

UFRRJ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOSSANIDADE
E BIOTECNOLOGIA APLICADA

DISSERTAÇÃO

Avaliação da Eficiência da Furfurilação da Madeira
de *Pinus* sp. Sobre à Agregação de Resistência à
Fungo xilófago e Térmita

João Vinícius Lourenço Coelho Netto

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOSSANIDADE E
BIOTECNOLOGIA APLICADA**

**Avaliação da Eficiência da Furfurilação da Madeira de *Pinus* sp.
Sobre à Agregação de Resistência à Fungo xilófago e Térmita**

JOÃO VINÍCIUS LOURENÇO COELHO NETTO

Sob orientação do professor
Dr. Henrique Trevisan

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada da UFRRJ, área de concentração em Fitossanidade.

Seropédica, RJ
Abril de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

LN472a Lourenço Coelho Netto, João Vinícius, 19/10/1998-
Avaliação da Eficiência da Furfurilação da Madeira
de Pinus sp. Sobre a Agregação de Resistência à Fungo
xilófago e Térmita / João Vinícius Lourenço Coelho
Netto. - Seropédica, 2025.
60 f.

Orientador: Henrique Trevisan.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Fitossanidade e
Biotecnologia Aplicada, 2025.

1. Tratamento da madeira. 2. impregnação. 3.
organismos xilófagos. I. Trevisan, Henrique,
02/11/1976-, orient. II Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro. Pós-Graduação em Fitossanidade e
Biotecnologia Aplicada III. Título.

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”.


O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq).

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOSSANIDADE E BIOTECNOLOGIA
APLICADA


JOÃO VINÍCIUS LOURENÇO COELHO NETTO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada da UFRRJ, área de concentração em Fitossanidade.


Dissertação Aprovada em: 14 / 04 / 2025

Documento assinado digitalmente
 **HENRIQUE TREVISAN**
Data: 27/05/2025 07:08:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Henrique Trevisan, UFRRJ/IF/DPF
(Orientador/Presidente)

Documento assinado digitalmente
 **VINICIUS JOSE FERNANDES**
Data: 27/05/2025 07:01:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Vinicius José Fernandes, UFRRJ/IB/
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente
 **SALY TAKESHITA YAMAGUTI**
Data: 27/05/2025 08:42:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Saly Takeshita Yamaguti, UFRA/
(Membro Externo)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao curso de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada, pela oportunidade de ter aprendizados tanto de vida pessoal quanto de vida profissional e acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão de bolsa de estudo concedida.

Ao meu orientador, Henrique Trevisan por todo apoio, ensinamentos e oportunidades ao longo desse período.

À banca examinadora pelos apontamentos e contribuições para este trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Biodeterioração da Madeira (LBM - IF, UFRRJ), em especial aos meus colegas e amigos Vinicius e Matheus Jardim, pela amizade, companheirismo e aprendizados, tanto de vida pessoal quanto profissional.

Ao professor Paulo Brioso, pelo auxílio com minha pesquisa e pelos ensinamentos durante as aulas.

Ao pessoal do Laboratório de Epidemiologia de Semente (LabEPS - IA, UFRRJ) por todo o auxílio e suporte durante meu mestrado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada, pelos ensinamentos durante as aulas.

À minha família, minha namorada e meus amigos, por serem fundamentais nessa etapa da minha vida, sempre me concedendo todo o auxílio necessário para mais essa conquista.

Ao Alojamento Masculino da Pós-Graduação, pela moradia e amizades, onde pude aprender sobre a vida e trabalho.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Muito obrigado a todos que contribuíram para que este estudo pudesse acontecer.

RESUMO GERAL

NETTO, João Vinícius Lourenço Coelho. **Avaliação da eficiência da furfurilação da madeira de *Pinus* sp sobre a agregação de resistência a fungos xilófagos e térmitas.** 2025. p. Dissertação (Mestrado em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada). Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

A madeira é um material muito utilizado comercialmente por ser renovável e de baixo custo, mas, devido à alta demanda e à uma legislação rigorosa referente ao emprego de madeiras nativas, reflorestamentos homogêneos com espécies florestais de rápido crescimento são considerados uma fonte promissora desse material. No entanto, as madeiras dessas espécies florestais são muito susceptíveis a variados processos de deterioração. Tendo essa problemática em vista, métodos preservativos da madeira são uma alternativa para agregar resistência biológica a esse material. Nesse contexto, a impregnação com álcool furfurílico tem demonstrado ser um método promissor nesse objetivo. Diante do exposto, esta dissertação foi dividida em dois capítulos, sendo o primeiro versando sobre a resistência da madeira de *Pinus* sp. furfurilada contra a ação do fungo de podridão parda *Rhodonia placenta* em condições laboratoriais e o segundo sobre a eficiência na inibição da ação do térmita subterrâneo *Coptotermes gestroi* Wasmann em condições de campo, na madeira de *Pinus* sp. furfurilada. A madeira de *Pinus* sp. foi obtida no *campus* da UFRRJ em Seropédica, RJ, e processada até a obtenção dos corpos de prova nas dimensões de 2,54 x 1,0 x 2,0 cm para o teste em laboratório contra o fungo *R. placenta* (75 repetições), e nas medidas de 7,6 x 2,5 x 0,3 cm para o teste em campo contra a ação de *C. gestroi* (50 repetições). Após o processamento da madeira, os corpos de prova foram submetidos à saturação em quatro diferentes soluções impregnantes nas concentrações de 10, 25, 50 e 100% de álcool furfurílico (AF), soluções compostas de AF, álcool etílico, ácido cítrico e água destilada. Após a saturação, foram submetidas a etapa de cura e polimerização da resina furfurílica, permaneceram por 48 h a 70° C em estufa de secagem laboratorial. Em ambos os capítulos, as diferentes cargas de AF resultaram em variações nos percentuais ganho de polímero (PGP). Foi possível observar um aumento gradual de PGP quando a adição da carga de AF chegou até a concentração de 50%. Porém, na carga de 100 % de AF puro, o PGP foi inferior ao observado na carga de 25% de AF. No capítulo I, os corpos de prova foram submetidos à ação de *R. placenta* em frascos inoculados por um período de quatro meses, enquanto no capítulo II os corpos de prova foram submetidos à ação de *C. gestroi* em condições de campo por um período de dois meses. Os resultados obtidos no capítulo I demonstram que, em sua totalidade, as concentrações de AF agregaram resistência à madeira de *Pinus* sp. contra *R. placenta* de forma equivalente, tornando-a altamente resistente a este fungo, quando comparada à madeira natural. No capítulo II indicou que a madeira de *Pinus* sp. *in natura* foi classificada como pouco resistente à *C. gestroi*. Já a madeira furfurilada teve aumento de classe de resistência de acordo com a concentração de AF aplicada, onde as concentrações de 10 e 25% de AF a madeira se mostrou resistente e nas cargas de 50 e 100%, se mostrou altamente resistente à *C. gestroi*.

Palavras-chave: Tratamento de madeira; impregnação; organismos xilófagos.

GENERAL ABSTRACT

NETTO, João Vinícius Lourenço Coelho. **Avaliação da eficiência da furfurilação da madeira de *pinus* sp sobre a agregação de resistência a fungos xilófagos e térmitas.** 2025. p. Dissertação (Mestrado em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada). Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Wood is a widely used commercial material due to its renewability and low cost. However, because of high demand and strict regulations regarding the use of native timber, homogeneous reforestation with fast-growing tree species has become a promising source of this material. Nevertheless, the wood from these species is highly susceptible to various deterioration processes. Given this issue, wood preservation methods offer an alternative to enhance the material's biological resistance. In this context, furfuryl alcohol impregnation has proven to be a promising method for this purpose. Accordingly, this dissertation is divided into two chapters. The first chapter examines the resistance of furfurylated *Pinus* sp. wood against the brown-rot fungus *Rhodonía placenta* under laboratory conditions, while the second chapter evaluates the effectiveness of furfurylation in inhibiting the subterranean termite *Coptotermes gestroi* Wasmann in field conditions. The *Pinus* sp. wood was obtained from the campus of UFRRJ in Seropédica, RJ, and processed into test specimens measuring $2.54 \times 1.0 \times 2.0$ cm for laboratory testing against *R. placenta* (75 replicates) and $7.6 \times 2.5 \times 0.3$ cm for field testing against *C. gestroi* (50 replicates). After processing, the specimens were saturated with four different impregnating solutions at concentrations of 10%, 25%, 50%, and 100% furfuryl alcohol (FA), composed of FA, ethyl alcohol, citric acid, and distilled water. Following saturation, they underwent a curing and polymerization stage for the furfuryl resin, remaining in a laboratory drying oven at 70°C for 48 hours. In both chapters, different FA loads resulted in varying polymer weight gain (PWG) percentages. A gradual increase in PWG was observed up to the 50% FA concentration. However, at the 100% pure FA load, the PWG was lower than that observed at the 25% FA load. In Chapter I, the specimens were exposed to *R. placenta* in inoculated flasks for four months, while in Chapter II, they were subjected to *C. gestroi* under field conditions for two months. The results from Chapter I demonstrated that all FA concentrations enhanced the resistance of *Pinus* sp. wood against *R. placenta* equally, rendering it highly resistant compared to untreated wood. Chapter II showed that untreated *Pinus* sp. wood was classified as slightly resistant to *C. gestroi*, whereas furfurylated wood exhibited increased resistance depending on the FA concentration applied. At 10% and 25% FA, the wood was classified as resistant, while at 50% and 100%, it was classified as highly resistant to *C. gestroi*.

Keywords: Wood treatment; impregnation; xylophagus organisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Amostras submersas em solução de álcool furfurílico visando a saturação (A) e saturadas com álcool furfurílico em processo de cura em estufa laboratorial (B).....	15
Figura 2. Frascos contendo solo úmido e iniciadores de madeira inoculados com <i>Rhodonía placenta</i>	16
Figura 3. Frascos contendo iniciadores de madeira inoculados com os corpos de prova postos visando a colonização dos mesmos pelo fungo <i>Rhodonía placenta</i>	16
Figura 4. Corpos de prova tratados após a ação do fungo <i>Rhodonía placenta</i> após a secagem em estufa. Da esquerda para a direita: Controle (A), 10 (B), 25 (C), 50 (D) e 100% (E) de álcool furfurílico, respectivamente.....	19
Figura 5. Perda de massa percentual média da madeira de <i>Pinus</i> sp. tratada com álcool furfurílico em quatro concentrações e submetida a ação do fungo xilófagos <i>Rhodonía placenta</i> durante quatro meses. *Letras distintas, entre barras, diferem estatisticamente (Dunn, 5% de significância).....	21
Figura 6. Amostras submersas em solução de álcool furfurílico visando a saturação (A) e saturadas com álcool furfurílico em processo de cura em estufa laboratorial (B).....	28
Figura 7. Confecção do envelope de papel cartonado com as amostras tratadas com álcool furfurílico com os respectivos tratamentos da esquerda para a direita: controle, 10%, 25%, 50% e 100% (A) e envelope de papel cartonado, contendo as amostras formando um bloco, em processo de fechamento com grampo de papel.....	29
Figura 8. Amostras inseridas na infestação ativa de <i>Coptotermes gestroi</i> . Setas em vermelho indicando o posicionamento do bloco na infestação.....	30
Figura 9. Corpos de prova tratados com álcool furfurílico após a ação do térmita <i>Coptotermes gestroi</i> após (A) e antes (B) do processo de limpeza em laboratório.....	31
Figura 13. Perda de massa percentual dos corpos de prova tratados com quatro diferentes concentrações de álcool furfurílico expostos à ação de <i>Coptotermes gestroi</i> durante dois meses. * Letras distintas, entre linhas, diferem estatisticamente (Dunn, 5% de significância).....	33
Figura 11. Corpos de prova de madeira de <i>Pinus</i> sp. <i>in natura</i> e tratados com álcool furfurílico a 10%, 25%, 50% e 100%, respectivamente, da esquerda para a direita, submetidos a ação do térmita <i>Coptotermes gestroi</i> por tanto tempo em condições de campo.....	36
Figura 12. Corpo de prova com ação muito severa, onde o térmita tomou cerca de 50% da amostra.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos tratamentos e cargas de furfurilação empregadas nos tratamentos aplicados nas amostras de madeira de <i>Pinus</i> sp.....	14
Tabela 2. Classes de resistência da madeira sob ação de fungos xilófagos baseadas na perda de peso (AWPA Standard E30-16).....	17
Tabela 3. Percentual ganho de polímero (PGP), absorção e retenção (g/cm ³) da madeira de <i>Pinus</i> sp, tratada com álcool furfurílico.....	18
Tabela 4. Classe de resistência da madeira de <i>Pinus</i> sp. tratada com álcool furfurílico em quatro concentrações e submetida a ação de <i>Rhodonía placenta</i> durante quatro meses.....	20
Tabela 5. Descrição dos tratamentos e cargas de furfurilação empregadas nos tratamentos aplicados nas amostras de madeira de <i>Pinus</i> sp.....	28
Tabela 6. Classes de resistência da madeira sob ação de térmitas subterrâneos baseadas na perda de peso (SNI – 7207 2006).....	31
Tabela 7. Notas da avaliação visual dos corpos-de-prova retirados da infestação <i>Coptotermes gestroi</i> , baseadas na AWPA Standard E1-16 (2016).....	32
Tabela 8. Classe de resistência da madeira de <i>Pinus</i> sp. tratada com álcool furfurílico em quatro concentrações baseadas na SNI-7207 2006 e submetida a ação de <i>Coptotermes gestroi</i> durante dois meses.....	35
Tabela 9. Deterioração média, notas da avaliação do aspecto visual (mínima e máxima) e diferença de peso em gramas das amostras tratadas com álcool furfurílico em diferentes concentrações sob ação de térmitas <i>Coptotermes gestroi</i>	37

Sumário

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. A madeira de <i>Pinus</i> sp. e suas utilizações.....	3
2.2. Álcool furfurílico	3
2.3. Métodos de tratamento da madeira por impregnação química	4
2.3.1. Tratamento da madeira pelo processo de furfurilação.....	4
2.4. Fungos xilófagos apodrecedores da madeira	6
2.5. O cupim subterrâneo <i>Coptotermes gestroi</i>	7
CAPÍTULO I	9
EFEITO DA FURFURILAÇÃO DA MADEIRA DE <i>PINUS</i> SP SOBRE A AÇÃO DO FUNGO XILÓFAGO <i>Rhodonía placenta</i> EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO	9
RESUMO.....	10
3. INTRODUÇÃO	12
4. METODOLOGIA	13
4.2. Obtenção da madeira empregada no experimento	13
4.3. Fabricação das amostras de madeira que empregadas no experimento com o fungo <i>R. placenta</i>	13
4.4. Ensaio de laboratório com fungo <i>R. placenta</i> para avaliar a agregação de resistência na madeira de <i>Pinus</i> sp.	15
4.5. Análise dos dados	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
6. CONCLUSÕES	22
CAPÍTULO II.....	23
EFICIÊNCIA NA INIBIÇÃO DA AÇÃO DO TÉRMITA SUBTERRÂNEO <i>Coptotermes gestroi</i> (WASMANN, 1896) EM CONDIÇÕES DE CAMPO, NA MADEIRA DE <i>Pinus</i> sp. FURFURILADA	23
RESUMO.....	24
7. INTRODUÇÃO	26
8. METODOLOGIA	27
8.2. Obtenção da madeira empregada no experimento	27
8.3. Fabricação das amostras de madeira empregadas no experimento com o térmita <i>C. gestroi</i>	27

8.4. Ensaio de campo com térmita <i>Coptotermes gestroi</i> para avaliar a agregação de resistência na madeira de <i>Pinus</i> sp.	29
8.5. Análise dos dados	32
9. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
10. CONCLUSÕES.....	38
11. CONSIDERAÇÕES GERAIS	39
12. REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO GERAL

A madeira é um material renovável utilizado desde o início da civilização, sendo empregada na confecção de ferramentas, embarcações, estruturas e residências. É um material muito difundido na cultura e na sociedade. Com o aumento populacional, a demanda por esse material tem crescido, fazendo surgir a necessidade de criarem-se métodos de produção e beneficiamento da madeira que sejam eficientes e de baixo impacto ambiental.

Nesse contexto, reflorestamentos com espécies florestais exóticas e de rápido crescimento, tem proporcionado a obtenção de alto nível biomassa em um ciclo de tempo menor se comparado ao ciclo de crescimento de espécies florestais nativas. Espécies de *Pinus* são muito utilizadas nesse propósito, pois fornecem madeira com características atrativas ao mercado, entre elas: coloração atrativa, fácil utilização para aplainar, chapear, laminar, serrar e possui certa resistência física, o suficiente para o uso em móveis de pequeno porte. No entanto, a madeira de pinus é altamente suscetível à ação de organismos xilófagos. Esse fato ocorre devido várias características, entre elas à alta porosidade da madeira, o que aumenta sua higroscopicidade e, consequentemente, sua absorção de água do ambiente, promovendo maior suscetibilidade aos fungos.

Esses xilófagos podem ser classificados de acordo com as distintas estratégias que empregam para deteriorar os componentes poliméricos da madeira, podendo ser: de podridão branca, podridão mole e podridão parda. O fungo *Rhodonía placenta*, causador da podridão parda, é capaz de degradar as porções ricas em polissacarídeos do tecido celular da madeira, deixando um resíduo rico em lignina em formato de lesões cúbicas. Os estágios iniciais dessa podridão podem passar despercebidos, já que apesar da baixa perda de massa, a celulose é despolimerizada em grande extensão, tornando a madeira frágil.

