração de 10% de EP; 20% concentração de 20% de EP; 30% concentração de 30% do EP.

Fonte: O Autor.

O potencial antimicrobiano ocorre devido à presença do ácido acético e dos compostos do furfural presentes no extrato pirolenhoso, os quais são potentes pesticidas naturais (BARBERO-LÓPEZ et al., 2019), fato esse observado na análise de CG-EM. A estrutura química desses compostos atua como trocadores de prótons diminuindo o gradiente de pH por meio da membrana citoplasmática, devido a acidificação citoplasmática causando a morte celular microbiana (SOARES et al., 2021). Os resultados encontrados condizem sobre a atividade antimicrobiana do extrato pirolenhoso condizentes na literatura (MEDEIROS, 2018).

Os compostos fenólicos também tem potencial antimicrobiano e estão presentes no extrato pirolenhoso, podendo contribuir para o desenvolvimento de revestimentos funcionais (PORTO et al., 2021). É importante ressaltar que a atividade antibacteriana e antifúngica do

extrato não remete somente a um grupo químico, mas a sua complexidade de compostos como os grupos ácidos e os grupos fenólicos. Além disso, o alto percentual de acidez, altas concentrações de grupos carbonilas e o baixo pH (MATTOS et al., 2019) corroboram para este potencial.

Neste sentido, o extrato pirolenhoso é uma alternativa na formulação de compostos antimicrobianos, fato já discutido por Souza et al. (2021) que ressalta a capacidade de inibição desse à várias espécies bacterianas, incluindo até as reconhecidas por problemas da saúde bucal.

#### **4.2.2 Ensaio com cupins**

Na tabela 5 estão apresentados os valores médios da quantidade de orifícios, o índice de mortalidade e danos do ensaio biológico com cupins.

Houve diferença significativa entre a testemunha e os tratamentos de 20% e 30%, porém não foi observado diferença significativa entre os tratamentos com extrato pirolenhoso. A madeira sem adição de extrato pirolenhoso, testemunha, apresentou maior quantidade de orifícios e menor taxa de mortalidade, com uma tendência a dano profundo.

A madeira tratada com 10% de EP apresentou variação no número de orifícios, de um a três, mortalidade de 55% e um dano variando de moderado para acentuado. A madeira tratada com 20% de EP apresentou uma variação de um a dois orifícios, mortalidade de 57,5% e um dano moderado. Enquanto que a madeira com 30% do extrato pirolenhoso teve menor quantidade de furos, com valor de dano entre superficial e o moderado, tendendo a uma alta mortalidade com cerca de 62%.

Por ser uma análise é subjetiva, uma vez que depende da observação e da interpretação de três avaliadores como preconiza a norma, foi utilizado a densitometria de raios-X para corroborar com a avaliação (Figura 9).

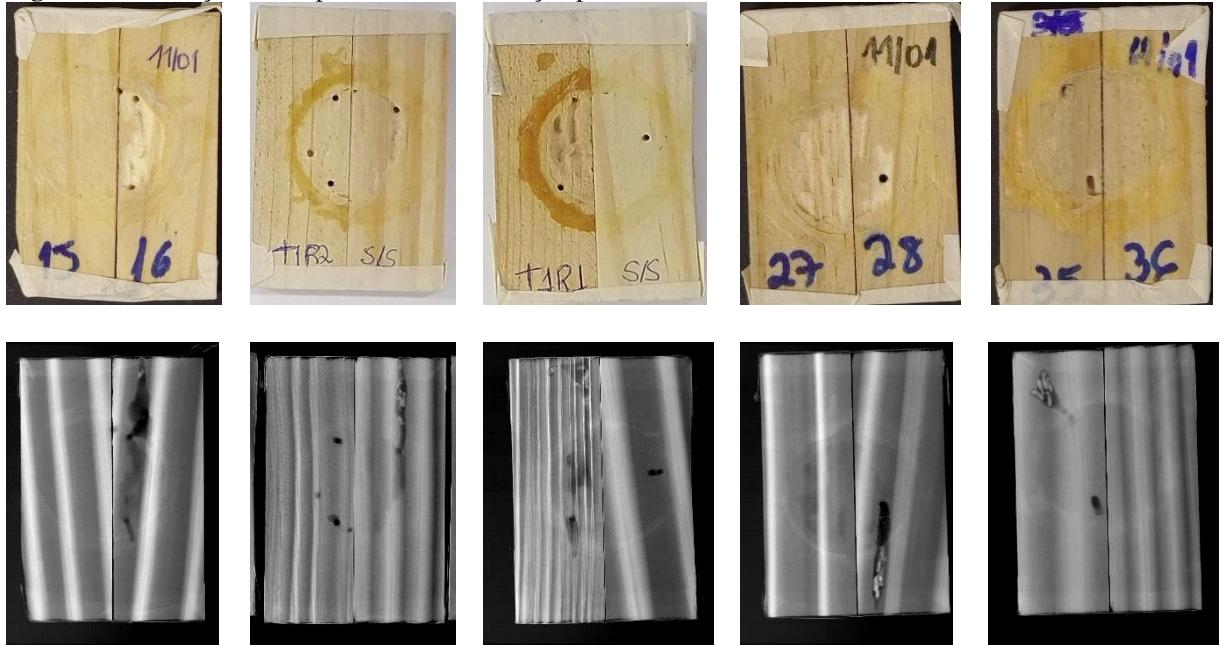
**Tabela 5** – Valores médios da quantidade de orifícios, o índice de mortalidade e danos do ensaio biológico com cupins

Tratamento	Nº Orifícios	Mortalidade (%)	Danos (%)
Testemunha ( <i>in natura</i> )	> 3	49,58	3,21 ± 0,24 a
10% extrato pirolenhoso	1 e 3	55,00	2,62 ± 0,24 ab
20% extrato pirolenhoso	1 e 2	57,50	2,16 ± 0,24 b
30% extrato pirolenhoso	0 e 1	61,67	1,87 ± 0,24 b

Valores médios seguidos de mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Fonte: O autor.

**Figura 9 – Avaliação visual pela norma x Avaliação pela densitometria de raios-X**



Fonte: O Autor.

A utilização da técnica de densitometria de raios-X mostrou-se eficiente para avaliar o índice de mortalidade, uma vez que foi possível observar o interior das galerias formadas pelos cupins e os respectivos danos internos a madeira.

Vale ressaltar que extrato pirolenhoso foi aplicado na forma de pincelamento, ou seja, apenas na superfície da madeira, demonstrando resultados satisfatórios de mortalidade, evidenciando, nesse estudo, que não há necessidade de embeber ou saturar a madeira, conforme estudos realizados por Boer et al. (2021), por exemplo, que concluíram que é necessário a ingestão da madeira com o extrato pirolenhoso para ter eficiência na mortalidade.

Corroborando com o presente estudo, Kadir et al. (2021) observaram que independente da dosagem química o extrato pirolenhoso apresenta atividade repelente e quanto maior a concentração maior será essa atividade.

Mmojieje e Hornung (2015) estudaram a aplicação do extrato pirolenhoso como inseticida de plantas na indústria agrícola e concluíram que a diluição de 10% é eficaz, tendo mortalidade de 92,5% e 100% para pulgões e ácaros vermelhos, respectivamente, após 48 dias de incubação.

Boer et al. (2021) usando papel filtro tratado, por imersão, com extrato pirolenhoso, atribuíram o efeito de repelência ao odor defumado do líquido e que a concentração de apenas

10% causou mortalidade completa. Os resultados encontrados por Kadir et al. (2021) também evidenciaram em sua experimentação em papel filtro, que a concentração de 10% tem alta atividade termicida, sendo essa ligada ao alto teor de fenólicos com propriedades antialimentares ou inseticidas, atuando no sistema nervoso e a respiração celular.

Como os estudos são recentes e a literatura é escassa sobre a aplicação do extrato pirolenhoso na madeira, pode ser atribuído para a discussão a analogia com os tratamentos ácidos, como a aplicação do componente majoritário do extrato (ácido acético) e aos compostos fenólicos. Já foram verificados estudos que a acetilação aumentou a resistência da madeira contra cupins e brocas marinhas (MANTANIS, 2017), sendo esta ação inibida por causa da modificação dos polímeros impossibilitando a penetração na parede celular. Além disso ocorre o bloqueio da difusão dentro da parede celular pela redução do teor de umidade de equilíbrio da madeira (HUNT et al., 2018).

Os tratamentos ácidos mostram uma maior resistência contra cupins, tendo efeito biocida. Alguns autores mencionaram que isso pode ocorrer devido a diminuição dos números de protozoários simbióticos em algumas espécies de cupins expostos à madeira acetilada ou a tratamentos ácidos criando um “efeito de fome”, reduzindo a incidência do ataque (FIGUEIREDO et al., 2019; 2020; TREU et al., 2020).

#### **4.2.3 Fungo**

Na tabela 6 estão apresentados os valores médios da perda de massa das madeiras (testemunha e tratada) em função dos tratamentos.

**Tabela 6** – Valores médios da perda de massa após a exposição ao fungo

Tratamento	Perda de Massa (%)
Testemunha	2,95 ± 0,41 a
10% Extrato pirolenhoso	2,21 ± 0,41 a
20% Extrato pirolenhoso	1,62 ± 0,41 b
30% Extrato pirolenhoso	1,83 ± 0,41 b

Valores médios seguidos de mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

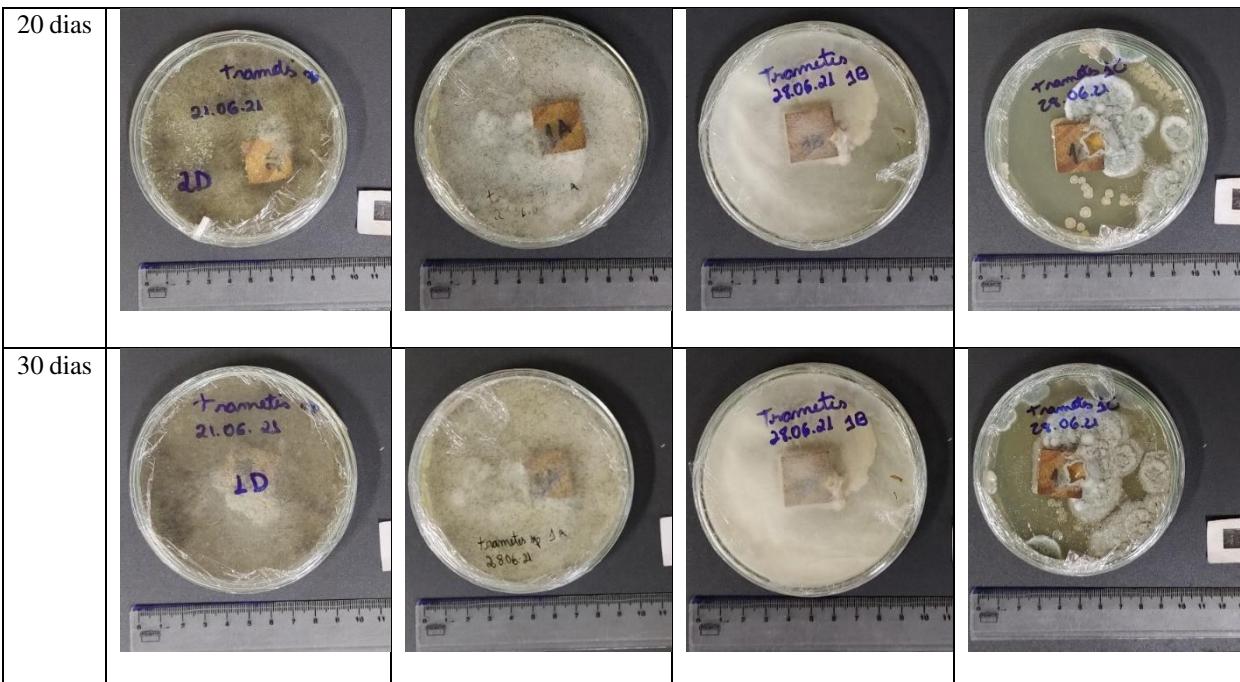
Fonte: O Autor.

