



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

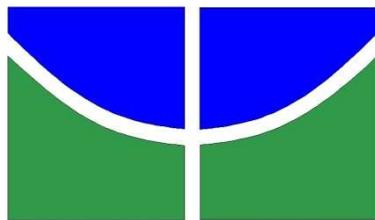
**EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS DA
AMAZÔNIA APÓS DEZ ANOS EM CAMPO DE APODRECIMENTO**

Laura de Castro Silva

Brasília, 1 de dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS DA
AMAZÔNIA APÓS DEZ ANOS EM CAMPO DE APODRECIMENTO**

Laura de Castro Silva

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado ao Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade de Brasília como parte
das exigências para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Florestal.
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa

Brasília-DF, 1 de dezembro de 2023



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento de Engenharia Florestal – EFL

EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS DA AMAZÔNIA APÓS DEZ ANOS EM CAMPO DE APODRECIMENTO

Estudante: Laura de Castro Silva

Matrícula: 18/0021800

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa

Menção: _____

Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa
Departamento de Engenharia Florestal
Orientador (EFL)

Prof. Dr. Ricardo Faustino Teles
Instituto Federal de Brasília - IFB
Membro da Banca

Prof. Dr. Eder Pereira Miguel
Departamento de Engenharia Florestal
Membro da Banca

Brasília-DF, 1 de dezembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, LAURA DE CASTRO

Eficiência do tratamento químico em madeiras da Amazônia após dez anos em campo de apodrecimento.

29 p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Engenheiro(a), Engenharia Florestal, 2023).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Madeira

2. CCA

3. Campo de apodrecimento

4. Resistência natural

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, L. C. (2023). **EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS DA AMAZÔNIA APÓS DEZ ANOS EM CAMPO DE APODRECIMENTO**. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 29 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR(A): Laura de Castro Silva

TÍTULO: *EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS DA AMAZÔNIA APÓS DEZ ANOS EM CAMPO DE APODRECIMENTO*.

GRAU: Engenheiro(a) Florestal

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Laura de Castro Silva

Lauracastrosm@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Ao longo de toda a graduação, as pessoas às quais pude contar e que serviram de alicerce nesta caminhada foram essenciais para a concretização desta realização. Assim, deixo meus mais sinceros agradecimentos à minha mãe e à minha avó, sem as quais nada disso seria possível. Espero poder retribuir sempre todo o esforço e dedicação. Amo muito vocês.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Florian, pelos ensinamentos, pela paciência e pelas palavras de incentivo. Este trabalho só foi possível graças aos seus conselhos e imenso apoio.

Às minhas colegas de curso Evelyn Vaz, Julia de Oliveira e Marcella Rocha, que foram fundamentais neste percurso, obrigada pela parceria e por toda ajuda e incentivo. Ao meu namorado Lucas Rabelo por todo apoio e companheirismo, obrigada por tornar tudo melhor.

À Engenharia Florestal e ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (UnB), obrigada por me proporcionar tantas experiências únicas e por todos os ensinamentos enriquecedores que levarei para sempre.

A todos vocês, meu muito obrigada!

Laura de Castro Silva

RESUMO

Silva, Laura de Castro (SILVA, L. C.) **EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO EM MADEIRAS DA AMAZÔNIA APÓS DEZ ANOS EM CAMPO DE APODRECIMENTO.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

O presente estudo teve como objetivo avaliar o estado de sanidade das madeiras amazônicas marupá (*Simarouba amara*), tauari (*Couratari sp.*) e cumaru (*Dipteryx odorata*), não tratadas e tratadas quimicamente sob pressão, com um produto à base de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA-C), após 10 anos em campo de apodrecimento utilizando o método não destrutivo de ondas ultrassônicas e o método de análise visual. A análise visual demonstrou que o tratamento químico foi eficiente para a proteção das amostras de marupá, tauari e cumaru. A técnica de avaliação não destrutiva de propagação de ondas ultrassônicas para o monitoramento do nível de deterioração foi útil para as amostras de marupá e tauari, para as amostras de cumaru não foi observado diferença considerável entre as amostras tratadas e não tratadas, provavelmente em razão da pouca penetração do preservante químico nesta espécie. Houve forte correlação entre a massa das amostras e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para as amostras sem tratamento químico e baixa correlação para as amostras tratadas com CCA-C, em razão do efeito de diminuição da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pelo produto químico. A estimativa de vida útil através da análise de regressão das amostras de marupá e tauari, indicando uma expectativa de 37 e 32 anos de vida útil em serviço, respectivamente. Para o cumaru o intervalo de tempo do estudo ainda não foi suficiente para estimar sua vida útil em serviço.

Palavras-chave: madeira; campo de apodrecimento; CCA; durabilidade natural.

ABSTRACT

Silva, Laura de Castro (SILVA, L. C.) **EFFICIENCY OF CHEMICAL TREATMENT ON AMAZONIAN WOOD AFTER TEN YEARS IN DECAY FIELD.** Monograph (Forest Engineering Degree) – University of Brasília, Brasília, DF.

The present study aimed to evaluate the health status of Amazonian wood marupá (*Simarouba amara*), tauari (*Couratari* sp.) and cumaru (*Dipteryx odorata*), untreated and chemically treated under pressure, with a product based on Copper Arsenat Chromated type c (CCA-C), after 10 years in a decay field using the non-destructive ultrasonic wave method and the visual analysis method. Visual analysis demonstrated that the chemical treatment was efficient in protecting marupá, tauari and cumaru samples. The non-destructive evaluation technique of ultrasonic wave propagation for monitoring the level of deterioration was useful for marupá and tauari samples, while for cumaru samples, no considerable difference was observed between treated and untreated samples, possibly due to the limited penetration of the chemical preservative in this species. There was a strong correlation between the mass of the samples and the velocity of ultrasonic wave propagation for untreated samples, while for samples treated with CCA-C the correlation was low, due to the effect of reducing the velocity of ultrasonic wave propagation by the chemical product. The estimated service life through regression analysis for marupá and tauari samples indicated an expected service life of 37 and 32 years, respectively. For cumaru, the study time interval was not yet sufficient to estimate its useful life in service.

Keywords: timber; decay field; CCA; natural durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cortes anatômicos da madeira de marupá (<i>Simarouba amara</i> Aubl.). Seção transversal (A) e seção tangencial (B).....	3
Figura 2. Cortes anatômicos da madeira de tauari (<i>Couratari</i> sp.). Seção transversal (A) e tangencial (B).....	4
Figura 3. Cortes anatômicos da madeira de cumaru (<i>Dipteryx odorata</i> sp.). Seção transversal (A) e radial (B).....	5
Figura 4. Campo de apodrecimento instalado na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB).	10
Figura 5. Equipamento de ultrassom e medição de ondas ultrassônicas em uma amostra de madeira no sentido transversal.....	12
Figura 6. Dimensões e esquematização do sentido de aplicação das ondas ultrassônicas nas amostras ensaiadas no campo de apodrecimento.....	12
Figura 7. Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as amostras de madeira de marupá, sem tratamento e tratadas com CCA-C nos anos de 2011 até 2021.....	14
Figura 8. Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as amostras de madeira de tauari sem tratamento e tratadas com CCA-C nos anos de 2011 até 2021.....	15
Figura 9. Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as amostras de madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C nos anos de 2011 até 2021.....	16
Figura 10. Valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C para o período de 2011 até 2021.....	17
Figura 11. Valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C para o período de 2011 até 2021.....	18
Figura 12. Valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C para o período de 2011 até 2021.....	19
Figura 13. Efeito da avaliação anual sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para a madeira de marupá tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021.....	21

Figura 14. Efeito da avaliação anual sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para a madeira de tauari tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021.....	21
Figura 15. Efeito da avaliação anual sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para as madeiras de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021.....	22
Figura 16. Valores médios da massa das amostras de madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021.....	25
Figura 17. Valores médios da massa das amostras de madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021.....	25
Figura 18. Valores médios da massa das amostras de madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021.....	26
Figura 19. Modelos estatísticos gerados para predição de vida útil das amostras de madeira de marupá tratadas com CCA-C, após 10 anos em campo de apodrecimento, em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	28
Figura 20. Modelos estatísticos gerados para predição de vida útil das amostras de madeira de tauari tratadas com CCA-C, após 10 anos em campo de apodrecimento, em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do estado de sanidade das amostras de madeira instaladas em campo de apodrecimento.....	11
Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para a velocidade de propagação de ondas de ultrassom, para as amostras de marupá, tauari e cumaru tratadas com CCA-C.....	20
Tabela 3. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson (r) e nível de significância para as três espécies de madeiras não tratadas (Testemunha) e tratadas com CCA-C, após 10 anos em campo de apodrecimento.....	23
Tabela 4. Modelo para predição de vida útil das amostras de madeira de marupá e tauari tratadas com CCA-C após 10 anos em campo de apodrecimento, em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

CM – Cumaru sem tratamento

CMT – Cumaru tratado com CCA-C

CV – Coeficiente de Variação

CCA-C – Arseniato de Cobre Cromatado Tipo C

FAL – Fazenda Água Limpa

IUFRO – União Internacional das Instituições de Pesquisa Florestal

LPF – Laboratório de Produtos Florestais

MA – Marupá sem tratamento

MAT – Marupá tratado com CCA-C

NDT – Ensaio não destrutivo

SFB – Serviço Florestal Brasileiro

TA – Tauari sem tratamento

TAT – Tauari tratado com CCA-C

UnB – Universidade de Brasília

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO GERAL	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Espécies utilizadas.....	4
3.1.1 Marupá (<i>Simarouba amara</i> Aubl.).....	4
3.1.2 Tauari (<i>Couratari</i> sp.).....	5
3.1.3 Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Wild)	5
3.2 Campo de Apodrecimento.....	6
3.3 Tratamento químico com CCA-C	6
3.4 Análise Visual	7
3.5 Ultrassom.....	7
4 MATERIAL E MÉTODOS	8
4.1 Coleta e Preparo do Material	8
4.2 Tratamento Preservativo.....	9
4.3 Instalação do Campo de Apodrecimento.....	10
4.4 Estado de Sanidade Através da Análise Visual.....	10
4.5 Estado de Sanidade Através de Ondas Ultrassônicas.....	11
4.6 Análise Estatística	13
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
5.1 Análise Visual	13
5.2 Análise da Velocidade das Ondas Ultrassônicas.....	17
5.3 Correlação entre a Massa das Amostras de Madeira e a Velocidade de Propagação das Ondas Ultrassônicas	23
5.4 Análise de Regressão.....	27
6 CONCLUSÕES.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material versátil utilizado para várias finalidades, comumente é empregado em estruturas de sustentação e para a produção de móveis. Dessa forma é importante conhecer aspectos que influenciam no desempenho desse material, principalmente em relação a sua capacidade de durabilidade e resistência mecânica ao longo do tempo. As diferentes propriedades da madeira variam de indivíduo para indivíduo e principalmente de espécie para espécie, sendo que essas características se distinguem em relação a estrutura anatômica, composição química e propriedades físicas e mecânicas, conferindo às madeiras diferentes resistências naturais em relação a diferentes agentes deterioradores.