Outro grupo de organismo xilófago capaz de deteriorar a madeira são os térmitas, com destaque principal para os térmitas subterrâneos. A espécie *Coptotermes gestroi* é uma praga urbana de grande importância, causando danos econômicos na escala de bilhões de dólares anualmente (Rust & Su, 2012). São capazes de consumir a madeira utilizada em móveis e estruturas, as inutilizando.

Devido a essa problemática, é necessário que madeiras de menor resistência natural, como a de pinus, sejam tratadas visando aumentar a durabilidade e o comércio. Diversas metodologias foram desenvolvidas e estudadas ao longo dos anos, mas as metodologias de impregnação têm assumido um papel de destaque, tendo em vista que é um processo altamente eficiente em relação à agregação de resistência. Entre os métodos de impregnação, a furfurilação tem sido mais bem estudada na Europa, tendo demonstrado resultados relevantes.

A furfurilação consiste em empregar o álcool furfurílico, uma substância composta por monômeros que é capaz de polimerizar quando exposto à elevadas temperaturas, gerando uma resina furfurílica. Essa polimerização, quando aplicada no interior da madeira, confere maior resistência biológica, aumento em sua resistência física e alteração em seu aspecto colorimétrico.

Com o aumento da resistência biológica, é possível que a madeira furfurilada seja aplicada em estruturas expostas aos fatores bióticos do ambiente, externo quanto interno, como fungos, térmitas, broqueadores e brocas marinhas. Sendo assim, esse tratamento possibilita tornar a madeira de pinus um material mais resistente biologicamente e, consequentemente, ampliar seu uso em situações onde a exposição aos riscos biológicos da deterioração sejam demandados.

Diante do exposto, esta dissertação visa avaliar a resistência da madeira de *Pinus* sp. impregnada com álcool furfurílico contra a ação do fungo xilófago *R. placenta* em condições laboratoriais e do térmita *C. gestroi* em condições de campo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A madeira de *Pinus* sp. e suas utilizações

Pinus é um gênero de gimnosperma que engloba diversas espécies florestais, como *Pinus caribaea* e *Pinus elliottii*. A madeira de *Pinus* sp. é muito utilizada no Brasil para a confecção de móveis, acabamentos, estruturas auxiliares, artigos de uso diário (palitos, pincéis, lápis) dentre outras finalidades (Ladeira *et al.*, 2018). É uma madeira de coloração branco-amarelado, brilho moderado, baixa densidade e fácil de trabalhar, o que a torna uma madeira comercialmente muito bem aceita. Além dessas finalidades, a madeira de *Pinus* também é fácil de aplainar, lixar, chapear, desdobrar, tornear, furar, fixar, colar e fazer bom acabamento (IPT, 2023). Também devido ao seu baixo custo, o mercado enxerga a madeira de pinus como uma boa alternativa para esse tipo de finalidade.

Além disso, a madeira de pinus devido à sua alta porosidade e baixa densidade (Ahmed *et al.*, 2013; Schulz *et al.*, 2020), torna viável a utilização de diversos métodos preservativos. Com essas características, é muito importante saber a proporção de lenho jovem e adulto que se encontra na madeira para saber como ela será tratada. Madeiras providas de árvores mais jovens, geralmente, são menos resistentes mecanicamente e biologicamente devido a sua alta porosidade, fazendo com que essa característica seja um dos fatores que vão ditar a eficiência de um tratamento (Hill, 2006; Oliveira *et al.*, 2006; Garbachevski *et al.*, 2022). Outro fator importante quanto a eficiência do tratamento é de qual região da tora a madeira será extraída. A madeira do cerne, uma madeira já adulta e “morta”, vai possuir baixa porosidade (Wiedenhoeft & Miller, 2005; Zabel & Morell, 2020) e consequentemente terá menos permeabilidade para que ocorra uma melhor penetração e retenção de produtos. Já a madeira do alburno, que é um tecido vivo e mais poroso (Albuquerque & Latorraca, 2000), devido a essas características, é a mais indicada para a utilização em tratamentos.

2.2. Álcool furfurílico

O álcool furfurílico (2 – furilmetanol), de fórmula molecular $C_5H_6O_2$, é uma molécula química orgânica composta por um anel furano, hidroxila e outros componentes químicos. Esse composto químico possui coloração transparente ou amarelada, mas se torna marrom escuro se exposto a luz solar e ar. É um composto volátil, fazendo com que seja armazenado de forma que vá preservar sua integridade química (Iroegbu & Ray, 2024). Esse material pode ser extraído a partir dos açúcares C5 e C6 do furfural, obtido a partir da biomassa gerada pela produção de bioetanol (Schulz, 2019), por meio da hidrogenização seletiva do furfural (Mariscal *et al.*, 2016; Simic *et al.*, 2021).

O AF é capaz de passar pelo processo de resinificação, que é autocatalítica sendo realizada em duas etapas, onde a velocidade da reação de polimerização do AF inicialmente pode ser manipulada por meio da temperatura, entretanto, diversos ácidos inorgânicos são utilizados para catalisar essa reação. Na segunda etapa, a cura do AF, o material impregnado é posto em alguma espécie de forno para que ocorra a ligação das ligações duplas presentes nos anéis furânicos do AF, produzindo um material sólido (Mariscal *et al.*, 2016). O tempo e a temperatura desse processo pode variar, como em Hadi *et al.* (2021), que usaram temperatura de 100° C em um intervalo de 24 h, ou como em Yang *et al.* (2019), que usaram 103° C por 3 h.

2.3. Métodos de tratamento da madeira por impregnação química

Dentre os métodos de melhoramento da madeira que vem ganhando uma importante relevância no meio científico e comercial, é o melhoramento por impregnação. Ele consiste na introdução de um ou mais produtos químicos nas paredes celulares da madeira por meio da aplicação de pressão, que, ao reagir, acabam formando um composto químico que bloqueia o grupo hidroxila, tornando a madeira menos higroscópica.

Um fator que favorece as metodologias à base de pressão é a melhor distribuição e penetração da solução preservante, fatores fundamentais na eficiência do tratamento da madeira (Borges *et al.*, 2018). Outro fator importante é que se torna possível controlar o quanto de produto da madeira tratada será absorvido, garantindo que haja uma efetiva proteção com o mínimo de produto utilizado. Os métodos de impregnação por pressão são feitos principalmente de duas formas no Brasil: o método de célula cheia, que consiste na aplicação de vácuo inicial, visando remover o excesso de água e ar presente na madeira e, em seguida, a aplicação de pressão na madeira imersa na solução preservativa, visando que a madeira absorva a solução; e o método de célula vazia, que consiste na aplicação de pressão para a injeção de produto na madeira, sem a aplicação de vácuo inicial (Lepage *et al.*, 2017; Carvalho *et al.*, 2018).

No Brasil, o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA, *Chormated Copper Arseniate*, do inglês) é um dos principais produtos preservativos da madeira utilizado (Vidal *et al.*, 2015). Esse preservativo, além de possuir alta eficiência, possui custo reduzido quando comparado com outros tratamentos, como os à base de óleos essenciais, tratamentos térmicos e outros tratamentos químicos à base de substâncias alternativas (Santos *et al.*, 2020). Em contrapartida, o descarte dessa madeira tratada pode gerar material poluente, devido à presença de cobre (Cu), cromo (Cr) e arsênio (As), gerando preocupações acerca do meio ambiente. (Santos *et al.*, 2020; Gosselin & Zagury, 2020).

Diversas resinas foram testadas ao longo dos anos como fenol formaldeído (PF), melamina formaldeído (MF), 1,3-dimetilol-4,5-di-hidroxietilenourea (DMDHEU), por exemplo, mas devido ao seu alto valor, não vingaram em escala industrial. Um processo que surgiu foi o Indurite, que surgiu na Nova Zelândia visando ampliar a valoração da espécie local, *Pinus radiata*, tornando-a mais dura e estável (Esteves & Pereira, 2009; Zelinka *et al.*, 2022).

A furfurilação foi outro processo testado, com um dos seus primeiros registros datando de 1955, quando Goldstein preparou uma solução utilizando cloreto de zinco com catalizador. Em 1959, Goldstein e, posteriormente em 1977, Stamm utilizaram anidrido maleico como um dos principais catalisadores de AF, e nesses trabalhos chegaram ao termo “furfurilação da madeira” (Goldstein, 1959; Stamm, 1977; Mantanis, 2017). Atualmente a empresa Kebony é a principal empresa que utiliza esse método em escala industrial.

2.3.1. Tratamento da madeira pelo processo de furfurilação

Entre os processos de impregnação da madeira disponíveis no mercado, a furfurilação é o que mais tem ganhado notoriedade na Europa. No Brasil, não existe exploração comercial desse processo de tratamento. Os subprodutos gerados a partir da cadeia produtiva da cana-de-açúcar são ricos em diversos tipos de açúcares. Dentre eles, os resíduos hemicelulósicos, especialmente aqueles ricos em xilose, são os mais relevantes, pois a desidratação da xilose permite a produção de furfural. A partir do furfural, é possível obter o álcool furfurílico (Zelinka *et al.*, 2022). No Brasil, apesar de possuir uma alta cadeia produtiva à base de cana-de-açúcar, não há nenhuma empresa que produza álcool furfurílico. Esse fato torna a

utilização deste produto no tratamento da madeira muito custosa, tendo em vista que o único meio de se obter esse o álcool furfurílico é por meio de importação.

A furfurilação é realizada por meio de solução composta por: álcool furfurílico, que penetra na estrutura da parede celular da madeira e, ao ser exposta ao calor, forma polímeros, preenchendo assim o espaço disponível e conferindo à madeira uma maior estabilidade dimensional e resistência (Lande, Westin, Schneider, 2004a; Zhang *et al.*, 2016); um catalisador, componente essencial da solução, responsável por determinar o ritmo e a eficiência da polimerização do álcool furfurílico (Li *et al.*, 2016); um agente anti-lixiviante, para que o material impregnado não seja perdido quando exposto a líquidos; e água, para conferir uma melhor homogeneidade à solução.

Observam-se pesquisas que sinalizam o aumento de resistência da madeira furfurilada a organismos xilófagos. De acordo com Lande, Westin e Schneider (2008), um peso de polímero ganho moderado, que consideraram como 30% de ganho, já é o suficiente para conferir resistência biológica à madeira. Nesse contexto, a madeira furfurilada é resistente aos fungos da podridão parda e branca, já que o preenchimento dos poros da madeira impede que a mesma retenha a umidade necessária ao metabolismo de tais fungos, tornando-a uma opção que não confere toxicidade à madeira (Lande, Westin, Schneider, 2008). De acordo com Acosta *et al.* (2020), a madeira furfurilada da espécie *Pinus elliottii*, demonstrou ser resistente contra térmitas. Todavia, com destaque negativo para a madeira tratada a 75% de concentração de álcool furfurílico, que em contrapartida de outros estudos apresentou uma perda maior de massa em relação às outras concentrações testadas, apontando um menor aporte de resistência física, indicando que a alta concentração de AF não necessariamente agrega eficientemente resistência contra organismos xilófagos. Acosta *et al.* (2020a) sugerem, também, um direcionamento de pesquisas, onde os estudos sejam feitos abordando outros organismos xilófagos, como fungos.

A resina de álcool furfurílico não pode ser utilizada diretamente de forma satisfatória, já que suas moléculas possuem um tamanho molecular muito grande, incapaz de penetrar a parede celular da madeira de forma que confira uma melhora significativa nas propriedades da madeira, assim indicando a necessidade da utilização de catalisadores para carrear o produto no interior dos poros da madeira (Mantanis, 2017; Schulz, 2019).

No ambiente industrial, as madeiras impregnadas são relativamente escassas devido ao alto custo da matéria prima necessária. Em contrapartida, na Europa, a madeira furfurilada já começa a ganhar projeção. A primeira unidade semi-industrial para produção de madeira tratada com álcool furfurílico foi criada em Porsgrunn (Noruega), mas a primeira unidade de produção à escala comercial foi construída em Heröya, em 2004, recebendo a marca Kebony. No entanto, a capacidade da produção era inferior a 3 000 m³/ano. A crescente utilização da madeira furfurilada em diversos mercados europeus levou à projeção de uma nova unidade, que ficou pronta em 2018, na Bélgica, com uma capacidade de produção superior a 20000 m³/ano (Esteves & Pereira, 2010).

O tratamento à base de impregnação por furfurilação, altera a composição química da madeira, e estudos apontam que há um aumento em sua resistência e flexibilidade, possibilitando que haja novos empregos para o uso de madeira de *Pinus* jovem, já que ela não tratada é muito flexível e frágil, contraindicada para o uso estrutural (Acosta *et al.*, 2020b). A madeira furfurilada apresenta diferentes ganhos de massa, dependendo dos diferentes níveis de concentração utilizados em seu tratamento, tornando-se, mais resistente de modo geral à ação de organismos xilófagos, como fungos, térmitas e brocas marinhas.

Além disso, existe uma alteração na sua coloração, assemelhando-se a madeiras tropicais mais nobres, tornando-se a uma madeira mais aceita comercialmente (Mantanis, 2017). As aplicações da madeira tratada já começam a se diferenciar da madeira “crua”, onde

sua aplicação pode ser feita em móveis mais robustos, decks, estruturas de portas e janelas na parte externa, dentre outras aplicações.

Este processo pode ter um futuro promissor, uma vez que o álcool furfurílico pode ser obtido através dos produtos secundários da produção do bioetanol, e o preço deste composto químico deverá baixar no futuro com implementação de usinas para o processamento da biomassa visando a produção de álcool furfurílico. Outro fator que favorece a furfurilação é que a madeira furfurilada não é tóxica, como ressaltada por Schulz *et al.* (2019). Quando queimada, sua fumaça possui composição química semelhante à da madeira não tratada, assim como seu produto lixiviado não é poluente (Lande; Westin; Schneider, 2004a), tornando esse processamento da madeira uma solução mais ecológica e comercialmente mais aceita nos grandes mercados consumidores.

No Brasil não há comercialização e nem produção de madeira furfurilada, apesar de ter vastas indústrias de produção de etanol que geram uma grande quantidade de biomassa oriunda da cana-de-açúcar. Portanto, se fazem necessárias pesquisas que procurem elucidar a efetividade da madeira furfurilada, sobre agregação de resistência aos diferentes organismos xilófagos no Brasil.

Esse fato se torna relevante, pois um processo de proteção da madeira contra deterioração pode ser eficiente em um local e outro não, haja vista as diferenças entre a composição e diversidade xilófaga de cada localidade, o que, em ambientes tropicais, como o Brasil, esses organismos geralmente são mais agressivos em relação aos ocorrentes em ambientes temperados, como na Europa.

2.4. Fungos xilófagos apodrecedores da madeira

Os fungos xilófagos afetam principalmente as porções do lenho de árvores abatidas, degradando os componentes poliméricos da madeira. Esse processo se dá através da ação de diversas enzimas e compostos de massa molar extracelular baixa, ocorrendo necessariamente de forma extracelular, já que deve ocorrer um processamento prévio das partículas da madeira para que o fungo consiga consumir as partes da estrutura molecular da madeira. Essa degradação ocorre por meio da penetração das hifas fúngicas no lúmen das células vegetais, sendo responsáveis pela liberação de metabólitos para que ocorra o processo de degradação. Um dos fatores principais que influenciam na eficiência da degradação é o tempo de exposição no qual a madeira sofre, quanto maior o tempo exposto, maior será o nível de degradação da madeira. Outro fator importante é o tipo de fungo, que pode ser de podridão parda, podridão branca e podridão mole, além da biodiversidade dos fungos presentes no local, podendo influenciar a competição entre os fungos e alterar sua atividade (Ferraz, 2010).

Para que ocorra a propagação dos fungos na madeira, é necessário que se tenha água, oxigênio e uma fonte de nutrientes. Os fungos deterioradores necessitam de umidade em torno de 40% a 75%, teor acima do ponto de saturação das fibras (Highley, 1999; Alves & Mendes, 2002; Oliveira & Müller, 2024). Do mesmo modo, madeiras muito úmidas também não são atacadas devido à falta de aeração entre os poros existentes na madeira, ou seja, as condições de oxigenação do substrato influenciam esse processo, pois sendo organismos aeróbicos, precisam de oxigênio para seu metabolismo (Zabel & Morell, 2020). Outro fato que influencia diretamente é a temperatura, onde fungos conseguem sobreviver em média entre 5°C e 65°C, onde autores indicam que a temperatura entre 20°C e 35°C é a temperatura ideal para seu desenvolvimento (Oliveira & Müller, 2024) enquanto outros autores indicam que é entre 15 a 45°C (Zabel & Morell, 2020), mas cada fungo possui seu alcance de temperatura ideal. Temperaturas muito elevadas fazem com que o fungo seja desnaturado enquanto temperaturas muito baixas diminuem a velocidade da propagação do fungo (Zabel & Morell, 2020).

