

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAR O DESEMPENHO DE  
MADEIRAS AMAZÔNICAS TRATADAS QUIMICAMENTE**

**RICARDO FAUSTINO TELES**

**ORIENTADOR: ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA  
CO-ORIENTADOR: MÁRIO RABELO DE SOUZA**

**DOCTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2014**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**“ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAR O DESEMPENHO DE  
MADEIRAS AMAZÔNICAS TRATADAS QUIMICAMENTE”**

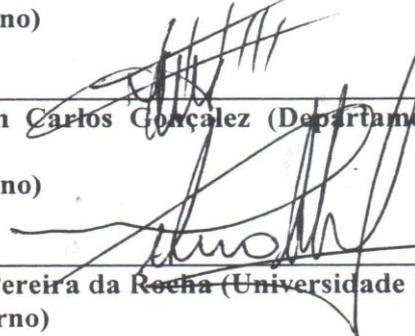
**RICARDO FAUSTINO TELES**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

**APROVADA POR:**

  
\_\_\_\_\_  
**Profº Dr. Alexandre Florian da Costa (Departamento de Engenharia Florestal - EFL/UnB);  
(Orientador)**

  
\_\_\_\_\_  
**Profº Dr. Claudio Henrique Del Menezzi (Departamento de Engenharia Florestal - EFL/UnB);  
(Examinador Interno)**

  
\_\_\_\_\_  
**Profº Dr. Joaquim Carlos Gonçalves (Departamento de Engenharia Florestal - EFL/UnB);  
(Examinador Interno)**

  
\_\_\_\_\_  
**Profº Dr. Márcio Pereira da Rocha (Universidade Federal do Paraná - UFPR);  
(Examinador Externo)**

  
\_\_\_\_\_  
**Profª Dr. Tereza Cristiana Monteiro Pastore (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente - IBAMA);  
(Examinador Externo)**

\_\_\_\_\_  
**Profº Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal - UnB);  
(Examinador Suplente)**

Brasília, 25 de abril de 2014

## FICHA CATALOGRÁFICA

TELES, RICARDO FAUSTINO

Ensaaios não destrutivos para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente.

XIV, 195pg, 210 x 297 mm (EFL/FT/UNB), Doutor, Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Ensaaios não destrutivos (END)

2. CCA

3. Durabilidade natural

4. Intemperismo

I. EFL/FT/UNB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TELES, R. F. (2014). Ensaaios não destrutivos para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD-040/2014, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 195p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ricardo Faustino Teles.

TÍTULO: Ensaaios não destrutivos para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente.

GRAU: Doutor

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



---

Ricardo Faustino Teles  
QI 22 Bloco G Apartamento 208.  
71015-078 Guar I – DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Pouco mais de quatro anos se passaram e as lembranças de tudo o que aconteceu nesse tempo me fez refletir que os agradecimentos aqui colocados são apenas uma pequena parcela de todos os bons momentos que vivi com várias pessoas que muito representam para mim. Assim, gostaria de agradecer a:

- Priscilla de França, minha esposa, companheira, amiga, confidente e o norte de toda a minha vida;
- Aos meus pais, Maria do Socorro Faustino e Douglas Guimarães Teles, por demonstrar a importância dos estudos na vida e pelo seu amor incondicional;
- Ao meu orientador Alexandre Florian da Costa, pelos ensinamentos, amizade, paciência, parceria e conselhos paternos;
- Ao orientador, co-orientador, amigo e exemplo de vida Mário Rabelo, por ter sido o estopim na minha vida acadêmica/científica e por estar sempre disposto a aconselhar e dar dicas valiosas de como ser uma pessoa melhor e comprometida com o trabalho e com a família;
- Ao professor Cláudio Del Menezzi, pela amizade construída ao longo desses anos e por ser um exemplo de dedicação à pesquisa científica, além de um ótimo parceiro de corridas de rua! Keep running Cláudio!
- Aos professores e o corpo técnico do departamento de Engenharia Florestal e da Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, pelo apoio ao desenvolvimento desse trabalho;
- A Anne Kimberly, inicialmente aluna, depois estagiária e sempre uma grande colega, pela sua disponibilidade e parceria. Valeu Kimberly!
- A Patrícia Amorim, colega de toda hora. Serei sempre grato por você ser uma pessoa ímpar em minha vida;
- Aos meus orientados, Maísa e Pedro pela ajuda durante a execução dos ensaios e por serem pessoas disponíveis para ajudar e aprender sempre.
- Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pelas novas e antigas amizades que levarei para sempre;
- Ao Instituto Federal de Brasília (IFB) e aos colegas de trabalho pela compreensão nas minhas ausências;
- A Montana Química S.A, pelo auxílio realizado na avaliação química das madeiras;
- A Coordenação de Aperfeiçoamento ao Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de pesquisa;
- A todos que, de forma direta ou indireta, estiveram presentes durante o desenvolvimento desse trabalho, o meu muito obrigado!

Agradeço a você leitor, por se interessar pelo assunto desenvolvido nesse trabalho e desejo que ele possa lhe ajudar de alguma forma na sua vida pessoal ou acadêmica.

A minha esposa,

Priscilla de França Silva Teles

Aos meus Pais,

Douglas Guimarães Teles  
Maria do Socorro Faustino

Às minhas avós (*in memorian*),

Dona Antônia e Dona Pedrina

À Mina (*in memorian*)

Dedico

## RESUMO

### ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAR O DESEMPENHO DE MADEIRAS AMAZÔNICAS TRATADAS QUIMICAMENTE

Autor: Ricardo Faustino Teles

Orientador: Dr. Alexandre Florian da Costa

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, abril de 2014.

O presente estudo teve como objetivo avaliar o uso e viabilidade de quatro diferentes técnicas de ensaio não destrutivo em campo de apodrecimento e em ensaios de intemperismo acelerado em laboratório utilizando as madeiras de marupá (*Simarouba amara*), tauari (*Couratari* sp.) e cumaru (*Dipteryx odorata*) sem tratamento químico e tratadas quimicamente com o preservante arseniato de cobre cromatado (CCA) tipo C. Para tanto, as madeiras foram usinadas em amostras no formato de estacas para a exposição em campo de apodrecimento e em réguas retangulares para o ensaio de intemperismo acelerado. O tratamento preservativo foi realizado em autoclave industrial sob pressão com CCA-C por meio do processo *Bethell* de célula cheia. Os métodos empregados para a avaliação não destrutiva foram a técnica de ondas de tensão, ondas ultrassônicas, colorimetria e análise da superfície pela rugosidade. Foi observado que somente as madeiras de marupá e tauari apresentaram penetração e retenção da solução de CCA-C na porção permeável do cerne, sendo o cumaru não impregnado através do processo *Bethell*. Embora o tratamento químico com a solução preservante CCA tipo C tenha diminuído a velocidade de propagação das ondas de tensão e ultrassônicas nas madeiras de marupá, tauari e cumaru, esse protegeu as madeiras tratadas, permanecendo a propagação das ondas pouco alteradas durante o período de dois anos de exposição no campo de apodrecimento. Os métodos de avaliação não destrutivos apresentaram-se como ferramentas úteis e viáveis para o uso em campo de apodrecimento. Foi possível estabelecer uma proposta de velocidades de propagação para os métodos de ondas de tensão e ultrassônico como metodologia alternativa à avaliação visual. A solução preservante modificou os parâmetros colorimétricos e da rugosidade de todas as madeiras estudadas. Entretanto, proporcionou resistência ao intemperismo acelerado, protegendo a superfície das madeiras do efeito deteriorador do foto-intemperismo e da ação da água.

**Palavras-chave:** madeira, CCA, durabilidade natural, intemperismo.

## **ABSTRACT**

### **NONDESTRUCTIVE TESTS TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF TREATED AMAZONIAN WOODS**

Author: Ricardo Faustino Teles

Advisor: Dr. Alexandre Florian da Costa

Post-graduate Program on Forest Science

Brasília, april of 2014.

The present study aimed to evaluate the use and feasibility of different techniques of nondestructive testing in a test site and in laboratory accelerated weathering tests using the woods of marupá (*Simarouba amara*), tauari (*Couratari* sp.) and cumaru (*Dipteryx odorata*) without any chemical treatment and chemically treated with copper-chromated-arsenate preservative (CCA) type C. For this purpose, the wood samples were sawn in stakes formats for the use in test site and in rectangular strips for the accelerated weathering. The preservative treatment was carried out on an industrial full cell cycle under pressure with CCA-C (Bethell). The methods employed for the nondestructive evaluation technique were the stress waves, ultrasound, colorimetry and analysis of the surface by roughness. It was observed that only marupá and tauari woods were penetrated and presented retention of CCA-C solution on the permeable portion of the heartwood, and cumaru was not impregnated by the full cell cycle. Although chemical treatment with the preservative solution decreased the speed of propagation of ultrasonic and stress waves and in all woods, the chemical solution protected the treated timbers, remaining a little change on the waves propagation during the period of two years exposure in the field test. The nondestructive evaluation methods presented as useful and feasible tools for use in the test site. It was possible to establish a proposal for wave propagation for methods of stress waves and ultrasound as an alternative to visual assessment methodology. The preservative solution modified colorimetric and roughness of all parameters studied woods. However, it provided resistance to accelerated weathering, protecting the surface of the wood from the effect of photodegradation and water action.