Há no Brasil uma grande variedade de espécies a serem exploradas no mercado madeireiro, com diferentes suscetibilidades a agentes deterioradores. Entretanto, tem se observado um uso bastante selecionado de espécies, levando a uma exploração intensa de determinadas espécies de madeiras, o que contribui para o aumento da pressão de seleção sobre uma quantidade pequena e determinada de espécies florestais. Grande parte das espécies madeireiras amazônicas consideradas tradicionais e mais conhecidas no mercado consumidor, tem sua ocorrência natural bastante reduzida e está em crescente processo de escassez, em alguns casos, até mesmo sob ameaça de extinção, devido à intensa exploração nos últimos anos. (ARAUJO et al., 2012). Assim, o melhoramento das propriedades mecânicas, biológicas e químicas da madeira, visando o aumento da sua durabilidade, gera um uso mais racional, proporcionando um maior equilíbrio na demanda por madeiras super exploradas, favorecendo a diminuição do risco de esgotamento e perda de diversidade, além de possibilitar um melhor aproveitamento do potencial madeireiro existente.

Nesse cenário, estão inseridos alguns métodos para determinação da resistência das madeiras, bem como diferentes métodos de tratamento químico. Como forma de aumentar a durabilidade e manter as propriedades físicas e mecânicas de diferentes espécies por mais tempo, o setor florestal vem desenvolvendo estudos com o objetivo de prolongar a vida útil deste material em serviço. Nesse sentido, a determinação da durabilidade de madeiras tratadas e não tratadas e o desempenho de diferentes processos de tratamento, são avaliados através de ensaios de campo, também conhecidos como campos de apodrecimento, onde amostras de madeira são submetidas ao intemperismo e a ação de agentes xilófagos.

Estudos que avaliam a decomposição de madeiras em campos de apodrecimento também contribuem para o entendimento deste processo em função das características

ecológicas inerentes ao ambiente florestal em que está inserido, como é o caso das especificidades encontradas em cada bioma e região do país. Características como temperatura, umidade, presença de microrganismos e tipos de solo, favorecem a diversidade e a atuação dos organismos decompositores da madeira (TREVISAN et al., 2007).

Para avaliar o desempenho do tratamento químico em madeiras em campo de apodrecimento, diversos são os métodos que podem ser empregados na avaliação dos parâmetros de qualidade da madeira. Métodos convencionais como a análise visual já vem sendo empregados para este tipo de avaliação devido a fácil implementação e rapidez da inspeção visual, entretanto, é um método de análise superficial, menos preciso e mais subjetivo por depender da percepção do avaliador. Dessa forma, nos últimos anos, a avaliação não-destrutiva, como métodos de ondas ultrassônicas e mecânicas, tornaram-se uma importante ferramenta na inferência de propriedades físicas e mecânicas da madeira, em razão principalmente do baixo custo dos equipamentos, rapidez e praticidade dos testes e da possibilidade de estimar propriedades sem alterar as capacidades de uso final (BALLARIN., NOGUEIRA, 2005; MELO., MENEZZI, 2016).

2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o estado de sanidade das madeiras amazônicas marupá (*Simarouba amara*), tauari (*Couratari sp.*) e cumaru (*Dipteryx odorata*), não tratadas e tratadas quimicamente sob pressão, com um produto à base de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA-C), instaladas em campo de apodrecimento entre os anos de 2011 e 2014, por TELES (2014), utilizando o método não destrutivo de ondas ultrassônicas e um método convencional de avaliação, denominado análise visual entre os anos de 2011 e 2021.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Espécies utilizadas

3.1.1 Marupá (*Simarouba amara* Aubl.)

Espécie pertencente à família Simaroubaceae, também conhecida pelos nomes populares marupá, malacacheta, caixeta, caju-rana, caraíba, dentre outros, é uma espécie típica da Região Amazônica, também encontrada em alguns estados da Região Nordeste do Brasil (RIZZINI, 1978).

De acordo com dados do Laboratório de Produtos Florestais (LPF, 2023) a madeira do marupá caracteriza-se por apresentar coloração branca, com cerne, albúrnio e camadas de crescimento indistintos, textura moderadamente lisa ao tato e brilho moderado. A espécie é considerada leve, com densidade básica de $0,38 \text{ g/cm}^3$, possui poros mais abertos e menos fibras entrelaçadas (SOUZA et al., 2016) também é considerada uma madeira de fácil tratamento com creosoto e CCA-A.

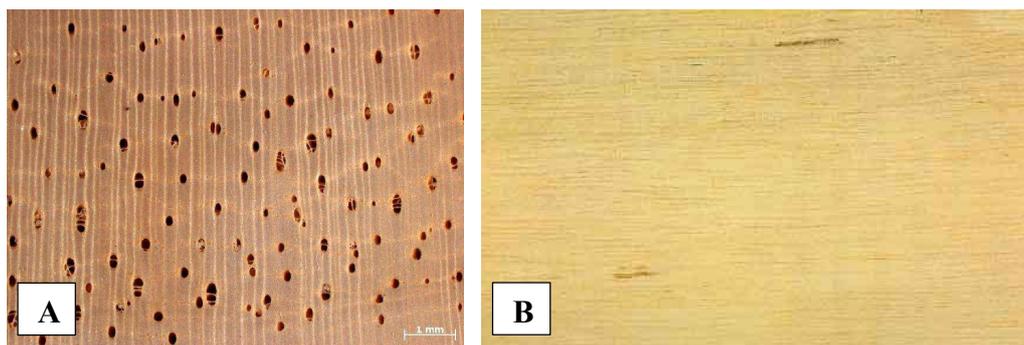


Figura 1. Cortes anatômicos da madeira de marupá (*Simarouba amara* Aubl.). Seção transversal (A) e seção tangencial (B)

Em relação a resistência a agentes xilófagos, Stangerlin et al. (2013) e Souza et al. (2016), apontam a baixa resistência a cupins e fungos apodrecedores, sendo observado uma suscetibilidade mais intensa a fungos de podridão branca.

Quanto ao uso, o marupá é considerada uma madeira macia ao corte, que não adquire defeitos significativos quando submetida a secagem artificial. É utilizada comercialmente na fabricação embalagens leves, tampo para instrumentos musicais de corda, tampo de ressonância para piano, pequenos objetos e revestimentos em geral e torneado. (CAMARGO e MELO, 2016, p.187)

3.1.2 Tauari (*Couratari* sp.)

Popularmente conhecido como caçador, cachimbeiro, maou, tauari, tauari-branco, tauari-claro, embirema e imbirema, pertence à família *Lecythidaceae* e no Brasil distribui-se pela região Amazônica nas áreas de floresta de terra firme (LPF, 2023; PROCÓPIO et al.,2010).

A madeira do tauari apresenta coloração amarelo acinzentado a branco amarelado, cerne e albarno indistintos, com anéis de crescimento pouco distintos, textura média, sem brilho. É uma espécie de densidade básica 0,52 g/cm³e resistência mecânica média (IBAMA, 2002).

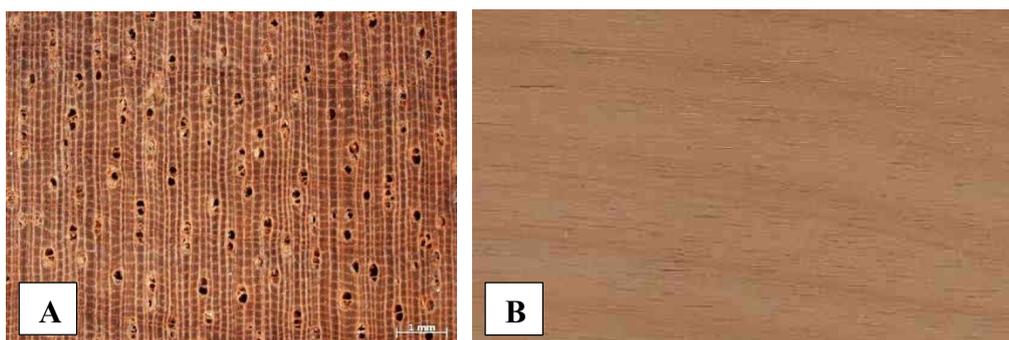


Figura 2.) Cortes anatômicos da madeira de tauari (*Couratari* sp.). Secção transversal (A) e tangencial (B).

Sua madeira é mais utilizada em construções pesadas e construções leves, como embarcações, móveis e artigos domésticos decorativos, brinquedos, artigos utilitários, chapas, instrumentos musicais, caixas e engradados. Segundo dados do LPF (2023) esta espécie possui grande apelo no mercado madeireiro, principalmente para o mercado de madeira serrada e em toras no estado do Amazonas (PROCÓPIO et al.,2010).

A madeira apresenta secagem artificial rápida sem defeitos significativos, fácil tratamento com creosoto (oleoso) e CCA (hidrossolúvel). Possui resistência natural baixa ao ataque de cupins e fungos apodrecedores em razão das suas características estruturais e químicas, como densidade média e baixo teor de extrativos (LPF, 2023).

3.1.3 Cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild)

Espécie da família *Fabaceae*, que atende pelos nomes populares cumaru, baru, camaru-ferro, cambaru, cambaru-ferro, entre outros, tem ocorrência na região amazônica, desde o estado do Acre até o Maranhão, em florestas de terra firme e várzeas, segundo o portal Embrapa (2023).

Dados do LPF (2023) indicam que essa espécie possui cerne e albarno distintos, com cerne de coloração marrom amarelado e albarno marrom pálido, além de anéis de crescimento distintos, textura média a fina e ausência de brilho. É considerada uma espécie de madeira dura

com densidade básica de 0,91 g/cm³ e elevada resistência mecânica, em razão da alta densidade o cumaru é uma espécie com cerne de difícil tratamento (IBAMA, 2002).

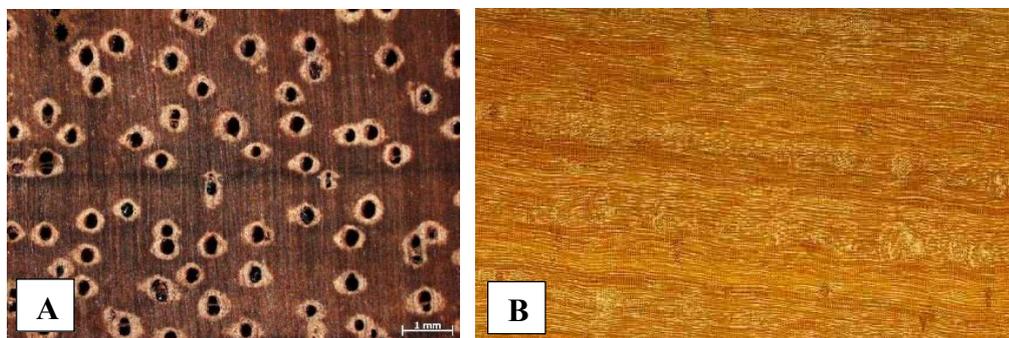


Figura 3. Cortes anatômicos da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* sp.). Seção transversal (A) e radial (B).

A secagem da madeira em estufa é rápida apresentando torcimento médio. Em relação a comercialização, a espécie é utilizada em construções pesadas, construções leve, embarcações, torneados e chapas de acordo com LPF (2023). A madeira do cumaru é classificada como pouco porosa e de alta resistência natural o que indica melhor desempenho frente ao ataque de fungos e cupins (DUARTE et al. 2020).

3.2 Campo de Apodrecimento

Os ensaios de campo, também conhecidos como campos de apodrecimento, consistem no soterramento parcial de amostras de madeiras, tratadas ou não, acompanhadas ao longo do tempo através de inspeções periódicas, com o objetivo de avaliar seu estado de sanidade sob condições reais de lixiviação, secagem, exposição à luz solar, solo, agentes químicos presentes e microrganismos xilófagos (OLIVEIRA, 2020).