Outro fator que influencia no desenvolvimento dos fungos é a luminosidade, onde os fungos possuem crescimento vegetativo na escuridão, enquanto o crescimento sexuado na presença de luz (Idnurm & Heitman, 2005; Pawlik *et al.*, 2020). Dentre esses fatores, um método eficiente para que a madeira não sofra ação de fungos xilófagos, seria o controle da umidade. Para esse aspecto, a finalidade do uso da madeira é um fator importante a se considerar, já que as distintas condições de exposição aos riscos biológicos, variam conforme o ambiente onde ela será exposta quando em serviço, podendo, portanto, favorecer ou dificultar a colonização por parte desses organismos (Hill, 2006).

Os fungos causadores de podridão parda são importantes recicladores de biomassa em ambientes florestais (Zhang *et al.*, 2016). Esses organismos possuem maior preferência por madeiras de coníferas, sendo um dos principais causadores de prejuízos no setor madeireiro no hemisfério norte (Arantes & Goodell, 2014). São capazes de degradar a porção rica em polissacarídeos do tecido da madeira, deixando um resíduo rico em lignina. Os estágios iniciais de ação desses fungos são pouco perceptíveis, já que apesar da baixa perda de massa, ocorre uma grande extensão de despolimerização da celulose, comprometendo a integridade física da madeira. A aparência da madeira é como se estivesse com manchas de umidade, podendo passar despercebido ao observador (Arantes & Goodell, 2014).

Apesar de sua importância ambiental, esses fungos causam prejuízos em ambientes urbanos, deteriorando madeiras não tratadas, como móveis e estruturas à base de pinus e eucalipto. Com a deterioração, ocorre a perda de força estrutural da madeira nas fases iniciais da contaminação devido a degradação dos polissacarídeos, deixando-a com uma cor marrom-avermelhada. Como mencionado anteriormente, a velocidade de degradação desses compostos varia de acordo com diversos fatores, podendo durar meses e até anos para ocorrer. Rachaduras cúbicas também podem ser observadas (Hill, 2006).

Entre os fungos de podridão parda, o mais utilizado para testes em madeira é o *Rhodonía placenta*. Esse fungo é pertencente à ordem Polyporales, que engloba o filo Basidiomycota, englobando tanto os fungos de podridão branca quanto os de podridão parda (Hori *et al.*, 2013, Wymelenberg *et al.*, 2011). Uma característica desse filo é o desenvolvimento da extremidade chamada basídio, que atua na reprodução sexuada desses fungos.

Os fungos de podridão branca afetam as partes da madeira que contém tanto polissacarídeos quanto lignina (Vivian *et al.*, 2015). Esses fungos são capazes de se aderir a parede da madeira facilmente, descolorindo o material sob efeito (Vivian *et al.*, 2015). A ação desse fungo causa perda de massa, assim como prejudica as propriedades físicas e mecânicas da madeira, apesar dessa ação ocorrer de forma mais lenta que a dos fungos de podridão parda (Garcia, 2006; Modes *et al.*, 2012; Mariano *et al.*, 2020).

Os fungos de podridão mole são do filo Ascomycota e são conhecidos por causar lesões que deixam o aspecto físico da madeira amolecido quando em estágio avançado de degradação. São capazes de degradar polissacarídeos comumente encontrados na região do alburno da madeira, de forma superficial e de velocidade reduzida (Mariano *et al.*, 2020).

2.5. O cupim subterrâneo *Coptotermes gestroi*

Os térmitas pertencem à classe Insecta, ordem Blattodea e ocorrem principalmente regiões tropicais e subtropicais, sendo menos comum em regiões temperadas e áridas, já que são áreas mais frias e possuem menor teor de umidade. Essa distribuição geográfica demonstra uma alta adaptabilidade em ambientes diferentes (Jones & Eggleton, 2010). Os térmitas são um dos principais organismos deterioradores de madeira em ambientes urbanos, com relevância para a espécie subterrânea *Coptotermes Gestroi*, considerada uma das pragas

urbanas mais importantes (Su, Mulluns & Chouvenc, 2023; Neoh & Lee, 2023). Esse inseto possui hábitos alimentares e de nidificação generalista, habitando desde troncos de árvore até edificações urbanas. Sua ocorrência é mais comum em ambientes urbanos do que em áreas florestais ou de produção agrícola, fato que pode estar relacionado com a ausência de predadores naturais nesses ecossistemas (Chiu *et al.*, 2016).

O térmita *C. gestroi* constrói túneis subterrâneos ou sobre fontes de alimento celulósico, os quais podem se estender por grandes distâncias. O tunelamento pode variar em formato, comprimento, volume e distribuição (Hedlund & Henderson, 1999; Hapukotuwa & Grace, 2012).

CAPÍTULO I

EFEITO DA FURFURILAÇÃO DA MADEIRA DE *PINUS* SP SOBRE A AÇÃO DO FUNGO XILÓFAGO *Rhodonía placenta* EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

RESUMO

A madeira, embora seja um material com muitas características desejáveis, possui origem orgânica, o que torna seus componentes poliméricos fonte de alimento para uma vasta gama de organismos xilófagos, sujeitando-a a processos de deterioração. Considerando esse fato, torna-se necessário se empregar métodos que agreguem resistência biológica a esse material para otimizar seu uso. A madeira de *Pinus* sp. é altamente suscetível a uma vasta gama de xilófagos, como por exemplo, os fungos de podridão. Com isso, se torna imprescindível o uso de tratamentos que visam agregar resistência biológica a essa madeira. Nessa circunstância, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do álcool furfurílico (AF) em agregar resistência à madeira de *Pinus* sp. ao fungo apodrecedor *Rhodonía placenta*. Foram realizados 5 diferentes tratamentos, consistindo em controle e os tratamentos em diferentes concentrações de AF: 10, 25, 50 e 100%. Foram confeccionados 75 corpos-de-prova, com 15 repetições para cada tratamento, sendo as amostras aclimatadas à 15% de umidade, pesadas, polimerizadas em estufa e novamente pesadas após esta etapa. Em sequência foram expostas à ação do fungo *R. placenta*, em condições de laboratório, por quatro meses, utilizando a norma AWWA Standard E30-16 (2016). As diferentes concentrações de AF conferiram à madeira distintos percentuais de ganho de polímero (PGP), onde, com o aumento da carga de AF, até a concentração de 50%, houve aumento gradual de PGP, enquanto na carga de 100%, esse valor só foi maior que o registrado nas amostras tratadas à 25% de AF. No que tange a agregação de resistência ao fungo *R. placenta*, na madeira de *Pinus* sp. tratada com diferentes concentrações de AF, observou-se, de forma equivalente, em todos os tratamentos, redução da perda de massa de forma significativa, quando comparada com a madeira natural. Conclui-se que o AF, independentemente da concentração testada, agrega resistência na madeira de *Pinus* sp à ação do fungo xilófago *R. placenta* em laboratório.

Palavras-chave: tratamento de madeira; impregnação; podridão parda.

ABSTRACT

Wood, despite its many desirable properties, is an organic material, making its polymeric components a food source for a wide range of wood-destroying organisms and subjecting it to deterioration processes. Given this fact, it becomes necessary to employ methods that enhance the biological resistance of this material to optimize its use. *Pinus* sp. wood is highly susceptible to various wood-destroying organisms, such as decay fungi. Thus, treatments aimed at improving its biological resistance are essential. In this context, the objective of this study was to evaluate the efficacy of furfuryl alcohol (FA) in enhancing the resistance of *Pinus* sp. wood to the brown-rot fungus *Rhodonía placenta*. Five different treatments were performed, consisting of control and treatments with different AF concentrations: 10, 25, 50 and 100%. Seventy-five specimens were prepared, with 15 repetitions for each treatment, and the samples were acclimated to 15% humidity, weighed, polymerized in an oven and weighed again after this stage.. After polymerization in an oven, they were weighed again. Subsequently, they were exposed to *R. placenta* under laboratory conditions for four months, following the AWWA Standard E30-16 (2016) guidelines. The different FA concentrations resulted in varying polymer weight gain (PWG) percentages. As the FA load increased up to 50%, a gradual rise in PWG was observed, whereas at the 100% load, this value was only higher than that recorded for the 25% FA-treated samples. Regarding the enhancement of resistance against *R. placenta* in *Pinus* sp. wood treated with different FA concentrations, all treatments showed a significant and equivalent reduction in mass loss compared to untreated wood. It is concluded that FA, regardless of the concentration tested, improves the resistance of *Pinus* sp. wood to the wood-degrading fungus *R. placenta* under laboratory conditions.

Keywords: wood treatment; impregnation; *Rhodonía placenta*.

3. INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um material renovável formado, essencialmente, por carbono fixado da atmosfera, podendo ser obtida de forma sustentável pelo cultivo de árvores em reflorestamentos. É um material que, de modo geral, apresenta muitas características desejáveis, como por exemplo, beleza, alta resistência mecânica, bom isolamento térmico e fácil trabalhabilidade (Vidal *et al.*, 2015). Por outro lado, a sua composição básica consiste de celulose, hemicelulose e lignina. Essas macromoléculas são utilizadas como fonte de alimento para diversos seres vivos xilófagos, como fungos, sendo uma característica que pode atrapalhar seu uso, sobretudo em madeiras que apresentam baixa durabilidade natural.

A utilização de espécies madeireiras nativas e a aplicação de uma legislação cada vez mais severa, no que se refere à utilização de produtos químicos, e também a grande redução na oferta de madeiras de boa qualidade por um baixo custo, tem motivado o desenvolvimento de novos métodos para a proteção da madeira contra a deterioração (Trevisan *et al.*, 2020).

As árvores de pinus são consideradas de rápido crescimento, tornando-as um recurso renovável de alta relevância. Por ser uma árvore do grupo botânico gimnosperma, sua madeira é menos densa e mais frágil que uma madeira de angiosperma (Zhang *et al.*, 2017; Garbachevski *et al.*, 2022), além de possuir baixa durabilidade natural (Jankowsky *et al.*, 2002; Niles, 2020). Essas características conferem um valor comercial inferior em relação às outras madeiras comerciais. Nesse contexto, em relação a baixa durabilidade, comumente são empregados métodos para aumentar sua resistência biológica, entre esses métodos, a impregnação com álcool furfurílico, denominada furfurilação, tem sido muito estudada, sobretudo na Europa.

O álcool furfurílico é obtido por meio do processamento de um subproduto biológico gerado por meio de bagaço de cana-de-açúcar, espiga de milho e casca de arroz, o furfural. Embora a produção em escala industrial de álcool furfurílico no Brasil não seja difundida, aponta-se essa possibilidade, uma vez que a matéria-prima é abundante, sobretudo o bagaço de cana-de-açúcar.

O álcool furfurílico é um composto orgânico com uma variedade de elementos químicos, de onde podem ser precisamente extraídos a partir dos açúcares C5 e C6 presentes na biomassa gerada (Mariscal *et al.*, 2016; Schulz, 2019) pela produção de, por exemplo, bioetanol.

A furfurilação é o processo de melhoramento da madeira que mais tem evoluído e despertado interesse dos pesquisadores nos últimos anos. O intuito de modificar a estrutura da madeira é para que ela se torne uma superfície menos suscetível aos distintos organismos xilófagos (Skrede *et al.*, 2019). Entre os organismos xilófagos que dificultam o uso de madeiras de baixa resistência biológica, os fungos são considerados relevantes.

Os fungos xilófagos são seres decompositores de biomassa em ambiente natural, o que torna os estudos que procuram agregar resistência à madeira, frente à ação desses organismos, muito relevantes (Skrede *et al.*, 2019). Entre esses estudos, identificar moléculas naturais ou sintéticas que, quando incorporadas na madeira, possibilitem aumentar sua resistência biológica, figuram entre os principais.

Diante do exposto, a técnica de furfurilação de madeiras tem potencial para contribuir para o emprego de madeiras que não sejam duráveis naturalmente. Nesse contexto, a madeira de Pinus, muito empregada no Brasil, é um destes casos, pois apresenta baixa durabilidade, o que inviabiliza seu uso em diversas situações.

Portanto, estudar a viabilidade/eficiência da furfurilação dessa madeira, pode ser uma alternativa para otimizar seu emprego no Brasil, gerando uma madeira mais resistente, tanto

mecanicamente quanto contra organismos xilófagos. Tendo em vista o exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a agregação de resistência na madeira de *Pinus* sp., contra à ação do fungo xilófago *Rhodonía placenta*, em condições de laboratório.

4. METODOLOGIA

4.2. Obtenção da madeira empregada no experimento

O experimento foi realizado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, Laboratório de Biodeterioração da Madeira. Foram abatidas seis árvores de *Pinus* sp., com idade em torno de 30 anos, cultivadas no *campus* da UFRRJ. Destas, foram retiradas três toras de 2,40 m de comprimento, e diâmetro da altura do peito (DAP) em torno de 40 cm, a partir do DAP (diâmetro à altura do peito). Utilizando-se uma serra de fita, foram retiradas duas costaneiras de cada tora, transformadas em blocos de aproximadamente 24 x 24 cm. Estes foram processados em uma serra circular múltipla de dois eixos, visando a obtenção de tábuas com espessura nominal de 3 cm. Desta forma, foram realizados cortes simultâneos em que o bloco foi desdobrado em tábuas tangenciais. Estas foram identificadas por porção do tronco, alburno, cerne interno e cerne externo, conforme a cor impressa no topo das peças. Esse material foi entabicado e submetido a um programa de secagem suave em estufa, que resultou em uma umidade média final de 8% na madeira.

No ensaio foi considerada a madeira procedente da região do alburno da tora para confecção das amostras, pois trata-se de uma porção da tora onde a madeira é menos durável e permeável a líquidos preservativos.

4.3. Fabricação das amostras de madeira que empregadas no experimento com o fungo *R. placenta*

Com as tábuas secas, foram fabricados os corpos-de-prova. Para isso foi empregado uma serra circular e uma de fita, onde foram fabricadas 75 amostras para ensaios laboratoriais com a espécie de fungo xilófago *R. placenta*. (2,54 x 1,0 x 2,0 cm) de acordo com a AWWA Standard E30-16 (2016).

A nomenclatura e descrição, respectivamente, das condições de tratamento preservativo das amostras de madeira furfurilada de pinus, foram submetidas à ação dos fungos xilófagos em condições laboratoriais. Sendo assim, o estudo foi desenvolvido com cinco tratamentos, sendo dividido em grupo controle e os demais com diferentes cargas de álcool furfurílico (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos tratamentos e cargas de furfurilação empregadas nos tratamentos aplicados nas amostras de madeira de *Pinus* sp.

Tratamento	Nomenclatura	Álcool furfurílico (%)	Álcool etílico (%)	Água (%)	Ácido cítrico
Controle	-	-	-	-	-
Solução 10 %	AF10	10	80	5	5
Solução 25 %	AF25	25	65	5	5
Solução 50 %	AF50	50	40	5	5
Solução 100%	AF100	100	-	-	-

Foram feitas soluções com cargas diferentes, onde o álcool etílico teve a função catalítica, o ácido cítrico tem a função de agente antilixiviante de acordo com autores como Schulz *et al.* (2019), ou como catalisador de acordo com autores como Lande *et al.* (2004a), Pilgård *et al.* (2010) e Thygesen *et al.* (2020), e a água para se obter uma máxima homogeneização.

As amostras foram submersas nas diferentes soluções em Erlenmeyers de capacidade de 2 litros no decorrer de 30 dias, período necessário para que a madeira fosse saturada por imersão (Figura 1A). Após a saturação, as amostras foram pesadas e encaminhadas a uma estufa de escala laboratorial, com uma temperatura de 70° C no período de 48 horas, visando o processo de polimerização *in situ* do álcool furfurílico presente no interior da madeira tratada, onde permaneceu nesta condição por cinco dias decorridos, até atingir massa constante (Figura 1B).

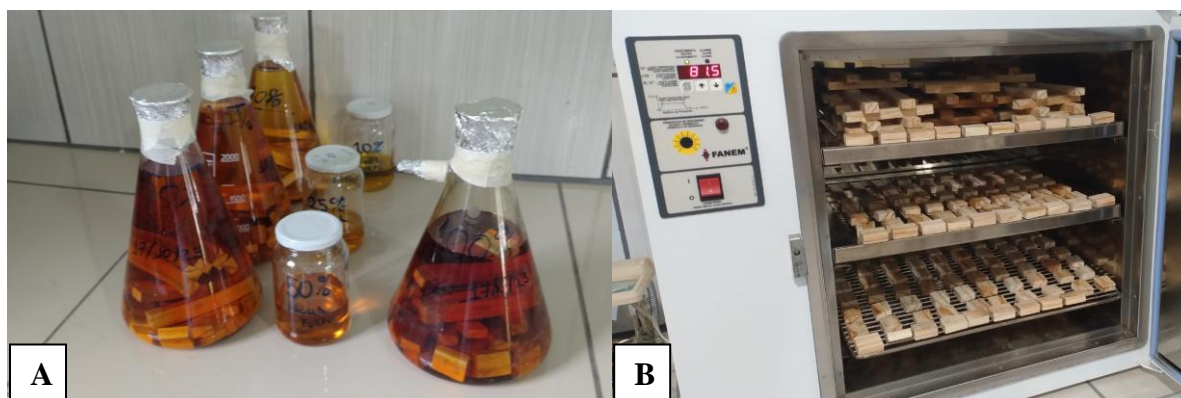


Figura 1. Amostras submersas em solução de álcool furfurílico visando a saturação (A) e saturadas com álcool furfurílico em processo de cura em estufa laboratorial (B).