**Keywords:** timber, CCA, natural durability, weathering.

## SUMÁRIO

<b>ABSTRACT</b> .....	VII
<b>SUMÁRIO</b> .....	VIII
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	X
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	XI
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>OBJETIVO</b> .....	3
<b>HIPÓTESE</b> .....	3
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA MADEIRA .....	4
2. PRESERVAÇÃO DA MADEIRA .....	7
2.1 Preservantes de madeira .....	8
2.2 Biodeterioração da madeira .....	12
2.2.1 Fungos apodrecedores .....	12
2.2.2 Intemperismo .....	14
2.2.3 Intemperismo acelerado .....	18
3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	20
3.1 Ondas de tensão .....	21
3.2 Ultrassom .....	26
3.3 Colorimetria aplicada à madeira .....	30
3.4 Rugosidade .....	32
4. MADEIRAS ESTUDADAS .....	35
4.1 Marupá .....	35
4.2 Tauari .....	36
4.3 Cumaru .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38
<b>CAPÍTULO I: USO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DA MADEIRA EM CAMPO DE APODRECIMENTO</b> .....	
1. INTRODUÇÃO .....	47
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	50
2.1 Material Lenhoso .....	50
2.2 Tratamento preservativo .....	50
2.2.1 Ensaio de penetração e retenção do CCA-C .....	51
2.3 Ensaio de durabilidade de madeira .....	52
2.3.1 Campo de apodrecimento .....	52
2.3.2 Informações climatológicas .....	53
2.3.3 Avaliação do estado de sanidade e análise visual .....	54
2.4 Avaliação não destrutiva - velocidade de propagação sonora .....	55
2.4.1 Ondas de tensão .....	55
2.4.2 Ondas ultrassônicas .....	56
2.5 Análises dos resultados .....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
3.1 Retenção e penetração .....	58
3.2 Ensaio de durabilidade de madeira .....	61
3.2.1 Avaliação visual .....	61
3.2.2 Avaliação das propriedades físicas .....	64
3.3 Avaliação não destrutiva .....	68

3.3.1 Efeito do tratamento preservante na velocidade de propagação sonora e ultrassonora...	68
3.3.2 Velocidade de propagação no sentido longitudinal ( $V_{LL}$ ) .....	70
3.3.3 Velocidade de propagação no sentido transversal ( $V_{TR}$ ) .....	78
3.3.4 Relações entre a avaliação visual e os métodos não destrutivos .....	89
4. CONCLUSÃO .....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93

**CAPÍTULO II: AVALIAÇÃO DO EFEITO DO INTEMPERISMO ACELERADO EM TRÊS ESPÉCIES FLORESTAIS TROPICAIS UTILIZANDO TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS**

1. INTRODUÇÃO .....	97
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	100
2.1 Material Lenhoso .....	100
2.2 Tratamento preservativo .....	100
2.3 Intemperismo acelerado .....	101
2.4 Colorimetria .....	103
2.5 Rugosidade .....	103
2.6 Ondas de tensão .....	104
2.7 Análise estatística .....	105
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	106
3.1 Propriedades físicas .....	106
3.1 Colorimetria .....	107
3.2 Rugosidade .....	119
3.3 Ondas de tensão .....	125
4. CONCLUSÃO .....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	127

<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>131</b>
<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>132</b>

<b>APÊNDICE I .....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE II .....</b>	<b>161</b>

## LISTA DE TABELAS

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<b>Tabela 1.</b> Composição básica dos três tipos de CCA (%). .....	9
<b>Tabela 2.</b> Esquema da fixação do CCA na madeira. ....	10

### CAPÍTULO I

<b>Tabela 1.</b> Períodos de avaliação do campo de apodrecimento. ....	54
<b>Tabela 2.</b> Estado de sanidade das amostras de madeira instaladas em campo de apodrecimento. ....	54
<b>Tabela 3.</b> Concentração dos ingredientes ativos da solução de CCA-C utilizados na impregnação das amostras de marupá, tauari e cumaru. ....	59
<b>Tabela 4.</b> Resultados da análise de penetração e retenção dos ingredientes da solução de CCA-C impregnados nas madeiras de marupá, tauari e cumaru pelo processo <i>Bethell</i> . ....	59
<b>Tabela 5.</b> Matriz de correlação entre a velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão e as variáveis climáticas. ....	78
<b>Tabela 6.</b> Matriz de correlação entre a velocidade de propagação pelo ultrassom e as variáveis climáticas. ....	78
<b>Tabela 7.</b> Matriz de correlação entre a velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ondas de tensão e as variáveis climáticas. ....	88
<b>Tabela 8.</b> Matriz de correlação entre a velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ultrassom e as variáveis climáticas. ....	88
<b>Tabela 9.</b> Correlação de Pearson entre $V_{LLsw}$ e $V_{LLus}$ com a velocidade de propagação no sentido transversal na porção aérea e soterrada das amostras em campo. ....	89
<b>Tabela 10.</b> Correlação de Pearson entre a velocidade de propagação no sentido longitudinal e transversal pelos métodos de onda de tensão e ultrassom para as madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C e as notas médias atribuídas pela avaliação visual. ....	90
<b>Tabela 11.</b> Valores de referência para o estado de sanidade das amostras de madeira instaladas em campo de apodrecimento pelo método proposto pela IUFRO e valores base de velocidade de propagação e tempo de propagação para os métodos de onda de tensão e ultrassônico. ....	92

### CAPÍTULO II

<b>Tabela 1.</b> Parâmetros técnicos dos ciclos de intemperismo aplicados no ensaio de intemperismo acelerado nas madeiras tropicais. ....	102
<b>Tabela 2.</b> Valores da massa (g) para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C de acordo com o período de exposição ao intemperismo acelerado. ....	106
<b>Tabela 3.</b> Variação dos parâmetros colorimétricos das madeiras de marupá, tauari e cumaru durante a exposição ao intemperismo acelerado juntamente com a classificação da variação total da cor. ....	112
<b>Tabela 4.</b> Valores dos parâmetros $R_a$ e $R_z$ para as madeiras de cumaru, marupá e tauari sem tratamento químico e tratadas com CCA-C. ....	119

## LISTA DE FIGURAS

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<b>Figura 1.</b> Modelo da estrutura da parede celular de uma fibra de madeira. ....	6
<b>Figura 2.</b> Diagrama representativo das quantidades relativas de celulose, hemicelulose e lignina através de uma secção transversal da parede celular da madeira. ....	7
<b>Figura 3.</b> Modelo parcial da estrutura da lignina de madeira de coníferas apresentando os dois grupos cromóforos (A e B) .....	15
<b>Figura 4.</b> Exemplo de espectros de reflexão da madeira (a) e dos componentes químicos lignina (b) e celulose (c). ....	16
<b>Figura 5.</b> Radical guaiacol formado após a radiação da madeira. ....	16
<b>Figura 6.</b> Esquema da barra elástica com a propagação da onda gerada por meio de um impacto. ....	22
<b>Figura 7.</b> Equipamentos de ondas de tensão .....	23
<b>Figura 8.</b> Comparação entre os tempos de propagação da onda de tensão na avaliação da deterioração biológica em árvores. ....	24
<b>Figura 9.</b> Espaço colorimétrico do sistema CIELAB 1976. ....	31
<b>Figura 10.</b> Características das superfícies da madeira produzida por diferentes tipos de usinagem. (a) serra de fita; (b) plaina mecânica; (c) serra circular; (d) lixamento .....	33
<b>Figura 11.</b> Gráficos esquemáticos de variação da rugosidade em uma superfície como referências de aquisição dos valores de $R_a$ (a) e $R_z$ (b).....	34
<b>Figura 12.</b> Perfil da superfície da madeira de <i>Eucalyptus benthamii</i> aplainada (a) e lixada (b). ....	35
<b>Figura 13.</b> Seção transversal (A) e tangencial (B) da madeira de marupá ( <i>Simarouba amara</i> ). ....	36
<b>Figura 14.</b> Seção transversal (A) e tangencial (B) da madeira de tauari ( <i>Couratari spp.</i> ). ....	37
<b>Figura 15.</b> Seção transversal (A) e tangencial (B) da madeira de cumaru ( <i>Dipteryx odorata</i> ). ....	37