Os campos de apodrecimento são métodos comumente empregados para avaliar a resistência natural de diferentes espécies de madeiras, a eficiência de produtos químicos preservantes e seus processos de impregnação. Dessa forma, após longos períodos de ensaio, é possível determinar com razoável precisão, qual será a vida útil em serviço das madeiras (COSTA et al., 2005), bem como a eficiência dos métodos de avaliação.

3.3 Tratamento químico com CCA-C

O tratamento químico com o preservativo hidrossolúvel CCA-C (Arseniato de Cobre Cromatado Tipo – C) é o mais empregado para aumentar a durabilidade de madeiras. Dentre os

componentes do produto químico o cobre fornece proteção contra fungos, o cromo tem a função de fixar o cobre e o arsênio na madeira, enquanto o arsênio fornece proteção suplementar contra fungos tolerantes ao cobre e insetos (FREEMAN; MCINTYRE, 2008). Existem três formulações básicas da solução (tipo A, B e C), o tipo C é o mais usado por apresentar maior resistência à lixiviação e melhor desempenho no campo, enquanto as outras formulações podem gerar impactos ambientais quando lixiviado da madeira (ARANTES, 2016)

3.4 Análise Visual

A análise visual é um método de inspeção simples, não destrutivo, com o qual verifica-se sinais externos que possam indicar possíveis defeitos e ataques de agentes deterioradores. Essa inspeção possibilita realizar prognósticos periódicos em estruturas de madeiras, tratadas e não tratadas quimicamente, detectando e quantificando possíveis danos estruturais (RÁBERG et al., 2007; ROSS et al., 1998; ABREU et al., 2013).

Dentro dos ensaios de campo a análise visual é considerada um método convencional, utilizada para verificações periódicas do estado de sanidades das madeiras instaladas em campo. Conforme sugestão da IUFRO, citada por Lopez e Milano (1986), em geral as madeiras são classificadas através de notas, variando de 0 a 10, as quais indicam seu estado de deterioração.

3.5 Ultrassom

O ultrassom é um método de avaliação não destrutiva (NDT), com aplicação tanto em árvores quanto em peças estruturais. Esta técnica utiliza a propagação de ondas ultrassônicas com o objetivo de avaliar a integridade estrutural de peças de madeiras, baseada na relação entre a velocidade do som, módulo de elasticidade e a densidade do meio percorrido pela onda (TELES, 2014).

As ondas ultrassônicas se propagam através de pulsos elétricos emitidos por um circuito elétrico. Estes pulsos elétricos são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas por meio de cristais piezelétricos localizados em transdutores (sensores), responsáveis por emitir e receber as ondas. Quando as vibrações mecânicas se deslocam pelo material o sinal emitido pelo gerador é atenuado, assim que recuperado por outro cristal piezelétrico o sinal é amplificado, transformando-se em pulso elétrico novamente, permitindo que o tempo de propagação seja medido. Dessa forma é possível obter a velocidade de propagação da onda

sonora, através da distância percorrida por esta e seu tempo de percurso, essa informação indicará o estado estrutural da madeira (CALEGARI, 2006; MISSIO et al., 2013).

O uso de ondas ultrassônicas como método de avaliação não destrutivo vem se mostrando promissor, tendo em vista o baixo custo da aquisição e operacionalização do equipamento quando comparado ao custo de máquinas de classificação automáticas e sua utilização pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através da uniformidade da matéria-prima e seus possíveis derivados (STANGERLIN et al., 2010; TELES, 2014). Através desta técnica tem sido avaliada a possibilidade de prever a capacidade de proteção de um determinado produto químico para diferentes espécies de madeiras, bem como a relação entre as avaliações não destrutivas e o método tradicional de avaliação visual.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Tendo em vista que o objetivo do presente estudo visa dar continuidade ao acompanhamento do estado de sanidade das amostras remanescentes no campo de apodrecimento, após o ano de 2014, os subitens apresentados a seguir são apenas um resumo dos já descritos por Teles (2014).

Os dados utilizados foram obtidos sempre no mês de setembro, entre os anos de 2012 e 2021, antes do início do período chuvoso, a fim de evitar a obtenção de dados em amostras muito úmidas. É importante ressaltar que, por razões adversas, nos anos de 2015 e 2020 não foi possível realizar a coleta de dados no campo de apodrecimento.

4.1 Coleta e Preparo do Material

Para o estudo foram utilizadas três espécies de madeiras tropicais quais sejam: o marupá (*Simarouba amara* Aubl.), tauari (*Couratari* sp.) e o cumarú (*Dipteryx odorata* (Aublet.) Willd.). As espécies em questão representam, respectivamente, grupos de madeiras de baixa, média e alta densidade (MELO et al. 1990).

Para a confecção das amostras das espécies instaladas no campo, foram adquiridas, no mercado madeireiro do Distrito Federal (DF), pranchas livres de preservantes químicos, com dimensões mínimas de 40 x 35 x 4000 mm (espessura x largura x comprimento). O material foi identificado microscopicamente por meio de comparação com o material depositado na Xiloteca (Index Xylarium FPBw) do Serviço Florestal Brasileiro (LPF/SFB) Teles (2014).

As pranchas foram secas ao ar livre até o momento do processamento. O teor de umidade do material foi determinado, por meio de um medidor de umidade elétrico capacitivo, em cinco posições ao longo do seu comprimento, obtendo-se os valores médios de 16%, 18% e 22% para as pranchas de marupá, tauari e cumaru, respectivamente.

Para a confecção das estacas, as pranchas foram desdobradas nas dimensões de 30 x 20 x 500 mm (largura x espessura x comprimento), utilizando-se apenas porções do cerne sem defeitos. Para cada uma das espécies de madeira foram produzidas e selecionadas 15 amostras para cada uma das espécies, entretanto, no presente estudo foram avaliadas somente 10 amostras, tendo em vista que as demais amostras foram retiradas do campo para análises químicas e ensaios mecânicos.

4.2 Tratamento Preservativo

A impregnação das amostras foi realizada em autoclave industrial sob pressão com produto químico hidrossolúvel à base de arseniato de cobre cromatado tipo C (CCA-C) por meio do processo Bethell em uma usina de preservação de madeiras localizada no Distrito Federal. As amostras foram dispostas aleatoriamente na autoclave em uma embalagem de malha de polipropileno.

Para a identificação da concentração dos ingredientes ativos da solução, após o tratamento químico, uma amostra da solução de tratamento foi avaliada pelo método estequiométrico. As amostras foram mantidas, por um período de 15 dias, em ambiente aberto para secagem natural e fixação dos ingredientes ativos. Posteriormente foram realizadas análises de penetração do produto químico através da utilização do produto Cromoazurol S (TELES, 2014).

Análises de retenção também foram realizadas utilizando amostras de cada espécie de madeira com tratamento e sem tratamento químico, através da retirada de cinco baguetas de cada amostra para a determinação da concentração dos ingredientes ativos por espectrometria de raios-X. Dessa forma, para a determinação dos ingredientes ativos foi utilizado um Espectrômetro de Raio-X Shimadzu –EDX-720 (TELES, 2014).

4.3 Instalação do Campo de Apodrecimento

Para a determinação da durabilidade das madeiras foi instalado um campo de apodrecimento com dimensões de 8m x 17m (largura x comprimento) em região de cerrado sentido restrito na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB) no mês de setembro de 2011. O método de ensaio adotado para instalação e inspeção do campo foi o "Método Padrão sugerido pela IUFRO para Ensaio de Campo com Estacas de Madeira", descrito por Lepage (1970).

A distribuição das amostras no campo foi feita de forma aleatória em seis linhas e quinze colunas com o uso da função "aleatório" no Microsoft Excel 2010, não havendo restrições quanto à proximidade de amostras de um mesmo tratamento. A distância entre as amostras foi de 1 metro nos dois sentidos, sendo também soterradas até a metade do comprimento padrão (250 mm) com as maiores faces expostas para o norte. A Figura 4 descreve o campo de apodrecimento instalado.



Figura 4. Campo de apodrecimento instalado na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). Fonte: Teles (2014).

4.4 Estado de Sanidade Através da Análise Visual

As avaliações do estado de sanidade das amostras de madeira ocorreram anualmente, a partir de 2011 tendo sempre como base o mês de setembro, visto que o momento mais indicado para análise deve anteceder o período de chuvas na região, evitando possíveis alterações em decorrência da análise de amostras úmidas e em solo saturado.

A retirada de todas as estacas presentes no campo para avaliação tem sido feita aplicando-se um leve impacto perpendicularmente ao topo de cada estaca. Desse modo, quando não ocorre a quebra da estaca, a peça retirada do solo é avaliada visualmente quanto ao seu aspecto, conforme sugestão da IUFRO (Tabela 1) citado por Lopez e Milano (1986).

Tabela 1. Classificação do estado de sanidade das amostras de madeira instaladas em campo de apodrecimento.

Nota	Descrição
10	Estaca sadia
9	Leve ataque
7	Ataque moderado
4	Ataque intenso
0	Destruído devido ao ataque

Fonte: Lopez e Milano (1986)

Ainda segundo os mesmos autores a vida útil das amostras de um lote da mesma espécie de madeira sem tratamento químico ou com produtos preservantes é definida como o tempo necessário para que 60% destas estejam intensamente atacadas ou destruídas, critério este que foi adotado no presente estudo, para determinar a durabilidade das espécies em campo.

4.5 Estado de Sanidade Através de Ondas Ultrassônicas

A avaliação das amostras de madeira através de ondas ultrassônicas foi realizada sobre as mesmas circunstâncias da análise visual, isto é, a partir do ano de 2012 sempre no mês de setembro, sendo as avaliações realizadas sobre o mesmo conjunto de amostras antes e após o tratamento químico.

Para essa avaliação foram utilizados transdutores piezoelétricos com encapsulamento metálico de ondas longitudinais de 54 kHz de face plana. O equipamento possui 500V de capacidade e transmite sinal contínuo com aquisição imediata de dados. A Figura 5 a seguir apresenta o equipamento de ultrassom.

. A propagação da onda foi aplicada no sentido transversal da amostra de madeira. No sentido transversal foram feitas três medidas na porção superior e três na inferior da amostra, conforme ilustrado na Figura 5. A velocidade de propagação da onda sonora foi calculada conforme apresentado na Equação 1.