Com o fim da etapa de polimerização, as amostras foram novamente pesadas e inseridas em frascos tampados para se realizar a esterilização em uma autoclave de escala laboratorial. Após esse tratamento, conforme as condições expressas anteriormente, foram realizadas 15 repetições, consistindo 75 amostras no total.

Para o cálculo do percentual ganho de polímero (PGP), foi utilizada a fórmula:

$$\text{PGP} = [(\text{PP-OS})/\text{OS}] * 100$$

Onde PP = peso polimerizado (g); OS (g) = peso seco.

Para o cálculo de absorção foi utilizada a fórmula:

$$(\text{PST} - \text{OS})/V$$

Onde PST = peso saturado (g); OS = peso seco (g) e V = volume do corpo de prova (cm³).

Para o cálculo da retenção foi utilizada a fórmula:

$$(\text{PP-OS})/V$$

Onde PP = peso polimerizado (g); OS = peso seco (g) e V = volume do corpo de prova (cm³).

4.4. Ensaio de laboratório com fungo *R. placenta* para avaliar a agregação de resistência na madeira de *Pinus* sp.

Com a madeira furfurilada, conforme descrito anteriormente, foi montado um ensaio laboratorial de acordo com a metodologia preconizada pela norma AWWA Standard E10-16 (2016). Esse ensaio foi montado em frascos de 600 mL de capacidade, preenchidos com 118 g de solo de PH 6,2 e capacidade de retenção de água de 27%. Após o preenchimento, foi adicionado 40 mL de água destilada e dois alimentadores de *Pinus* sp. por frasco, com subsequente esterilização à temperatura de $120 \pm 1^\circ \text{C}$ e posterior inoculação de culturas puras do fungo da espécie *R. placenta*, causador da podridão parda (Figura 2).



Figura 2. Frascos contendo solo úmido e iniciadores de madeira inoculados com *Rhodonía placenta*.

Para testar a resistência dos corpos de prova confeccionados com madeira de *Pinus furfurilada*, frente a ação dos fungos, foi observado a fase em que os alimentadores estavam completamente colonizados pelos mesmos. Nesta ocasião os corpos de prova esterilizados foram acomodados nos frascos utilizando uma capela de fluxo laminar visando evitar a contaminação, no total de 15 para cada espécie de fungo/condição de tratamento.

O ensaio foi mantido em condição climatizada ($28 \pm 2^\circ \text{C}$ e $75 \pm 5 \text{ UR}$) por um período de 120 dias (Figura 3).



Figura 3. Frascos contendo iniciadores de madeira inoculados com os corpos de prova postos visando a colonização dos mesmos pelo fungo *Rhodonía placenta*.

Decorrido esse período, os corpos de prova foram climatizados a 12% de umidade e a perda de massa obtida em função dos valores de massa obtidos antes da submissão das amostras à ação dos fungos. Sendo assim, para avaliação da eficiência do tratamento preservativo sobre o desenvolvimento dos fungos de podridão parda, classificando a perda de massa das amostras com a aplicação dos parâmetros descritos na norma AWWA Standard E30-16 (2016), onde: altamente resistente (perda de massa de 0 a 10%); resistente (perda de massa de 11 a 24%); moderadamente resistente (perda de massa de 25 a 44%) e pouco ou não-resistente (perda de massa acima de 45%).

Tabela 2. Classes de resistência da madeira sob ação de fungos xilófagos baseadas na perda de peso (AWPA Standard E30-16).

Classe de resistência	Perda de peso (%)
Altamente Resistente	0 - 10
Resistente	11 – 24
Moderadamente resistente	25 - 44
Pouco resistente ou não-resistente	> 45

4.5. Análise dos dados

A análise estatística dos dados foi realizada pelo programa BioEstat versão 5.0 (AYRES *et al.*, 2007). Para isso a normalidade dos dados foi conferida pelo teste de Lilliefors (5% significância). Constatada normalidade, os dados foram submetidos ao teste de Tukey (5% significância). Para os dados não-normais, empregou-se o teste de Kruskal-wallis, com o pós-teste de Dunn (5% de significância), para análise de variâncias dos postos médios, utilizando a média verdadeira dos dados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tratamento com AF, na madeira de *Pinus* sp., proporcionou de forma distinta a incorporação de resina furfurílica nas amostras. Sendo assim, o PGP (percentual de ganho de polímero) diferiu estatisticamente conforme a carga de AF empregada na madeira (Tabela 3). Portanto, a aplicação de 50% AF, viabilizou o maior PGP significativamente, em comparação aos demais tratamentos. Evidencia-se, também, que a concentração de 25%, também demonstrou agregar maior PGP significativo, em relação à aplicação de AF puro. Esse resultado sugere que os aditivos utilizados na preparação das soluções diluídas de AF, álcool etílico, água e ácido cítrico, podem aumentar a eficiência da polimerização da resina furfurílica na madeira, em comparação com madeiras tratadas com soluções puras de AF, sem aditivos.

Tabela 3. Percentual ganho de polímero (PGP), absorção e retenção (g/cm³) da madeira de *Pinus* sp., tratada com álcool furfurílico.

Tratamento	PGP (%)	Absorção (g/cm ³)	Retenção (g/cm ³)
Controle	---	---	---
10 %	12 ± 5 d	1,111 ± 0,09 b	0,102 ± 0,043 d
25 %	25 ± 5 b	1,406 ± 0,06 a	0,202 ± 0,030 b
50 %	39 ± 6 a	1,446 ± 0,09 a	0,334 ± 0,043 a
100 %	16 ± 3 c	1,391 ± 0,13 a	0,139 ± 0,036 c

*Letras distintas, entre linhas, diferem estatisticamente (Tukey, 5% de significância).

Por outro lado, essa agregação de eficiência no processo de polimerização da resina furfurílica, notada nas soluções diluídas à 25 e 50%, em comparação à solução pura de AF, não foi notada, de forma significativa, nas amostras tratadas com a solução diluída a 10%, sendo essa condição a que viabilizou o menor PGP (Tabela 3). Diante desse resultado, seria relevante esclarecer em novas investigações, qual teor de diluição de AF com aditivos, abaixo de 25%, pode ser considerado equivalente, no processo de polimerização da resina furfurílica, em comparação com soluções puras de AF.

O fato de as soluções diluídas terem resultado em um PGP da madeira, maior que a solução pura de AF, pode estar relacionada aos aditivos empregados na diluição. Nesse contexto, o processo de polimerização da resina furfurílica está associado ao pH da solução, sendo observado que em soluções mais ácidas, esse processo apresenta evidências de ser mais eficiente (Yao *et al.* 2017; Coimbra *et al.* 2022). Diante disso, o uso do ácido cítrico como catalizador, entre os aditivos empregados nas diluições deste trabalho, pode ter contribuído para o maior PGP, registrado nas madeiras tratadas com essas soluções diluídas.

Cabe ainda notar, que embora se observe a influência do processo de diluição das soluções no PGP, a absorção do líquido preservativo pela madeira, praticamente não foi afetada pelo processo de diluição. Pois, a quantidade de produto absorvida foi praticamente a mesma em todos os tratamentos, somente a diluição a 10%, demonstrou uma absorção significativamente menor, em comparação com as demais diluições (Tabela 3). Já para a retenção, que expressa efetivamente a quantidade de produto que permaneceu na madeira, após ela estar climatizada, notou-se, semelhante ao que foi notado nos valores de PGP, forte influência do processo de diluição do líquido preservativo. Sendo assim, as concentrações de 25 e 50%, foram as mais eficientes em promover a retenção do produto preservativo na madeira, evidenciando valores proporcionalmente equivalentes aos observados no PGP.

Sobre o PGP no processo de furfurilação de madeiras, Schulz *et al.*, (2019) ao tratarem a madeira de *Pinus elliotti* com AF por meio de vácuo-pressão, utilizaram 5% de ácido cítrico, em concentrações 10%, 25% e 50% de AF, registraram valores percentuais de PGP de 4,28%; 8,55% e 7,01%, respectivamente, valores inferiores aos observados neste trabalho. Isso possivelmente indica que esses valores inferiores podem estar relacionados na eficácia da impregnação do AF no interior da parede celular dessa madeira e na porção do seu lenho,

tendo em vista que no presente trabalho os valores de PGP obtidos utilizando a mesma proporção de ácido cítrico foram superiores.

Por outro lado, Lande *et al.*, (2004b), ao realizarem a furfurilação na madeira de *Pinus sylvestris*, utilizando como catalisador ácido cítrico e anidridos carboxílicos cíclicos, em concentrações de AF de 92%, 48%, 30% e 15%, registraram PGP de 120%, 50%, 29% e 11%, respectivamente, valores superiores aos apresentados por esta pesquisa. Esses autores apontam que esses percentuais podem estar relacionados à baixa densidade e alta porosidade da madeira de *P. sylvestris*, assim como aos catalisadores aplicados na solução, sobretudo o anidrido carboxílico, que distingue do utilizado neste trabalho. Ainda, convém evidenciar que o processo de impregnação do AF, utilizado por Lande *et al.* (2004b), foi o de vácuo-pressão, diferente do empregado neste trabalho, que foi o de saturação.

Embora as diluições do AF tenham proporcionado diferenças no PGP, esse fato não afetou significativamente à agregação de resistência da madeira de *Pinus* sp. ao fungo *R. placenta*. Sendo assim, a madeira natural demonstrou ser moderadamente resistente a este fungo, mas quando tratada com AF, em qualquer diluição testada, tornou-se muito resistente (Figura 4 e Tabela 4).



Figura 4. Corpos de prova tratados após a ação do fungo *Rhodonia placenta* após a secagem em estufa. Da esquerda para a direita: Controle (A), 10 (B), 25 (C), 50 (D) e 100% (E) de álcool furfurílico, respectivamente.

Tabela 4. Classe de resistência da madeira de *Pinus* sp. tratada com álcool furfurílico em quatro concentrações e submetida a ação de *Rhodonía placenta* durante quatro meses.

Tratamento	<i>R. placenta</i>
Testemunha	Resistência moderada
10%	Muito resistente
25%	Muito resistente
50%	Muito resistente
100%	Muito resistente

Esse resultado pode ser atribuído a diversos fatores, entre eles, ao preenchimento dos espaços intracelulares da madeira pela resina furfurílica, conforme demonstrado por Thygesen *et al.* (2021). Esses autores, ao analisarem a microscopia confocal a laser na madeira de *Pinus radiata in natura* e furfurilada, observaram o lúmen das células preenchido com resina furfurílica. Sendo assim, esse efeito proporciona a diminuição da higroscopicidade, tornando a madeira um substrato menos favorável para o desenvolvimento da maioria dos fungos xilófagos (Lande *et al.*, 2004a; Lande *et al.*, 2004b; Pilgård *et al.*, 2010; Beck *et al.*, 2016; Mayowa *et al.*, 2023). Esse fato indica uma ação não-tóxica por parte do AF sobre esses xilófagos, e, portanto, a resistência biológica agregada às madeiras se dá pela diminuição da oferta de água a esses organismos. Portanto, há consenso que o mecanismo de agregação de resistência nas madeiras furfuriladas, aos fungos, está associado a essa característica, como relatado por diversas pesquisas (Pilgård e Alfredsen (2009), Esteves, Nunes e Pereira (2010), Sejati *et al.* (2016), Mantanis (2017).

Por outro lado, há um aspecto que também pode influenciar na agregação de resistência da madeira de pinus furfurilada, contra a ação de *R. placenta*, é a alteração da composição química da parede celular. Lande *et al.* (2004a, 2008), Nordstierna *et al.* (2008), Sejati *et al.* (2016) Gallio *et al.*(2019), informam que pode ocorrer a ligação entre a resina furfurílica com a parede celular da madeira, alterando, portanto, sua composição química. Sendo assim, esse fato pode tornar mais demorado o processo de degradação dos componentes poliméricos que fazem parte da constituição da madeira (Skrede *et al.*, 2019).

Sobre esse assunto, Skrede *et al.* (2019) acrescentam que, ao furfurilarem a madeira de *Pinus radiata*, e submetê-la à ação do fungo *R. placenta*, observaram que a expressão de alguns genes relacionados à produção de enzimas que deterioram a madeira, como a oxiredutase e outras enzimas hidrolíticas, sofreram retardamento quando *R. placenta* se

desenvolvia na madeira furfurilada, em comparação à madeira natural. Igualmente, Alfredsen *et al.* (2016) evidenciaram que madeiras furfuriladas, também expostas à *R. placenta*, evidenciaram proporcionar uma mudança na expressão gênica de *R. placenta*, relacionada ao metabolismo oxidativo, promovendo um decréscimo na expressão gênica destinada à produção de enzimas degradadoras de polissacarídeos. Portanto, diante dos relatos de Skrede *et al.* (2019) e Alfredsen *et al.* (2016), aponte-se que os resultados encontrados nesse trabalho podem estar relacionados, também, a esses mecanismos gênicos, que afetam a produção das enzimas degradadoras dos componentes poliméricos da madeira furfurilada.

Analogamente ao aumento da classe de resistência da madeira de *Pinus* sp. furfurilada, constatou-se que o tratamento feito à 10% de diluição de AF, proporcionou uma perda de massa na madeira, estatisticamente igual às madeiras tratadas com soluções mais concentradas (Figura 5). Esse resultado ressalta a constatação de que soluções menos concentradas de AF, embora afetem significativamente o PGP, como anteriormente discutido, conferem efeito similar às soluções mais concentradas, no que tange agregação de resistência à madeira de *Pinus* sp., frente à ação de *R. placenta*.

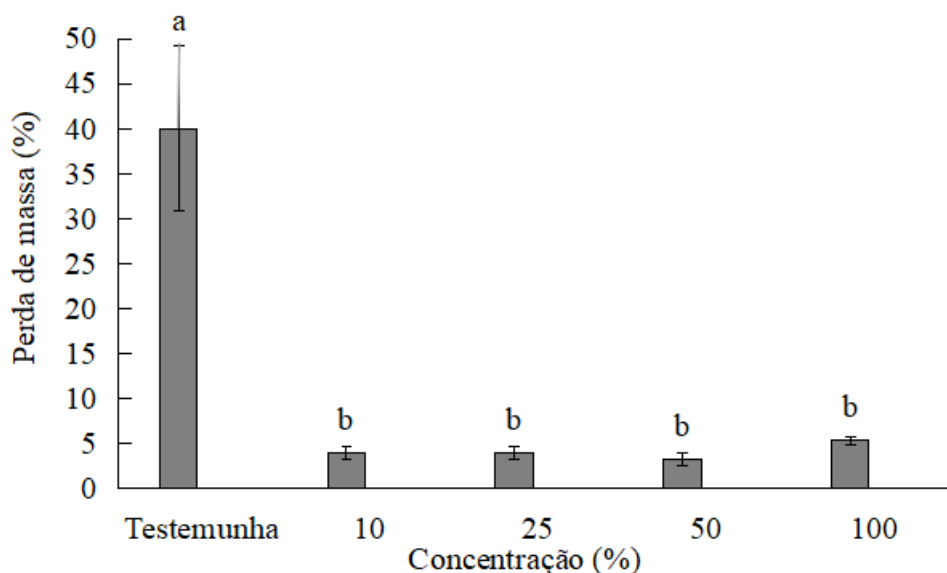


Figura 5. Perda de massa percentual média da madeira de *Pinus* sp. tratada com álcool furfurílico em quatro concentrações e submetida à ação do fungo xilófago *Rhodonia placenta* durante quatro meses. * Letras distintas, entre barras, diferem estatisticamente (Dunn, 5% de significância).

Nas amostras que obtiveram PGP inferiores, a inibição de *R. placenta* foi estatisticamente similar em comparação com as amostras que obtiveram PGP superiores. Esteves, Nunes e Pereira (2010), ao realizar a furfurilação na madeira de *Pinus pinaster* a uma concentração de 70%, obteve um PGP médio de 38%, semelhante ao valor observado nas amostras furfuriladas à 50%, neste trabalho. Esteves, Nunes e Pereira (2010) observaram que a madeira natural submetida à ação de *R. placenta* perdeu 28,23% de massa e a tratada, 1,11%. Para essa perda de massa, e considerando os critérios da norma AWWA Standard E30-16 (2016), a madeira furfurilada seria classificada como altamente resistente, semelhante ao registro deste trabalho.

Sendo assim, os resultados demonstrados indicam que concentrações menores de AF, no processo de impregnação da madeira, podem proporcionar agregação de resistência eficiente à *R. placenta*, gerando economia do agente impregnante.

Skrede *et al.* (2019) registraram perda de massa de 28,8% na madeira natural de *Pinus radiata* submetida à ação de *R. placenta*. Esse valor é inferior ao observado nesta pesquisa, que foi em torno de 40%. Em contrapartida, quando Skrede *et al.* (2019) furfurilaram a madeira em concentrações de 10%, 40% e 70% de AF, registrando PGP de 4%, 24% e 37%, respectivamente. Esses corpos-de-prova, ao sofrerem ação de *R. placenta*, obtiveram perda de massa de 42,5%; 34,6% e 16,0% respectivamente, valores superiores aos demonstrados nesse trabalho.