### CAPÍTULO I

<b>Figura 1.</b> Estacas de madeira sem tratamento químico e tratadas com CCA-C. ....	51
<b>Figura 2.</b> Campo de apodrecimento experimental instalado na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). ...	53
<b>Figura 3.</b> Posição das amostras de madeira no campo de apodrecimento. ....	53
<b>Figura 4.</b> Equipamento <i>Stress Wave Timer</i> . Detalhes do transmissor tipo martelo e do receptor para uso em campo. ....	56
<b>Figura 5.</b> Equipamento de ultrassom Pundit Lab - Proceq e medição de ondas ultrassônicas em uma amostra de madeira no sentido transversal. ....	57
<b>Figura 6.</b> Dimensões e esquema do sentido de aplicação das ondas acústicas e ultrassônicas nas amostras ensaiadas no campo de apodrecimento e avaliadas quanto à deterioração. ....	57
<b>Figura 7.</b> Identificação dos padrões de penetração do produto preservativo CCA-C na seção transversal das madeiras de marupá (A), tauari (B) e cumaru (C), com 0 meses (1) e 24 meses (2) de exposição no campo. ....	60
<b>Figura 8.</b> Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C nos seis períodos de avaliações. ....	62
<b>Figura 9.</b> Massa das madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C de acordo com as avaliações realizadas no campo de apodrecimento. ....	65
<b>Figura 10.</b> Densidade aparente das madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C de acordo com as avaliações realizadas no campo de apodrecimento. ....	66
<b>Figura 11.</b> Velocidade de propagação sonora no sentido longitudinal e transversal nas madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C. ....	69
<b>Figura 12.</b> Efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido longitudinal para as madeiras sem tratamento químico. ....	71
<b>Figura 13.</b> Efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ondas de tensão e ultrassom para as madeiras tratadas com CCA-C. ....	72

<b>Figura 14.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para ondas de tensão no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico.....	75
<b>Figura 15.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para o ultrassom no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico. ....	75
<b>Figura 16.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para ondas de tensão no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C.....	76
<b>Figura 17.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para o ultrassom no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C. ....	76
<b>Figura 18.</b> Comparação do efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras sem tratamento químico.....	79
<b>Figura 19.</b> Comparação do efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras tratadas com CCA-C.....	80
<b>Figura 20.</b> Comparação entre a velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão no sentido transversal nas posições superior e inferior de acordo com período de avaliação para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C. ....	82
<b>Figura 21.</b> Comparação entre a velocidade de propagação pelo método ultrassônico no sentido transversal nas posições superior e inferior de acordo com período de avaliação para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C. ....	83
<b>Figura 22.</b> Efeito da deterioração causada por fungos apodrecedores e cupins na madeira de marupá sem tratamento químico ao longo do tempo. ....	84
<b>Figura 23.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão no sentido transversal, em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico.....	85
<b>Figura 24.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ultrassom no sentido transversal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico.....	86
<b>Figura 25.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão no sentido transversal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C. ....	86
<b>Figura 26.</b> Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ultrassom no sentido transversal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C.....	87
<b>Figura 27.</b> Modelos estatísticos de predição da velocidade de propagação nos sentidos longitudinal e transversal pelo método de ondas de tensão para as madeiras sem tratamento em função da nota média atribuída às estacas pela avaliação visual.....	90
<b>Figura 28.</b> Modelos estatísticos de predição da velocidade de propagação nos sentidos longitudinal e transversal pelo método do ultrassom para as madeiras sem tratamento em função da nota média atribuída às estacas pela avaliação visual.....	91

## CAPÍTULO II

<b>Figura 1.</b> Câmara de intemperismo acelerado modelo QUV/Spray da empresa Q-Lab (A). Detalhes da abertura de exposição do equipamento (B). ....	102
<b>Figura 2.</b> Equipamento rugosímetro <i>Surftest SJ-401</i> da empresa Mitutoyo.....	104
<b>Figura 3.</b> Equipamento <i>Stress Wave Timer</i> modelo 239A com sistema de emissão de ondas de tensão por meio de pêndulo.....	105
<b>Figura 4.</b> Valores das coordenadas cromáticas ( $a^*$ e $b^*$ ), luminosidade ( $L^*$ ) saturação (C) e ângulo de tinta ( $h^*$ ) de acordo com o tempo de exposição ao intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).....	108

<b>Figura 5.</b> Valores das coordenadas cromáticas ( $a^*$ e $b^*$ ), luminosidade ( $L^*$ ) saturação (C) e ângulo de tinta ( $h^*$ ) de acordo com o tempo de exposição ao intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).....	109
<b>Figura 6.</b> Valores das coordenadas cromáticas ( $a^*$ e $b^*$ ), luminosidade ( $L^*$ ) saturação (C) e ângulo de tinta ( $h^*$ ) de acordo com o tempo de exposição ao intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).....	110
<b>Figura 7.</b> Alteração total da cor ( $\Delta E$ ) para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico após o intemperismo acelerado. ....	114
<b>Figura 8.</b> Alteração total da cor para as madeiras de marupá, tauari e cumaru tratadas com CCA-C após o intemperismo acelerado. ....	115
<b>Figura 9.</b> Curvas de reflectância da madeira de marupá sem tratamento químico (A) e tratada com CCA-C (B) antes e após o intemperismo acelerado.....	116
<b>Figura 10.</b> Curvas de reflectância da madeira de tauari sem tratamento químico (A) e tratada com CCA-C (B) antes e após o intemperismo acelerado.....	116
<b>Figura 11.</b> Curvas de reflectância da madeira de cumaru sem tratamento químico (A) e tratada com CCA-C (B) antes e após o intemperismo acelerado.....	117
<b>Figura 12.</b> Superfície da madeira de marupá sem tratamento químico e tratadas com CCA-C antes e após a exposição ao intemperismo acelerado com o aumento de 20x. ....	118
<b>Figura 13.</b> Superfície da madeira de tauari antes e após a exposição ao intemperismo acelerado com o aumento de 20x. ....	118
<b>Figura 14.</b> Superfície da madeira de cumaru antes e após a exposição ao intemperismo acelerado com o aumento de 20x. ....	118
<b>Figura 15.</b> Imagens obtidas por MEV da superfície da madeira de marupá sem tratamento químico (A) e tratadas com CCA (B) (aumento de 20x), apresentando a estrutura dos elementos de vasos com resíduos (C) e fibras rompidas (D) (aumento de 500x).....	120
<b>Figura 16.</b> Perfil da rugosidade ( $R_a$ ) da madeira de marupá sem tratamento (A) e tratada com CCA-C (B). ....	121
<b>Figura 17.</b> Resultados dos parâmetros $R_a$ e $R_z$ de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C. ....	122
<b>Figura 18.</b> Resultados dos parâmetros $R_a$ e $R_z$ de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C. ....	122
<b>Figura 19.</b> Resultados dos parâmetros $R_a$ e $R_z$ de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C .....	123
<b>Figura 20.</b> Superfície da madeira de marupá sem tratamento (A e B, aumentos de 20x e 120x, respectivamente), e detalhes do rompimento dos elementos celulares (C e D, aumentos de 500x) após 1200 horas de exposição ao intemperismo acelerado. ....	124
<b>Figura 21.</b> Superfície da madeira de marupá tratada com CCA-C (A) e detalhes dos elementos celulares (B e C, aumento de 500x) após 1200 horas de exposição ao intemperismo acelerado.....	124
<b>Figura 22.</b> Resultados da velocidade de propagação no sentido longitudinal de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).....	126

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

a*	Eixo cromático vermelho-verde
As	Arsênio
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de arsênico
b*	Eixo cromático amarelo-azul
C*	Cromaticidade
CCA	Arseniato de cobre cromatado
CIE	<i>Comission International de L'Eclairage</i>
CM	Cumaru sem tratamento
CMT	Cumaru tratado com CCA-C.
Cr	Cromo
CrO <sub>3</sub>	Trióxido de cromo
Cu	Cobre
CuO	Óxido de cobre
CV	Coefficiente de variação
D <sub>Ap</sub>	Densidade aparente
DP	Desvio padrão
h*	Ângulo de tinta
i.a	Ingrediente ativo
IUFRO	<i>International Union of Forestry Research Organizations</i>
L	Distância percorrida pela onda
L*	Clareza ou luminosidade
LiP	Lignina-peroxidase
MA	Marupá sem tratamento
MAT	Marupá tratado com CCA-C
NDT	Ensaio não destrutivo
PR	Penetração profunda e regular
R	Retenção
ST	Sem tratamento químico
SU	Penetração superficial
SW	Velocidade de propagação com stress wave timer
t	Tempo de trânsito da onda
TA	Tauari sem tratamento
TAT	Tauari tratado com CCA-C
US	Velocidade de propagação com ultrassom
v	Velocidade de propagação da onda
V <sub>LL</sub>	Velocidade de propagação no sentido longitudinal
V <sub>LLsw</sub>	Velocidade de propagação no sentido longitudinal com stress wave timer
V <sub>LLus</sub>	Velocidade de propagação no sentido longitudinal com ultrassom
V <sub>TR</sub>	Velocidade de propagação no sentido transversal
V <sub>TRsw</sub>	Velocidade de propagação no sentido transversal com stress wave timer
V <sub>TRus</sub>	Velocidade de propagação no sentido transversal com ultrassom
ρ <sub>ap</sub>	Densidade aparente

## INTRODUÇÃO

A madeira é um material utilizado em larga escala no Brasil, principalmente na construção civil e na indústria moveleira. O seu emprego é destinado aos mais variados usos, desde fôrmas de concreto a componentes estruturais, estruturas de sustentação em mobiliário e em forma de painéis de madeira. Assim, o conhecimento de suas propriedades físicas, mecânicas e biológicas favorece a um uso ecologicamente sustentável e eficiente desse nobre material.