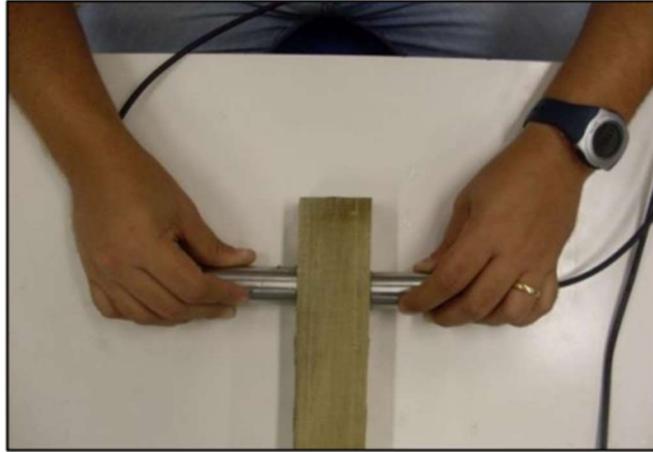


Figura 5. Equipamento de ultrassom e medição de ondas ultrassônicas em uma amostra de madeira no sentido transversal. Fonte: Teles (2014).

$$v_0 = \frac{L}{t * 10^{-6}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

v_0 = velocidade de propagação da onda, m/s;

L = distância percorrida pela onda, m

t = tempo de trânsito da onda, μ s

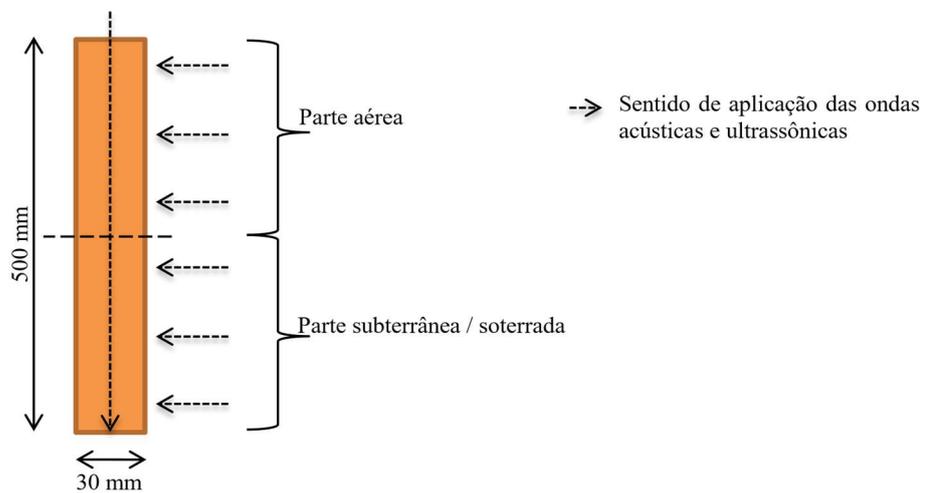


Figura 6. Dimensões e esquematização do sentido de aplicação das ondas ultrassônicas nas amostras ensaiadas no campo de apodrecimento. Fonte: Teles (2014).

4.6 Análise Estatística

A partir das notas obtidas através da análise visual das amostras, foi calculada a média das 10 amostras para cada espécie ao longo dos anos, tanto para as testemunhas como para as amostras tratadas com CCA-C.

Os valores da velocidade, obtidos com o equipamento de ultrassom, foram submetidos a uma Análise de Variância (ANOVA), utilizando o software de planilhas *Microsoft Excel*, para avaliar se existe diferença significativa, entre a velocidade ultrassônica das amostras e o período (anos), tanto para as não tratadas como para as tratadas com CCA-C. Foi obtido também, com teste de Tukey através do software *R 3.3.0* (R Core Team, 2023), uma comparação do efeito dos anos de avaliação sobre a velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Foi realizada ainda uma análise de correlação entre a massa das amostras ao longo do tempo (anos) e as suas respectivas velocidades ultrassônicas, tanto para as amostras não tratadas para as tratadas com preservante químico.

A partir de uma análise de regressão, utilizando o software *Curve Expert* (versão 1.6), relacionando a velocidade ultrassônica das amostras ao longo dos anos em campo, foram obtidas equações objetivando prever o tempo que as amostras permanecerão sadias, e dessa forma, obter uma estimativa de vida útil em serviço para cada espécie de madeira tratadas com CCA-C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Visual

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os valores médios das notas atribuídas para as amostras de madeiras de marupá, tauari e cumaru, respectivamente, sem tratamento e tratadas com CCA-C, pelo método de avaliação visual desde o ano de 2011, quando o campo foi instalado, até o ano de 2021.

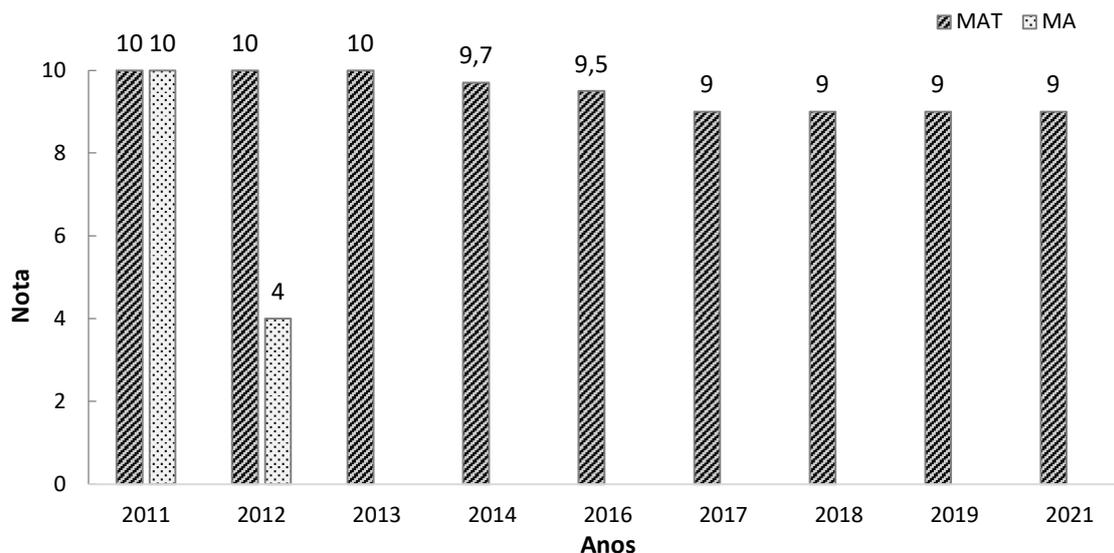


Figura 7. Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as amostras de madeira de marupá, sem tratamento e tratadas com CCA-C nos anos de 2011 até 2021. Onde: MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C.

Para as amostras de marupá sem tratamento foi possível observar, de acordo com as notas atribuídas pela análise visual, uma rápida redução do número de estacas em campo. As inspeções mostraram que após dois anos da instalação, apenas uma amostra permanecia em campo. Sendo assim, de acordo com a sugestão da IUFRO, citado por Lopez e Milano (1986), a vida útil das amostras de marupá em campo foi de menos de 2 anos (TELES, 2014). Com relação às amostras tratadas com CCA-C os resultados mostraram uma pequena redução nos valores atribuídos pela análise visual, sendo observado que, após 10 anos em campo, todas as 10 amostras ainda apresentavam um bom estado de sanidade, não sendo possível ainda estabelecer um prazo de vida útil para essas amostras.

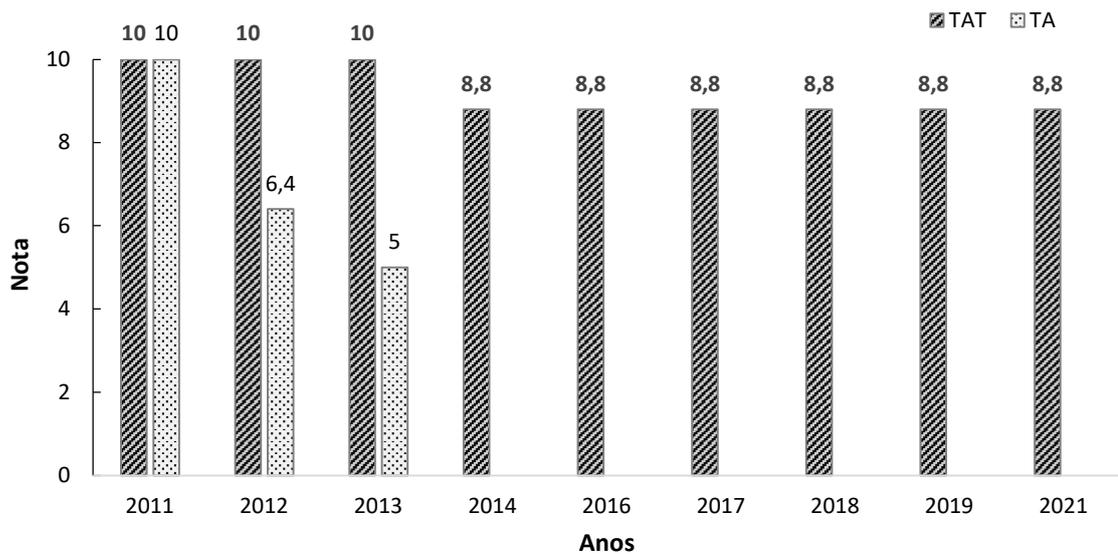


Figura 8. Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as amostras de madeira de tauari sem tratamento e tratadas com CCA-C nos anos de 2011 até 2021. Onde: TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C.

As amostras de tauari sem tratamento apresentaram um comportamento ligeiramente superior as de marupá, com 8 amostras ainda em campo até o ano de 2013 e apenas uma amostra restante no ano de 2014. Nesse mesmo período foi observado também um rápido decréscimo das notas atribuídas pela análise visual. As amostras tratadas com preservante apresentaram comportamento semelhante ao observado nas amostras de marupá, não sendo possível estabelecer uma vida útil para as amostras tratadas.

Assim sendo, estes resultados indicam, de acordo com a sugestão da IUFRO, citado por Lopez e Milano (1986), uma baixa durabilidade natural da madeira de tauari, com média de 3 anos de vida útil para a região de cerrado, onde foi realizado o estudo. Vale ressaltar que esse método de avaliação da vida útil não considera as condições locais do campo nem características climáticas da região (Teles, 2014).

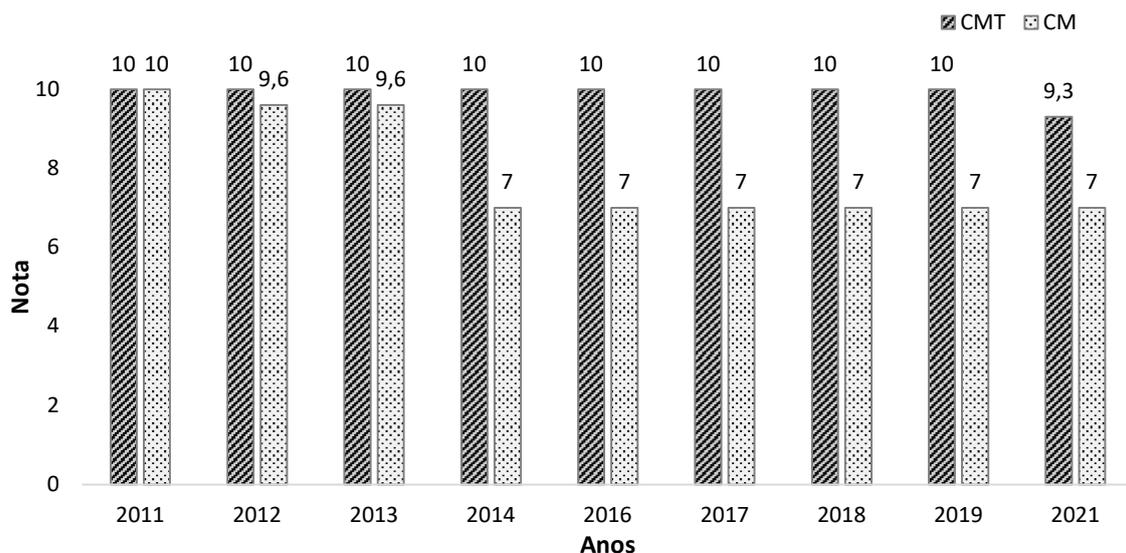


Figura 9. Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as amostras de madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C nos anos de 2011 até 2021. Onde: CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

Pela análise visual, as amostras de cumaru apresentaram resultados próximos entre as sem tratamento e tratadas com CCA-C, até o terceiro ano após a instalação do campo de apodrecimento. A partir do quarto ano, as amostras sem tratamento mostraram um decréscimo mais acentuado em seu estado de sanidade em relação as amostras tratadas. No entanto, para o período avaliado, ainda não foi possível determinar a durabilidade natural ou vida útil para as amostras de cumaru, visto que, todas ainda se mantem moderadamente sadias e em campo. As amostras tratadas com preservante, mostraram-se sadias por quase todos os anos de avaliação, com uma ligeira diminuição no estado de sanidade após 10 anos em campo, não sendo possível estabelecer sua vida útil.