Os superiores valores de perda de massa apresentados por Skrede *et al.* (2019), para a madeira furfurilada de *P. radiata*, em comparação com os obtidos nesse trabalho, pode ter explicação no tipo de aditivo usado na preparação das soluções. O ácido cítrico, empregado como catalisador na formulação do líquido preservativo, tem forte evidência que também inibe o fungo *R. placenta*. Sendo assim, de acordo com Cruz-Lopes *et al.* (2025), o ácido cítrico puro impregnado na madeira de *Pinus pinaster*, em concentrações de 5%, 10% e 15%, é capaz de agregar resistência contra a ação do fungo *R. placenta*. Cruz-Lopes *et al.* (2025) explicam que essa resistência pode ser atribuída por meio da modificação da estrutura da madeira pelo ácido, tornando a madeira um ambiente mais inóspito para fungos.

Desta forma, os valores baixos de perda de massa da madeira de *Pinus* sp. furfurilada e submetida à ação do fungo *R. placenta*, podem ter explicação, também, no tipo de catalisador usado nas diluições do AF, o ácido cítrico. Diante da evidência de que o uso desse ácido isoladamente, por si só é capaz de agregar resistência significativa à madeira de pinus, ao fungo *R. placenta*, segundo Cruz-Lopes *et al.* (2025), pode-se, então, sinalizar um efeito sinérgico deste ácido com o AF.¹²

6. CONCLUSÕES

Resultados da presente pesquisa realizado em condição de laboratório e suas seguintes conclusões:

A madeira natural de *Pinus* sp. é moderadamente resistente ao fungo *Rhodonia placenta* em condições de laboratório. Quando impregnada com álcool furfurílico, torna-se altamente resistente, em qualquer uma das concentrações testadas neste trabalho.

A concentração de álcool furfurílico impregnado na madeira de *Pinus* sp., influencia na quantidade de resina furfurílica incorporada na madeira, porém não afeta a eficiência na inibição do fungo, e dessa forma, a concentração mais baixa avaliada (10%), tem eficiência análoga as maiores concentrações testadas.

Os aditivos usados para realizar as diluições, álcool etílico, água e ácido cítrico, aparentam melhorar o processo de polimerização, em relação à impregnação com álcool furfurílico puro, conferindo maiores percentuais de incorporação de resina furfurílica na madeira de *Pinus* sp.

CAPÍTULO II

EFICIÊNCIA NA INIBIÇÃO DA AÇÃO DO TÉRMITA SUBTERRÂNEO *Coptotermes gestroi* (WASMANN, 1896) EM CONDIÇÕES DE CAMPO, NA MADEIRA DE *Pinus* sp. FURFURILADA

RESUMO

Desde os primórdios da civilização, a madeira é utilizada na produção de instrumentos e estruturas. No entanto, por ser um material biológico, está suscetível à deterioração por diversos organismos xilófagos. Os térmitas se destacam entre os xilófagos, causando danos estimados em 40 bilhões de dólares por ano, sendo a maior parte desse prejuízo atribuído aos térmitas subterrâneos. Portanto, o uso de métodos preservativos torna-se necessário para melhorar as características naturais da madeira, tornando-a mais resistente e adequada para diversas aplicações. Dentre os métodos existentes, a furfurilação tem se destacado, já que é um material obtido a partir de subprodutos da produção de etanol. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência da madeira de *Pinus* sp. furfurilada em diferentes concentrações de álcool furfurílico (AF), contra a ação do térmita *Coptotermes gestroi* (Wasmann, 1896). Para isso, foram confeccionados 50 corpos de prova, consistindo em 5 tratamentos com 10 repetições cada, onde foram incorporadas quatro diferentes concentrações de AF (10%, 25%, 50%, 100%) e o tratamento controle, com madeira natural. Após impregnação, as mostras foram individualizadas em envelopes de papel corrugado, totalizando 10 envelopes. As diferentes cargas de AF nas amostras resultaram em diferentes percentuais ganhos de polímero (PGP), e constatou-se que houve um aumento gradual de PGP correspondente com o aumento de carga de AF até a concentração de 50%, enquanto na carga de 100% esse valor foi menor que o da carga de 25%. Quando em estado natural, a madeira de *Pinus* sp. foi classificada como pouco resistente à ação de *C. gestroi*. Todavia quando furfurilada à 10 e 25 % demonstrou-se resistente, à 50 e 100%, foi classificada como altamente resistente. Em relação a perda de massa, dada pelo consumo de biomassa pelos térmitas, somente as amostras tratadas à 50 e 100% de AF, apresentaram valores significativamente diferentes em relação à madeira natural. Portanto, conclui-se que o tratamento da madeira de *Pinus* sp. com AF, agrega resistência biológica à ação de *C. gestroi* em condições de campo, sendo as concentrações de 50 e 100% de AF, as mais eficientes.

Palavras-chave: tratamento de madeira; impregnação; térmita.

ABSTRACT

Since the dawn of civilization, wood has been used to produce instruments and structures. However, as a biological material, it is susceptible to deterioration by various wood-destroying organisms. Termites stand out among these organisms, causing estimated damages of \$40 billion per year, with most of these losses attributed to subterranean termites. Therefore, the use of preservative methods becomes necessary to enhance wood's natural characteristics, making it more resistant and suitable for various applications. Among existing methods, furfurylation has gained prominence, as it is a material derived from byproducts of ethanol production. Thus, this study aims to evaluate the resistance of furfurylated *Pinus* sp. wood at different concentrations of furfuryl alcohol (FA) against the action of the termite *Coptotermes gestroi* (Wasmann, 1896). For this purpose, 50 test specimens were prepared, consisting of 5 treatments with 10 replicates each, incorporating four different FA concentrations (10%, 25%, 50%, 100%) and a control treatment with untreated wood. After impregnation, the samples were individually wrapped in corrugated paper envelopes, totaling 10 envelopes. The different FA loads in the samples resulted in varying polymer weight gains (PWG), and it was observed that there was a gradual increase in PWG corresponding to the increase in FA load up to the 50% concentration, while at the 100% load, this value was lower than that of the 25% load. In its natural state, *Pinus* sp. wood was classified as slightly resistant to *C. gestroi*. However, when furfurylated at 10% and 25%, it proved resistant, and at 50% and 100%, it was classified as highly resistant. Regarding mass loss, determined by biomass consumption by termites, only the samples treated with 50% and 100% FA showed values significantly different from untreated wood. Therefore, it is concluded that treating *Pinus* sp. wood with FA enhances biological resistance against *C. gestroi* under field conditions, with FA concentrations of 50% and 100% being the most effective.

Keywords: wood treatment; impregnation; termite.

7. INTRODUÇÃO

A produção de madeira em território brasileiro abrange 1,8 milhão de hectares (Lopes & Stroparo, 2022). Devido à sua composição orgânica, rica em lignina e celulose, a madeira está suscetível à ação de diversos grupos de organismos xilófagos. A legislação ambiental tem se tornado cada vez mais rigorosa no que tange o emprego de madeiras providas de espécies florestais nativas, bem ao uso de produtos químicos usados no tratamento preservativo desse material, o que tem motivado o desenvolvimento de novos métodos de proteção da madeira referente à proteção contra deterioração (Trevisan *et al.*, 2020).

A madeira de pinus possui um mercado bem consolidado, tendo em vista que apresenta características positivas do ponto de vista comercial. Sendo assim, as árvores apresentam rápido crescimento, e a madeira pode ser trabalhada facilmente, bem como o tratamento preservativo é facilitado (Vidal *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2017). No entanto, a madeira de pinus é suscetível à ação de organismos degradadores da madeira, pois, além de possuir alta porosidade (Zhang *et al.*, 2017), característica que facilita o consumo por parte desses organismos, favorece também, o aumento da higroscopicidade, que por consequência aumenta a absorção de água, facilitando, igualmente, à ação dos xilófagos (Jankowsky *et al.*, 2002; Skrede *et al.*, 2019; Niles, 2020), incluindo os térmitas. Os danos causados globalmente por esses xilófagos são estimados em 40 bilhões de dólares por ano, e 80% desse impacto é causado por térmitas subterrâneos (Oi, 2022).

Essa praga xilófaga é muito comum no meio urbano, onde um dos principais indícios de infestação é a presença de túneis confeccionados em madeiras e até mesmo nas partes de alvenaria (Costa-Leonardo, 2002; Brazolin *et al.*, 2010; Rust & Su, 2012; Fernandes, 2017; Fernandes *et al.*, 2019; Martha *et al.*, 2024). Esses túneis são feitos a partir da lignina, material no qual não são capazes de digerir e de partículas de solo, excrementos, carcaça de cupins mortos e saliva (Kuswanto, Ahmad & Dungani, 2015). O consumo da madeira por esses organismos resulta em uma estrutura interna fragilizada, tornando-a oca e, consequentemente, reduzindo sua resistência mecânica.

Tendo em vista essa problemática, o tratamento da madeira se torna fundamental para seu uso no meio urbano, fazendo com que a torne mais resistente à ação desses organismos (Rust & Su, 2012). Os métodos de impregnação da madeira são considerados alternativas eficazes para o tratamento da madeira. Dentre os métodos disponíveis no mercado, a furfurilação se destaca como um dos métodos mais promissores (Hadi *et al.*, 2020). O processo utiliza uma solução composta de álcool furfurílico (AF) e catalisadores, que penetra o espaço intercelular da madeira e, com a aplicação de calor, vai polimerizar e reagir, formando ligações com as paredes das células (Lande, 2004; Gallio *et al.*, 2019). A furfurilação não só aumenta a resistência física da madeira, mas também protege e confere maior resistência contra agentes biológicos degradadores da madeira (Lande *et al.*, 2008; Alfredsen *et al.*, 2016; Skrede *et al.*, 2019), tornando seu valor comercial mais lucrativo.

AF é produzido a partir do furfural, obtido a partir da biomassa gerada da indústria de etanol, por exemplo. A produção de AF ocorre a partir da hidrogenização dos carbonos C5 e C6 do furfural (Mariscal *et al.*, 2016; Schulz, 2019).

Em relação à furfurilação, essa técnica possui potencial para proporcionar aumento de durabilidade em madeiras susceptíveis aos processos de deterioração biológica. Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência da madeira de *Pinus* sp. furfurilada em diferentes concentrações de álcool furfurílico (AF), contra a ação do térmita *Coptotermes gestroi* (Wasmann, 1896), em condições de campo.

8. METODOLOGIA

8.2. Obtenção da madeira empregada no experimento

O experimento foi realizado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, Laboratório de Biodeterioração da Madeira. Foram abatidas seis árvores de *Pinus* sp, cultivadas no campus da UFRRJ. Destas, foram retiradas três toras de 2,40 m de comprimento, e diâmetro da altura do peito (DAP) em torno de 40 cm, a partir do DAP (diâmetro à altura do peito). Utilizando-se uma serra de fita, foram retiradas duas costaneiras de cada tora, transformadas em blocos de aproximadamente 24 x 24 cm. Estes foram processados em uma serra circular múltipla de dois eixos, visando a obtenção de tábuas com espessura nominal de 3 cm. Desta forma, foram realizados cortes simultâneos em que o bloco foi desdobrado em tábuas tangenciais. Estas foram identificadas por porção do tronco, alburno, cerne interno e cerne externo, conforme a cor impressa no topo das peças. Esse material foi entabicado e submetido a um programa de secagem suave em estufa, que resultou em uma umidade média final de 8% na madeira.

No ensaio foi considerada a madeira procedente da região do alburno da tora para confecção das amostras, pois trata-se de uma porção da tora onde a madeira é menos durável e permeável a líquidos preservativos.

8.3. Fabricação das amostras de madeira empregadas no experimento com o térmita *C. gestroi*

Com as tábuas secas, foram fabricados os corpos de prova. Para isso foi empregado uma serra circular e uma de fita, onde foram fabricadas 50 amostras para ensaios em campo (7,6 cm x 2,5 cm x 0,3 cm). Essa quantidade amostral e as dimensões das amostras foi preconizada devido ao espaço limitado da infestação de *C. Gestroi*.

A nomenclatura e descrição, respectivamente, das condições de tratamento preservativo das amostras de madeira furfurilada de *Pinus* sp., foram submetidas à ação de térmitas xilófagos em condições campais. Sendo assim, o estudo foi desenvolvido com 5 tratamentos, sendo dividido em grupo controle e os demais, com diferentes cargas de álcool furfurílico (Tabela 5).

Tabela 5. Descrição dos tratamentos e cargas de furfurilação empregadas nos tratamentos aplicados nas amostras de madeira de *Pinus* sp.

Tratamento	Nomenclatura	Álcool furfurílico (%)	Álcool etílico (%)	Água (%)	Ácido cítrico
Controle	-	-	-	-	-
Solução 10%	AF10	10	80	5	5
Solução 25%	AF25	25	65	5	5
Solução 50%	AF50	50	40	5	5
Solução 100%	AF100	100	-	-	-

Foram feitas soluções com cargas diferentes, onde o álcool etílico teve a função catalítica, o ácido cítrico tem a função de agente anti-lixiviante de acordo com autores como Schulz *et al.* (2019), ou como catalisador de acordo com autores como Lande *et al.* (2004), Pilgård *et al.* (2010) e Thygesen *et al.* (2020), e água para se obter uma homogeneização da solução. As amostras foram submersas nas diferentes soluções postas em Erlenmeyers de 2 litros por um período de 30 dias, período necessário para saturação (Figura 6A) por imersão. Após a saturação, as amostras foram pesadas e encaminhadas a uma estufa de escala laboratorial configurada a uma temperatura de 70°C aplicada por 48 horas, visando o processo de polimerização in situ do álcool furfurílico presente no interior da madeira tratada, onde permaneceu nesta condição por 5 dias, até atingir massa constante (Figura 6B).

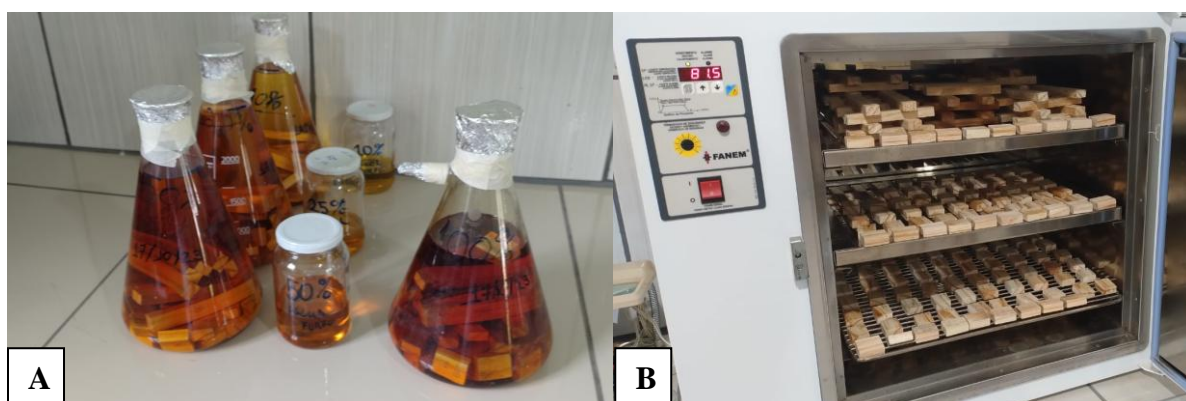


Figura 6. Amostras submersas em solução de álcool furfurílico visando a saturação (A) e saturadas com álcool furfurílico em processo de cura em estufa laboratorial (B).

Com o fim da etapa de polimerização, as amostras foram novamente pesadas e inseridas em envelopes de papel ondulado, visando ser um atrativo para que as térmitas em campo consumam a madeira presente nos envelopes (Figura 7), de acordo com a metodologia autoral proposta.

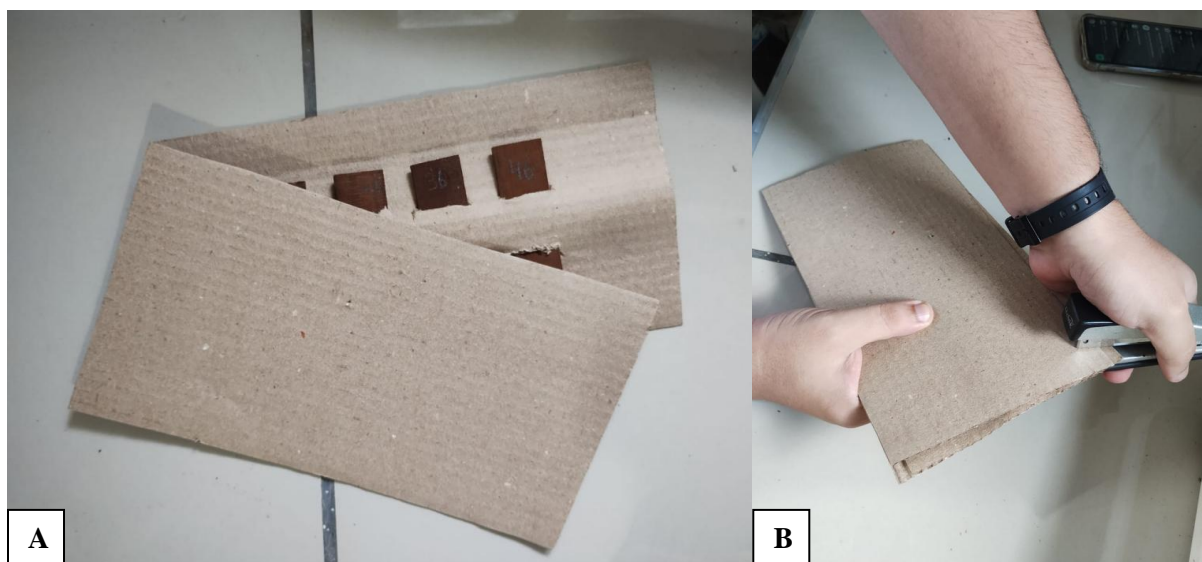


Figura 7. Confeção do envelope de papel cartonado com as amostras tratadas com álcool furfurílico com os respectivos tratamentos da esquerda para a direita: controle, 10%, 25%, 50% e 100% (A) e envelope de papel cartonado, contendo as amostras formando um bloco, em processo de fechamento com grampo de papel.