No Brasil, a diversidade de espécies florestais é significativa, demonstrando um forte potencial madeireiro a ser explorado. Entretanto, a seleção e comercialização de poucas espécies contribuem para uma exploração inadequada das reservas, aumentando a pressão de seleção em poucas espécies florestais.

Devido a grande versatilidade desse material, torna-se necessário o conhecimento dos fatores que influenciam diretamente na sua resistência e rigidez. Dentre os principais fatores pode-se destacar: a espécie de madeira utilizada, as resistências física, mecânica e biológica, a quantidade de defeitos (nós, desvios de grã e rachaduras), a orientação de corte, entre outros.

A preservação de madeiras está inserida neste contexto, objetivando o uso econômico e racional deste material capaz de competir com outros materiais construtivos como o ferro, aço e o concreto. A tecnologia do tratamento de madeiras tem desempenhado um papel muito importante no desenvolvimento do setor florestal. O tratamento químico da madeira, direto ou indireto, contribui para a manutenção das suas características físico-mecânicas por um maior período de tempo, atendendo melhor as expectativas do mercado consumidor.

A forma mais usual para se determinar a durabilidade da madeira é por meio de ensaios de campo, conhecidos como campos de apodrecimento. Neste tipo de avaliação, a madeira é exposta ao solo, às intempéries do ambiente e a presença de microrganismos e insetos xilófagos (LEPAGE, 1970). Esse ensaio avalia a resistência natural da madeira e a eficiência de produtos químicos durante o período de teste, com o objetivo de estimar a sua vida útil, tratada ou não quimicamente. Apesar dos altos custos envolvidos nos ensaios de campo, este é o método mais amplamente utilizado para prever o desempenho que a madeira apresentará em serviço e o seu potencial de utilização natural ou preservada.

Os preservantes para madeiras são substâncias químicas que possuem a função de proteger a estrutura da madeira com o objetivo de torná-la resistente a ação de agentes biodeterioradores. Galvão et al. (2004) afirmam que para um produto ser considerado realmente um preservativo, uma vez aplicado, deve penetrar profundamente na madeira, não evaporar nem ser arrastado pelas águas da chuva ou umidade do solo. Também não deverá ser tóxico ao homem e animais domésticos, nas concentrações usuais, e ser relativamente barato.

Entre as soluções químicas utilizadas como preservantes de madeira, o arseniato de cobre cromatado, conhecido comumente como CCA, é o preservativo responsável pelo maior volume de madeira tratada e tem sido utilizado amplamente no mundo inteiro, desde a sua descoberta em 1933 (APPEL et al., 2006; GALVÃO et al., 2004). De acordo com Lepage (1986), esse produto químico apresenta três formulações básicas, tipo A, B e C, sendo que este último é o mais usado para construções e uso em geral por apresentar maior resistência à lixiviação e melhor desempenho no campo.

O intemperismo é um agente deteriorador importante no estudo da durabilidade natural da madeira. Ele é definido como uma deterioração lenta que a madeira sofre quando exposta ao tempo, sendo a intensidade de sua ação causada por uma combinação de fatores encontrados na natureza como umidade, irradiação solar, calor e frio, uso de produtos químicos no material e abrasão. Para Ishiguri et al. (2003) o intemperismo é considerado um problema para os consumidores de madeira porque, além de modificar a textura, a cor e o brilho, também afeta o desempenho dos produtos de proteção aplicados sobre esta.

O método convencional de avaliação do estado de sanidade de madeiras em campo de apodrecimento é comumente realizado conforme a sugestão da *International Union of Forestry Research Organizations* (IUFRO), consistindo em uma classificação com base em um sistema de notas com valores entre 10 e 0, os quais indicam desde amostras sadias até peças destruídas devido ao ataque de fungos ou insetos. Esse sistema é considerado subjetivo, sendo indicado que as inspeções sejam efetuadas por uma mesma pessoa ou pequeno grupo, com critérios homogêneos quanto à avaliação da sanidade (LOPEZ e MILANO, 1986).

Partindo dessa realidade, diversos métodos indiretos que permitem a estimativa das propriedades da madeira e seus subprodutos têm sido empregados em laboratórios e indústrias. Esses são conhecidos como técnicas de ensaios não destrutivos (NDT) e se caracterizam por permitirem respostas rápidas e por possuírem boa relação quando

comparados com métodos de ensaios padronizados, além de não alterar a característica estrutural e o conseqüente emprego final da madeira. Entre os métodos conhecidos de NDT, chamam atenção as técnicas de ondas de tensão e ultrassônica, bem como a espectroscopia no visível e no infravermelho.

## **OBJETIVO**

O presente estudo teve como objetivo avaliar o uso e viabilidade de quatro diferentes técnicas de ensaios não destrutivos em campo de apodrecimento e em ensaio de intemperismo acelerado em laboratório para a avaliação do estado de sanidade de três espécies de madeiras tropicais Amazônicas sem tratamento químico e tratadas quimicamente com o preservante CCA tipo C.

## **HIPÓTESE**

As técnicas de ensaios não destrutivos são ferramentas viáveis na avaliação da durabilidade natural de madeiras sem tratamento químico e tratadas com CCA tipo C em campo e expostas ao intemperismo acelerado, com potencial de substituição ao método padrão de avaliação visual.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA MADEIRA

Kollmann e Côte (1968) classificam a madeira como um material heterogêneo e as variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira são significativos entre espécies, embora dentro da mesma espécie elas também ocorram, principalmente, em função da idade, fatores genéticos e características ambientais. Dentro de uma mesma espécie, ocorrem variações expressivas nos sentidos base-topo (axial) e medula-casca (radial) (TRUGILHO et al., 1996).

Quimicamente, a madeira é um material lignocelulósico constituída por compostos químicos complexos que incluem os componentes de alto peso molecular ou macromoleculares, da parede celular divididos em celulose, hemicelulose e lignina, e uma série de compostos de baixos pesos moleculares conhecidos como extrativos (ROWELL, 2005). Para Pala (2007), a variação da composição e da organização dos componentes de alto e baixo peso molecular na ultraestrutura da madeira justifica a diversidade das propriedades tecnológicas (morfológicas, físicas, mecânicas e biológicas).

Entre os polímeros constituintes da madeira, a celulose corresponde entre 40 a 44% da composição total, possuindo um polímero linear de alto peso molecular de monômeros de 4  $\beta$ -anidroglicopirranose associadas entre si por ligações  $\beta$ -1,4 glicosídicas, com disposição a formação de feixes que se agregam na forma de microfibrilas, na qual regiões altamente ordenadas (cristalinas) se alternam com regiões menos ordenadas (amorfas) (KLOCK, 2005). Para Sjoström (1993), a cristalinidade da celulose proporciona resistência ao ataque químico e as demais formas de deterioração, em comparação com a maioria das polioses e lignina. A estrutura fibrosa formada pela celulose proporciona uma alta resistência mecânica à tração e alta insolubilidade à grande parte dos solventes orgânicos.

As hemiceluloses, ou polioses, estão constituídas na faixa entre 15 a 35% nas folhosas e 20 a 32% nas madeiras coníferas (ROWELL, 2005). Estão associadas com a celulose e polímeros ramificados de baixo peso molecular, sendo composta de vários tipos de monômeros de açúcar, como a pentose (xilose e arabinose) e hexose (galactose, glicose e manose) (PASTORE, 2004). As hemiceluloses possuem alta reatividade, sendo solúveis em álcalis e facilmente hidrolisáveis por ácidos diluídos para formarem açúcares.

A lignina é uma macromolécula amorfa, composta basicamente por unidades de fenilpropano (WILLIAMS, 2005), contendo subestruturas fenólicas (10-20%) e não fenólicas (80-90%). Os teores de lignina apresentados nas madeiras de folhosas encontram-se entre 18 a 25% para folhosas, enquanto que para as coníferas essa faixa é superior e situa-se entre 25 a 35%. Entretanto, conforme apresentado por Rowell (2005), em termos qualitativos, a lignina presente nas madeiras de folhosas apresenta-se com uma estrutura química mais complexa do que observado nas coníferas. Isso ocorre devido à lignina presente nas coníferas ser referida como lignina guaiacil, uma vez que, aproximadamente, 95% dos estruturais são derivados do álcool coniferil. Na lignina das folhosas, a composição se dá por partes semelhantes de álcool sinapílico e coniferílico (50:50, 60:40 ou 40:60), sendo denominada de lignina do tipo guaiacil-siringil (DENCE e LIN, 1992). A lignina atua como agente aderente entre as microfibrilas nas paredes celulares nos traqueídes e nas fibras (KOLLMANN e COTÊ, 1968; HAYGREEN e BOYWER, 1989).