Não houve diferença significativa entre a madeira (testemunha) e a tratada com 10% de extrato pirolenhoso quanto a perda de massa por fungos. Essas, diferiram das tratadas com 20% e 30% de extrato pirolenhosos, as quais tiveram menores perdas de massa.

Vale ressaltar que o experimento não foi conduzido até o final devido a uma contaminação do fungo, o que inviabilizou a análise final do experimento (Figura 10). Entretanto, foi observado que o aumento da concentração do extrato pirolenhoso reduziu a perda de massa, tendo as madeiras tratadas com 20% e 30% do EP mais eficazes ao decaimento fúngico.

**Figura 10** – Ensaio biológico com fungo

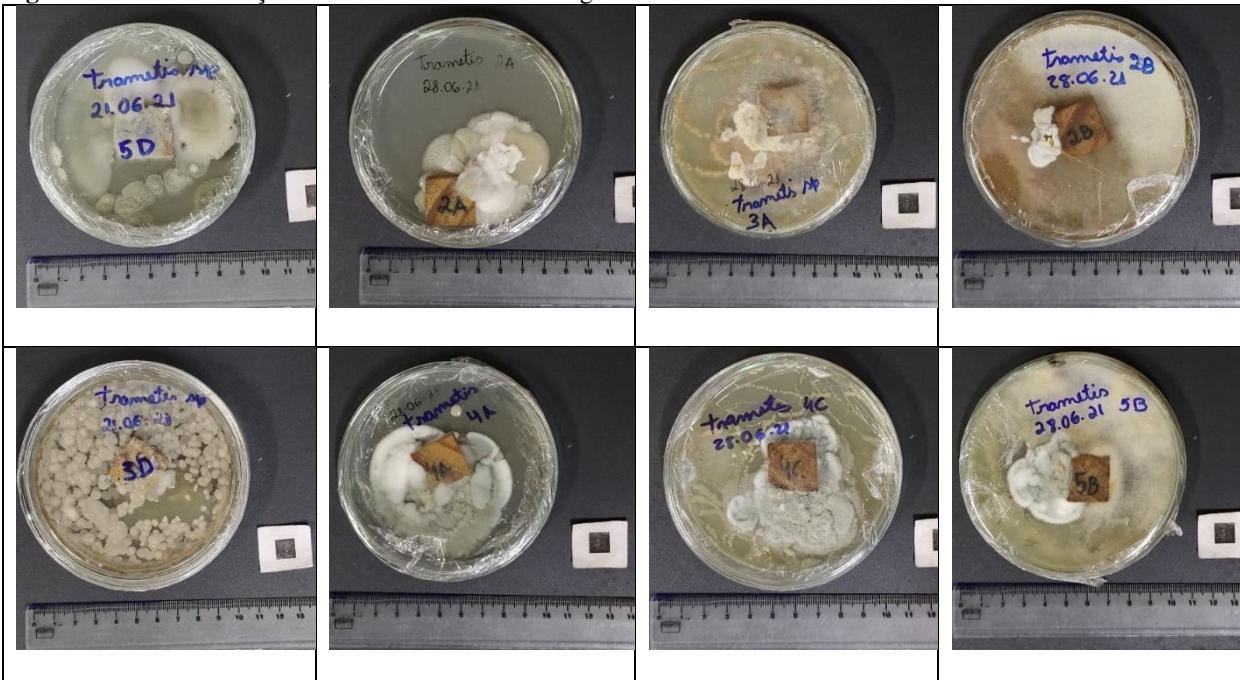
T	Controle	Concentrações do extrato pirolenhoso		
		10 %	20 %	30 %
0 dia				
5 dias				
13 dias				



Fonte: O Autor.

Nota-se que até a primeira semana foi possível observar a atividade fúngica, porém após esse período observa-se que alguns tratamentos apresentaram outras atividades, consequentemente a inatividade fúngica e a viabilidade do ensaio (Figura 11). De modo geral, em aproximadamente, 5 dias já foi possível observar a contaminação do fungo e a interferência no ensaio.

**Figura 11 – Contaminação do ensaio da atividade fúngica.**



Fonte: O Autor.

Apesar da contaminação ocorrida no presente estudo, segundo Boer et al. (2021) e Hu et al. (2022) o extrato tem eficácia na restrição do crescimento do fungo de podridão branca *T. versicolor*, devido ao efeito sinérgico dos vários compostos químicos como o ácido propiônico, ácido acético e o furfural.

Compostos como o guaiacol (2-methoxiphenol), 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl), 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-2-propanone e 4-hydroxy-3-methoxy-benzoic, identificados pela técnica de CG-EM corroboram para a capacidade antifúngica observada no extrato pirolenhoso.

A eficácia do extrato pirolenhoso pode ter sido pela influência do processo de acetilação. Este fenômeno melhora a resistência biológica contra o decaimento fúngico, causando exclusão da umidade da parede celular da madeira (HUANG et al., 2018). Segundo Hunt et al. (2018), o mecanismo de resistência a degradação fúngica ocorre devido: (1) as hemiceluloses acetiladas não são apropriadas para alimentação; (2) os fungos são incapazes de penetrar na parede celular porque os microporos estão bloqueados pela modificação química e (3) a difusão dentro da parede celular é inibida devido a redução da higroscopicidade, consequentemente a diminuição do teor de umidade de equilíbrio da madeira.

De acordo com Beck et al. (2018), a difusão dentro da parede celular é inibida devido a redução da higroscopicidade, consequentemente a diminuição do teor de umidade de equilíbrio da madeira, sendo o mais provável para explicar a resistência ao decaimento fúngico, o qual previne a difusão de íons que forma uma rede de transportes contínuas dentro das paredes celulares que impede a difusão de agentes químicos fúngicos.

Para Rowell (2020) o mecanismo de eficácia não é baseado apenas na toxicidade da acetilação e essa precisa ser melhor estudado, pois a umidade também pode interferir visto que está presente na parede celular da madeira. Os autores observaram eficácia contra o ataque fúngico nas madeiras acetiladas com 20%.

Huang et al. (2018), em trabalho realizado, utilizando como tratamento o vinagre comercial (ácido acético 10%), observaram que esse foi suficiente para proteger a madeira, reduzindo o ataque fúngico de podridão branca em relação a testemunha, bem como da madeira tratada termicamente.

#### **4.3 ENSAIOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIOS**

Para avaliar a eficácia do extrato pirolenhoso como fonte ácida para o agente carbonizador (aditivo diamônio), ou seja, compostos com propriedades retardadoras de chama,

esses foram ensaiados quanto a propagação da chama e teste de combustibilidade, de acordo com os tratamentos.

#### 4.3.1 Análise de cor

Na tabela 7 são apresentados os índices colorimétricos, no sistema CIELab, das madeiras de pinus em função dos tratamentos. Foi observado reduções significativas nas coordenadas de cor das madeiras tratadas com extrato pirolenhoso em relação à testemunha, nos valores de L (100: claro; 0 escuro). Foi observado diferença significativa nas coordenadas da tonalidade (h) das madeiras testemunha em comparação com os revestimentos 1 e 2 (amarelo claro) em relação às madeiras tratadas com revestimentos 3 e 4 (amarelo alaranjado). Vale salientar que, variação não foi expressiva e pode variar em função do observador e da fonte luminosa.

**Tabela 7** – Os índices colorimétricos da madeira testemunhas e dos tratamentos com extrato pirolenhoso com adição do aditivo químico

Tratamento	Formulação	L	C	H	Cor estimada	ΔE*	Classificação
Testemunha	Madeira <i>in natura</i>	66,27 a	28,8 ab	69,33 a	Amarelo Claro	---	---
Revestimento 1	20% EP + 3% aditivo	49,45 b	27,5 b	63,07 b	Amarelo-Alaranjado	16,6	Muito Apreciável
Revestimento 2	20% EP + 5% aditivo	52,55 b	28,53 ab	64,70 b	Amarelo-Alaranjado	13,6	Muito Apreciável
Revestimento 3	30% EP + 3% aditivo	50,17 b	31,12 a	56,13 c	Amarelo-Alaranjado	17,7	Muito Apreciável
Revestimento 4	30% EP + 5% aditivo	51,15 b	30,63 a	56,17 c	Amarelo-Alaranjado	17,0	Muito Apreciável

Valores médios seguidos de mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade

ΔE\* = impressão global da cor

A fotoquímica da lignina e extractivos influenciam na coloração mais escura, o que conferem os tons de amarelo da madeira (SOUZA et al., 2019; MARINI et al., 2021). Corroborando com a afirmação anterior, a análise da química estrutural da madeira tratada com concentração de extrato pirolenhoso de 20% (revestimento 1 e 2) resultou em 5,71% e 27,5% em extractivos totais e lignina total, respectivamente. Aumentando a concentração para 30% do extrato pirolenhoso (revestimento 3 e 4), houve um ligeiro aumento nos teores de extractivos totais e lignina total em 6,48% e 29,92%, respectivamente.

A mudança de coloração, também, é explicada a partir dos resultados obtidos pela técnica de FT-IR, que evidenciou aumento dos grupos cromóforos (carbonila e carboxila), os quais também podem alterar a coloração da madeira. No presente estudo, verificou-se que, as madeiras com maiores concentrações desses componentes apresentaram tonalidade mais escura.

A impressão global da cor  $\Delta E^*$  foi classificado como “Muito Apreciável”, mesmo com a leve alteração da cor natural da madeira pelo extrato pirolenhoso.

A característica visual é um importante parâmetro, geralmente formulados padrões comerciais para madeira, como “padrão mogno” e “padrão cerejeira” (MELO et al., 2013). A madeira natural foi classificada como amarelo claro e a aplicação do extrato pirolenhoso promoveu uma leve alteração da cor que passou a ser classificada como amarelo-alaranjado. No entanto, salienta que essa mudança é pouco expressiva e depende do observador e a influência da luminosidade utilizada (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI, 2018). No entanto, vale mencionar que caso houve uma mudança drástica de coloração da madeira, essa poderia ser tão aceita no mercado tradicional de madeiras que utilizam o pinus, por exemplo, conhecida por sua coloração clara.

Além disso, deve-se considerar que a aplicação de qualquer produto independente da substância e/ou tratamento, pode ocasionar alteração da cor original da madeira.

#### **4.3.2 Ensaio superficial de propagação de chamas (*Schlyter modificado*)**

Na Tabela 8 estão apresentados os valores médios da perda de massa e tempo de chama em função dos tratamentos.

A madeira testemunha teve perda de massa, em média, de 25,18% e ignição aos 10 minutos com espalhamento da chama e produção densa de gases (fumaça) a partir de 12 minutos.

Inda para a madeira testemunha, nota-se que o momento que teve chama visível de alta intensidade (com espalhamento da chama e produção de fumaça) foi no período de 8 e 12 minutos, permanecendo essa chama mesmo após o limite de ensaio de 20 minutos.