A resistência natural é resultante, principalmente, da quantidade e tipos de extrativos, assim como, da densidade da madeira (ARAÚJO, 2021). De acordo com Carneiro et al. (apud CRISÓSTOMO et al, 2021) madeiras da Região Amazônica com teor de extrativos acima de 7% apresentam maior potencial de resistência natural. Sendo assim, considerando o teor de extrativos das madeiras de marupá e tauari de 1,91 e 1,01%, respectivamente (KERN C., PASTORE, 2009), bem como sua densidade reduzida, pode-se inferir que estas características contribuem para baixa resistência natural apresentada por estas espécies. O cumaru, por sua vez, é uma espécie de densidade alta e, de acordo com Stangerlin et al. (2013), apresenta um teor de extrativos de 9,20%, o que também corrobora com sua alta resistência natural frente a agentes xilófagos.

5.2 Análise da Velocidade das Ondas Ultrassônicas

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica, para as amostras de marupá, tauari e cumaru, respectivamente, entre os anos de 2011 e 2021.

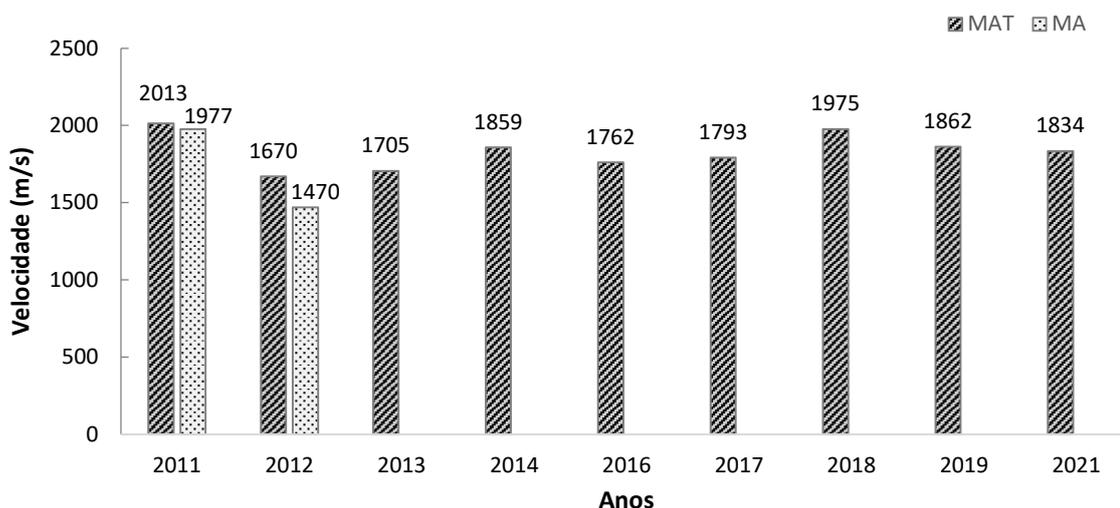


Figura 10. Valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C para o período de 2011 até 2021. Onde: MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C.

Os valores médios da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para as amostras sem tratamento de marupá, dentro do período avaliado, oscilaram entre 1977 e 1470 m/s. Este resultado mostra uma redução considerável da velocidade das ondas ultrassônicas entre o primeiro e segundo ano de avaliação, demonstrando uma relação muito próxima com a rápida deterioração dessa madeira nesse mesmo período. Esse resultado indica que o valor mínimo da velocidade de propagação da onda ultrassônica observado (1470 m/s) para essa espécie de madeira sem tratamento, poderia ser utilizado como forma de indicar a substituição de peças que estão em uso em contato com o solo e expostas às intempéries. Em relação as amostras tratadas com CCA-C, também foi observado uma redução na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, com valores variando entre 2013 e 1670 m/s ao longo dos 10 anos do estudo, porém ainda não foi possível estabelecer um valor mínimo de velocidade de propagação da onda ultrassônicas para essas madeiras.

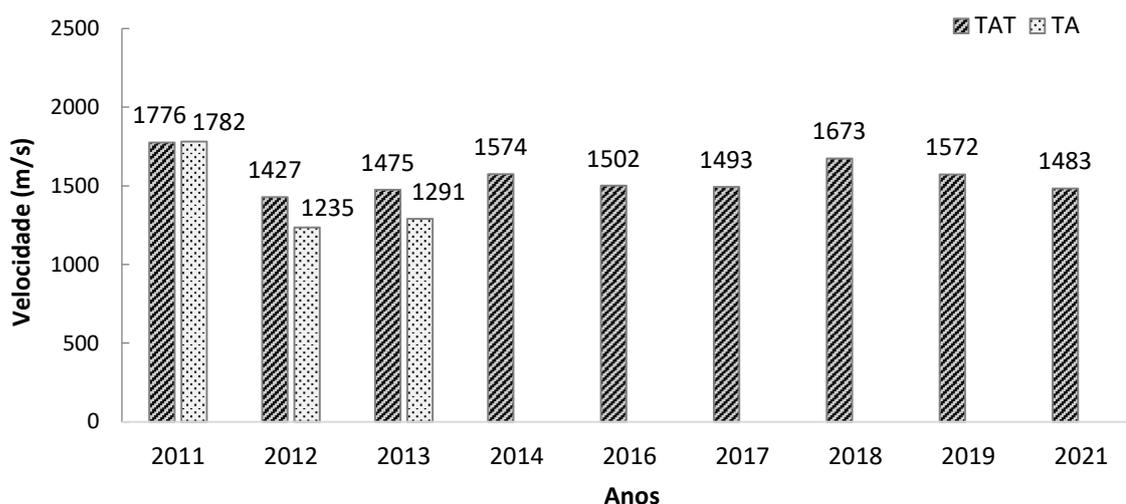


Figura 11. Valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C para o período de 2011 até 2021. Onde: TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C.

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas das amostras de madeira de tauari sem tratamento apresentaram comportamento semelhante ao observado nas amostras de marupá, com uma redução da velocidade de propagação (1782 a 1291 m/s), neste caso, após o segundo ano de avaliação. Seguindo o mesmo raciocínio, valores mínimos próximos a 1291/1235 m/s, poderiam ser utilizados como indicativo para a substituição de peças dessa espécie de madeira quando utilizadas sem tratamento químico, em contato com o solo e expostas às intempéries. Para as amostras tratadas com CCA-C, a velocidade variou entre 1776 e 1427 m/s, chegando a 1483 m/s após 10 anos em campo, indicando redução da velocidade das ondas ultrassônicas a partir do primeiro ano de avaliação, não sendo possível ainda estabelecer um valor mínimo de velocidade de propagação da onda ultrassônicas para essas madeiras. Segundo Teles (2014), estes resultados são um indicativo da atividade biológica do campo de apodrecimento, onde foi possível observar ataque de fungos apodrecedores e cupins, principalmente, nas amostras de madeira não tratadas

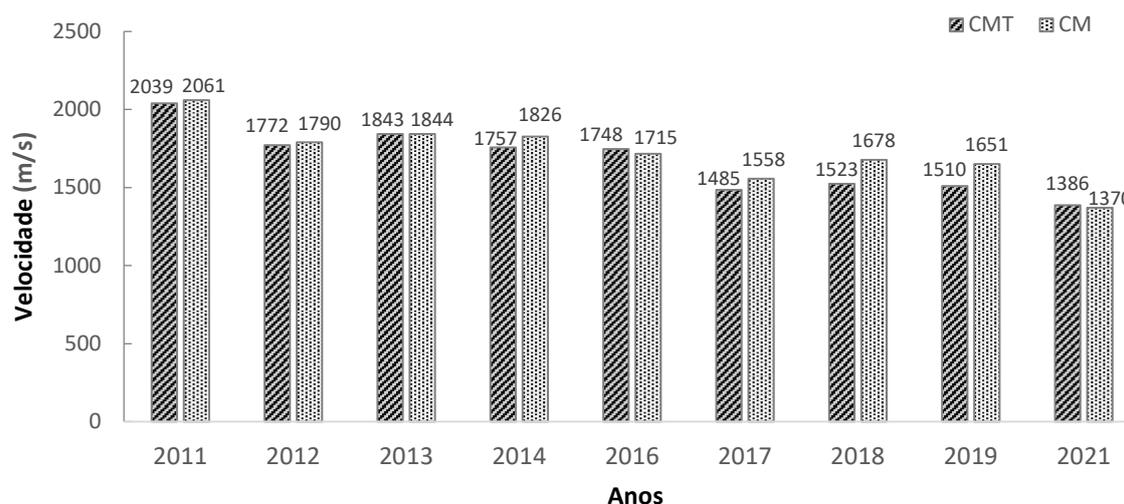


Figura 12. Valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C para o período de 2011 até 2021. Onde: CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

Dentre as três espécies de madeira estudadas, o cumaru foi a que apresentou a menor variação na velocidade das ondas ultrassônicas, ao longo do período observado, entre as amostras tratadas e não tratadas. As amostras sem tratamento apresentaram valores médios de velocidade de propagação variando entre 2061 e 1370 m/s, enquanto as tratadas com CCA-C variaram entre 2039 e 1386 m/s. Estes resultados indicam que, entre as amostras tratadas e não tratadas, não houve alterações consideráveis nas velocidades de propagação das ondas ultrassônicas. Entretanto, é possível observar uma tendência de aumento da deterioração das amostras de madeira, acompanhada por uma redução na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, esta diminuição pode estar associada também a dificuldade em acoplar corretamente os transdutores nas amostras devido ao efeito de desgaste por. Em função dos resultados observados até o momento, ainda não é possível estabelecer um valor mínimo de velocidade de propagação da onda ultrassônica que possa indicar uma possível substituição tanto para as amostras sem tratamento químico como para as tratadas com CCA-C.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de variância para a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para cada uma das espécies de madeiras tratadas com CCA-C.

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para a velocidade de propagação de ondas de ultrassom, para as amostras de marupá, tauari e cumaru tratadas com CCA-C.

Madeira	Fonte de Variação	Soma dos quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05)
Marupá	Entre grupos	1064311.3	8	133038.9	18.9	1.07E-15
	Dentro dos grupos	569488.5	81	7030.7		
	Total	1633799.8	89			
Tauari	Entre grupos	865749.9	8	108218.7	36.7	2.75E-22
	Dentro dos grupos	209262.2	71	2947.4		
	Total	1075012.1	79			
Cumaru	Entre grupos	3217865.1	8	402233.1	113.7	4.71E-38
	Dentro dos grupos	258312.3	73	3538.5		
	Total	3476177.4	81			

Os resultados da ANOVA mostraram que houve diferença significativa da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para as amostras de marupá, tauari e cumaru ao longo do período de avaliação do campo de apodrecimento. Dessa forma, é possível inferir que houve influência do tempo (ano) sobre a média das velocidades dos três conjuntos de amostras de madeira tratadas com CCA-C ao longo dos 10 anos de observação em campo de apodrecimento.

Os resultados demonstram que as três espécies de madeira, ainda que tratadas quimicamente, apresentam efeitos da deterioração biológica (fungos e cupins) e física (intemperismo), com o passar do tempo, mesmo que de forma mais atenuada e em proporções diferentes entre si. As diferenças no estado de sanidade, observadas entre as três espécies de madeiras, podem estar relacionadas, além das características inerentes de cada espécie, ao efeito protetor do próprio produto químico utilizado (CCA-C), bem como pela profundidade de sua penetração, distribuição e quantidade dos ingredientes ativos retidos na madeira.