Além dos principais carboidratos componentes da madeira, existem ainda alguns constituintes presentes em menores concentrações, tais como os extrativos da madeira. Estes são compostos orgânicos e representam cerca de 0,2 a 1,0% da composição da madeira de clima temperado, tendo como exemplos as resinas, taninos, polifenóis, ceras, ésteres de ácidos graxos e terpenos. Existem ainda composto inorgânico, que correspondem entre 0,2 a 1,0%, como as cinzas, que podem chegar a até 5% em madeiras tropicais, contendo sais de K, Ca, Mg e cátions de Fe, Mn e B (USDA, 2010; KOLLMANN e COTÊ, 1968).

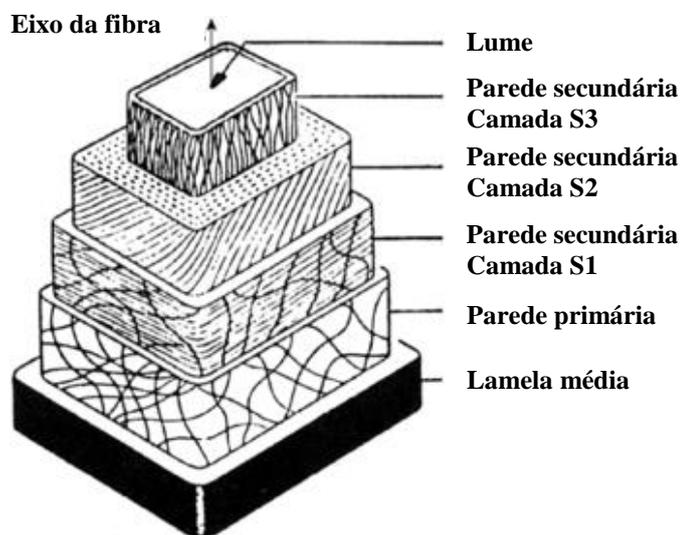
Analisando a ultraestrutura da madeira, observa-se que a parede celular é formada por camadas individuais dispostas segundo um arranjo concêntrico. A lamela média é uma camada altamente lignificada (FENGEL e WEGENER, 1984), localizando-se entre as células individuais, servindo como elemento de ligação entre estas. Apresenta espessura média entre 0,2 a 1,0  $\mu\text{m}$  (HAYGREEN e BOWYER, 1989).

A parede primária possui morfologia delgada, com as fibrilas de celulose arranjadas em camadas que se cruzam formando um aspecto de redes (KLOCK, 2005). A parede primária é a primeira camada depositada durante o desenvolvimento da célula, este sistema permite uma expansão (crescimento) da célula jovem. Por consequência, a orientação das fibrilas na camada mais externa é mais oblíqua, contendo polioses, pectina e proteínas imersas em uma matriz de lignina, com a sua espessura situada na faixa entre 0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$ .

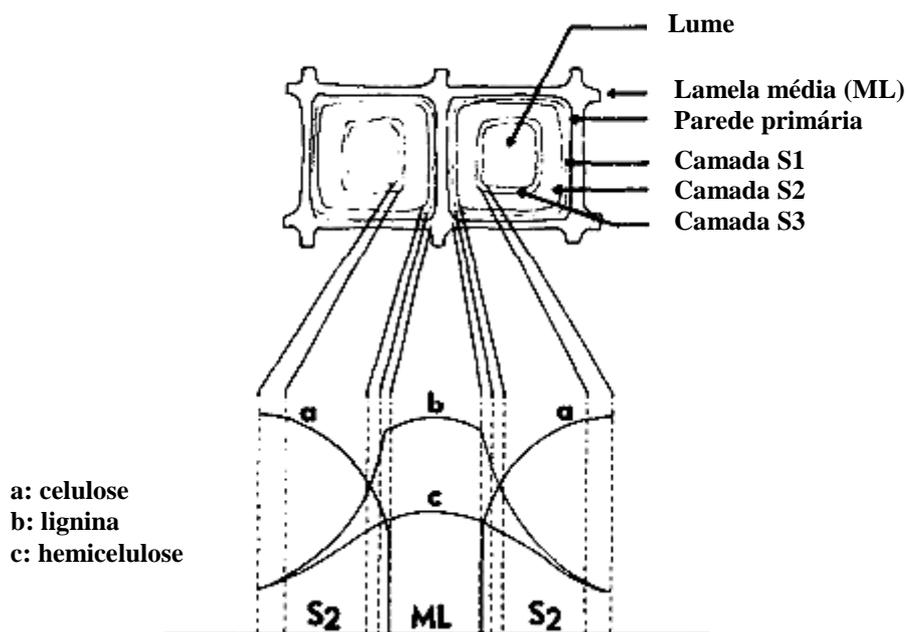
A parede secundária é formada por três camadas, designadas por S1, S2 e S3, as quais possuem espessuras e arranjos distintos. A camada S1 apresenta espessura de 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$ , e as fibrilas de celulose se apresentam em orientação helicoidal, com o ângulo formado entre as fibrilas em relação ao eixo da célula considerada pode variar entre 50 e 70° (ROWELL, 2005). É a camada mais lignificada, assemelhando-se neste sentido mais à parede primária, sendo também mais resistente ao ataque de fungos que a S2 (KLOCK, 2005).

A camada S2 constitui a parte mais espessa da parede celular, considerada a porção principal da célula, com espessamento variando de 1,0 a 9,0  $\mu\text{m}$ . Nesta camada, as fibrilas estão dispostas num ângulo praticamente reto em relação ao eixo da célula, podendo variar entre 10 e 30°, diminuindo com o aumento do comprimento da célula (LEPAGE, 1986).

A camada S3 apresenta em média 0,1  $\mu\text{m}$  de espessura. As fibrilas de celulose são arranjadas numa inclinação suave, porém não em uma forma estritamente paralela. Possui uma concentração maior de substâncias não estruturais, o que confere a superfície do lume uma aparência mais ou menos lisa (KLOCK, 2005). A Figura 1 ilustra um modelo da estrutura da parede celular e a Figura 2 apresenta um esquema das quantidades relativas de celulose, hemicelulose e lignina na seção transversal da parede celular da madeira.



**Figura 1.** Modelo da estrutura da parede celular de uma fibra de madeira. Modificado de Rowell (2005).



**Figura 2.** Diagrama representativo das quantidades relativas de celulose, hemicelulose e lignina através de uma secção transversal da parede celular da madeira. Modificado de Feist e Hon (1984).

## 2. PRESERVAÇÃO DA MADEIRA

A preservação de madeiras é definida como o conjunto de produtos, métodos, técnicas e pesquisas destinadas a alterar, medir ou estudar a durabilidade da madeira, podendo ser dividida em preservação natural, indireta, biológica e química (CAVALCANTE, 1983).

Moraes (1996) apresenta a preservação natural como o uso da madeira de forma a evitar a ação dos agentes deterioradores, protegendo-a do contato com o solo (apoiando as edificações sobre bases de concreto ou pedra) e das fontes de umidade (através de beirais largos), e como preservação química, a introdução de produtos químicos dentro da estrutura da madeira, visando torná-la tóxica aos organismos que a utilizam como fonte de alimento. A preservação indireta pode ser conceituada como o tratamento do meio em que a madeira está sendo utilizada; enquanto que a preservação biológica envolve o emprego de organismos vivos na prevenção ao ataque dos organismos xilófagos (LEPAGE, 1986).

Os tratamentos sob pressão são considerados os mais eficientes, em razão da distribuição e penetração do preservativo na peça tratada. Tais tratamentos são classificados em processos de célula cheia e de célula vazia, em função da maneira pela qual é feita a distribuição do

preservativo nas fibras da madeira (GALVÃO et al., 2004; LEPAGE, 1986). As madeiras tratadas por esses métodos podem ser utilizadas em qualquer situação, mesmo nas que apresentam alto índice de ataque por organismos xilófagos, como no caso de contato direto com o solo (ROCHA, 2000).

Em geral, os principais produtos tratados são postes de eletrificação rural e de telefonia, cruzetas, dormentes de estrada de ferro, madeiras usadas na agricultura (cercas, estacas), madeiras estruturais para a construção civil, madeiras para jardins e parques, compensados, produtos de marcenaria, madeiras para mineração, para proteção de estradas, madeiras serradas e madeiras para construção de portos, diques, entre outros (MORAES, 1996).