Os revestimentos 1, 2, 3 e 4 com 0,40%, 0,75%, 0,57% e 0,60% de perda de massa, respectivamente, todos produzindo pouca chama visível, entre 12 e 15 minutos, e sem espalhamento da chama e formação de gases (fumaça).

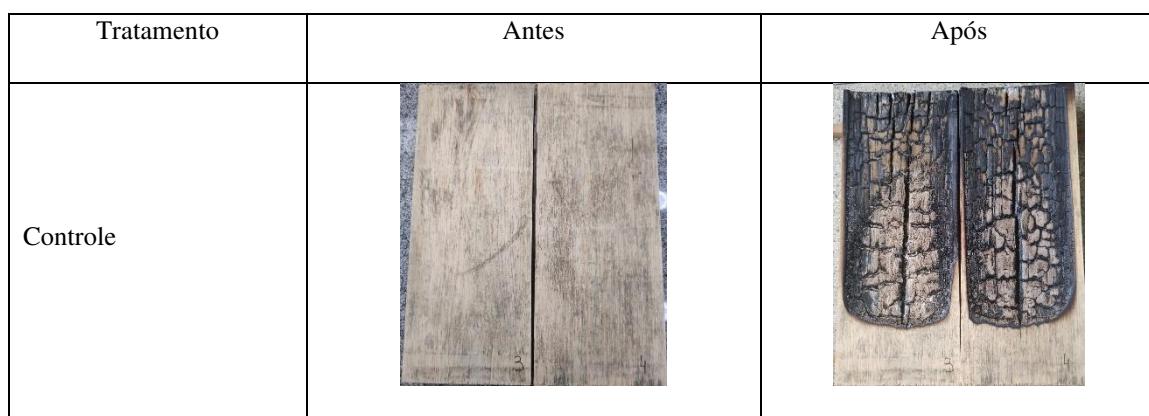
O revestimento 4 produziu gases (fumaça) e chama visível entre 13-15 minutos, provavelmente devido a presença de nós e concentração de resina.

**Tabela 8** – Os valores médios da perda de massa e do tempo de chama visível

Tratamento	Formulação	Perda de massa (%)	Início da Chama visível e propagação
Testemunha	Madeira <i>in natura</i>	25,18	8-12 minutos.
Revestimento 1	20% EP + 3% aditivo	0,40	> 15 minutos
Revestimento 2	20% EP + 5% aditivo	0,75	> 15 minutos
Revestimento 3	30% EP + 3% aditivo	0,57	> 15 minutos
Revestimento 4	30% EP + 5% aditivo	0,60	13 -15 minutos

Fonte: O Autor.

Nota-se que independente do percentual de extrato pirolenhoso e aditivo ignífugo, aplicando na madeira, que a perda de massa foi bem menor em relação a testemunha, assim como o tempo de propagação, os quais foram superiores. Os revestimentos retardaram a chama e tempo de duração com uma ligeira liberação de gases e inexpressiva perda de massa, indicando que o tratamento foi eficiente quanto à redução da propagação de chamas. Vale salientar que as regiões de nós na madeira foram os locais onde se observou uma chama visível e também liberação de gases, devido a presença de extractivos em maior quantidade, bem como a composição do mesmo (Figura 12 e 13).

**Figura 12** – Aspecto visual das madeiras antes e após o teste de propagação de chamas

Revestimento 1		
Revestimento 2		
Revestimento 3		
Revestimento 4		

Fonte: O Autor.

Efeito similar foi observado por Gaff et al. (2019) com o uso de revestimento à base de água (diamônio), os quais observaram redução, em relação a testemunha, de 92% na perda de massa e diminuição de até 89% nos valores da taxa de queima.

Mantanis et al. (2019) também encontraram resultados satisfatórios utilizando compostos à base de fósforo, como o diamônio, devido o mesmo fornece uma camada protetora que reduz a propagação da chama e consequentemente a perda de massa.

**Figura 13 – Amostra controle com a propagação de chama e chama visível durante o ensaio.**



Fonte: O Autor.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os valores médios de temperatura máxima alcançada (°C) no centro da peça de madeira ensaiada no teste de propagação de chama.

**Tabela 9 – Valores médios da temperatura máxima alcançada (°C) no centro da peça de madeira ensaiada no teste de propagação de chama**

Tratamento	Formulação	Posição termopar no sentido longitudinal		
		Superior	Média	Inferior
Testemunha	Madeira in natura	71,7 (26,4) *	85,6 (13,6)	61,4 (11,2)
Revestimento 1	20% EP + 3% aditivo	32,0 (0,7)	34,1 (0,7)	36,3 (2,5)
Revestimento 2	20% EP + 5% aditivo	31,8 (1,0)	35,0 (1,7)	33,8 (0,6)
Revestimento 3	30% EP + 3% aditivo	32,4 (1,1)	35,0 (2,9)	31,8 (0,9)
Revestimento 4	30% EP + 5% aditivo	34,6 (2,5)	37,3 (5,3)	33,1 (0,3)

\*Valores em parênteses são referentes a desvio padrão

Fonte: O Autor.

**Tabela 10** - Valores médios do acréscimo da temperatura máxima alcançada (°C) no centro da peça de madeira ensaiada no teste de propagação de chama

Tratamento	Formulação	Posição termopar no sentido longitudinal		
		Superior	Média	Inferior
Testemunha	Madeira in natura	43,6 (25,5) *	54,2 (13,0)	32,1 (11,0)
Revestimento 1	20% EP + 3% aditivo	4,8 (0,7)	7,7 (1,1)	9,4 (3,1)
Revestimento 2	20% EP + 5% aditivo	2,7 (1,0)	5,8 (3,3)	4,8 (1,8)
Revestimento 3	30% EP + 3% aditivo	3,8 (1,7)	6,8 (1,8)	3,0 (0,6)
Revestimento 4	30% EP + 5% aditivo	5,3 (3,3)	7,0 (4,3)	2,9 (0,8)

\*Valores em parênteses são referentes a desvio padrão

Fonte: O Autor.

Observou-se que o tratamento testemunha foi o que apresentou uma maior temperatura, atingindo máximas de temperatura média de 71,7 °C, 85,6 °C e 61,4 °C para altura superior, média e inferior, respectivamente. Apresentando acréscimo médio da temperatura em 43,6 °C, 54,2 °C e 32 °C para a altura superior, média e inferior, respectivamente. Os revestimentos 1 e 2 atingiram valores médio de temperatura entre 31,8 e 33,8 °C e um acréscimo médio da temperatura de até 9,4 °C. Os revestimentos 3 e 4 alcançaram temperatura máxima entre 31,8 e 37,3 °C e o acréscimo médio da temperatura de até 7 °C (Tabelas 9 e 10).

Analizando o desvio padrão, a amostra testemunha apresentou maiores desvios, em relação aos acréscimos de temperaturas, devido ao espalhamento de chamas. Em toda a estrutura, a altura média, foi a que apresentou maiores temperaturas, isto se explica devido a localização do aparato que se posiciona um pouco abaixo da altura média. Logo em seguida a altura superior da testemunha apresentou maiores temperaturas, explicado pelo espalhamento das chamas. Entre os revestimentos não ocorreu notáveis diferenças, entretanto observados alguns acréscimentos de temperatura. Isto pode ser explicado devido a presença de nós na madeira e bolsas de resinas, o que aumenta o teor de voláteis da madeira, consequentemente sua inflamabilidade.

A aplicação do revestimento funcionou como uma barreira isolante, reduzindo a quantidade de calor transferida para a estrutura da madeira. Pham et al. (2019) relatam que a presença dos compostos de fósforos e fósforo-nitrogênio são altamente eficazes contra o fogo, pois retardando a chama dão estabilidade térmica a madeira. Isto é devido a decomposição do

fosfato diamônio, os quais formam camadas de fósforo ou formando  $P_4O_{10}$  (ou  $P_2O_5$ ) que funcionam como barreira.

Para Hautamäki et al. (2020) ocorre liberação de água e amônia, os quais diluem os gases voláteis da combustão, induzindo a inibição da chama. Fato esse corroborado pelos estudos realizados por Park et al. (2020) utilizando o fosfato diamônio, em composição como retardante de chama, os quais observaram diminuição do comprimento e da área carbonizada.

Os resultados obtidos com a aplicação do extrato pirolenhoso junto com aditivo ignífugo, utilizado nesse presente estudo, permite concluir que os mesmos retardam a propagação da chama, porém não deixa a madeira imune ao fogo.

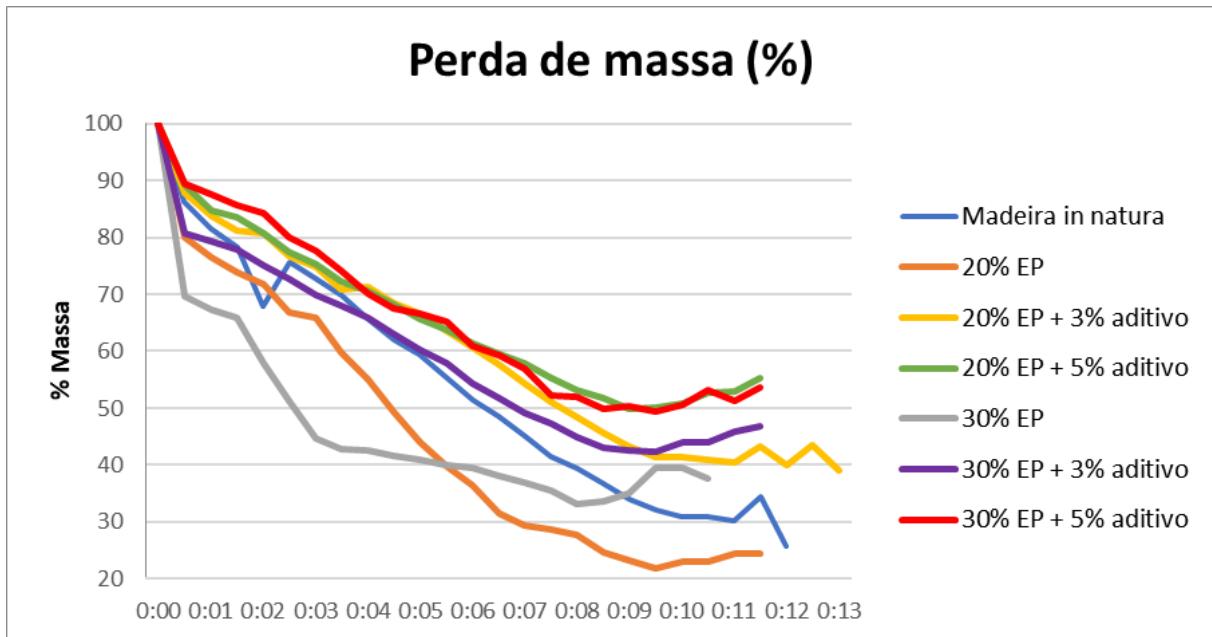
Para Hautamäki et al. (2020) salientam que esses são aspectos importantes considerando cenários reais de incêndios em ambientes construídos. Park et al. (2020) preconizam que o retardante de chama evita a combustão contínua ou a propagação da chama mesmo quando o material combustível esteja em contato com a chama direta, restringindo as reações.