8.4. Ensaio de campo com térmita *Coptotermes gestroi* para avaliar a agregação de resistência na madeira de *Pinus* sp.

Com a madeira furfurilada, conforme expresso anteriormente, foi montado o ensaio de em uma infestação natural de *C. gestroi*, em condições de campo. Montou-se 10 blocos inteiramente causalizados, contendo uma repetição de cada tratamento incluindo a testemunha, totalizando 50 repetições no total. Amostras de madeira não tratada foram inseridas, de forma excedente, para acompanhar a colonização sem interferir nas amostras tratadas. Essa metodologia é autoral, onde foi proposto a melhor forma de se realizar o experimento de escolha por parte dos térmitas, tendo em vista o espaço disponível e a disposição da infestação em campo.

Os blocos foram montados em papel cartonado, visando ser um atrativo para os térmitas. Após a confecção dos blocos, os mesmos foram inseridos na infestação de forma sequencial em pares (Figura 8) e removidos após 60 dias e encaminhados para o laboratório.



Figura 8. Amostras inseridas na infestação ativa de *Coptotermes gestroi*. Setas em vermelho indicando o posicionamento do bloco na infestação.

No laboratório, os corpos de prova foram limpos com o auxílio de ferramentas para retirar o excesso de material depositado pelos térmitas (Figura 9) e em seguida foram postos em estufa de secagem a 100°C, visando atingir o peso constante, nessa condição. Após esse processo, foram pesados novamente, utilizando uma balança de precisão. Baseado na diferença entre os pesos da madeira tratada antes e após a ação dos térmitas, as amostras foram classificadas em classes de resistência, baseado na norma SNI 7207 (2006) (Tabela 6). Após essa classificação, foram avaliadas utilizando os critérios estipuladas pela norma AWWA Standard E1-16 (2016) (Tabela 7), que estipula notas para as lesões dos térmitas nos corpos de prova, possibilitando calcular o índice médio de deterioração.

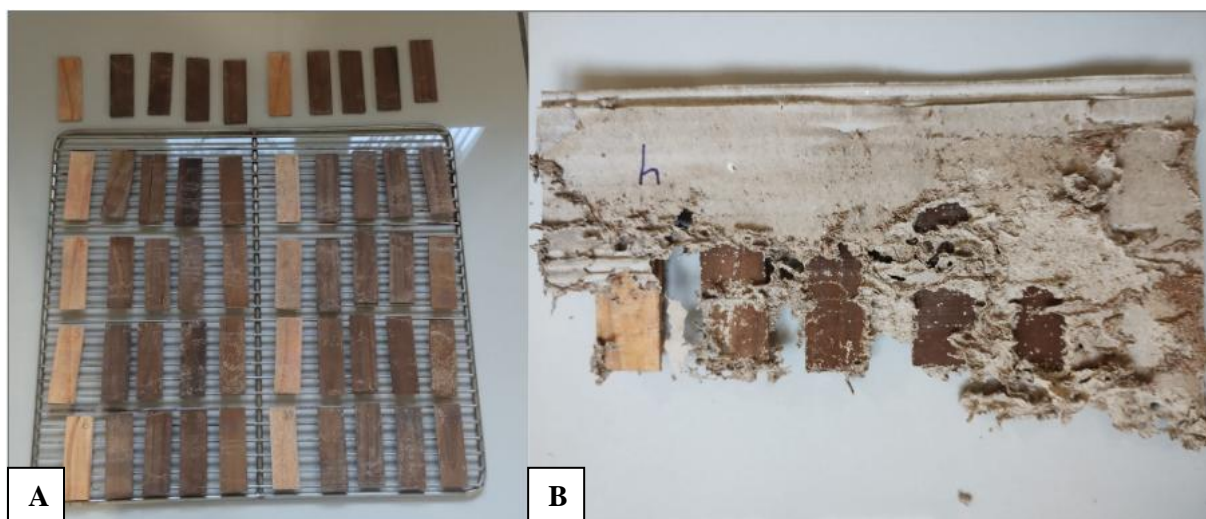


Figura 9. Corpos de prova tratados com álcool furfurílico após a ação do térmita *Coptotermes gestroi* após (A) e antes (B) do processo de limpeza em laboratório.

Tabela 6. Classes de resistência da madeira sob ação de térmitas subterrâneos baseadas na perda de peso (SNI – 7207 2006).

Nível	Classe de resistência	Perda de peso (%)
I	Muito Resistente	< 3,52
II	Resistente	3,52 - 7,50
III	Moderadamente resistente	7,50 - 10,96
IV	Pouco resistente	10,96 - 18,94
V	Não resistente	18,94 - 31,89

Tabela 7. Notas da avaliação visual dos corpos-de-prova retirados da infestação *Coptotermes gestroi*, baseadas na AWPA Standard E1-16 (2016).

Notas	Crítérios de avaliação
10	Sem alterações
9,5	Ação superficial, com pequenas escarificações
9	Fraca ação, tomando até 3% da superfície da madeira
8	Ação moderada, tomando entre 3% e 10% da superfície da madeira
7	Ação moderada a severa, tomando entre 10% e 30% da superfície da madeira, podendo haver penetração
6	Ação severa, tomando entre 30% e 50% da madeira
4	Ação muito severa, tomando entre 50% e 75% da madeira
0	Falha

8.5. Análise dos dados

A análise estatística dos dados foi realizada pelo programa BioEstat versão 5.0 (Ayres *et al.* 2007). Para isso a normalidade dos dados foi conferida pelo teste de Lilliefors (5% significância), onde se constatou a não normalidade dos dados, onde o teste de Dunn (5% significância) foi aplicado nas análises, utilizando a média verdadeira dos valores.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A madeira natural de *Pinus* sp. perdeu 13,23% de massa, enquanto as madeiras tratadas com AF nas concentrações de 10, 25, 50 e 100% perderam 5,19, 4,52, 3,38 e 3,28%, respectivamente. A comparação dos valores obtidos no controle, com os mensurados nas amostras tratadas à 10% e 25%, não apresentou diferença estatística (Figura 13), indicando, portanto, que nesses tratamentos, em relação à perda de massa, à ação do térmita foi equivalente. Já nos tratamentos a 50 e 100% de concentração de AF, observou-se diferença estatística significativa, quando a comparação foi realizada com os valores obtidos na madeira natural. Vale ressaltar também, que, estatisticamente, não há diferença entre a perda de massa das amostras tratadas nas concentrações de 50 e 100%.

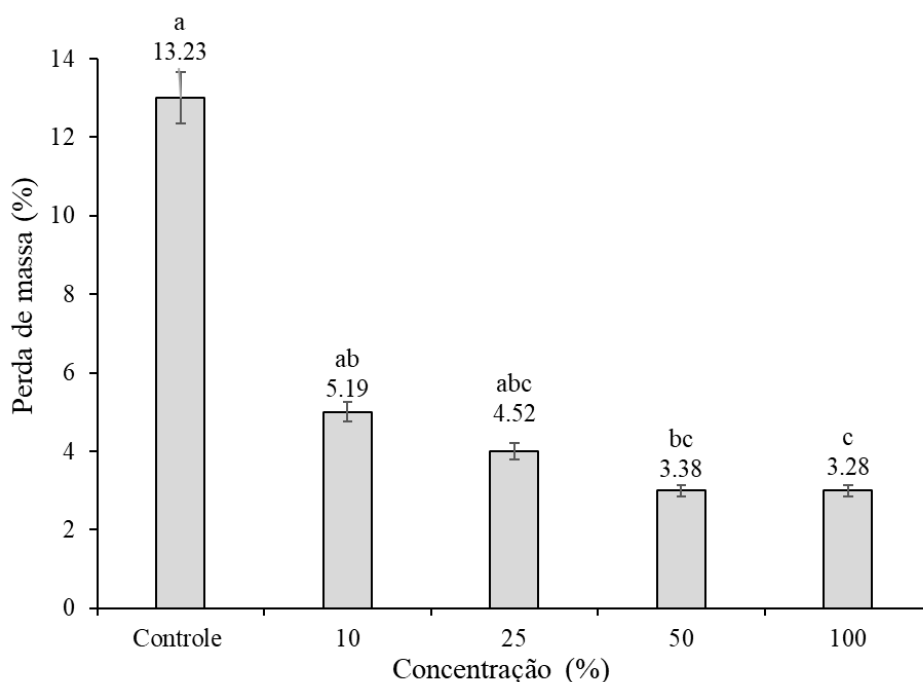


Figura 10. Perda de massa percentual média dos corpos de prova tratados com quatro diferentes concentrações de álcool furfurílico expostos à ação de *Coptotermes gestroi* durante dois meses. * Letras distintas, entre linhas, diferem estatisticamente (Dunn, 5% de significância).

A literatura demonstra que a madeira furfurilada apresenta agregação de resistência a várias espécies de térmitas, em condição de campo e laboratório Hadi, Westin & Rasyid (2005), Gascón-Garrido *et al.* (2013), Acosta *et al.* (2020), Hadi *et al.* (2020), Hadi *et al.* (2021), Sabrina *et al.* (2021) e Krajewski, Witomski & Dymica (2023), o que corrobora com as observações realizadas nesse trabalho.

Nesse sentido, Hadi, Westin & Rasyid (2005) furfurilaram a madeira de *Pinus sylvestris* em três concentrações de AF, 15, 48 e 92%, com ácido cítrico e/ou anidridos carboxílicos cíclicos, e submeteram as amostras em duas localidades a campo. Na primeira, onde a fauna de térmitas era composta por *Coptotermes* sp., *Macrotermes* sp., *Microtermes* sp. e *Nasutitermes* sp., Hadi, Westin & Rasyid (2005) observaram que após um ano, a madeira de *P. sylvestris* *in natura* perdeu 93% de sua massa, enquanto a tratada à 15% de AF perdeu de 65%. Já a madeira com 93% de AF não demonstrou perder massa. Para a segunda localidade, onde a fauna de térmitas era composta por *Macrotermes gilvus*, *Microtermes inspiratus*, e *Schedorhinotermes javanicus*, a madeira *in natura* perdeu 85% de massa, enquanto às furfuriladas a 15, 48 e 92% de concentração de AF perderam 65, 0 e 0%, respectivamente.

Ainda, Hadi *et al.* (2020), testaram a furfurilação da madeira de *Pinus merkusii* com uma solução contendo 95% de AF e 5% de ácido tartárico, contra a ação de *Macrotermes gilvus* em condições de campo por um período de 3 meses. Observaram uma perda de massa de 9,30% para a madeira *in natura*, enquanto a madeira furfurilada apresentou perda de 3,14%, indicando que a furfurilação da madeira de pinus submetida às condições de campo agrega resistência contra a ação de térmitas subterrâneos, corroborando, também, com os resultados obtidos neste trabalho.

Ozaki *et al.* (2001) furfurilaram a madeira de *Cryptomeria japonica* em cinco soluções distintas, uma com AF a 100%, uma com ácido bórico a 100% e três soluções contendo AF com catalisadores distintos, que foram: 75% de AF com ácido bórico, 87% de

AF com biborato de amônio e 87% de AF com borato de amônio. Os testes foram realizados com as madeiras tratadas não-lixiviadas e lixiviadas e avaliaram a resistência da madeira contra *Coptotermes formosanus* em condição de laboratório por um período de 6 semanas. Os resultados indicaram que a madeira *in natura* foi altamente suscetível a esse térmita, com perda de massa acima de 30%, enquanto as madeiras tratadas com ácido bórico puro e com AF em todas as concentrações foram altamente resistentes, onde a perda de massa foi inferior a 5% quando não lixiviadas. Já as madeiras tratadas lixiviadas que continham catalisadores e AF obtiveram perda de massa inferior a 5%, já a contendo AF puro obteve perda de 25% e a com ácido bórico puro obteve perda de massa em torno de 10%.

Hadi, Westin & Rasyid (2005) furfurilaram a madeira de *Pinus sylvestris* em três concentrações de AF, 15, 48 e 92%, contendo ácido cítrico e/ou anidridos carboxílicos cíclicos. Ao submeterem essas amostras, à ação de *Cryptotermes cynocephalus* em condições de laboratório por um período de 7 semanas, observaram que a perda de massa da madeira *in natura* foi de 10%, enquanto nas madeiras furfuriladas a 15, 48 e 92%, a perda de massa foi de 4,2, 1,6 e 0%, respectivamente.

Gascón-Garrido *et al.* (2013) ao furfurilarem a madeira de *Pinus palustri* utilizado a solução comercial SYP 30, contra a ação de *Reticulitermes banyulensis*, em laboratório, por um período de 8 semanas, relataram que houve perda de massa de 3,3% na madeira *in natura*, 6,7% na madeira furfurilada não-lixiviada e 8,9% na madeira furfurilada lixiviada.

Ainda, Acosta *et al.* (2020) furfurilaram a madeira de *Pinus elliottii*, empregando concentrações de 25, 50 e 75% de AF, em soluções contendo 5% de ácido cítrico, 5% de água destilada e completando a solução com álcool etílico. Foram feitos testes laboratoriais de escolha e alimentação forçada, onde os resultados obtidos indicaram que a madeira *in natura* não apresentou resistência contra *Coptotermes curvignatus*, enquanto a madeira furfurilada demonstrou agregação de resistência em todas as concentrações testadas. Os autores ressaltam que apesar de observarem agregação de resistência em todas as concentrações, a de 75% de AF apresentou maior perda de massa, em torno de 15%, enquanto as demais concentrações de AF obtiveram perda de massa em torno de 5%. Esse resultado difere dos demonstrados nesse trabalho, onde quanto maior a concentração de AF empregada, maior foi a agregação de resistência ao térmita.

Hadi *et al.* (2021) testaram em laboratório a resistência de quatro madeiras furfuriladas em solução contendo 95% de AF e 5% de ácido tartárico, impregnadas por meio de vácuo-pressão, contra a ação do térmita *Coptotermes curvignathus* por quatro semanas, entre elas, *Pinus merkusii*. Esses autores relataram que a madeira natural apresentou perda de massa em torno de 21,27%, enquanto a madeira de pinus furfurilada perdeu 2,02% de massa.

Sabrina *et al.* (2021), ao furfurilar a madeira de *Pinus merkusii* utilizando uma solução contendo 95% de AF e 5% de ácido tartárico contra a ação de *Coptotermes curvignatus* em condições de campo, por um período de um ano, demonstrou que houve perda de massa de 59,02% para a madeira *in natura*, enquanto a tratada perdeu 4,07%.

Krajewski, Witomski & Dymica (2023) impregnaram a madeira de *Pinus sylvestris* em solução contendo 50% de AF e 2 g de ácido cítrico por meio de vácuo-pressão contra a ação de *Reticulitermes lucifugus* em laboratório, por um período de 4 semanas. Averiguaram que a madeira furfurilada obteve perda de 0,01 g, enquanto na madeira *in natura* da porção provinda do alburno perdeu em média 0,71 g e a madeira *in natura* provinda do cerne, perdeu em média 0,21 g, indicando que a furfurilação agregou resistência contra a ação do térmita subterrâneo.

Em relação a classificação de resistência da madeira de *Pinus* sp, natural e furfurilada, verificou-se que a testemunha, submetida à ação de *C. gestroi*, em condições de campo, por dois meses, demonstrou ser pouco resistente. Por outro lado, todos os tratamentos com AF

agregaram aumento desse parâmetro. Porém, nos tratamentos com teores de 50% e 100% de AF, observou-se o maior acréscimo na resistência da madeira, sendo classificada como muito resistente. Nas condições experimentais onde empregou-se 10% e 25% de AF, essa classificação foi menos acentuada, e a madeira tornou-se resistente à *C. gestroi* (Tabela 8).

Tabela 8. Classe de resistência da madeira de *Pinus* sp. tratada com álcool furfurílico em quatro concentrações baseadas na SNI-7207 2006 e submetida a ação de *Coptotermes gestroi* durante dois meses.

Tratamento	<i>C. gestroi</i>
Testemunha	IV – Pouco resistente
10%	II – Resistente
25%	II – Resistente
50%	I – Muito resistente
100%	I – Muito resistente

Sobre essa classificação, Gascón-Garrido *et al.* (2013) observaram que a resistência da madeira de *Pinus palustri* furfurilada e natural, submetida à lixiviação artificial, demonstrou ser não durável à ação de *Reticulitermes banyulensis* em laboratório por um período 8 semanas. Por outro lado, as amostras furfuriladas e não-lixiviadas, foram classificadas como duráveis a esse térmita. Os resultados apresentados por Gascón-Garrido *et al.* (2013) indicam que o processo de lixiviação da madeira pode influenciar a classificação de durabilidade da madeira e, portanto, pode ser uma variável que afete negativamente a eficiência desse processo de tratamento. No entanto, cabe ressaltar, que as amostras empregadas neste trabalho não sofreram nenhum processo de lixiviação artificial, por outro lado, estavam expostas em condição de campo, onde processos de lixiviação natural podem ter ocorrido, face às intempéries ambientais.