Segundo Lepage (1970), a forma mais usual para se determinar a durabilidade da madeira tratada é por meio de ensaios de campo, conhecidos como campos de apodrecimento. Neste tipo de ensaio a madeira é exposta ao solo, às intempéries do ambiente e a presença de microorganismos e insetos xilófagos. O objetivo desse ensaio é avaliar as condições da madeira natural ou tratada quimicamente durante o período de teste, verificando os tipos de organismos que estão deteriorando o material e estimar a vida média em serviço. Ainda de acordo com o autor, apesar dos altos custos envolvidos nos ensaios de campo, este é o único método onde é possível prever o desempenho que a madeira apresentará em serviço e o potencial de utilização da madeira natural ou preservada. Esses campos de apodrecimento podem ser instalados com amostras em forma de moirões ou estacas. O campo com estacas é um método padronizado pela IUFRO (União Internacional das Instituições de Pesquisa Florestal) e muito utilizado para avaliar a durabilidade da madeira tratada. Esse tópico será tratado com maiores detalhes adiante.

De acordo com Nicholas (1985), a madeira quando está em contato com o solo deteriora muito mais rápido do que fora dele, devido ao equilíbrio da umidade da madeira em contato com o solo úmido, a possibilidade de lixiviação de produtos preservantes e a uma grande quantidade de microorganismos que colonizam a madeira e/ou causam deterioração do preservante.

## **2.1 Preservantes de madeira**

Os preservantes para madeira são substâncias que possuem a função de proteger a estrutura da madeira com o objetivo de evitar a biodeterioração por agentes xilófagos (insetos e fungos),

tornando-a tóxica as esses organismos. Galvão et al. (2004) afirmam que para um produto ser considerado realmente um preservante, uma vez aplicado deve penetrar profundamente na madeira, não se evaporar, nem ser lixiviado pelas águas da chuva ou umidade do solo. Também, não deverá ser tóxico ao homem e animais domésticos, nas concentrações usuais e ser relativamente barato.

Uma das formas comuns e simples de classificar os produtos preservantes é pela natureza física do produto, sendo classificados como oleosos, aqueles cuja natureza é oleosa, oleossolúveis, aqueles que são dissolvidos em algum tipo de solvente orgânico, e preservativos hidrossolúveis, os quais o solvente é a água (FREITAS, 2002), sendo representantes desses grupos o creosoto, o pentaclorofenol, e o arseniato de cobre cromatado (CCA), respectivamente.

Os preservantes hidrossolúveis são expressos em termos de ingrediente ativo (i.a), uma convenção estabelecida para se expressar às formulações dos preservantes em uma mesma base estequiométrica. Os óxidos dos elementos são tomados como base para este cálculo (GALVÃO et al. 2004).

O CCA é o preservante de mais ampla utilização em todo o mundo. De acordo com Lepage (1986) existem três formulações básicas da solução, sendo estas o tipo A, B e C, (Tabela 1), sendo que todas contem cerca de 19% de óxido de cobre (CuO). O tipo C é o mais usado por apresentar maior resistência à lixiviação e melhor desempenho no campo. O sal seco ou a solução preservante deve ser preparado com pureza acima de 95% na base anidra.

**Tabela 1.** Composição básica dos três tipos de CCA (%).

<b>Componente</b>	<b>Tipo A</b>	<b>Tipo B</b>	<b>Tipo C</b>
<b>Cromo (CrO<sub>3</sub>)</b>	65,5	35,3	47,5
<b>Cobre (CuO)</b>	18,1	19,6	18,5
<b>Arsênio (As<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	16,4	45,1	34,0

Adaptado de Lepage (1986).

O arsênio é geralmente utilizado em duas formas aniônicas, como arsenito, As (III) trivalente, ou na forma mais mobilizável, As (V) pentavalente. O pentóxido de arsênico utilizado no CCA tem arsênio pentavalente. O cobre está principalmente na forma catiônica de Cu<sup>+2</sup> e o cromo, embora seja um cátion, comumente se apresenta em duas formas aniônicas, a mais

mobilizável e tóxica de íons cromatos, Cr (VI), e a menos móvel e tóxica Cr (III). No CCA, ela é principalmente hexavalente (CHIRENJE et al., 2003). Smith e William (1973) indicam que a maior fixação dos sais do CCA ocorre quando obtida as relações Cr/As > 1,9 e Cr/Cu igual a 1,7.

A Tabela 2 apresenta os aspectos cinéticos das reações químicas que levam a fixação dos sais na madeira (DALGREN, 1975; PIZZI, 1982). Essa compilação esquemática foi sistematizada por Lepage (1986) e apresenta a fixação do cobre, cromo e do arsênio com a celulose e lignina. Porém estudos posteriores de Pizzi et al. (1986) e Pizzi et al. (1990) sugerem ainda que os extrativos das madeiras podem ser considerados sítios de fixação do CCA.

**Tabela 2.** Esquema da fixação do CCA na madeira.

Reações iniciais instantâneas	Principais períodos de fixação e de precipitação		
	1ª zona de reação	2ª zona de reação	3ª zona de reação
Fixação do cobre por troca iônica	<-----Adsorção de Cr <sup>VI</sup> na celulose ----->		
	<-----Redução do Cr <sup>VI</sup> a Cr <sup>III</sup> na celulose ----->		
	Formação de CuCrO <sub>4</sub> e complexação com as unidades guaiacil da lignina ----->		NR
Troca temporária com retirada de prótons e adsorção de ácido crômico			NR
	Redução do Cr <sup>VI</sup> para Cr <sup>III</sup> para formar CuAsO <sub>4</sub> ----->		
	CrAsO <sub>4</sub> complexação com o guaiacil da lignina ----->		NR
	<----- CrAsO <sub>4</sub> precipitação na celulose ---->		NR
	Complexação de Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> com as unidades guaiacil da lignina	Complexação do HCrO <sub>4</sub> com as unidades guaiacil da lignina	Complexação do CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> com as unidades guaiacil da lignina
	<----- Cu <sup>2+</sup> complexação com a lignina e celulose ----->		

Onde: NR: não reativo. Fonte: Lepage (1986)

Hingston et al. (2001) indicam que as reações iniciais do CCA com a madeira resultam em um rápido decréscimo do pH, o qual depende da concentração da solução, ocorrendo devido à fixação do cobre por troca iônica com liberação de prótons. Posteriormente, o pH se eleva gradualmente de acordo o avanço das reações de fixações. Pizzi (1982) sugere o aumento do

pH em função da formação dos complexos lignina-ácido crômico e lignina-cromato de cobre, juntamente com a redução do cromo.

Pizzi et al. (1982) e Hingston et al. (2001) atribuem os seguintes produtos formados com a reação do CCA com a madeira:

- $\text{CuCrO}_4$ : complexos estáveis com a lignina (10 a 15%);
- $\text{CrAsO}_4$ : complexos com a lignina e precipitado inorgânico de  $\text{CrAsO}_4$  na celulose;
- $\text{Cr}_2(\text{OH})_4\text{CrO}_4$ : precipitado inorgânico na celulose;
- $\text{Cu}^{2+}$ : formação de complexos com a lignina com grupos guaiacil e celulose (10 a 20%), pode ser adsorvido fisicamente nos componentes da madeira (5 a 20%) e formação de complexos com outros grupos químicos da lignina além do guaiacil (40 a 70%).

Como observado, a maior parte do cobre está associado à lignina, sugerindo a sua localização e fixação na camada S1 da parede secundária. Porém, nota-se que o cobre também se associa à celulose, possivelmente ligado às hidroxilas. Assim, quando o CCA é aplicado à madeira os seus principais componentes reagem com os carboidratos, lignina e extrativos tornando-se insolúvel (GALVÃO et al., 2004). Ainda de acordo com os autores, o cromo é considerado o principal responsável pela fixação do arsênio e do cobre, sendo estes dois responsáveis pela função inseticida e fungicida, respectivamente, aderindo à parede celular da madeira após as reações de fixação. Essas reações são rápidas, geralmente em condição ambiente levam de 3 a 15 dias e aceleram com a temperatura. Por essa razão, os preservativos tipo CCA são os mais indicados para processos industriais sob pressão e à frio.

Após o tratamento, a madeira adquire coloração esverdeada em função da presença do cobre, não exalando odores nem vapores tóxicos irritantes ao homem e não aumenta a combustibilidade, além de conferir proteção contra fungos, insetos e brocas marinhas (LEPAGE, 1986). Seu uso é recomendado para ambientes internos, externos e madeiras com ou sem contato com o solo.

De acordo com Evans (2000), um dos principais inconvenientes apresentados pelo CCA é a perda de resistência da madeira tratada, sobretudo da tenacidade, que está relacionada com o aumento da retenção. Essa perda de resistência tende a estar ligada a alterações no pH ocorridas no primeiro estágio da reação de insolubilização do CCA.

Os fatores que influenciam a quantidade de componentes lixiviados da madeira tratada dependem do grau de absorção e da distribuição do preservativo, concentração na madeira, permeabilidade da madeira e parâmetros tecnológicos do processo de impregnação. A temperatura e o conteúdo de umidade da madeira, durante a fixação, influenciam a lixiviação dos componentes (BROWN e EATON, 2000).