#### **4.3.3 Teste de combustibilidade**

Na Figura 14 apresentadas a perda de massa, no ensaio de combustibilidade, da madeira testemunha e das tratadas com extrato pirolenhoso na concentração de 20 e 30% e estes com a adição do diamônio nas concentrações de 3 e 5%.

A amostra *in natura* e o tratamento com 20% de extrato pirolenhoso ao final do ensaio permaneceu com 20% da massa inicial, enquanto que o tratamento com 30%, permaneceu com 40% da massa. Para os tratamentos com o aditivo químico, foi observado que todos permaneceram com cerca de 50% da massa inicial.

**Figura 14** – Perda de massa da amostra *in natura* e dos tratamentos com extrato pirolenhoso e aditivo diamônio em diferentes concentrações



Fonte: o Autor

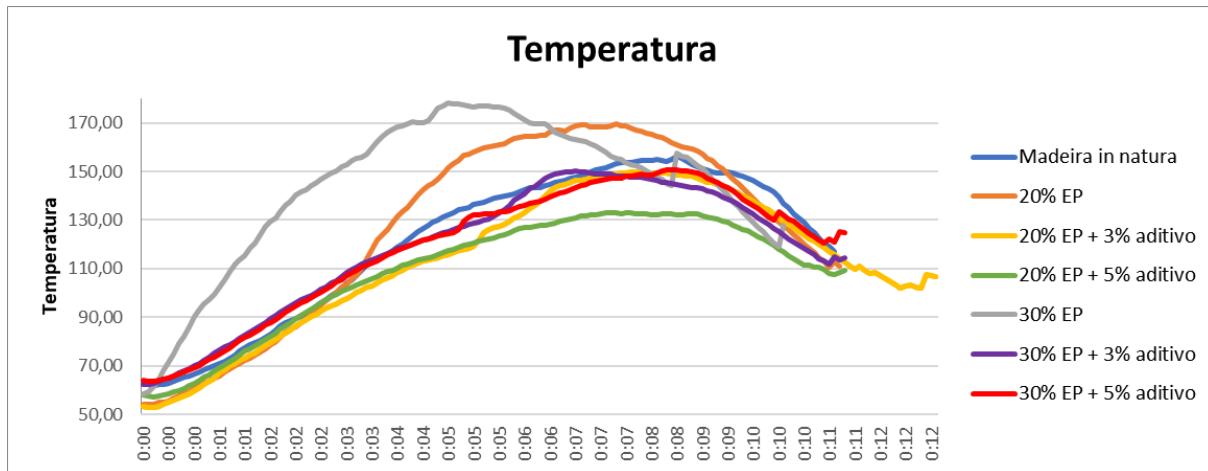
Na Figura 15 apresentadas o aumento da temperatura, no ensaio de combustibilidade, da madeira testemunha e das tratadas com extrato pirolenhoso na concentração de 20 e 30% e estes com a adição do diamônio nas concentrações de 3 e 5%.

A madeira *in natura* alcançou temperatura máxima de 156 °C após sete minutos de ensaio. As madeiras tratadas com 20 e 30% de extrato pirolenhoso obtiveram temperaturas máximas de 169 e 178 °C, após transcorridos 7 e 5 minutos de ensaio, respectivamente.

Já as madeiras revestidas com 20% de extrato pirolenhoso e com 3 e 5% de aditivo químico alcançaram temperaturas máximas de 149 e 132 °C, após 8 minutos de ensaio, respectivamente.

Os tratamentos com 30% de extrato pirolenhoso e com 3 e 5% de aditivo diamônio alcançaram temperaturas máximas de 148 e 140 °C, aos 8 e 10 minutos de ensaio, respectivamente.

**Figura 15** – Temperatura da madeira *in natura* e dos tratamentos com extrato pirolenhoso e aditivo diamônio em diferentes concentrações



Fonte: o Autor

As madeiras tratadas apenas com o extrato pirolenhoso, ou seja, sem a aplicação de aditivos, alcançaram as maiores temperaturas em relação à amostra *in natura*. Porém, com a adição do aditivo químico, as temperaturas máximas foram menores em relação à amostra *in natura*. Também foi observado o atraso no tempo da queima, principalmente nas amostras com 30% de extrato pirolenhoso com adição dos aditivos.

O ensaio com a amostra *in natura* finalizou em 13:50 minutos. Para as amostras com 20% de extrato pirolenhoso e com adição de 3% e 5% de aditivo químico finalizados com 12:50 minutos, 13:35 minutos e 14:05 minutos. Já para as amostras com 30% de extrato pirolenhoso e com adição de 3% e 5% de aditivo químico com 12:30, 12:55 minutos e 14:45 minutos, respectivamente. Observou-se que quanto maior a concentração do aditivo químico maior o atraso no tempo da queima e menor a perda de massa do material.

Foi observado durante o processo da queima uma camada carbonizada na superfície do corpo de prova, está possivelmente com propriedades não combustíveis e termicamente isolante, justificando assim o atraso no tempo de queima protegendo o material da exposição ao fogo e ao calor (Figura 16).

**Figura 16** – Amostras antes e após o ensaio de combustibilidade

Tratamento	Face a	Face b	Face c
Amostras <i>in natura</i> antes do ensaio			

Amostras <i>in natura</i> após exposição			
20% EP com 3% de diamônio antes exposição			
20% EP com 3% de diamônio após exposição			
20% EP com 5% de diamônio antes exposição			
20% EP com 5% de diamônio após exposição			
30% EP com 3% de diamônio antes exposição			
30% EP com 3% de diamônio após exposição			
30% EP com 5% de diamônio antes exposição			
30% EP com 5% de diamônio após exposição			

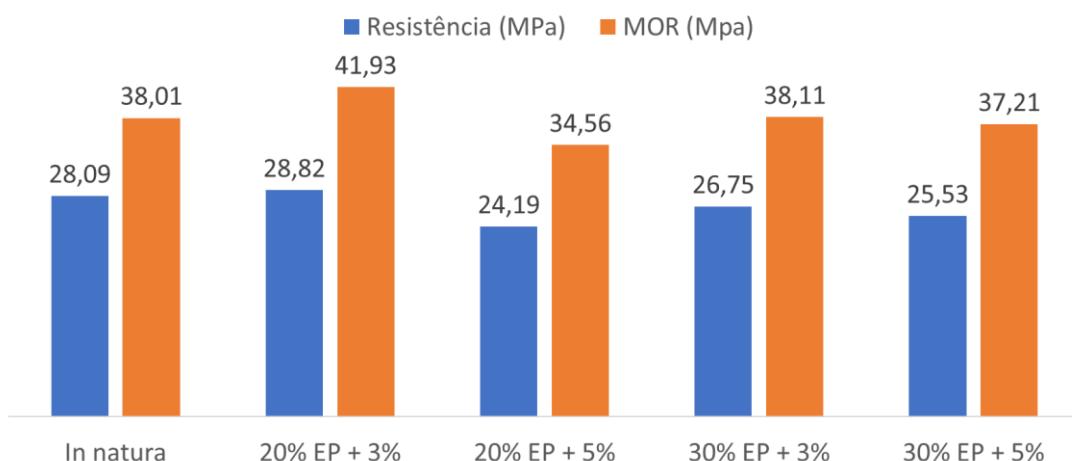
Fonte: O Autor.

#### 4.3.4 Efeito da propagação da chama nas propriedades da madeira

Na figura 17 são apresentados os valores médios da resistência mecânica à compressão paralela às fibras e o módulo de ruptura das madeiras, após exposição ao fogo, em função dos tratamentos.

Não houve efeito significativo da aplicação do extrato pirolenhoso e do aditivo químico na resistência à compressão paralela da madeira. Apesar de verificar efeito significativo, com a exposição ao fogo a aplicação de 20% de EP com 3% de aditivo químico ocasionou um aumento médio de 2,60% em relação à testemunha, enquanto que o tratamento com 20% de EP com 5% de aditivo químico e 30% de EP com 3% e 5% do aditivo químico demonstraram um decréscimo médio de 13,88%, 4,77% e 9,11%, respectivamente.

**Figura 17** - Resistência mecânica à compressão paralela e módulo de ruptura (MPa) das madeiras testemunha e tratadas com extrato pirolenhoso nas concentrações de 20% e 30% com 3% e 5% de aditivo químico após exposição ao fogo



Fonte: O Autor.

Também não houve efeito significativo da aplicação do extrato pirolenhoso e do aditivo químico no módulo de ruptura da madeira.

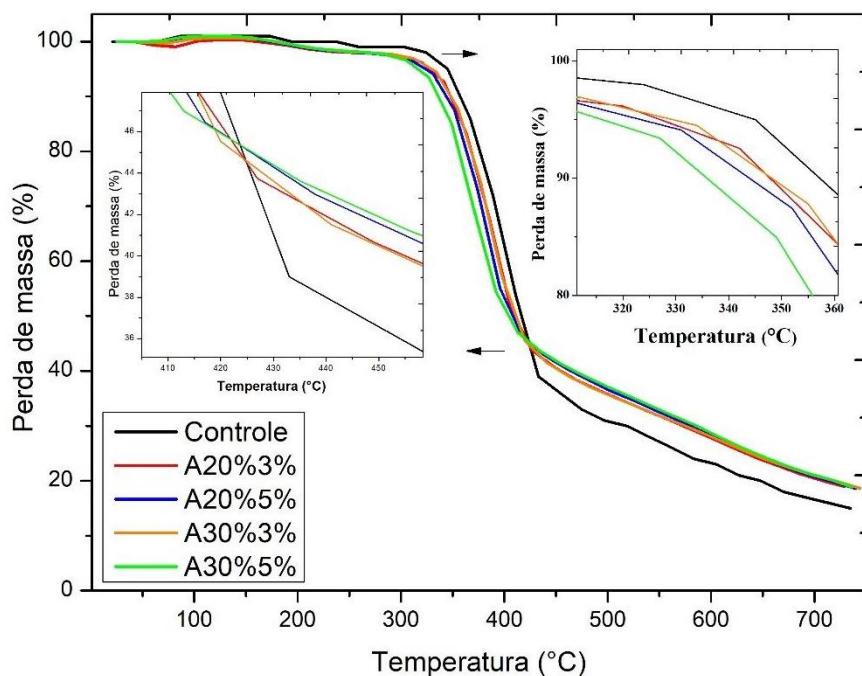
Apesar de não ter diferenças significativas, nota-se uma redução de 13,88% no módulo de ruptura das madeiras tratadas com 20% de EP e 5% de aditivo. De acordo com Schulz et al. (2018), não ocorre risco para a estrutura.

Pham et al. (2019), avaliando a aplicação de 25%, em massa, do fosfato diamônio como retardante de chama, verificaram redução de 11,53% da resistência à flexão de compósito plástico-madeira. Segundo os autores, de modo geral, houve melhor desempenho dos

compósitos quanto a propagação das chamas e apenas ligeira redução nas demais propriedades mecânicas dos compósitos.

Na Figura 18 estão apresentados a análise termogravimétrica do controle e dos tratamentos com 20% e 30% do extrato pirolenhoso com a aplicação de 3% e 5% de aditivo químico diamônio antes e depois da situação de incêndios. Observa-se uma mesma faixa de degradação e mesmo comportamento da aplicação do extrato pirolenhoso na madeira sem adição de aditivos.

**Figura 18** – Termogramas das madeiras tratadas com extrato pirolenhoso e aditivo químico diamônio antes da situação de incêndios



Controle: *in natura*; A20%3% – 20% EP com 3% de diamônio; A20%5% – 20% EP com 5% de diamônio; A30%3% - 30% EP com 3% de diamônio; A30%5% – 30% EP com 5% de diamônio.