Ainda, sobre essa classificação, Hadi *et al.* (2021) testaram a resistência de quatro madeiras em laboratório, incluindo a de *Pinus merkusii*, *in natura* e tratadas com AF e ácido tartárico como catalisador, contra a ação do térmita *Coptotermes curvignathus* por um período de 4 semanas. Observaram que a madeira de pinus *in natura* demonstrou ser não resistente, enquanto a madeira de pinus furfurilada foi classificada como muito resistente. Portanto, os resultados apresentados por Hadi *et al.* (2021) e os deste trabalho, corroboram a informação de que a furfurilação de madeiras do gênero pinus pode proporcionar resistência contra a ação dos térmitas do gênero *Coptotermes*.

Esses resultados também são evidenciados pela análise do índice de deterioração, parâmetro que expressa o estado das lesões nas amostras, em decorrência da ação do térmita. Portanto, nessas madeiras, de maneira geral, observou-se que *C. gestroi* proporcionou lesões

classificadas de moderadas a severas, em alguns casos. Essa ação lesionou entre 10% e 30% da superfície de algumas amostras, havendo, inclusive, penetração (Figura 11 e 12). Portanto, a madeira natural apresentou índice médio de deterioração, que expressa a maior ação das térmitas (Tabela 9).

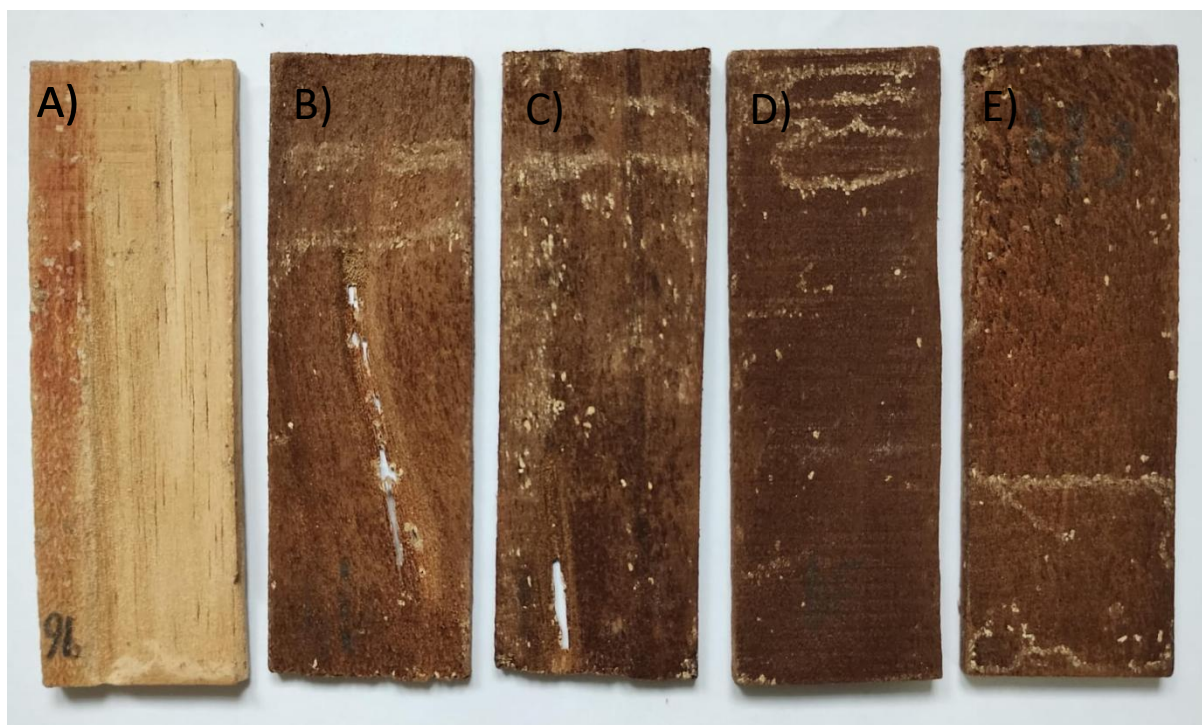


Figura 11. Corpos de prova de madeira de *Pinus* sp. *in natura* (A) e tratados com álcool furfurílico a 10% (B), 25% (C), 50% (D) e 100% (E), respectivamente, da esquerda para a direita, submetidos a ação do térmita *Coptotermes gestroi* por tanto tempo em condições de campo.



Figura 12. Corpo de prova com ação muito severa, onde o térmita tomou cerca de 50% da amostra.

Tabela 9. Deterioração média, notas da avaliação do aspecto visual (mínima e máxima) e diferença de peso em gramas das amostras tratadas com álcool furfurílico em diferentes concentrações sob ação de térmitas *Coptotermes gestroi*.

Tratamento	Índice de Deterioração	Nota	
		Máxima	Mínima
Controle	7,8 ± 1,93	10	4
10%	8,6 ± 1,17	10	7
25%	9,3 ± 0,94	10	7
50%	9,5 ± 0,53	10	9
100%	9,3 ± 0,48	10	9

*Letras distintas, entre linhas, diferem estatisticamente (Dunn, 5% de significância).

Na madeira furfurilada, o índice de deterioração variou conforme a concentração de álcool furfurílico empregado no tratamento. Esse registro sinaliza que quanto maior a concentração do produto na madeira, menor foram as lesões que danificaram as amostras. Sendo assim, a concentração de 10%, permitiu que, em média, houvesse ação fraca do térmita, o que equivale à 3% da superfície da madeira escarificada. Já para as concentrações de 25%, 50% e 100% de álcool furfurílico, observou-se os maiores índices médios de deterioração, o que revela ação superficial dos insetos na madeira, havendo somente pequenas escarificações (Figura 12 e Tabela 9).

Esses resultados estão equivalentes com os apresentados por Hadi *et al.* (2020), que, observaram, para a madeira de pinus tratada com solução contendo 95% de AF e 5% de ácido tartárico, e submetida em condições de campo por 3 meses à ação de *Macrotermes gilvus*, uma nota de 7,4 para a madeira *in natura* e 9,6 para a madeira furfurilada. Essas notas indicam ação moderada à severa dos térmitas, com danos em torno de 10 a 30% do corpo de prova para a madeira *In natura*, enquanto para a madeira tratada, indica apenas pequenas lesões superficiais.

Ainda, Sabrina *et al.* (2021), ao impregnarem a madeira de *Pinus merkusii* com AF a 95% e 5% de ácido tartárico, registraram notas médias de 9,8, indicando que houve pouca ação de *Coptotermes curvignatus* em condições de campo por um ano. Em comparação, a madeira não tratada obteve notas médias em torno de 4, indicando que houve ação severa, tendo ação em torno de 50% e 75% da superfície da madeira.

Já Hadi *et al.* (2021), furfurilaram a madeira de *Pinus merkusii* com AF a 95% e 5% de ácido tartárico, onde obtiveram nota 5,5 para a madeira de pinus *in natura*, indicando que houve lesão no corpo de prova correspondente a mais de 50% de seu volume. Já para a madeira furfurilada, obteve-se nota 9,7, indicando que houve ação superficial na amostra, onde menos de 3% de sua área foi afetada por *Coptotermes curvignatus* em condições de laboratório por 4 semanas. Esses resultados indicam que a impregnação com AF aumentou a resistência da madeira de *P. merkusii* contra a ação de térmitas subterrâneos, corroborando com o encontrado neste trabalho.

Krajewski *et al.* (2023) impregnaram a madeira de *Pinus sylvestris*, em solução contendo 50% de AF e 2 g de ácido cítrico. Essas amostras foram submetidas à ação de

Reticulitermes lucifugus, em laboratório por um período de quatro semanas. Foi observado que a madeira furfurilada obteve nota 9 no aspecto visual, enquanto a madeira *in natura*, provinda tanto do alburno quanto do cerne, obtiveram notas 2,8 e 8,2, respectivamente, indicando que a furfurilação da madeira agrega resistência contra esse térmita, dificultando que o térmita promova lesões nas amostras, como observado neste trabalho

Cabe ressaltar, também, que o catalisador empregado nas diluições do AF, pode ser um fator que afete à agregação de resistência da madeira frente a *C. gestroi*. Neste trabalho, empregou-se o ácido cítrico com esse propósito. Portanto, de acordo com Cruz-Lopes *et al.* (2025), o ácido cítrico impregnado isoladamente na madeira de *Pinus pinaster*, em concentrações de 5, 10 e 15% demonstrou, por si só, ser um produto capaz de conferir resistência significativa contra a ação do térmita do gênero *Rhinotermes*, por um período de 8 semanas em condições de laboratório. Cruz-Lopes *et al.* (2025) explicam que essa agregação de resistência pode ter ocorrido por meio da modificação da estrutura da madeira pelo ácido, tornando-a mais durável e com menor capacidade de retenção de água e, conseqüentemente, menos palatável e, também, de difícil digestão pelos térmitas. Diante disso, especula-se que o uso do ácido cítrico pode ir além do papel de catalisador da reação de polimerização do AF na madeira, podendo ser, também, uma variável que tenha atuado, sinergicamente com o AF, na inibição da ação de *C. gestroi* nas amostras.

10. CONCLUSÕES

A madeira natural de *Pinus* sp. apresenta pouca resistência à *Coptotermes gestroi* em condições de campo.

Quando impregnada com álcool furfurílico (AF), a madeira de pinus torna-se resistente à 10% e 25% e altamente resistente a 50% e 100%, respectivamente, indicando que a concentração de álcool furfurílico influencia nas classes de resistência da madeira de pinus.

A concentração de álcool furfurílico impregnado na madeira de *Pinus* sp., afeta a inibição da ação de *Coptotermes gestroi*, sendo que a madeira de pinus natural apresenta lesões que configuram, em média, ação moderada. Já as amostras tratadas com 10% apresentam lesões correspondente a fraca ação, enquanto as madeiras tratadas a 25%, 50% e 100% de álcool furfurílico apresentam lesões que configuram ação superficial

11. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A madeira natural de *Pinus* sp. é moderadamente resistente ao fungo *Rhodonía placenta* em condições de laboratório. Quando impregnada com álcool furfurílico, torna-se altamente resistente, em qualquer uma das concentrações testadas neste trabalho.

A concentração de álcool furfurílico impregnado na madeira de *Pinus* sp., influencia na quantidade de resina furfurílica incorporada na madeira, porém não afeta a eficiência na inibição do fungo, e dessa forma, a concentração mais baixa avaliada (10%), tem eficiência análoga as maiores concentrações testadas.

Os aditivos usados para realizar as diluições, álcool etílico, água e ácido cítrico, aparentam melhorar o processo de polimerização, em relação à impregnação com álcool furfurílico puro, conferindo maiores percentuais de incorporação de resina furfurílica na madeira de *Pinus* sp.

A madeira natural de *Pinus* sp. apresenta pouca resistência à *Coptotermes gestroi* em condições de campo.

Quando impregnada com álcool furfurílico (AF), a madeira de pinus torna-se resistente à *Coptotermes gestroi* 10% e 25% e altamente resistente a 50% e 100%, respectivamente, indicando que a concentração de álcool furfurílico influencia nas classes de resistência da madeira de pinus.

A concentração de álcool furfurílico impregnado na madeira de *Pinus* sp, afeta a inibição da ação de *Coptotermes gestroi*, sendo que a madeira de pinus natural apresenta lesões que configuram, em média, ação moderada. Já as amostras tratadas com 10% apresentam lesões correspondente a fraca ação, enquanto as madeiras tratadas a 25%, 50% e 100% de álcool furfurílico apresentam lesões que configuram ação superficial.

12. REFERÊNCIAS

- ACOSTA, A. P.; LABIDI, J.; BARBOSA, K. T.; CRUZ, N.; DELUCIS, R. D. A.; GATTO D. A. Termite Resistance of a Fast-Growing Pine Wood Treated by *In Situ* Polymerization of Three Different Precursors. **Forests** 11, no. 8: 865, 2020a.
- ACOSTA, A. P.; BELTRAME, R.; MISSIO, A. L.; DELUCIS, R. D. A.; GATTO D. A. Juvenile and mature woods from pine subjected to in situ polymerization with furfuryl alcohol, **Wood Material Science & Engineering**. 2020b.
- AHMED, S. A.; HANSSON, L.; MORÉN, T. Distribution of preservatives in thermally modified Scots pine and Norway spruce sapwood. **Wood Science Technology**, 2013. v. 47, p. 499 – 513.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Floresta e Ambiente**, 2000. v. 7, n. 1, p. 158 – 166.
- ALFREDSEN, G.; FOSSDAL, C. G.; NAGY, N. E.; JELLISON, J.; GOODELL, B. Furfurylated wood: impact on *Postia placenta* gene expression and oxalate crystal formation. **De Gruyter**, 2016. Vol. 70, p. 947 – 962.
- AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. **AWPA E10-16**. Laboratory method for evaluating the decay resistance of wood-based materials against pure basidiomycete cultures: soil/block test. EUA: AWP, 2016.
- AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. **AWPA E30-16**. Standard method for evaluating natural decay resistance of wood using laboratory decay tests. EUA: AWP, 2016.
- ARANTES, V.; GOODELL, B. Current understandig of brown-rot fungal biodegradation mechanisms: a review. In: SCHULTZ, T. P.; GOODELL, B.; NICHOLAS, D. D. Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials. Washington, DC: **American Chemical Society**, 2014. V. 1158 p. 3-21.

AYRES, M.; AYRES Jr, M.; AYRES, D. L.; SANTOS, A. A. A. BioEstat 5.0 – **Aplicações Estatísticas nas Áreas das Ciências Biológicas e Médicas**. Sociedade Civil Mamirauá, Tefé. 380p. 2007.

BECK, G.; HILL, C.; COCHER, P. M.; ALFREDSEN, G. Accessibility of hydroxyl groups in furfurylated wood at different weight percent gains and during *Rhodonía placenta* decay. **European Journal of Wood and Wood Products**, 2019. V. 77, p. 953-955.

BORGES, C. C.; TONOLI, G. H. D.; CRUZ, T. M.; DUARTE, P. J.; JUNQUEIRA, T. A. Nanoparticles-based wood preservatives: the next generation of wood protection? **CERNE**, 2018. v. 24, n. 4, p. 397-407.

BRAZOLIN, S.; TOMAZELLO, M. F.; AMARAL, R. D. A. M.; OLIVEIRA, M. A. N. Associação entre fungos e cupins subterrâneos no processo de biodeterioração do lenho de árvores de *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze da cidade de São Paulo, SP. **Scientia Florestalis**. v. 38, p. 215 - 224 , 2010.

CARVALHO, D. E.; LOIOLA, P. L.; GUIMARÃES, P. P.; CASTRO, V. G. Métodos de preservação. In CASTRO, V.G.; GUIMARÃES, P.P. Deterioração e preservação da madeira. **Edufersa**, 2018. p. 163 – 176.

CHIU, C. I.; YEH; H. T.; TSAI, M. J.; LI, H. F. Naturalization and control of *Coptotermes gestroi* (Blattodea: Rhinotermitidae) in a Taiwanese forest. **Journal of Economic Entomology**, 2016. v. 109, p. 1317–1325.

COIMBRA, M. C. R.; BRAZIL, T. R.; MORGADO, G. F. M.; MARTINS, E. F.; ANJOS, E. G. R.; OYAMA, I. M. C. RODRIGUES, J. S.; BOTARO, V. R.; MONTAGNA, L. S.; REZENDE, M. C. Estabelecimento de rota síntese da resina furfurílica em meio ácido visando minimizar a exotermia da reação. *Matéria*, 2022. v. 27, n. 3, p. 1 – 16.

COSTA-LEONARDO, A. M. *Coptotermes havilandi*. In: COSTA-LEONARDO, editor. **Cupins-praga: morfologia, biologia e controle**. Rio Claro, 2002.

CRUZ-LOPES, L.; SELL, M.; LOPES, R.; ESTEVES, B. Enhancing *Pinus pinaster* Wood Durability Through Citric Acid Impregnation. **Sustainability**, 2025. v. 17, p. 1-16.

ESTEVEES, B.; PEREIRA, H. Novos Métodos de Protecção da Madeira. **6º Congresso Florestal Nacional – A floresta num mundo globalizado**. Ponta Delgada, Portugal, 2009.

ESTEVEES, B.; NUNES, L.; PEREIRA, H. Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). **European Journal of Wood and Wood Products**, 2010. V. 69, p. 521-525.

FERNANDES, J. F. Preferência alimentar de *Coptotermes gestroi* (Wasmann, 1986) (Blattodea: Rhinotermitidae) por diferentes tipos de madeira em áreas urbanas. Dissertação de Mestrado, **Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, Seropédica – RJ. p. 54, 2017.

FERNANDES, V. J.; SOUZA, T. S. D.; GAZAL, V.; AGUIAR-MENEZES, E. D. L.; MENEZES, E. B. Differential susceptibility of MDF and commercial wood to *Coptotermes gestroi*. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. e20170562, 2018.

FERRAZ, A. L. **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J. L. Caxias do Sul, Educs, 2010. Ed. 2, p. 215 – 242.