## **2.2 Biodeterioração da madeira**

A durabilidade ou resistência natural da madeira refere-se ao grau de suscetibilidade a ação de intempéries e ao ataque de agentes deterioradores, como fungos, insetos e brocas marinhas. Madeiras de alta densidade, por apresentarem uma estrutura celular mais fechada e, freqüentemente, elevado teor de substâncias especiais, impregnando as paredes das células, são conhecidas como mais resistentes. A presença de materiais como sílica, alcalóides, taninos, normalmente de ocorrência mais acentuada no cerne dos troncos, aumentam a durabilidade natural da madeira devido ao efeito tóxico que apresentam sobre os agentes deterioradores (BURGER & RICHTER, 1991).

### **2.2.1 Fungos apodrecedores**

Para Moreschi (2005), entre os agentes biológicos que utilizam a madeira como fonte de nutrição e, conseqüentemente causam sua deterioração, os fungos são os responsáveis pela maior proporção de danos causados, visto que os mesmos ocorrem com elevada frequência na madeira.

De acordo com Zabel e Morrell (1992) a biodeterioração da madeira ocasionada por fungos xilófagos ocorre em etapas ou estágios graduais e contínuos, dependendo do tipo de microrganismo, sendo dividido em três estágios (PALA, 2007):

- Primeiro estágio: denominado incipiente, que ocorre a partir do momento da penetração superficial na madeira pelos microrganismos, com liberação de enzimas que agem na colonização, porém sem evidências de ataque na madeira.
- Segundo estágio: denominado intermediário, que apresenta a evidência do ataque do microrganismo, com a alteração colorimétrica da superfície da madeira, porém sem alteração na estrutura celular.

- Terceiro estágio: denominado avançado, é caracterizado pela destruição total da estrutura da madeira.

O apodrecimento causado pela ação dos fungos xilófagos é ocasionado pela atuação de enzimas que são produzidas a partir de vários biocatalizadores, em que cada uma dessas substâncias desenvolve funções específicas, como a aceleração ou controle das reações bioquímicas. Esses biocatalizadores são macromoléculas de proteínas com estrutura supermolecular definida, contendo um centro ativo. A hifa secreta enzimas destruidoras da celulose, quebrando a estrutura na região cristalina por expansão intermolecular, resultando na clivagem de algumas ligações de hidrogênio e covalentes. Várias outras enzimas agem também sinergicamente, quebrando e degradando a celulose não cristalizada em cadeias oligoméricas mais curtas e em unidades de celobiose, chegando, finalmente, a simples monômeros de glicose, que podem ser digeridos pelas hifas (COSTA, 2009). Pode-se afirmar que a quebra enzimática consiste basicamente na transformação dos componentes insolúveis da madeira, em produtos solúveis, e em seguida em compostos químicos simples, capazes de serem metabolizados.

A deterioração enzimática das polioses requer um conjunto enzimático mais complexo ao encontrado na celulose, uma vez que diferentes tipos de ligações e unidades monoméricas estão presentes na sua estrutura de heteropolissacarídeo ramificado. A completa deterioração das polioses requer a ação de uma série de enzimas hidrolíticas (ROWELL, 2005).

Rowell (2005) indica que na deterioração da lignina as principais enzimas oxidativas são as peroxidases, em que se pode destacar a lignina-peroxidase (LiP) e a peroxidase dependente de manganês (MnP), e as oxidases ou lacases. Para Oliveira et al. (1986), esse processo pode ser relativamente rápido, demonstrando, assim, a eficiência dos fungos xilófagos em deteriorar substratos lignocelulósicos.

De acordo com Mendes e Alves (1988), os principais causadores de danos em materiais lignocelulósicos são os fungos pertencentes à classe dos Basidiomicetos. Dentre esses, se destacam os causadores da chamada podridão parda, que destroem os polissacarídeos da parede celular, e os de podridão branca, que, além de polissacarídeos, destroem também a lignina.

A madeira sob ataque de fungos de podridão parda apresenta alterações na composição química, redução da resistência mecânica, diminuição de massa, modificação da cor natural, aumento da permeabilidade, redução da capacidade acústica, aumento da inflamabilidade, diminuição do poder calorífico e maior propensão ao ataque de insetos, comprometendo, dessa forma, a sua qualidade e inviabilizando a sua utilização para fins tecnológicos (COSTA, 2009). Oliveira et al. (1986) indicam que os fungos de podridão parda deterioram, apenas, os polissacarídeos, mantendo a lignina residual intacta.

A madeira deteriorada por fungos de podridão branca apresenta tendência de perder seu aspecto lustroso e sua cor natural, tornando-se esbranquiçada, como resultado da destruição de pigmentos (SANTINI, 1988). Além disso, adquire uma consistência esponjosa, por vezes, linhas escuras demarcam a área atacada (LELIS et al. 2001). De modo geral, esses fungos deterioram em maior grau madeiras de folhosas em comparação com coníferas (CURLING et al. 2000). Wetzstein et al. (1999) relatam que as atividades ocorrentes em madeiras atacadas por essa classe de podridão são atribuídas a enzimas, como a lignina peroxidase, lacase e manganês peroxidase, que catalisam a deterioração via difusão de agentes oxidantes ou mediadores específicos.

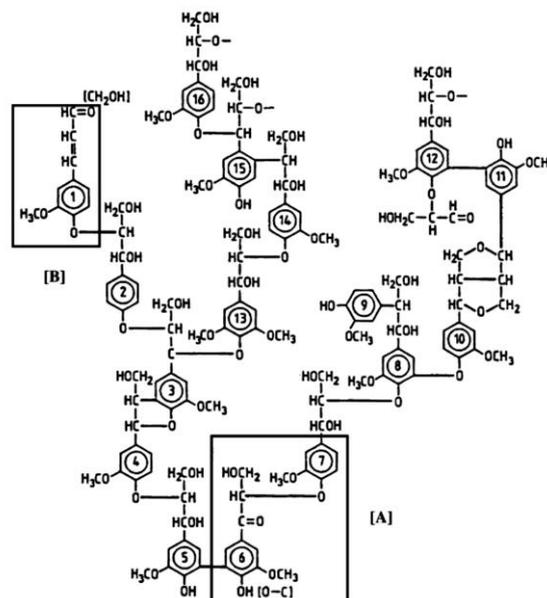
A umidade e a temperatura da madeira são consideradas os fatores mais importantes para o desenvolvimento de fungos apodrecedores, com valores ótimos entre 40 a 75% de teor de umidade e entre 25 e 30°C de temperatura (LEPAGE, 1986). Mendes e Alves (1988) indicam ainda que baixas concentrações de oxigênio no ambiente e pH abaixo 2 e superior a 7 restringem o desenvolvimento dos fungos apodrecedores.

### **2.2.2 Intemperismo**

Intemperismo é o termo geral usado para definir a lenta deterioração de materiais quando expostos ao tempo (WILLIAMS, 2005). O mecanismo de deterioração depende do tipo de material, mas a causa é uma combinação de fatores encontrados na natureza como umidade, irradiação solar, calor e frio, uso de produtos químicos no material e abrasão. Para Ishiguri et al. (2003) o intemperismo é considerado um problema para os consumidores de madeira porque, além de modificar a textura, a cor e o brilho, também afeta o desempenho dos produtos de proteção aplicados sobre esta.

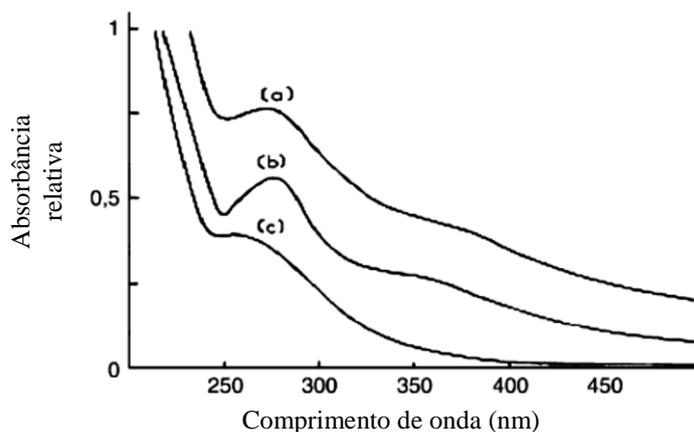
A madeira quando submetida ao intemperismo sofre danos que são inicialmente observados pela variação de cor natural, podendo chegar a comprometer as propriedades químicas, físicas e mecânicas. Nesse mesmo sentido, Silva et al. (2007) analisando o efeito do intemperismo sobre as cores da madeira afirmam que esta propriedade sofre com a ação do intemperismo sejam pela lixiviação ocasionada pela chuva ou ainda pela incidência da luz. Creemers et al. (2002) afirmam que todos os elementos do clima influenciam mutuamente, de forma complexa e com grande intensidade, os danos sobre a madeira. Entretanto, pode-se afirmar que a radiação solar e a precipitação são dominantes em relação aos outros mecanismos do intemperismo.