Fonte: O Autor.

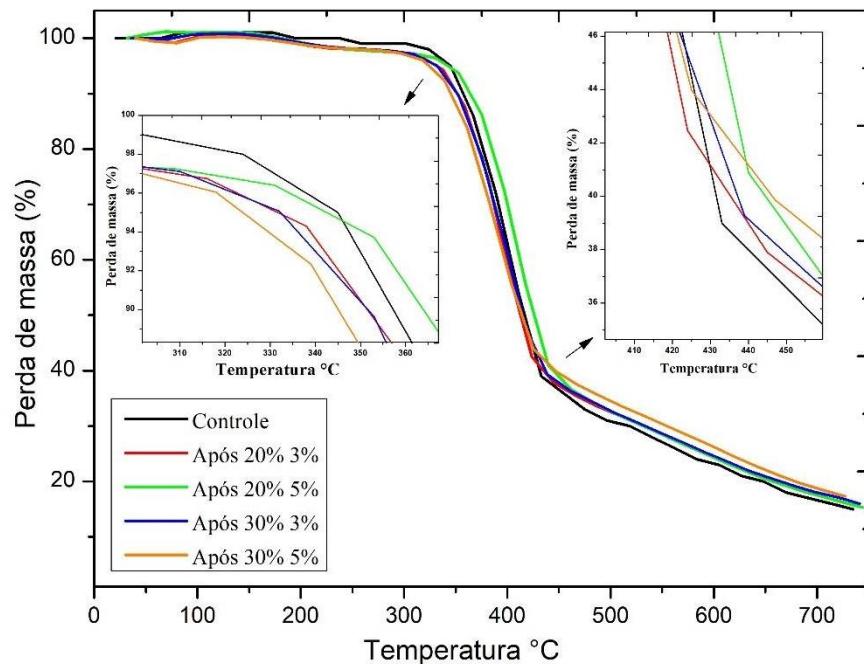
Observa-se menor perda de massa das madeiras tratadas com o extrato pirolenhoso e aditivo químico em relação a amostra testemunha, madeira *in natura*, evidenciando o aumento da resistência a degradação térmica em função da aplicação dos produtos, principalmente após a temperatura de aproximadamente 425 °C.

Nota-se um ligeiro aumento da resistência a degradação térmica da madeira quando aumenta o percentual de aditivo químico.

Na Figura 19 são apresentados os termogramas das madeiras em função dos tratamentos, após situação de incêndio. Verifica-se que maiores concentrações do aditivo químico

ocasionaram aumento da estabilidade térmica, consequentemente reduziu a perda de massa da madeira.

**Figura 19** – Termograma das madeiras tratadas com extrato pirolenhoso e aditivo químico diamônio, após situação de incêndios

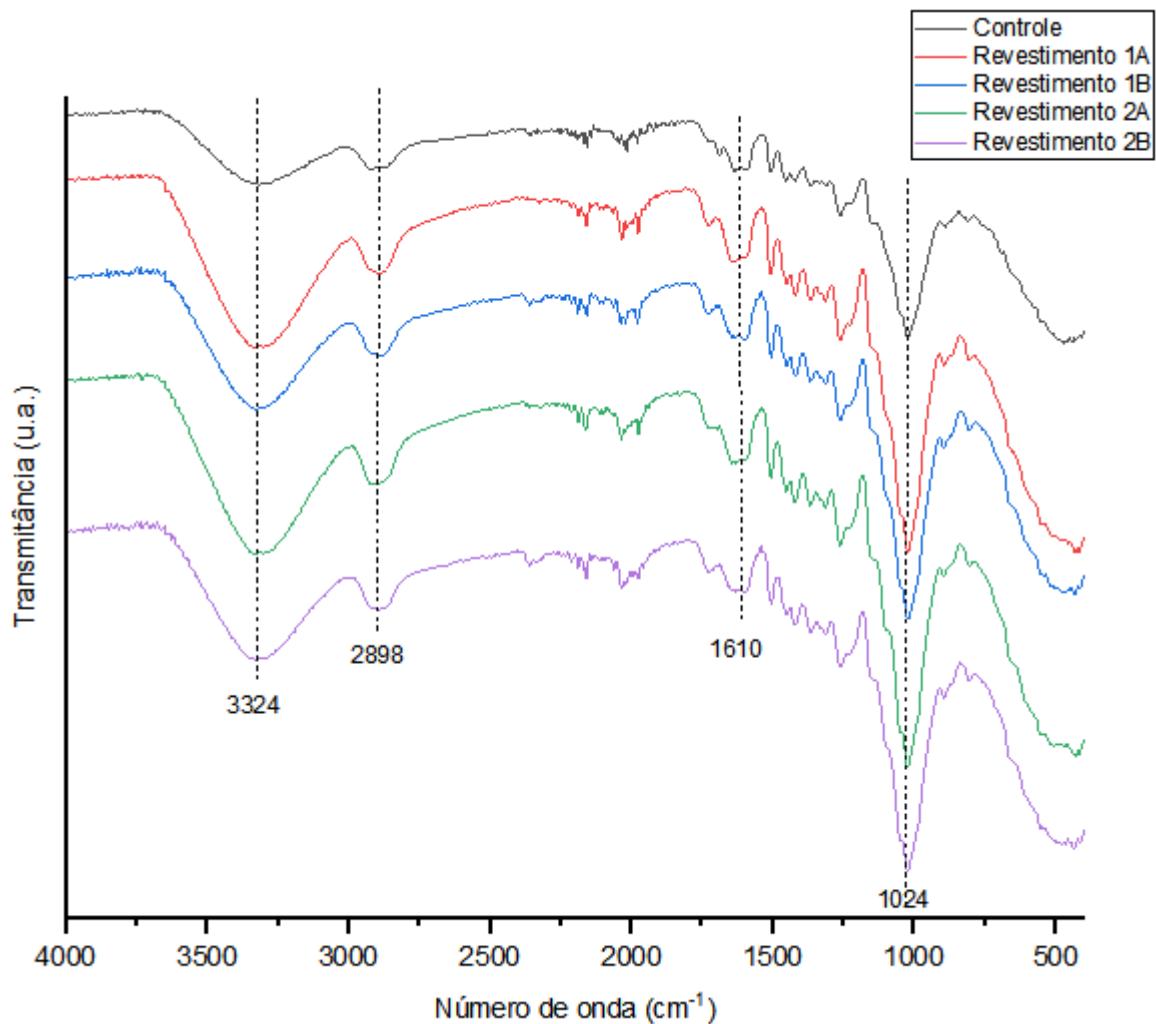


Controle: in natura; Após 20% 3% – 20% EP com 3% de diamônio; Após 20% 5% – 20% EP com 5% de diamônio; Após 30% 3% - 30% EP com 3% de diamônio; Após 30% 5% – 30% EP com 5% de diamônio.

Fonte: O Autor.

Os espectros FTIR das madeiras em função dos tratamentos estão apresentados nas Figuras 20 e 21.

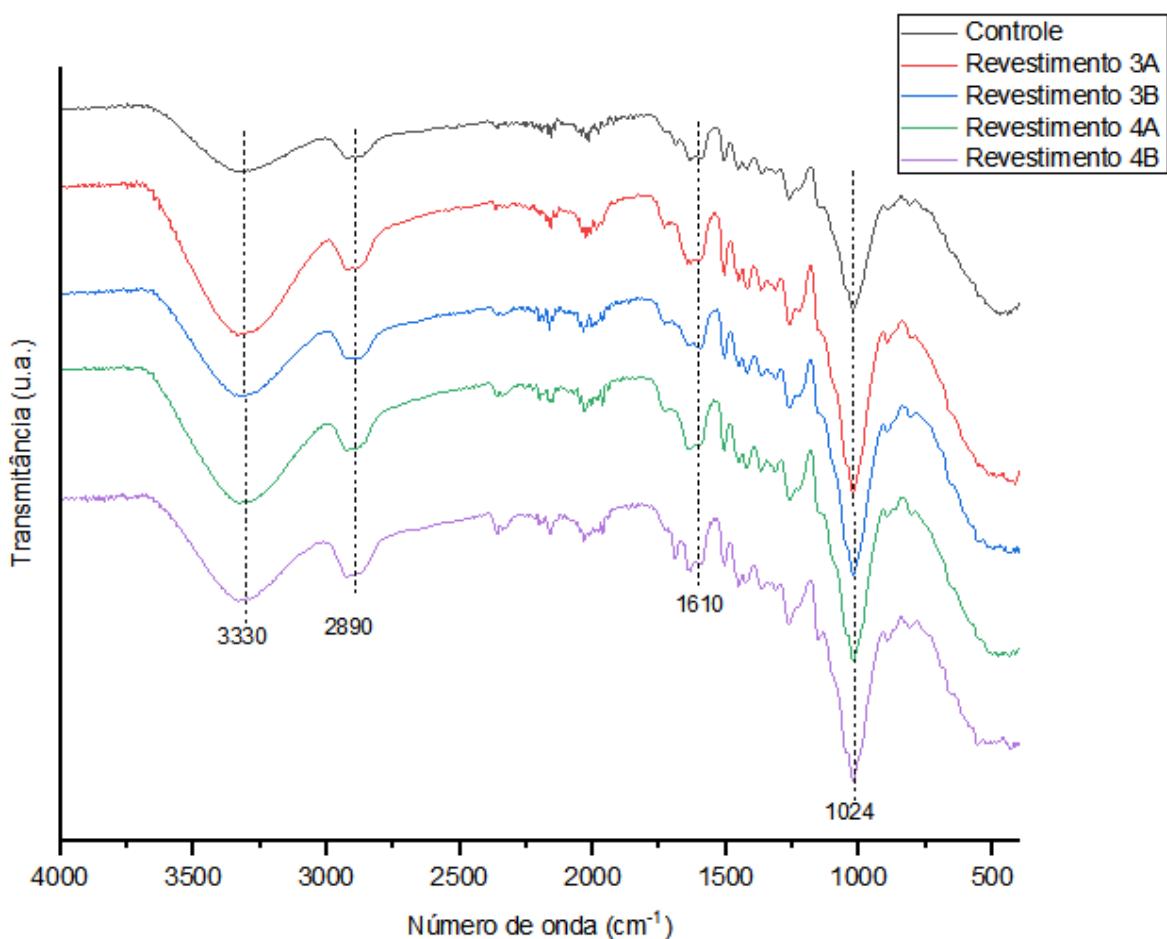
**Figura 20** – Espectros de absorção na região do Infravermelho por Transformada de Fourier da madeira de *Pinus elliottii* em função dos tratamentos com 20% de extrato pirolenhoso e adição de 3% e 5% de aditivo químico diamônio antes e após situação de incêndios



Controle - *in natura*; Revestimento 1A - antes da situação de incêndio; Revestimento 1B - depois da situação de incêndio; Revestimento 2A – antes da situação de incêndio; Revestimento 2B - depois da situação de incêndio.

Fonte: O Autor.

**Figura 21**—Espectros de absorção na região do Infravermelho por Transformada de Fourier da madeira de *Pinus elliottii* em função dos tratamentos com 20% de extrato pirolenhoso e adição de 3% e 5% de aditivo químico diamônio antes e após situação de incêndios



Controle - *in natura*; Revestimento 3A - antes da situação de incêndio; Revestimento 3B - depois da situação de incêndio; Revestimento 4A – antes da situação de incêndio; Revestimento 4B - depois da situação de incêndio.