GALLIO, E.; ZANATTA, P.; CRUZ, N. D.; ZANOL, G. S.; SCHULZ, H. R. & GATTO, D. A. Influência dos tratamentos de termorretificação e furfurilação em propriedades tecnológicas de uma conífera. **Revista Matéria**, 2019. V. 24, N. 03, artigo e-12424.

GARBACHEVSKI, E. C.; HILLIG, E.; ABREU, R. N.; RETSLAFF, F. A. S.; KOEHLER, H. S. Physico-mechanical properties and growth characteristics of pine juvenile wood as a function of age and planting spacing. **Revista Árvore**, 2022. v.46, p. 1 – 11.

GARCIA, T. A. **Purificação e caracterização das lacases de *Pycnoporus sanguineus***. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Brasília, 2006. p. 126.

GASCÓN-GARRIDO, P.; OLIVER-VILLANUEVA, J. V.; IBIZA-PALACIOS, M. S.; MILITZ, H.; MAI, C.; ADAMOPOULOS, S. Resistance of wood modified with different technologies against Mediterranean termites (*Reticulitermes* spp.). **International Biodeterioration & Biodegradation**. v. 82, p. 13 – 16, 2013

GOLDSTEIN, I. S. The impregnation of wood to impart resistance to alkali and acid. **Forest Products Journal**, v. 5, n. 4, p. 265-267, 1955.

GOSSELIN, M.; ZAGURY, G. J. Metal(loid)s inhalation bioaccessibility and oxidative potential of particulate matter from chromated copper arsenate (CCA) - contaminated soils. **Chemosphere**, 2020. v. 238, n. 124557.

HADI, Y.; WESTIN, M.; RASYID, E. Resistance of furfurylated wood to termite attack. **Forest Products Journal**, 2005. Vol. 55, p. 85-88.

HADI, Y. S.; HERLIYANA, E. N.; MULYOSARI, D.; ABDILLAH, I. M.; PARI, R.; HIZIROGLU, S. Termite resistance of furfuryl alcohol and imidacloprid treated fast-growing tropical wood species as function of field test. **Applied Science**, 2020. v. 10, p. 1 – 10.

HADI, Y. S.; MULYOSARI, D.; HERLIYANA, E. N.; PARI, G.; ARSYAD, W. O. M.; ABDILLAH, I. M.; GÉRARDIN, P. Furfurylation of wood from fast-growing tropical species to enhance their resistance to subterranean termite. **European Journal of Wood Products**, 2021. v. 79, p. 1007–1015. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01676-4>.

HAPUKOTUWA, N. K.; GRACE, K. *Coptotermes formosanus* and *Coptotermes gestroi* (Blattodea: Rhinotermitidae) Exhibit Quantitatively Different Tunneling Patterns. **Hindawi Publishing Corporation**, 2012. v.2012, p. 1 – 7.

HEDLUND, J. C.; HENDERSON, G. Effect of available food size on search tunnel formation by the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae), **Journal of Economic Entomology**, 1999. v. 92, n. 3, p. 610–616.

HIGHLEY, T. L. Biodeterioration of wood. In: Forest Products Laboratory. Wood handbook: Wood as an engineering material. **Madison**, USDA, 1999.

HILL, C. A. S. **Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes**, 2006. Vol. 1, p. 239.

HORI, C.; GASKELL, J.; IGARASHI, K.; SAMEJIMA, M.; HIBBETT, D.; HENRISSAT, B.; CULLEN, D. Genomewide analysis of polysaccharides degrading enzymes in 11 white- and brown-rot Polyporales provides insight into mechanisms of wood decay. **Mycologia**, 2013. v.105, n.6, p.1412–1427. DOI: <https://doi.org/10.3852/13-072>

IDNURM, A.; HEITMAN, J. Light Controls Growth and Development via a Conserved Pathway in the Fungal Kingdom. **PloS Biology**, 2005. v.3, p. 615 – 626.

INDONESIAN NATIONAL STANDARD. **SNI 7207**. Teste de durabilidade da madeira e dos produtos de madeira contra organismos degradadores da madeira. Indonésia, 2006.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT). Manual de biodeterioração de madeiras em edificações, 2001.

IROEGBU, A. O. C.; RAY, S. S. On the chemistry of furfuryl alcohol polymerization: A review. **Journal of Polymer Science**, 2024. v. 62, p. 1044 – 1060.

JANKOWSKI, I. P.; BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. P. **Preservação**. Revista da Madeira, n. 68, dez. 2002.

JONES, D.T.; EGGLETON P. Global biogeography of termites: a compilation of sources. In: BIGNELL, D.E.; ROISIN, Y.; LO, N. **Biology of termites: a modern synthesis**. Springer Netherlands, 2010. p. 477 – 498.

KRAJEWSKI, A.; WITOMSKI, P.; DYMICA, A. The resistance of *Pinus sylvestris* L. wood modified with furfuryl alcohol for destruction by *Reticulitermes lucifugus* var. *Santonensis* (de Feytaud). **Wood Research**, 2023. v. 68, p. 58 – 67.

KUSWANTO, E.; AHMAD, I.; DUNGANI, R. Threat of subterranean termites attack in the asian countries and their control: a review. **Asian Journal of Applied Sciences**. v. 8, p. 227 – 239, 2015.

LADEIRA, L. A.; PEREIRA, C. C. A.; COUTO, L. C.; REIS, A. B. Determinação das propriedades físicas da madeira de pinus. sp. **Brazilian Applied Science**. V. 2, n. 7, Edição Especial, p. 2244-2251, 2018.

LANDE, S., WESTIN, M., SCHNEIDER, M. Properties of furfurylated wood. **Scandinavian Journal of Forest Research**, 2004a. Vol. 19, p. 22-30.

LANDE, S.; WESTIN, M.; SCHNEIDER, M. H. Eco-efficient wood protection: furfurylated wood as alternative to traditional wood preservation. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, 2004b. V. 15 p. 529-540.

LANDE, S.; WESTIN, M.; SCHNEIDER, M. H. Development of modified wood products based on furan chemistry. **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, 2008. v. 484, p. 367 – 378.

LEPAGE, E.; SALIS, A. G.; GUEDES, E. C. R. Tecnologia de proteção da madeira. 1 ed. **Montana Química**. 225p, 2017.

LI, W.; REN, D.; ZHANG, X.; WANG, H.; YU, Y. The Furfurylation of Wood: A Nanomechanical Study of Modified Wood Cells. **BioResources**, 2016. Vol. 11, p. 3614 – 3625.

LOPES, L. R.; STROPARO, T. R. Cultura de *Pinus taeda*: custos e resultados. **Open Science Research V**. v. 5, p. 1118 – 1133, 2022.

MANTANIS, G. I. Chemical Modification of Wood by Acetylation or Furfurylation: A Review of the Present Scaled-up Technologies. **BioResources**, 2017. v. 12, p. 4478 – 4489.

MARIANO, L. G.; CARVALHO, A. G.; TREVISAN, H.; FERNANDES, M. C. A. Identification and control of wood-deteriorating fungi. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 87, p. 1 – 7, 2020.

MARISCAL, R.; MAIRELES-TORRES, P.; OJEDA, M.; SÁDABA, I.; GRANADOS, M. L. Furfural: a renewable and versatile platform molecule for the synthesis of chemicals and fuels. **Energy & Environmental Science**, 2016. v.9, p. 1144 – 1189.

MARTHA, R.; CANDELIER, K.; THÉVENON, M. F.; GEORGE, B.; RAHAYU, I. S.; DARMAWAN, W.; GÉRARDIN, P. Non biocide treatments for the protection of short rotation teak wood against subterranean termites. **Construction and Building Materials**, v. 450, p. 1 -11, 2024.

MAYOWA, O. J.; ESTHER, F. O.; ADEYEMI, I. E.; OLUWATOBI, D. O. **An Analysis of Impact of Furfurylation Treatments on the Physical and Mechanical Properties of Pterygota macrocarpa Wood**. Journal of Materials Science Research and Reviews, 2023. V. 11, Ed. 1, p. 6-23.

MODES, K. S.; LAZAROTTO, M.; BELTRAME, R.; VIVIAN, M. A.; SANTINI, E. J.; MUNIZ, M. F. B. Resistência natural das madeiras de sete espécies florestais ao fungo *Pycnoporus sanguineus* causador da podridão branca. **Cerne**, 2012. v.18, n.3, p.407 – 411.

NEOH, K. B.; LEE, C. Y. Asian subterranean termite, *Coptotermes gestroi*, IN, **Biology and Management of the Formosan Subterranean Termite and Related Species** (SU, Y.N; LEE, C.Y.). v.1, p. 323 – 352, 2023.

NILES, J. E. Efeito do tempo de exposição a campo na durabilidade natural das madeiras de *Cryptomeria japonica*, *Cupressus lusitanica* e *Pinus taeda*. Trabalho de conclusão de curso, **Universidade Federal de Santa Catarina**, Curitibanos, 2020. p.56

NORDSTIERNA L.; LANDE S.; WESTIN M.; KARLSSON O.; FURO I. Towards novel wood-based materials: chemical bonds between lignin-like model molecules and poly(furfuryl alcohol) studied by NMR. **Holzforschung**, 2008. v. 62, p. 709 – 713.

OI, F. A Review of the Evolution of Termite Control: A Continuum of Alternatives to Termiticides in the United States with Emphasis on Efficacy Testing Requirements for Product Registration. **Insects**, 2022. v.13, p. 1 – 28.

OLIVEIRA, F. L.; LIMA, I. L.; GARCIA, J. N.; FLORSHEIM, S. M. B. Propriedades da madeira de *Pinus taeda* em função da idade e da posição radial na tora. **Revista Instituto Florestal**, 2006. v.18, p. 59 – 70.

OLIVEIRA, L. S.; MULLER, M. T. Agentes de biodeterioração da madeira. **Editores UFPel**, Pelotas, 2024. p. 70.

OZAKI, S. K.; YALINKILIC, M. K.; IMAMURA, Y.; SOUZA, M. F. D. Effect of combined boron compounds and furfuryl alcohol treatment on termite and decay resistance in wood. **High-Performance Utilization of Wood for Outdoor Uses**, 2001. V. 1, p 97-103.

PAWLIK, A.; JASZEK, M.; STEFANIUK, D.; SWIDERSKA-BUREK, U.; MAZUR, A.; WIELBO, J.; KOPER, P.; ZEBRACKI, K.; JANUSZ, G. Combined effect of light and nutrients on the micromorphology of the white rot fungus *Cerrena unicolor*. **International Journal of Molecular Sciences**, 2020. v. 21, p 1 – 13.

PILGÅRD, A.; TREU, A.; VAN ZEELAND, A. N. T.; GOSSELINK, R. J. A.; WESTIN, M. Toxic hazard and chemical analysis of leachates from furfurylated wood. **Environmental Toxicology and Chemistry**, 2010. v. 29, n. 9, p. 1918–1924.

RUST, M. K.; SU, N. Y. Managing social insects of urban importance. **Annual Review of Entomology**. v. 57, p. 55 – 77, 2012.

SABRINA, P. A.; HADI, Y. S.; NAWAWI, D. S.; ABDILLAH, I. B.; PARI, R. Color Changes and Resistance Against Subterranean Termites Attack of Furfuryl Alcohol Impregnated Pine and Sengon Woods Through Graveyard Test. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2021. v. 891, p. 1 – 6.

SANTOS, C. E.; CANDATEN, L.; SILVA, P. R. B.; TREVISAN, R. Madeira preservada com CCA: proficuidade, potencial deletério, toxicidade dos resíduos e tecnologias de recuperação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, 2020. v.15, p. 153 – 166.

SEJATI, P. S.; IMBERT, A.; GÉRARDIN-CHARBONNIER, C.; DUMARÇAY, S.; FREDON, E.; MASSON, E.; NANDIKA, D.; PRIADI, T.; GÉRARDIN, P. Tartaric acid catalyzed furfurylation of beech wood. **Wood Science and Technology**, v. 51, p. 379 – 394.

SCHULZ, H. R.; GALLIO, E.; ACOSTA, A. P.; BARBOSA K. T.; GATTO D. A. Efeito da furfurilação em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus elliottii*. **Revista Matéria**, V. 24, N. 03, artigo e-12442, 2019.

SCHULZ, H. R.; ACOSTA, A. P.; BARBOSA K. T.; GALLIO, E.; BELTRAMEN, R.; GATTO, D. A. Efeito do tratamento térmico da madeira de *Pinus elliottii* nos parâmetros físico-mecânicos e colorimétricos. **BIOFIX Scientific Journal**, 2020. V.5, p. 86-93.

SEJATI, P. S.; IMBERT, A.; GÉRARDIN-CHARBONNIER, C.; DUMARÇAY, S.; FREDON, E.; MASSON, E.; NANDIKA, D.; PRIADI, T.; GÉRARDIN, P. Tartaric acid catalyzed furfurylation of beech wood. **Wood Science and Technology**, v. 51, p. 379 – 394.

SIMIC, Z. V.; KIJEVCANIN, M. L.; RADOVIC, I. R.; GRILC, M.; IVANIS, G. R. Thermodynamic and transport properties of biomass-derived furfural, furfuryl alcohol and their mixtures. **Energies**, 2021. V. 14, p 1-18.

SKREDE, I.; SOLBAKKEN, M. H.; HESS, J.; FOSSDAL, C. G.; HEGNAR, O.; ALFREDSEN, G. Wood Modification by Furfuryl Alcohol Caused Delayed Decomposition Response in *Rhodonina (Postia) Placenta*. **Applied and Environmental Microbiology**. Jul, 2019.

STAMM, A. J. Dimensional stabilization of wood with furfuryl alcohol,” in: Wood Technology: Chemical Aspects, Goldstein (ed.), ACS Symposium Series, v. 43, **American Chemical Society**, 1977, Washington, EUA, p.141-149. DOI: 10.1021/bk-1977-0043.ch009

SU, N. Y.; MULLINS, A.; CHOUVENC, T. Elimination of structural and tree infestations of the Asian subterranean termite, *Coptotermes gestroi* (Wasmann) (Blattodea: Rhinotermitidae) with noviflumuron baits in above-ground stations. **Journal of Economic Entomology**, 2023. V. 116, n.3, p. 909–915.

THYGESEN, L. G.; EHMCKE, G.; BARSBERG, S.; PILGÄRD, A. Furfurylation result of Radiata pine depends on the solvent. **Wood, Science and Technology**, 2020. v.54, p.929 – 942.

THYGESEN, L. G.; BECK, G.; NAGY, N. E.; ALFREDSEN, A. Cell wall changes during brown rot degradation of furfurylated and acetylated wood. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2021. V.162, p. 1-10.

TREVISAN, H.; SOUZA, T. S.; ROCHA, N. F.; CARVALHO, A. G. Reflexões sobre o ensino em proteção e deterioração de madeiras nos cursos de engenharia florestal do Brasil. **Engenharia Florestal Desafios, Limites e Potencialidade**. 1Ed, v. 1, p. 731 – 758, 2020.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. *Ciência Florestal*, 2015. v. 25, n. 1, p. 257 – 271.

VIVIAN, M. A.; SANTINI, E. J.; MODES, K. S.; GARLET, A.; MORAIS, W. W. C. Resistência biológica da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* a fungos apodrecedores em ensaios de laboratório. **Ciência Florestal**, 2015. v. 25, n. 1, p. 175 – 183.

WIEDENHOEFT, A. C.; MILLER, R. B. Structure and Function of Wood. In: ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. **CRC Press**, 2005. v. 1, p. 18 – 42.

WYMELENBERG, A. V.; GASKELL, J.; MOZUCH, M.; SPLINTER BONDURANT, S. B. D.; SABAT G.; RALPH, J.; SKYBA, O.; MANSFIELD, S. D.; BLANCHETTE, R. A.; GRIGORIEV, I. V.; KERSTEN, P. J.; CULLEN, D. Significant Alteration of Gene Expression in Wood Decay Fungi *Postia placenta* and *Phanerochaete chrysosporium* by Plant Species. **Appl Environ Microbio**, 2011. v.177. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00508-11>

YANG, T.; WANG, J.; XU, J.; MA, E.; CAO, J. Hygroscopicity and dimensional stability of *Populus euramericana* Cv. modified by furfurylation combined with low hemicellulose pretreatment. *J Mater Sci*, 2019. v. 54, p. 13445 – 13456.

ZABELL, R. A.; MORRELL, J. J. Wood Microbiology. **Academic Press**, 2020. v. 1, p. 566.

ZELINKA, S. L.; ALTGEN, M.; EMMERICH, L.; GUIGO, N.; KEPLINGER, T.; KYMALAINEN, M.; THYBRING, E. E.; THYGESEN, L. G. Review of wood modification and wood functionalization technologies. **Forests**, 2022. V. 13. p. 1-46.

ZHANG, J.; PRESLEY, G. N.; HAMMEL, K. E.; RYU, J. S.; MENKE, J. R.; FIGUEROA, M.; HU, D.; ORR, G.; SCHILLING, J. S. Localizing gene regulation reveals a staggered wood decay mechanism for the brown rot fungus *Postia placenta*. **PNAS**, 2016. V.113, p. 10968-10973.

ZHANG, M.; JI, C.; ZHU, J.; WANG, X.; WANG, D.; HAN, W. Comparison of wood physical and mechanical traits between major gymnosperm and angiosperm tree species in China. **Wood Science and Technology**, 2017. v. 51, p. 1405 – 1419.