De acordo com a norma NBR 9480 (ABNT, 2009), para peças de madeira a serem utilizadas em contato com o solo é indicado um valor de retenção de 6,5 kg i.a./m. De acordo com os resultados da análise química feita por Teles (2014), para penetração e retenção dos ingredientes ativos impregnados nessas amostras de madeiras, apenas o marupá apresentou um valor acima ao recomendado pela citada norma.

As Figuras 11, 12, 13 apresentam os efeitos dos anos de avaliação sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para as amostras de marupá e tauari sem tratamento e para o cumaru não tratado e tratado com CCA-C.

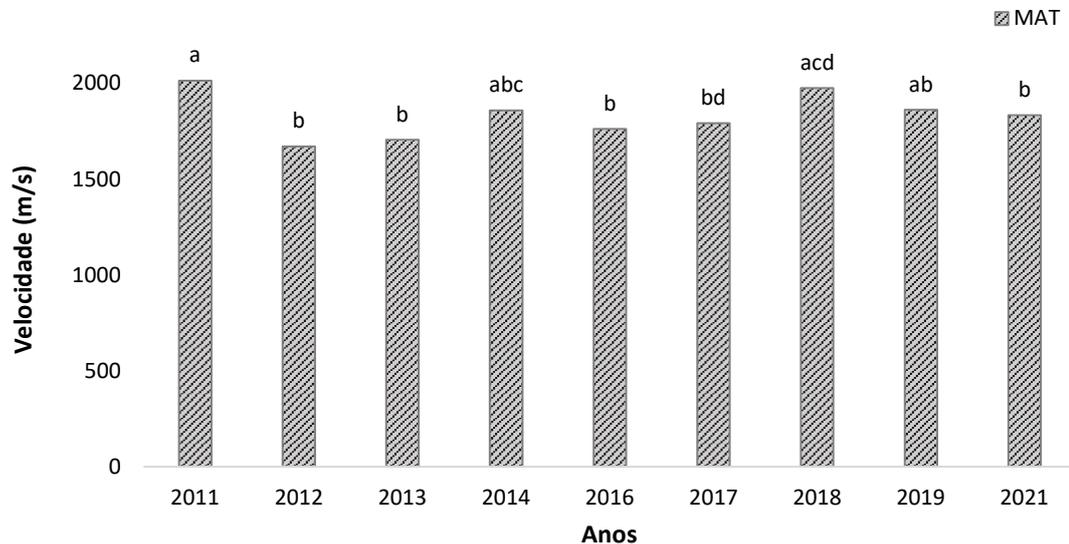


Figura 13. Efeito da avaliação anual sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para a madeira de marupá tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021. Onde: MAT – marupá tratado com CCA-C.

Nota: Colunas seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ($p > 0,05$).

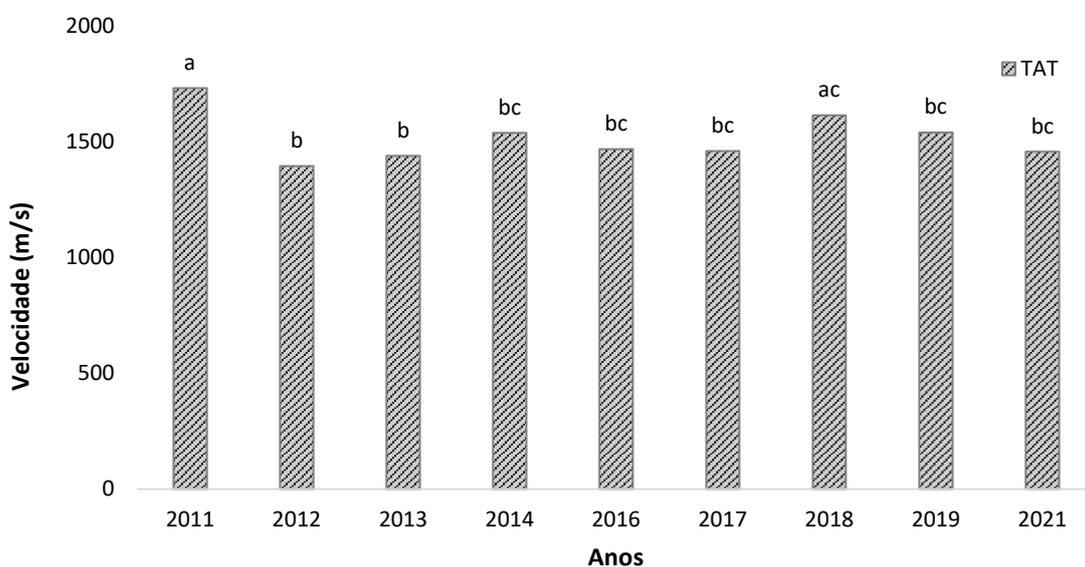


Figura 14. Efeito da avaliação anual sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para a madeira de tauari tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021. Onde: TAT – tauari tratado com CCA-C.

Nota: Colunas seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ($p > 0,05$).

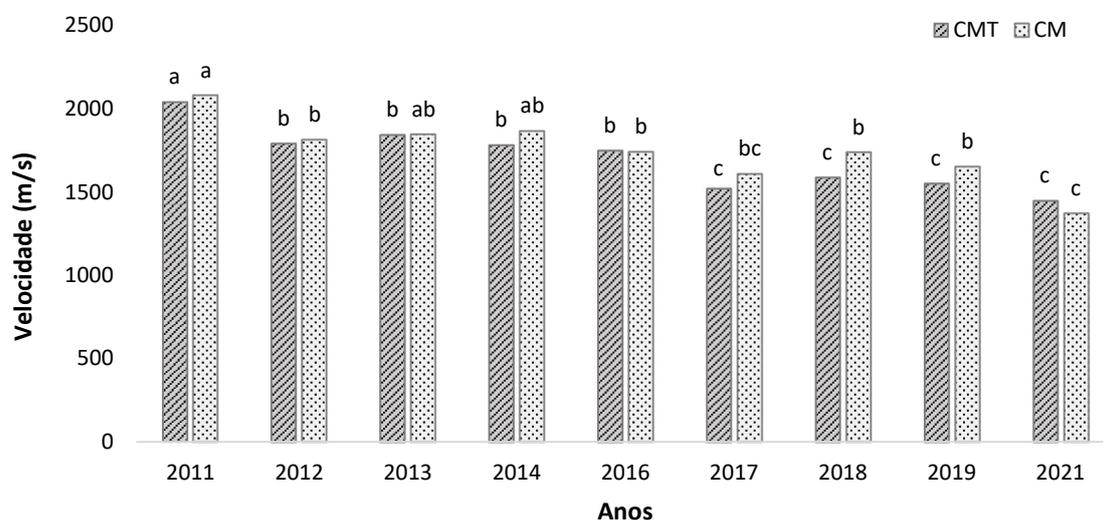


Figura 15. Efeito da avaliação anual sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para as madeiras de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021. Onde: CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

Nota: Nota: Colunas de mesma cor seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ($p > 0,05$).

Os resultados mostram que as amostras de madeira das três espécies apresentaram diferenças na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas ao longo dos anos de avaliação.

Para as amostras de marupá tratadas foram observadas variações (reduções e aumentos) na velocidade de propagação da onda ultrassônica ao longo dos 10 anos, com destaque principalmente para os anos de 2014 e 2018. Esses efeitos podem estar relacionados ao período de chuvas um pouco mais prolongado, em especial nos anos citados, associado ao curto período de avaliação (10 anos), ainda insuficiente, demonstrando uma deterioração até o momento não significativa das amostras de madeira dessa espécie neste período.

Para as amostras de tauari tratadas foi observado um comportamento semelhante ao observado para o marupá, o qual pode estar relacionado também com o efeito das chuvas prolongadas, ao curto período de avaliação das amostras em campo e a eficiência do tratamento químico.

As amostras de cumaru sem tratamento e tratadas quimicamente apresentaram um comportamento esperado em relação ao estado de sanidade, após a implantação do campo de apodrecimento. Os resultados mostraram uma diminuição lenta e progressiva da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas a partir de 2011, até o ano de 2021, apresentando um

comportamento semelhante entre as amostras tratadas e não tratadas. Esse último pode estar relacionado com a baixa ou quase nula penetração e retenção do produto químico observada nas amostras tratadas, conforme análise química realizada por Teles (2014).

5.3 Correlação entre a Massa das Amostras de Madeira e a Velocidade de Propagação das Ondas Ultrassônicas

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de correlação de Pearson (r) entre a massa das amostras de madeira e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, para as três espécies de madeira, após 10 anos de implantação do campo de apodrecimento.

Para determinar a relação estatística entre as variáveis massa e velocidade foi realizada uma análise de correlação, procurando observar a existência de linearidade entre essas variáveis e sua intensidade. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos a partir dessa análise.

Tabela 3. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson (r) e nível de significância para as três espécies de madeiras não tratadas (Testemunha) e tratadas com CCA-C, após 10 anos em campo de apodrecimento.

Madeira	Tratamento	Coefficiente de correlação (r)	Significância (p<0.05)
Marupá	Testemunha	0.62	0.003
	CCA-A	0.14	0.177
Tauari	Testemunha	0.85	5.27E-09
	CCA-A	0.37	0.001
Cumaru	Testemunha	0.63	1.01E-10
	CCA-A	0.59	6.84E-09

As amostras de marupá sem tratamento apresentaram uma correlação moderada (0,62), positiva e significativa entre perda de massa e a velocidade de propagação da onda ultrassônica. Esse resultado indica uma relação inversa entre essas duas variáveis analisadas, ou seja, uma redução na velocidade de propagação da onda ultrassônica com o aumento da deterioração das amostras de madeira ocasionadas pela ação dos fungos e cupins e pelo intemperismo. Para as amostras tratadas com CCA-C esse índice foi baixo (0,14) e não significativo, demonstrando pouca correlação entre a perda de massa e velocidade de propagação da onda ultrassônica. Esse resultado pode estar associado ao efeito do produto químico que continua protegendo as

amostras e mantendo-as em bom estado de conservação frente a ação dos agentes biológicos e físicos.

Para as amostras de tauari não tratadas, foi observada uma alta correlação positiva (0,85), enquanto as tratadas apresentaram um baixo índice de correlação (0,37), entre a perda de massa e a velocidade de propagação da onda ultrassônica. Ambos os resultados apresentaram um comportamento semelhante aos observados para as amostras de marupá, tendo como possíveis justificativas as mesmas apresentadas para aquela espécie. Cabe ressaltar que os valores obtidos para as amostras de Tauarí são ligeiramente superiores aos observados para o marupá.

As amostras da madeira de cumaru não tratadas e tratadas apresentaram uma correlação moderada (0,63 e 0,59 respectivamente), não sendo possível indicar ainda uma forte relação entre a massa e a velocidade de propagação da onda ultrassônica. No entanto, o índice de correlação, principalmente, para as amostras tratadas com CCA-C, são os mais expressivos dentre as três espécies de madeiras estudadas.

De acordo com Crisóstomo et al. (2021), a correlação significativa entre a perda de massa e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, para as amostras sem tratamento químico é um comportamento esperado, tendo em vista que o aumento da perda de massa leva a redução da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Por outro lado, para as amostras tratadas quimicamente a correlação não significativa pode ser explicada pela atenuação da onda ultrassônica provocada pelo uso de preservantes hidrossolúveis (Bucur, 2006), e pela baixa variabilidade das amostras, visto que a maioria delas ainda se encontram sadias.