Fonte: O Autor.

De modo geral, não houve alterações significativas nos espectros de FTIR para as madeiras tratadas com extrato pirolenhoso e aditivo químico.

A banda de 3330 cm<sup>-1</sup> corresponde ao estiramento OH (KUBOVSKÝ et al., 2020). Observou ligeira mudança e redução dessa banda nos espectros das madeiras tratadas com EP e o aditivo químico após expostas ao fogo, indicando quebra de ligações OH com a exposição da madeira ao calor.

As bandas próximas a 2890 cm<sup>-1</sup> são de estiramentos de C-H, importantes para os principais componentes da madeira (KUBOVSKÝ et al., 2020). Observou-se um ligeiro alongamento dessa banda nas madeiras após a situação de incêndio, provavelmente, devido a degradação térmica das hemiceluloses, tendo como consequência aumento relativo do percentual de lignina.

Os picos de absorção próximas a banda de 1610 cm<sup>-1</sup> correspondem ao estiramento de ligações C=C de anéis aromáticos na lignina, sendo ligações estáveis e resistentes a degradação térmica. Nota-se um ligeiro aumento desta banda. Também pode ser observado a banda no comprimento de onda de 1024 cm<sup>-1</sup> atribuída às ligações P-O, recorrentes do fosfato diamônio.

## 5. CONCLUSÕES

Em conclusão, o Extrato pirolenhoso demonstrou ser uma alternativa ecológica promissora no tratamento de madeiras contra xilófagos. Sua composição química, que inclui ácido acético, compostos fenólicos, guaiacol e derivados, mostrou eficácia em diluições a partir de 20%. Outro fator importante observado, foi o efeito de repelência em relação aos cupins.

Apesar da aplicação do EP na superfície da madeira, alterando sua coloração original, essa mudança é aceitável comercialmente. Porém, é importante considerar a finalidade de uso do tratamento, pois o EP possui um poder calorífico superior ao da madeira. No entanto, ao ser utilizado na composição de um retardante de chama, demonstrou sinergia com o agente carbonizador, o que pode ser atribuído a presença de compostos fenólicos que são estáveis e resistentes a degradação térmica.

Quando associado o EP com o fosfato diamônio, funcionou como uma barreira isolante, reduzindo a transferência de calor, a propagação de chama e a perda de massa da madeira.

É uma limitação a falta de diferenciação entre a fração do extrato e o produto bruto na literatura consultada. A escassez de estudos sobre o uso do EP na madeira ressalta a importância do atual estudo para avaliar as potencialidades desse coproduto da carbonização no avanço sustentável do setor da construção em madeiras.

Recomenda-se novas pesquisas para aprimorar o conhecimento técnico sobre o extrato pirolenhoso e as suas aplicabilidades no tratamento em madeiras, para assim avançar no desenvolvimento sustentável do setor de construções em madeira.

## 6. REFERÊNCIAS

- ACOSTA, A.P., SCHULZ, H.R., BARBOSA, K.T., ZANOL, G.S., GALLIO, E., DELUCIS, R.A., GATTO, D.A. Dimensional stability and colour responses of *Pinus elliotti* wood subjected to furfurylation treatments. **Maderas. Ciencia y tecnologia** 22(3): 303-310, 2020.
- AGUILAR FILHO, D. **Combustibilidade e tratamento ignífugo da madeira**. 1986. 109 f. Dissertação de Mestrado (Departamento de Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 1987.
- ALAPIETI, T., MIKKOLA, R., PASANEN, P., SALONEN, H. The influence of wooden interior materials on indoor environment: a review. **European Journal of Wood and Wood Products** 78(4): 617-634, 2020.
- ALMEIDA. R.S.R., TACCINI, M.M., MOURA, L.F., CERIBELLI, U.L., BRITO, J.O., GLORIA E.M. Potential of pyroligneous extract of Eucalyptus wood as a preservative of cosmetic and sanitizing products. **Waste Biomass Valor**. 2019;10:1111-1118.
- ARAÚJO, E.S. Potencial antibacteriano e antifúngico do extrato pirolenhoso. 2018. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, Rio Grande do Norte, 2018.
- ARAÚJO, E.S., PIMENTA, A.S., FEIJÓ, F.M.C., CASTRO R.V.O., FASCIOTTI, M., MONTEIRO, T.V.C., LIMA, K.M.G. Antibacterial and antifungal activities of pyroligneous acid from wood of *Eucalyptus urograndis* and *Mimosa tenuiflora*. **Journal of Applied Microbiology**. 2018;124(1):85-96.
- ARAÚJO, R.C.S., PASA, V.M.D., MARRIOT P.J., CARDEAL, Z.L. Analysis of volatile organic compounds in polyurethane coatings based on *Eucalyptus* sp. bio-oil pitch using comprehensive two-dimensional gas chromatography (CG x GC). **Journal od Analytical and Applied Pyrolysis**. 2010;88:91-97.
- AMATA. Madeira Engenheirada: maior exportador de madeira, Canadá acelera uso construtivo. Disponível em: <https://amatabrasil.com.br/maior-exportador-de-madeira-canada-acelera-uso-construtivo/>. Acesso em 20 de junho de 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM. D664-18e2**: Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. ASTM Internacional, 2018. <https://doi.org/10.1520/D0664-18E02>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM. D-2017**: Standard method for accelerated laboratory test of natural decay resistance for woods. West Conshohocken, PA. ASTM Internacional, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8112: Carvão Vegetal – Análise Imediata**. Rio de Janeiro. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14432:2001. Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações–Procedimento.** Rio de Janeiro, Brasil.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9442:1986 Versão Corrigida:1988. Materiais de construção - Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, Brasil.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7190:1997. Projeto e Execução de Estruturas de Madeira: Projeto de Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro, Brasil.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5628:1980. Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo.** Rio de Janeiro.

BARBERO-LÓPEZ, A., AKKANEN, J., LAPPALAINEN, R., PERANIEMI, S., HAAPALA, A. Bio-based wood preservatives: Their efficiency, leaching and ecotoxicity compared to a commercial wood preservative. **Science of The Total Environment**, 753: 142013, 2021.

BARBERO-LÓPEZ, A., CHIBILY, S., TOMPOPO, L., SALAMI, A., ANCIN-MURGUZUR, F.J., VENALAINEN, M., LAPPALAINEN, R., HAAPALA, A. Pyrolysis distillates from tree bark and fibre hemp inhibit the growth of wood-decaying fungi. **Industrial Crops e Products**, 129: 604-610, 2019.

BARBERO-LÓPEZ, A., CHIBILY, S., SCHEEPERS, G., GRAHN, T., VENÄLÄINEN, M., HAAPALA, A. Analysis of green wood preservation chemicals. **International Journal of Environmental and Ecological Engineering**, 12(3): 175-181, 2018.

**BAUFLEUR, A.M.Y. Efeito da acetilação nas propriedades tecnológicas da madeira de Jacaranda copaia.** 2019. 55f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Cuiabá, Mato Grosso, 2019.

BECK, G., THYBRING, E.E., THYGESEN, L.G. Brown-rot fungal degradation and deacetylation of acetylated wood. **International Biodegradation & Biodegradation**, 135: 62-70, 2018.

BERTO, A.F., OLIVEIRA, C.R.M. Avaliação da segurança contra incêndio de sistemas construtivos. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação** 4(13): 2020.

BOER, F.D., VALETTE, J., COMMANDRÉ, J.M., FOURNIER, M., THÉVENON, M.F. Slow pyrolysis of sugarcane bagasse for the production of char and the potential of its by-products for wood protection. **Journal of Renewable Materials**, 9(1): 97, 2021.

BONFATTI JÚNIOR, E.A., LENGOWSKI, E.C. Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

BUKAUSKAS, A., MAYENCOURT, P., SHERPERD, P., SHARMA, B., MUELLER, C., WALKER, P., BREGULLA, J. Whole timer construction: A state of the art review. **Construction and Building Materials**, 231: 784-769, 2019.

CAMPOS, A.D. Informação técnica sobre extrato pirolenhoso. **Embrapa Clima Temperado – Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2018.

CARVALHO, A. G. Colorimetric and chemical changes in pre-hydrolyzed strand board particles of *Pine* and *Eucalyptus*. **BioResources**, 9 (4): 7234-7242, 2014.

CASTRO, V.R., CASTRO, M.P.F., ZANUNCIO, A.J.V., ZANUNCIO, J.C., CASTRO, P.G.S., CARNEIRO, A.A.D.C.O., VITAL, B.R. Resistance of in natura and Torrefied Eucalyptus Wood to *Cryptotermes brevis* (Isoptera). **BioResources**, 14(2): 2480-2490, 2019.

CAU/BR. Moradias Infantis: arquitetos brasileiros ganham o inédito Prêmio Internacional RIBA. Disponível em: <https://www.caubr.gov.br/moradias-infantis-arquitetos-brasileiros-ganham-o-inedito-premio-internacional-riba/>. Acesso em 20 de junho de 2021.

CHAO, Y.Y., HUNG, K.C., XU, J.W., WU, T.L., WU, J.H. Effects of acetylated veneer on the natural weathering properties of adhesive-free veneer overlaid wood-plastic composites. **Polymers**, 12 (3): 513, 2020.

CHINDAPRASIRT, P., HIZIROGLU, S., WAISURASINGHA, C., KASEMSIRI, P. Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with diammonium phosphate flame retardant. **Polymer composites**, 36(4): 604-612, 2015.

COELHO, D. C. S. **Modelo computacional para Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas em Madeira**. 2011. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção). Escola Superior de Tecnologia e Gestão – Instituto Politécnico de Bragança, 2011.

COSTA, J.M.F.N., CARNEIRO, A.D.C.O., CARVALHO, A.M.M.L., JACOVINE, L.A.G., VITAL, B.R., ARAUJO, S.O., CANAL, W. D. Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, 11(1), 2020.

Extrato Pirolenhoso do Brasil – EPB. Relatório de Composição do EPB106. Belo Horizonte, 2020.

FERNANDES, F. P. D. **Análise numérica de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio**. 2018. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, 35: 1039-1042, 2011.

FERREIRA, M. D.; MELO, R. R. D.; ZAQUE, L. A. M.; STANGERLIN, D. M. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de angelim-pedra submetida a tratamento térmico. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v.16, n.1, p. 3-7, São Paulo, 2019.

FIGUEIREDO, G.G., BORTOLINI, A.T.P., STANGERLIN, D.M., PARIZ, E., OLIVEIRA, D.S. Caracterização tecnológica da madeira de *Trattinnickia burserifolia* Mart. submetida ao tratamento de acetilação. **Nativa**, Sinop, 7(4): 420-425, 2019.

FIGUEIREDO, G.G., STANGERLIN, D.M., FERREIRA, M.D., ZAQUE, L.A.M., PARIZM E., PEREIRA, B.L.C. Qualidade da madeira acetilada de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Advances in Forestry Science**, 7(1): 905-910, 2020.

FONSECA, E. M. M.; COELHO, D. C.S. **Avaliação estrutural de duas espécies de madeira submetidas à ação do fogo**. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia CLME'2011, 2011.

FORSMAN, K., SERRANO, E., DANIELSSON, H., ENGQVIST, J. Fracture characteristics of acetylated young scots pine. **European Journal od Wood Products**, 78: 693-703, 2020.

GAFF, M., KAČÍK, F., GAŠPARÍK, M., TODARO, L., JONES, D., CORLETO, R., OSVALDOÁ, L.M., ČEKOSVKÁ, H. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood. **Construction and Building Materials**, 200: 551-558, 2019.

GONÇALVES, F.G., PINHEIRO, D.T.C., PAES, J.B., CARVALHO, A.G., OLIVEIRA, G.L. Durabilidade natural de espécies florestais madeireiras ao ataque de cupim de madeira seca. **Floresta e Ambiente**, 20(1): 110-116, 2013.

GUO, S., ZHENG, S., HU, Y., HONG, J., WU, X., TANG, M. Embodied energy use in the global construction industry. **Applied Energy**, 256: 113838, 2019.

GREWAL, A.; ABBEY, L.; GUNUPURU, L. R. Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, vol. 135, p. 152-159, 2018.

HAUTAMÄKI, S., ALTGEN, M., LARNOY., HÄNNINEN, T., RAUTKARY, L. The effect of diammonium phosphate and sodium silicate on the adhesion and fire properties of birch veneer. **Holzforschung**, v. 74, n. 4, p. 372-381, 2020.

HU, S.C., CHENG, J., WANG, W.P., ZHU, Y.H., KANG, K., ZHU, M.Q., HUANG, X.H. Preparation and analysis of pyroligneous liquor, charcoal and gas from lacquer wood by carbonization method based on a biorefinery process. **Energy**, v. 239, p. 121918, 2022.

HUANG, X., KOCAEFE, D., KOCAEFE, Y., PICHETE, A. Combined effect of acetylation and heat treatment on the physical, mecanical and biological behavior of jack pine (*Pinus banksiana*) wood. **European jornal of wood and wood products**, v. 76 (2): 525-540, 2018.

HUNT, C.G., ZELINKA, S.L., FRIHART, C.R., LORENZ, L., YELLE, D., GLEBER, S.C., VOGT, S., JAKES, J.E. Acetylation increases relative humidity threshold for ion transport in wood cell walls – A means to understanding decay resistance. **Internacional Biodeterioration & Biodegradation**, v. 133, p. 230-237, 2018.

HURMEKOSKI, E. How can wood construction reduce environmental degradation?. European Forest Institute, Joensuu, 2017.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf> (10 de setembro de 2021).

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. 2021. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/e-mail-marketing/livre/info-madeira-construcao.pdf> (15 de setembro de 2021).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1980). **IPT 1157**. Métodos de teste e análise em preservação de madeira: teste laboratorial acelerado de resistência natural ou madeira preservada ao ataque de cupins do gênero *Cryptotermes* (Fam. Kalotermitidae). São Paulo, Brasil.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. IPT. 2021. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=7](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7). Acesso em 11 de dezembro de 2021.

KADIR, R., ALI, M.S.M., KARTAL, S.N., ELHAM, P., ALI, N.A.M., AWANG, A.F. Chemical characterization of pyrolysis liquids from Dyera costulata and Evolution of their bio-efficiency Against subterraneam termites, *Coptotermes curvignathus*. **European Journal of Wood and Wood Products**, 1-12, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s00107-021-01732-z>

KANDOLA, B. K.; LUANGTRIRATANA, P.; DUQUESNE, S.; BOURBIGOT, S. The effects of thermophysical properties and environmental conditions on fire performance of intumescent coatings on glass fibre-reinforced epoxy composites. **Materials**, v. 8, n. 8, p. 5216-5237, 2015.

KUBOVSKÝ, I., KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification. **Polymers**, v. 12, n. 2, p. 485, 2020.

KUMAR, S.O., TAKAMORI, S.T., ARAKI, H., KURODA, S. Flame retardancy of clay-sodium silicate composite coatings on wood for construction purpose. **Rsc Advances** 5(43): 34109-34116, 2015.

LARANJEIRA, J.; CRUZ, H.; PINTO, A. P. F.; SANTOS, C. P. **Reação ao fogo de madeira antiga protegida com tratamentos retardadores de combustão**. In: 2º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio, 2013, Coimbra, Portugal.

LEE, S. H.; ASHAARI, Z.; LUM, W. C.; HALIP, J. A.; ANG, A. F.; TAN, L. P.; CHIN, K. L.; TAHIR, P. M. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. **Construction and Building Materials**, vol. 181, p. 408-419, 2018.

LI, Y., HAN, M.Y., LIU, S.Y., CHEN, G.Q. Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: a multi-scale perspective. **Building and Environment** 151: 240-250, 2019.

LIMA, C.M., GONÇALEZ, J.C., COSTA, T.R.V., PEREIRA, R.S., LIMA, J.B.M., LIMA, M.S.A. Comportamento da cor de lâminas de madeira de Pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum*) tratada com produtos de acabamento. **Revista Árvore**, v. 37, p. 377-384, 2013.

LU, J., JIANG, P., CHEN, Z., LI, L., HUANG, Y. Flame retardancy, thermal stability, and hygroscopicity of wood materials modified with melamine and amino trimethylene phosphonic acid. **Construction & Building Materials** 267, 121042, 2021.

MANTANIS, G.I. Chemical modification of woof by acetylation or furfurylation: a review of the presente scaled-up Technologies. **BioResources**, v. 12 (2): 4478-4489, 2017.

MANTANIS, G. I.; MARTINKA, J.; LYKIDIS, C; & ŠEVCIK, L. Technological properties and fire performance of medium density fibreboard (MDF) treated with selected polyphosphate-based fire retardants. **Wood Material Science & Engineering**, 2019.

MARINI, L.C., ALMEIDA, T.H., ALMEIDA, D.H., CHISTOFORO, A.L., LAHR, F.A.R. Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp. pela colorimetria. **Ambiente Construído**, 21(1): 149-160, 2021.

MARTINS, G. C. A. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. 2016. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade São Paulo, São Carlos, 2016.

MATTOS, C., VELOSO, M.C.C., ROMEIRO, G.A., FOLLY, E. Biocidal applications trends of bio-oils from pyrolysis: Characterization of several conditions and biomass, a review. **Journal of Applied Microbiology**, 139: 1-12, 2019.

MEDEIROS, L. C. D. **Efeito da velocidade de carbonização na composição química do extrato pirolenhoso da madeira de Eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) e jurema preta (*Mimosa tenuiflora* (Wild.) Poir.).** 2018. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Programa de Ciência Florestais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, Rio Grande do Norte, 2018.

MELO, R.R., DEL MENEZZI, C.H.S., SOUZA, M.R., STANGERLIN, D.M. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, v. 20, p. 238-249, 2013.

MESQUITA, R.R.S., PAULA, M.H., GONÇALEZ, J.C. Colorimetria e espectroscopia no infravermelho médio em madeira de curupixá frente ao intemperismo artificial com produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 688-699, 2020.

MMOJIEJE, J., HORNUNG, A. The potential application of pyroligneous acid in the UK agricultural industry. **Journal of Crop Improvement**, v. 29, n. 2, p. 228-246, 2015.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; KIMURA, E. F. A.; PINTO, E. M.; REGOBELLO, R. Análise numérica do comportamento de elementos de madeira em situação de incêndio. **Floram: Florestas e Ambiente**, vol. 19 (2), p. 162-170, 2012.

MORGADO, L. **A arquitectura moderna e a habitação em madeira. Uma perspectiva histórica até à primeira metade do século XX.** CIMAD 11 - 1º Congresso Ibero-Latino-Americano da Madeira na Construção, 2011, Coimbra, Portugal.

MORGAN, A.B., GILMAN, J.W. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions. **Fire and Materials** 37(4): 259-279, 2012.

MORYS, M.; HAßLER, D.; KRUGER, S.; SCHARTEL, B.; HOTHAN, S. Beyond the standard time-temperature curve: Assessment of intumescent coatings under standard and deviant temperature curves. **Fire Safety Journal**, v. 112, p. 102951, 2020.

OLIVEIRA, C.A.B. **Influência do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas de madeiras de reflorestamento.** 2020. 95f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, São Paulo, 2020.

ORAHAMI, H. A.; YOSHIMURA, T. Antifungal and antitermitic activities of wood vinegar from *Vitex pubescens* Vahl. **Journal Wood of Science**, vol. 59, p. 344-350, 2013.

PAES, J. B.; RAMOS, I. E. C.; Nascimento, J. W. B. Eficiência do CCB na resistência da madeira de algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) D.C.) a cupins xilófagos, em ensaio de alimentação forçada. **Floresta e Ambiente**, vol. 15 (1), p. 01-12, 2008.

PARK, S., HAN, Y., SON, D. W. Flame retardancy of wood products by spreading concentration and impregnation time of flame retardant. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 48, n. 4, p. 417-430, 2020.

PHAM, H.L., PHAM, L.T., HOANG, D., KIM, J. Effective phosphorus/phosphorus-nitrogen fire retardants Applied to biocomposites based on polypropylene-wood flour: flammability, thermal behavior, and mechanical properties. **Macromolecular Research**, v. 27, n. 12, p. 1185-1192, 2019.

PIMENTA, A. S.; FASCIOTTI, M.; MONTEIRO, T. V. C.; LIMA, K. M. G. Chemical composition of pyroligneous acid obtained from *Eucalyptus* CG100 clone. **Molecules**, vol. 23, p. 426, 2018.

PINTO, E. M. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira.** São Carlos, 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2001.

PONDELAK, A., SKAPIN, A.S., KNEZ, N., KNEZ, F., PAZLAR, T. Improving the flame retardancy of wood using na eco-friendly mineralisation process. **Royal Society of Chemistry** 23(3): 1130-1135, 2021.

POPESCU, C.M., PFRIEM, A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products – An overview. **Fire and Materials** 44(1): 100-111, 2020.

PORTO, F.G.S., CAMPOS, A.D., GARCIA, I.T.S. Distilled pyroligneous liquor obtained from *Eucalyptus grandis* and chitosan: physicochemical properties of the solution and films. **Environmental Science and Pollution Research**, 26:672- 683, 2019.

PORTO, F.G.S., VASCONCELOS, E.S., CAMPOS, A.D., CARREÑO, N.L.V., GARCIA, I.T.S. Chitosan in *Eucalyptus grandis* pyroligneous liquor for agricultural application: physicochemical and structural characterization during storage. **Journal of Polymers and the Environment**, 29: 1591-1599, 2021.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD. Projeto Siderurgia Sustentável. 2021. Disponível em <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/projects/SiderurgiaSustentvel.html>. Acesso em 01 de setembro de 2021.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; ALLWOOD, J. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 68 (1), p. 333-359, 2017.

REMADE. Revista da Madeira. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/noticias/15809/maior-predio-construido-de-madeira-do-mundo-esta-na-noruega>>. Acesso em 20 de junho de 21.

RESENDE, E.B., FARIA, L.C.S., FREITAS-FERREIRA, E., AVERSI-FERREIRA, T.A. Uso de wood frame na construção civil no Brasil. **Research, Society and Development** 10(6): e31210615818, 2021.

RIBA. 20 buildings awarded RIBA International Awards for Excellence 2018. Disponível em: <<https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/knowledge-landing-page/riba-international-awards-for-excellence-2018>>. Acesso em 20 de junho de 2021.

RICHTER, F.; REIN, G. A multiscale model of wood pyrolysis in fire to study the roles of chemistry and heat transfer at the mesoscale. **Combustion and Flame**, v. 216, p. 316-325, 2020.

RYSZARD, K.; MALGORZARA, M. Smart environmentally friendly composite coatings for wood protection. In: **Smart Composite Coatings and Membranes**. Woodhead Publishing, 2016. p. 293-325.