As Figuras, 14, 15 e 16 apresentam os valores médios de massa para as amostras não tratadas e tratadas com CCA-C ao longo dos 10 anos de avaliação em campo de apodrecimento, para cada uma das espécies de madeira.

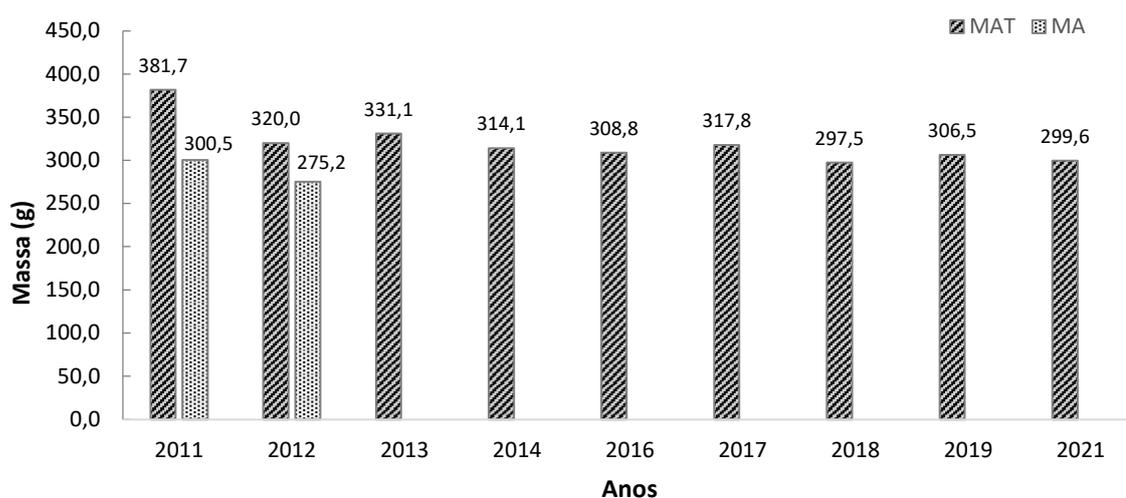


Figura 16. Valores médios da massa das amostras de madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021. Onde: MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C.

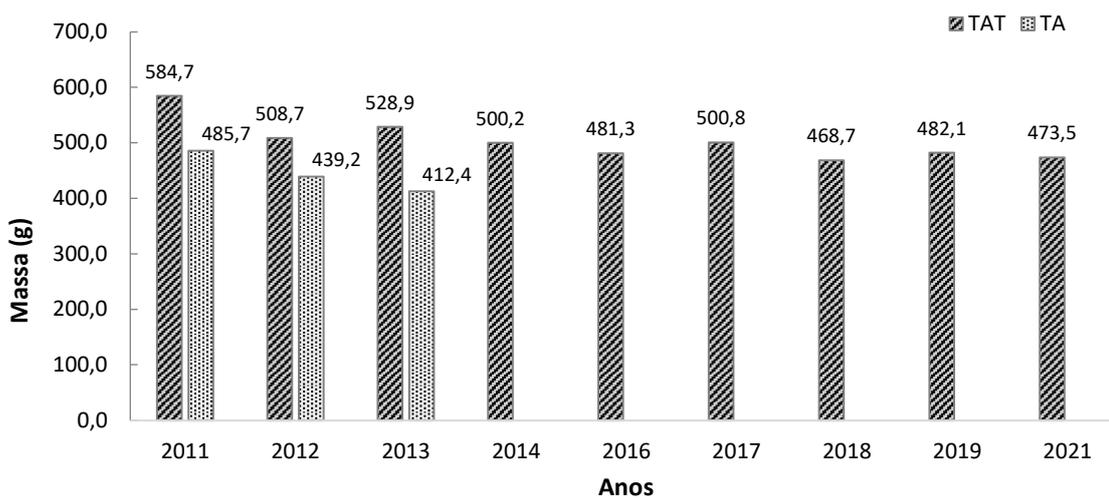


Figura 17. Valores médios da massa das amostras de madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021. Onde: TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C.

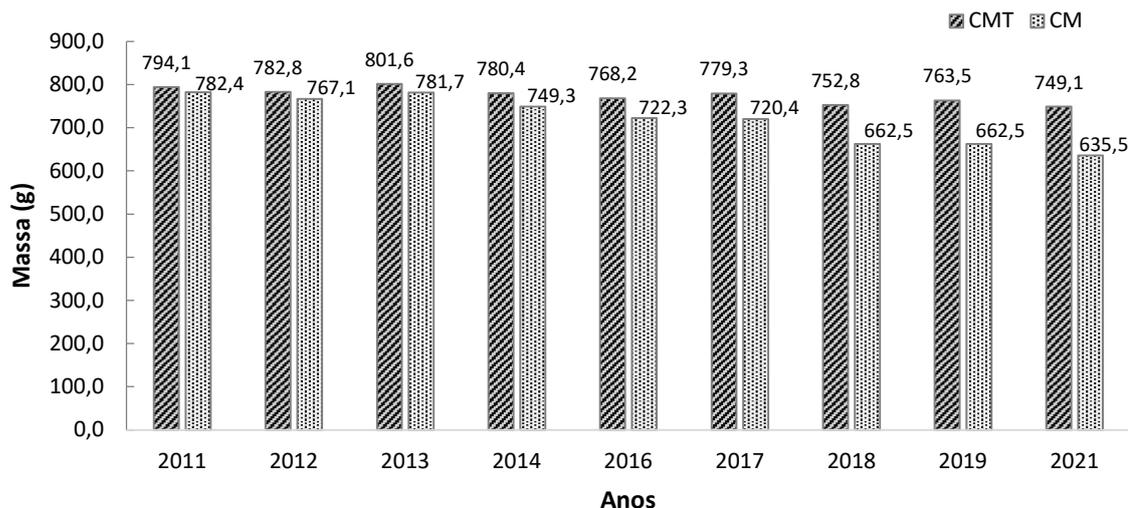


Figura 18. Valores médios da massa das amostras de madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C entre os anos de 2011 até 2021. Onde: CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

Os resultados indicam uma perda gradual de massa para todas as amostras de madeira sem tratamento e tratadas quimicamente, ao longo dos 10 anos de avaliação em campo.

Para as amostras de marupá sem tratamento, a perda de massa após 20 meses em campo foi de 8,42%, enquanto para as tratadas a perda foi de 21,51% após 10 anos em campo. Esses resultados mostram que a partir da perda de massa próxima a 8%, a madeira de marupá sem tratamento químico, quando exposta às intempéries e em contato com o solo, deverá ser substituída. Isso pode ser explicado, devido a elevada deterioração provocada pela ação de agentes físicos e biológicos (fungos e cupins), bem como pela percentagem mínima de amostras remanescentes em campo, após esse período, conforme sugestão da UIFRO, citado por Lopez e Milano (1986). Já para as madeiras tratadas com CCA-C ainda não é possível se estabelecer um valor mínimo de perda de massa, tendo em vista que todas as amostras ainda se encontravam em bom estado de conservação no campo após 10 anos.

As amostras de tauari sem tratamento apresentaram uma perda de massa de 15,09% após 3 anos em campo, enquanto as tratadas com CCA-C essa perda foi de 19,02% após 10 anos. Dessa forma, é possível inferir que após uma perda de massa próxima a 15%, as madeiras sem tratamento químico deverão ser substituídas, conforme sugestão da IUFRO, citado por Lopez e Milano (1986). Da mesma forma, para as tratadas com CCA-C ainda não é possível determinar um valor mínimo de perda de massa, devido a todas as amostras ainda se encontrarem em bom estado de conservação no campo após 10 anos.

Para as amostras de cumaru foi observado um decréscimo mais lento da perda de massa ao logo dos 10 anos do estudo. Todas as amostras se encontram em campo e em bom estado de

conservação, com as tratadas (CCA-C) apresentando uma menor perda de massa (5,67%), em comparação com as não tratadas (18,78%).

As oscilações nos valores de perda de massa, observadas para as três espécies de madeiras, podem estar associadas à variação do teor de umidade das amostras no campo, decorrente das alterações climáticas observadas na região do Distrito Federal, no período do estudo (TELES, 2014).

5.4 Análise de Regressão

A partir da relação entre as variáveis velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s) e tempo (em meses), foram obtidas equações que permitiram modelar o comportamento destas variáveis, para as amostras tratadas de marupá e tauari, utilizando como base a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, utilizadas para determinar a vida útil das amostras de madeira dessas espécies sem tratamento químico. A Tabela 4 apresenta o modelo que melhor prediz a expectativa de vida útil para as madeiras de marupá e tauari tratada com CCA-C.

Tabela 4. Modelo para predição de vida útil das amostras de madeira de marupá e tauari tratadas com CCA-C após 10 anos em campo de apodrecimento, em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Espécie	Modelo	Equação
Marupá	Reciprocal Quadratic	$Y(x) = \frac{1}{(a + bx + cx^2)}$
Tauari		

As Figuras 17 e 18 descrevem o comportamento das amostras de madeira de marupá e tauari tratadas com CCA-C, após 10 anos em campo de apodrecimento, de acordo com as equações ajustadas para predição da vida útil de cada uma das espécies, bem como, seus respectivos coeficientes de correlação e erro padrão.

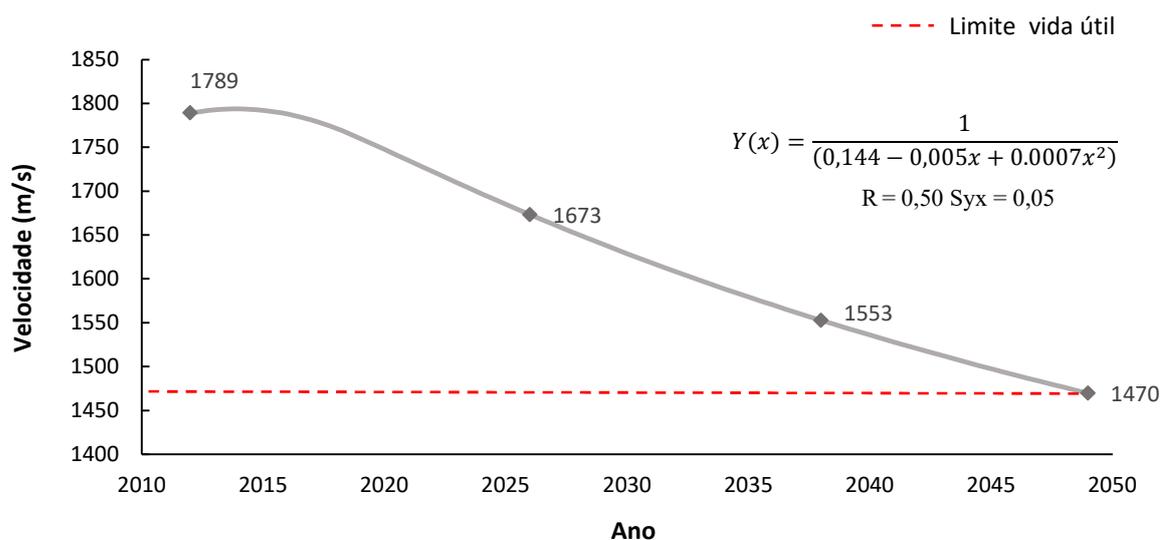


Figura 19. Modelos estatísticos gerados para predição de vida útil das amostras de madeira de marupá tratadas com CCA-C, após 10 anos em campo de apodrecimento, em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Onde: Y = variável dependente - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; a = 0,144; b = - 0,005; c = 0,0007; x = variável independente - tempo em meses.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas utilizada para delimitar a vida útil da madeira de marupá tratada com CCA-C foi de 1470 m/s, valor médio atingido pelas amostras em campo sem tratamento químico no ano de 2012, último período em que ao menos 60% das amostras encontravam-se totalmente deterioradas. Com isso, o modelo utilizado para o marupá estima que a velocidade ultrassônica estabelecida como parâmetro deva ser atingida por volta do ano 2048, totalizando 37 anos em serviço para esta espécie. Os valores de coeficiente de correlação (0,5) e de erro padrão (0,05) indicam que o modelo é razoável para a predição da vida útil desta espécie.