ROWELL, R.M. Innovation in Wood Preservation. **Polymers**, 12(7): 1511, 2020.

SANTOS, H.S., FERRARINI, S.F., PIRES, M.J.R., AZEVEDO, C.M.N., COUDERT, L., BLAIS, J.F. Descontaminação em processo de contracorrente de madeira tratada com CCA e tratamento do esgoto gerado por eletrorrecuperação e precipitação. **Scientia Forestalis**, 48(127): e3234, 2020.

SCHIRP, A., SCHWARZ, B. Influence of compounding conditions, treatment of wood particles with fire-retardants and artificial weathering on properties of wood-polymer composites for façade applications. **European Journal of Wood and Wood Products**, 1-20 2021.

SCHULZ, H.R., GALLIO, E., ACOSTA, A.P., BARBOSA, K.T., GATTO, D.A. Efeito da furfuralização em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus elliottii*. **Revista Matéria**, v. 24, n. 3, 2018.

SENA, M.F.M., ANDRADE, A.M., FILHO, S.T., SANTOS, F.R., PEREIRA, L.F. Potential of the extract pirolenhoso: introductory characterization of practice. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, 18: 41-44, 2014.

SERAFIM, M. C. G.; FRANÇA, E. P. C.; NÓBREGA, F. F. B. Processos Estruturais e direito à moradia no Sul Global: contribuições das experiências sul-africana e colombiana. **Revista Opinião Jurídica (Fortaleza)**, 19 (32): 148-183, 2021.

SILVA, M. K. A. G.; PIMENTA, A.; SOUZA, E. C.; NÓBREGA, R. C. S.; SILVA, E. I. S.; LOURENÇO, Y. B. C.; CAETANO, V.; MEDEIROS, L. C. D. Produção, composição e utilização do extrato pirolenhoso na agricultura. In: III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. **Trabalho apresentado**. Florianópolis, SBCTEM, 2017.

SIKORA, A., KAČÍK, F., GAFF, M., VONDROVÁ, V., BUBENÍKOVÁ, T., KUBOVSKÝ, I. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. **Journal of Wood Science**, v. 64, n. 4, p. 406-416, 2018

SOARES, W.N.C., LIRA, G.P.O., SANTOS, C.S., DIAS, G.N., PIMENTA, A.S., PEREIRA, A.F., BENÍCIO, L.D.M., RODRIGUES, G.S.O., AMORA, S.S.A., ALVES, N.D., FEIJÓ, F.M.C. Pyroligneous acid from *Mimosa tenuiflora* and *Eucalyptus urograndis* as an antimicrobial in dairy goats. **Journal of Applied Microbiology**, 131 (2): 604-614, 2021.

SOLIS-POMAR, F., DÍAZ-GÓMEZ, A., BERRÍO, M.E., RAMÍREZ, J., JARAMILLO, A.F., FERNÁNDEZ, K., ROJAS, D., MELENDREZ, M.F., PÉREZ-TIJERINA, E. A dual active-passive coating with intumescent and fire-retardant properties based on high molecular weight tannins. **Coatings** 11(4): 460, 2021.

SOUSA, W.C.S., BARBOSA, L.J., SOARES, A.A.V., GOULART, S.L., PROTÁSIO, T.P. Wood colorimetry for the characterization of amazonian tree species: a subsidy for a more efficient classification. **CERNE**, v. 25, n. 4, p. 451-462, 2019.

SOUZA, J.B., RÉ-POSSI, N., RAPOSO JR, J.L. Characterization of pyroligneous acid used in agriculture by gas chromatography-mass spectrometry. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 23(4): 610-617, 2012.

SOUZA, J.L.S., ALVES, T., CAMERINI, L., NEDEL, F., CAMPOS, A.D., LUND, R.G. Antimicrobial and cytotoxic capacity of pyroligneous extracts films of *Eucalyptus grandis* and chitosan for oral applications. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2021.

ŠVAJLENKA, J., KOZLOVSKÁ, M. Analysis of the energy balance of constructions based on wood during their use in connection with CO<sub>2</sub> emissions. **Energies** 13(18): 4843, 2020a.

TIAN, N.; DELICHATSIOS, M. A.; ZHANG, J.; FATEH, T. A methodology and a simple engineering fire performance model for Intumescence Fire Retardant coatings. **Fire Safety Journal**, v. 98, p. 120-129, 2018.

THOMAS, A.; MOINUDDIN, K., ZHU, H., JOSEPH, P. Passive fire protection of wood using some bio-derived fire retardants. **Fire Safety Journal**, p. 103074, 2020.

TREU, A., NUNES, L., LARNOY, E. Macrobiological degradation of esterified wood with sorbitol and citric acid. **Forests**, 11 (7): 776, 2020.

WALSH-KORBS, Z.; AVÉROUS, L. Recent developments in the conservation of materials properties of historical wood. **Progress in Materials Science**, vol. 102, p. 167-221, 2019.

WITITSIRI, S. Production of wood vinegars from coconut shells and additional materials for control of termite workers, *Odontotermes* sp. and striped mealy bugs, *Ferrisia virgata*. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, vol. 33 (3), p. 349-354, 2011.

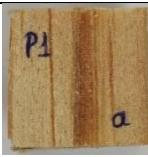
YATAGAI, M.; NISHIMOTO, M.; HORI, K. Termiticidal activity of wood vinegar, its componentes and their homologues. **Journal Wood of Science**, vol. 48, p. 338-341, 2002.

ZANATTA, P.; PERES, M. L. D.; GALLIO, E.; RIBES, D. D.; LAZAROTTO, M.; GATTO, D. A.; MOREIRA, M. L. Redução da inflamabilidade da madeira de *Pinus elliotii* modificada com partículas de TiO<sub>2</sub>. **Revista Matéria**, vol. 23 (1), 2018.

ZHU, Z.; FU, S.; LAVOINE, N.; LUCIA, L. A. Structural reconstruction strategies for the design of cellulose nanomaterials and aligned wood cellulose-based functional materials - A review. **Carbohydrate Polymers**, vol. 247 (1), 2020.

## APÊNDICE A - Notas

Ensaio de combustibilidade com tratamentos de EP em diferentes concentrações sem a utilização do diamônio.

Tratamento	Face a	Face b	Face c
In natura antes exposição	 a	 b	 c
In natura após exposição			
20% EP antes exposição	 a	 b	 c
20% EP após exposição			
30% EP antes exposição	 a	 b	 c
30% EP após exposição			

## ANEXO A - Normas

Anexo 1 - Compostos identificados do extrato pirolenhoso pelo método de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas.

Nome do composto	Área (%)
(E)-2-hexenyl ester butanoic acid	0,36
(S)-(+)-1,2-propanediol	0,15
(Z)-2-decen-1-ol	0,19
(Z,Z)-3,4-diethyl-2,4-hexadienedioic acid dimethyl ester	0,42
[1S-(1.alpha.,2.alpha.,5.beta.)]-5-methyl-2-(1-methylethyl)-cyclohexanol	0,19
1-(1H-pyrrol-2-yl)-ethanone	0,14
1-(2-furyl)-2-methyl-1,2-butanediol	0,16
1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-ethanone	0,26
1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-2-propanone	0,29
1-(acetoxy)-2-propanone	0,09
1,1'-(1,3-phenylene)bis-ethanone	0,03
1,2,3-trimethoxy-5-methyl-benzene	2,33
1,2,3-trimethoxybenzene	0,05
1,3,5-trimethoxy-benzene	0,22
1,4:3,6-dianhydro-.alpha.-D-glucopyranose	1,78
1,6-anhydro-.beta.-D-glucopyranose	1,39
1-cyclohexyl-ethanone	0,18
1-hydroxy-2-propanone	0,1
1-methylpropyl ester butanoic acid	0,55
2-(2-(2-butoxyethoxy)ethoxy)ethyl 3-methylbutanoate	0,53
2,2-dimethyl-3-heptanone	0,41

2,2-dimethyl-tetrahydrofuran	0,13
2,3,7,7a-tetrahydro-7a-methyl-1H-indene-1,5(6H)-dione	0,04
2,3-dihydroxy-benzoic acid	0,08
2,3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	0,14
2,4,6-trimethyl-octane	0,29
2',4'-dihydroxy-3'-methylpropiophenone	0,05
2,5-dihydro-3,5-dimethyl-2-furanone	0,2
2,5-dimethyl-1,4-benzenediol	0,06
2,5-dimethyl-4-nitro-3-hexanone	5,21
2,5-hexanedione	0,1
2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-phenol	0,06
2,6-dimethoxy-phenol	15,54
2,6-dimethyl-phenol	0,35
2-acetyl-resorcinol	0,26
2-butyltetrahydro-furan	0,06
2-ethyl-hexanoic acid ethyl ester	0,15
2-hydroxy-3-acetyl-6-methyl-4-pyrone	0,08
2-hydroxy-3-propyl-2-cyclopenten-1-one	0,09
2-methoxy-4-propyl-phenol	0,06
2-methoxy-phenol	1,67
2-methyl-phenol	0,22
3,4-dimethoxy-phenol	0,57
3,4-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	0,06
3,4-dimethyl-phenol	0,2
3,5-dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	0,18

3,5-dimethoxy-4-hydroxytoluene	5,54
3-ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	0,91
3-methoxy-1,2-benzenediol	3,47
3-methoxy-4-[3-oxo-3-(pyrrolidin-1-yl)propoxy]benzaldehyde	0,81
3-methyl-1,2-benzenediol	0,97
3-methyl-1,2-cyclopentanedione	4,29
3-methyl-2(5H)-furanone	0,1
3-methyl-2,5-furandione	0,11
3-methyl-2-cyclopenten-1-one	0,52
3-nonenoic acid	0,32
4-(1-methylethyl)-2-cyclohexen-1-one	0,06
4-acetoxytridecane	0,16
4-ethyl-2-methoxy-phenol	0,82
4-ethylcatechol	0,26
4-hydroxy-3,5-dimethoxy-benzaldehyde	0,06
4-hydroxy-3-methoxy-benzoic acid methyl ester	0,05
4-hydroxy-butanoic acid	1,87
4-methyl-1,2-benzenediol	1,14
4-methyl-1,3-dioxane	0,03
4-methyl-5H-furan-2-one	0,1
4R-acetamido-2,3-cis-epoxy-cyclohexanone	0,51
5-hydroxy-4-nitrotetrahydropyran-3-yl ester acetic acid	0,08
5-methyl-2-furancarboxaldehyde	0,06
Acetic acid	7,52
Benzoic acid	0,26

Butanoic acid	10,28
Catechol	4,89
cis-2,3-epoxy-3,4-dimethyl-valeric acid ethyl ester	0,14
Creosol	2,39
dihydro-5-methyl-2(3H)-furanone	0,14
diphthalimido-2-propanone	0,03
Ethanol	3,77
Hexanedioic acid	1,05
Hydroquinone	0,48
Isopropyl Alcohol	0,54
Maltol	4,09
Mequinol	0,08
Methyl 4-O-methyl-d-arabinopyranoside	0,11
n-Caproic acid vinyl ester	0,04
Pentanal	3,42
Phenol	1,09
Propanoic acid	0,35
Pyridine borane	0,72
tetrahydro-2H-pyran-2-one	0,17
Triethylenediamine	0,18
Valeric acid 3-tridecyl ester	0,19
Vinyl 2-ethylhexanoate	0,16

Fonte: O Autor.