Para gerar a equação ajustada foram utilizados os dados de tempo (meses), sendo que, para ambas as variáveis foram aplicadas o logaritmo natural com o objetivo de reduzir o desequilíbrio entre os valores. A equação foi gerada utilizando os dados dos anos de 2012 a 2017, tendo em vista, alterações observadas nos demais períodos que podem indicar a interferência de fatores climáticos do local.

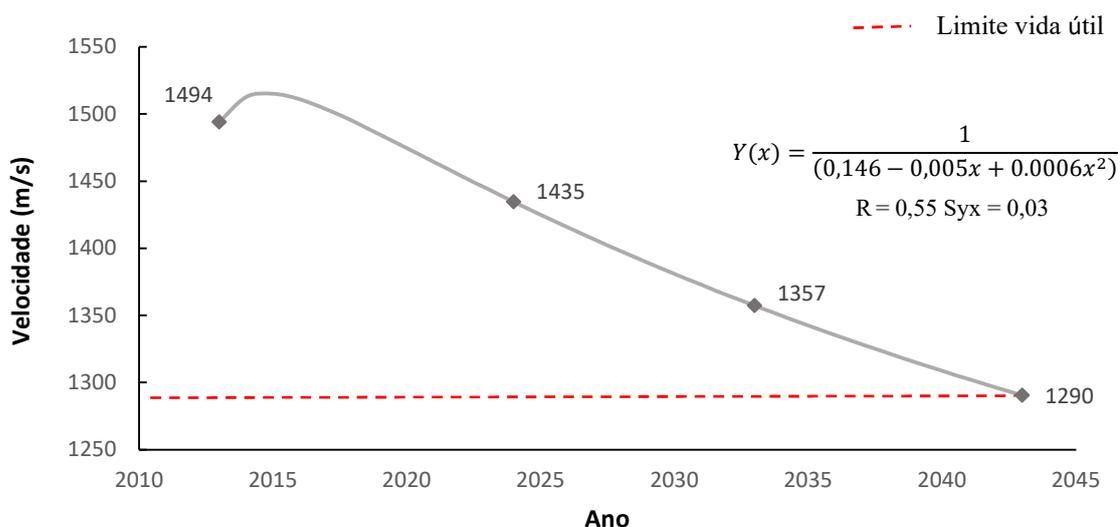


Figura 20. Modelos estatísticos gerados para predição de vida útil das amostras de madeira de tauari tratadas com CCA-C, após 10 anos em campo de apodrecimento, em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Onde: Y = variável dependente - velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; a = 0,146; b = - 0,005; c = 0,0006; x = variável independente - tempo em meses.

Para o tauari a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de 1290 m/s, valor médio atingido pelas amostras em campo sem tratamento químico no ano de 2013, foi adotada para delimitar a vida útil das amostras tratadas com CCA-C. Os resultados estimam o ano de 2043 como limite de vida útil para o tauari, correspondendo a 32 anos em serviço para esta espécie. Os valores do coeficiente de correlação (0,55) e do erro padrão (0,03) demonstram uma confiabilidade razoável para estimativa prevista de vida útil do tauari. A equação gerada utilizou os dados dos anos de 2012 a 2017, também a fim de se evitar a interferência de fatores climáticos.

Para o cumaru não foram gerados modelos, tendo em vista que todas as amostras tratadas permanecem em campo, não sendo possível determinar uma velocidade ultrassônica que delimite sua vida útil para estes 10 anos de análise.

6 CONCLUSÕES

A análise visual demonstrou que o tratamento químico utilizando o composto químico à base de arseniato de cobre cromatado tipo C (CCA-C) foi eficiente para a proteção das amostras de marupá, tauari e cumaru após 10 anos em campo de apodrecimento na região da

Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). As amostras de cumaru apresentaram uma impregnação superficial do CCA-C, no entanto foi observada diferença considerável no estado de sanidade das amostras sem tratamento químico em comparação com as tratadas segundo análise visual.

O uso da técnica de avaliação não destrutiva da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, mostrou-se promissor para monitorar o nível de deterioração das amostras marupá e tauari, principalmente, em relação estado de sanidade das amostras tratadas com CCA-C. Para as amostras de cumaru não foi observado diferença considerável entre as amostras tratadas e não tratadas através do método de propagação de ondas ultrassônicas, A alta densidade dessa espécie, e o curto espaço de tempo, desde a implantação do campo de apodrecimento, podem ter influenciado nesse resultado. É importante salientar que resultados mais precisos obtidos através de estudos contínuos, são necessários para a construção de um banco de dados sólido, que aprimore o uso da técnica de ultrassom para espécies com características variadas e em diferentes condições. Tendo em vista essa análise, é importante a manutenção e monitoramento contínuo de campos de apodrecimento como o do presente estudo.

Foi observada uma forte correlação entre a massa das amostras e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para as amostras sem tratamento químico e baixa correlação para as amostras tratadas com CCA-C. A presença do preservante pode ter influência na atenuação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, devido a pequena diferença entre as amostras tratadas com CCA-C e as não tratadas. As amostras tratadas com CCA-C, apresentaram menores perdas de massa ao longo do tempo. Variações nas condições climáticas da região, ocorridas durante o período avaliado, podem ter influenciado a variação na perda de massa das amostras das três espécies estudadas.

A predição da vida útil das amostras de marupá e tauari, através da análise de regressão, utilizando a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função do tempo em campo, apresentou modelos estatístico, indicando uma expectativa de 37 e 32 anos de vida útil em serviço, respectivamente, para estas espécies. Para o cumaru ainda não foi possível prever a vida útil em serviço. Estes resultados evidenciam a eficiência do produto químico no aumento da durabilidade de madeiras, principalmente para espécies de menor densidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. B.; LIMA, J. T.; RABELO, G. F.; GOMES, F. C.; TRUGILHO, P. F.; ELOY, F. S. Avaliação não destrutiva de estruturas de madeiras em edifício histórico de Tiradentes, MG. **Cerne**. Lavras/MG: Universidade Federal de Lavras, v. 19, n. 03, p. 481-487, set. 2013.

ARANTES, L. S. **Efeito do tratamento preservativo com CCA-C na estabilidade dimensional da madeira de *Eucalyptus***. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2016.

ARAUJO, H. J. B.; MAGALHÃES, W. L. E.; OLIVEIRA, L. C. Durabilidade de madeira de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson) tratada com CCA em ambiente amazônico. **Acta Amazonica**. Rio Branco/AC, v. 42, n.01, p 49 – 58, 2012

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som**. Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu/SP, 2005

BUCUR V. **Acoustic of Wood**. Berlin: Springer-Verlag. 2006.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**. 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

COSTA, A. F.; VALE, A. T.; GONZALEZ, J. C.; SOUZA, F. D. M. Durabilidade de madeiras tratadas e não tratadas em campo de apodrecimento. **Floresta e Ambiente**. Brasília/DF, v.12, n.01, p. 07 - 14, 2005.

CRISÓSTOMO, M. C.; COSTA, A. F.; TELES, R. F. Aplicação de ondas ultrassônicas em madeiras amazônicas tratadas e não tratadas em campo. **Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades**. Brasília/DF: Editora Científica Digital, p. 267-285, 2021.

CUMARÚ. **Portal Embrapa**, Mato Grosso. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agrossilvipastoril/sitio-tecnologico/trilha-ecologica/especies/cumaru>. Acesso em: 14 de fev. 2023.

CUMARÚ. **Serviço florestal brasileiro: laboratório de produtos florestais**. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/pt->

br/?option=com_madeirasbrasileiras&view=especieestudada&especieestudadaid=89. Acesso em: 12 de fev. 2023.

DUARTE, B. B.; LAHR, F. A. R.; CURVELO, A. A. S. Caracterização física- mecânica e composição química da madeira de Cumaru (*Dipteryx odorata*). **Engenharia Industrial Madeireira: Tecnologia, Pesquisa e Tendências**. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, p.102-110, 2020.

FREEMAN, M. H.; MCINTYRE, C. R. A. Comprehensive Review of Copper Based Wood Preservatives: with a focus on new micronized ordispersed copper systems. **Forest Products Journal**, Madison, v. 58, n.11, p. 6-27, nov. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Madeiras tropicais brasileiras**. 2ª ed. Brasília: IBAMA, 2002. 152p.

KERN C., PASTORE T.C.M. Resistência ao Intemperismo Artificial de Quatro Madeiras Tropicais: O Efeito dos Extrativos. **Ciência Florestal** (UFSM. Impresso). v. 19, p. 23-30, 2009.

MARUPÁ. **Serviço florestal brasileiro: laboratório de produtos florestais**. Disponível em: https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/?option=com_madeirasbrasileiras&view=especieestudada&especieestudadaid=230. Acesso em: 12 de fev. 2023.

MELO, R. R.; MENEZZI, C. H. D. D. Estimativa das propriedades físico-mecânicas de compostos LVL confeccionados com paricá por meio de ultrassom. **Ciência Florestal**, Santa Maria. v. 26, n. 1, p. 263-272, 2016.

MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; MODES, L.S.; SANTINI, E. J.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L. Método ultrassônico para estimativa do módulo de elasticidade de madeiras de *Pinus taeda* tratadas termicamente. **Ciência Rural**. Santa Maria/RS, v.43, n.4, p.616-622, 2013.

OLIVEIRA, E. M. **Redes neurais para predição da vida útil de madeiras da Amazônia em campo de apodrecimento**. Dissertação (Doutorado), Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

PROCÓPIO, L. C.; GAYOT, M.; SIST, P.; FERRAZ, I. D. K. As espécies de tauari (Lecythidaceae) em florestas de terra firme da Amazônia: padrões de distribuição geográfica, abundâncias e implicações para a conservação. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 04, p. 884-897, mai, 2010.

SOUSA, J. R.; ABREU, R. L. S.; NASCIMENTO, C. S.; CRUZ, I. A. Estudo da deterioração da Madeira de *Simarouba amara* (Marupá) em campo de apodrecimento. **Anais do V congresso de iniciação científica do INPA – CONIC**, Manaus/AM, p.353-357, jul. 2016.

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GARLET, A.; PASTORE, T. C. M. Resistência natural da madeira de três espécies amazônicas submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, Pelotas/RS, v. 04, n. 01, p. 16-29, mai. 2013.

STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; MELO, R. R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, M. A.; CASTELO, P. A. R.; BELTRAME, R. Uso de ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, Pelotas/RS, v. 01, n. 02, p. 45-51, nov. 2010.

TAUARI. **Serviço florestal brasileiro: laboratório de produtos florestais**. Disponível em: https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/?option=com_madeirasbrasileiras&view=especieestudada&especieestudadaid=79. Acesso em: 12 de fev. 2023.

TELES, R. F. **Ensaio não destrutivo para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente**. Dissertação (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TREVISAN, H; TIEPPO, F. M. M.; Avaliação de propriedades físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies florestais em função da deterioração em dois ambientes. **Revista Árvore** Viçosa/MG, v.31, n.1, p.93-101, 2007.