A fotodegradação, conceito empregado como o processo de decomposição devido à radiação ultravioleta (UV) presente na luz do sol é considerado como o mais prejudicial, pois se iniciam as modificações químicas dos principais polímeros que constituem a madeira: a celulose, a lignina e a hemicelulose (FEIST e HON, 1984). Ainda de acordo com os autores, a ação da água causa a lixiviação tanto de extrativos como dos produtos fotodegradados expondo uma nova superfície à ação do tempo. Garcia et al. (2000) apresentam um modelo da estrutura parcial da lignina da madeira de coníferas, exibindo os dois grupos A e B cromóforos que absorvem a luz UV e passam por diferentes etapas do mecanismo de fotodegradação (Figura 3).



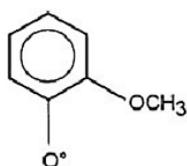
**Figura 3.** Modelo parcial da estrutura da lignina de madeira de coníferas apresentando os dois grupos cromóforos (A e B) (GARCIA et al., 2000).

George et al. (2005) afirmam que dentre os constituintes da madeira apenas a lignina possui alta absorção na região UV/visível (Figura 4). Os autores apresentam os espectros de absorvância que indicam a deterioração da madeira, não só sob a ação da luz UV, mas também sob os comprimentos de onda mais curtos de luz visível.



**Figura 4.** Exemplo de espectros de reflexão da madeira (a) e dos componentes químicos lignina (b) e celulose (c). (GEORGE et al., 2005, modificado).

Quimicamente, de acordo com Pastore (2004), a lignina é considerada como primeiro componente polimérico principal a decompor-se e o processo pode ser acompanhado pela diminuição do teor de lignina e pela formação de grupos carbonílicos da superfície. Estrutura fenólica da lignina possui grupos cromóforos que sofrem a ação dos raios ultravioletas. Os mecanismos de fotodegradação da lignina são complexos e geram diversos radicais fenólicos, sendo o principal deles o guaiacol (Figura 5). Este radical é transformado em estruturas quinóides, que são a origem do amarelecimento da superfície da madeira (George et al., 2005). Ainda de acordo com os autores, existem três caminhos que provocam alteração do guaiacol: foto-redução com eliminação de um átomo de hidrogênio, que dá origem a um grupo cetil; clivagem da ligação éter- $\beta$ -arila, que resulta em um radical fenacil; e a transferência de energia, com eliminação de um átomo de oxigênio (GOUVEIA, 2008).



**Figura 5.** Radical guaiacol formado após a radiação da madeira. Fonte: Williams (2005).

A celulose quando irradiada com comprimentos de onda superiores a 340 nm, na presença de oxigênio e energia, produz radicais alcoxi e carbônicos, por meio da cisão nas posições C1 e C4 da ligação glicosídica. Os radicais alcoxi geralmente são estáveis quando comparados com os carbônicos, que em contato com o oxigênio, perdem o hidrogênio e formam hidroperóxidos. Assim, a degradação da celulose é indicada pela perda de peso e pela redução do grau de polimerização (PANDEY, 2005).

Dessa forma, a fotodegradação da madeira é considerada um fenômeno superficial, devido à grande quantidade de grupos (carbonila, dupla ligação, hidroxila fenólica, entre outros) ou sistemas cromóforos (quinonas, bifenil, entre outros) dos componentes distribuídos na camada externa que impedem a entrada da luz na madeira (COSTA et al., 2011, PASTORE, 2004). Nesse sentido, segundo Sudiyani et al. (2002), espécies ricas em lignina são mais resistentes ao intemperismo e a perda de massa ocorre devido à degradação dos componentes da madeira por meio da foto-oxidação.

Pastore (2004) apresenta o processo de fotodegradação da madeira, indicado pelo esquema sequencial abaixo:

- Os cromóforos primários das ligninas absorvem luz ultravioleta (300 – 400 nm);
- Nas ligninas, as ligações éteres são quebradas e novos radicais são formados;
- Os radicais reagem com a lignina para produzir outros radicais, do tipo fenóxi e cetílicos;
- Os radicais cetílicos são quebrados e dão origem a novos grupos fenóis e a cetonas, que agem como cromóforos secundários;
- Os fenóis são oxidados e formam quinonas amarelas e cetonas aromáticas;
- Os cromóforos secundários absorvem a luz e provocam novo ciclo de fotodegradação da lignina.

A radiação ultravioleta consegue penetrar até uma profundidade de 75  $\mu\text{m}$  e a visível atinge cerca de 200  $\mu\text{m}$ , dependendo da cor original da madeira. Apesar de a radiação visível penetrar mais profundamente, sua energia, menor do que 70 kcal/mol, é insuficiente para romper as ligações químicas em qualquer um dos constituintes da madeira (HON, 2001). Desse modo, a radiação ultravioleta é considerada a mais danosa ao uso da madeira.

Quando a ação da luz adiciona-se a ação da água, após 300h de exposição à radiação ultravioleta, o efeito da fotodegradação na superfície da madeira pode atingir uma profundidade de até 120  $\mu\text{m}$  (HORN et al., 1994). Ayadi et al. (2003), sugerem que a principal função da água seja facilitar a penetração da luz na madeira nas regiões acessíveis e abrir regiões não acessíveis. Assim, o efeito isolado da luz é menos pronunciado na superfície da madeira, visto que o intemperismo com água apenas, não tem, virtualmente, nenhum efeito na comparação ao resultado da luz e da água combinadas.

Tolvaj (1994), ao analisar a influência da radiação ultravioleta sobre a madeira de 16 espécies oriundas de regiões temperadas concluiu que as modificações provocadas pela ação da radiação eram mais intensas durante as primeiras 20 horas de exposição, sendo nítido o escurecimento de todas as espécies.

### **2.2.3 Intemperismo acelerado**

Com o intuito de reduzir custos e o tempo de duração dos testes em campo para a avaliação do intemperismo, foram desenvolvidos ensaios laboratoriais que simulam o intemperismo e permitem estimar e comparar a durabilidade natural das madeiras de diversas espécies. Esses ensaios são conhecidos como intemperismo acelerado ou artificial e possuem métodos normalizados que padronizam os parâmetros empregados para a exposição aos diferentes níveis de intensidade luminosa e simulações de chuvas e orvalho. Entre as normas comumente utilizadas podem ser citadas a ASTM G154, a série ISO 4921 e a ABNT 9512, todas voltadas para testes de durabilidade de materiais poliméricos e metálicos.

O processo de incidência de raios ultravioletas (UV) pode ser simulado através de um reator fotoquímico. Os reatores fotoquímicos podem ser classificados quanto à fonte de radiação, que pode ser solar ou artificial (utilizando uma lâmpada de luz ultravioleta, por exemplo). As fontes artificiais de radiação mais comum para tais reatores fotoquímicos são as lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa, média ou alta pressão, ou lâmpadas fluorescentes com emissão de luz UV com valores de radiação espectral entre 280 a 340 nm. Essas lâmpadas usualmente são dispostas de forma que as amostras a serem tratadas recebam a maior concentração de fótons possível. Para isso, muitos reatores utilizam lacas espelhadas refletoras, ou mesmo são construídos de forma cilíndrica com suas paredes internas de material refletor (GONÇALEZ et al., 2010; NEUMANN et al., 2002).

Para Evans (2008) o efeito causado pelo intemperismo acelerado pode ser considerado mais intenso do que ao observado em campos de apodrecimento, salvo o efeito causado por agentes deterioradores como fungos e insetos. Dessa forma, entende-se que o intemperismo natural por possuir uma combinação de fatores climáticos e de agente deterioradores é o mais indicado para o estudo da durabilidade natural da madeira. Entretanto, as características geográficas e climatológicas do local de exposição limitam as comparações entre os resultados obtidos no campo para uma mesma espécie florestal. Portanto, as simulações realizadas pelo intemperismo acelerado proporcionam parâmetros de comparações entre as propriedades da madeira de forma mais ágil e rápida, com a possibilidade de reprodução dos métodos empregados em diferentes laboratórios (RATU, 2009).

A dificuldade de comparação entre o intemperismo natural e o acelerado decai sobre a complexa combinação de efeitos oriundos da natureza. Basicamente, para que as comparações entre os métodos sejam válidas, todos os parâmetros empregados nas simulações devem possuir a mesma extensão quando comparados aos observados às características geográficas e climatológicas do local. Leva-se em conta ainda a dificuldade do desenvolvimento de fungos apodrecedores e insetos nas condições climáticas simuladas nas câmaras de intemperismo, aonde a temperatura e umidade são relativamente superiores aos indicados para o desenvolvimento e propagação desses agentes deterioradores (BREARD, 2003). Entretanto, as simulações de intemperismo são consideradas válidas e os desenvolvimentos de ciclos específicos devem ser produzidos a fim de aumentar a sensibilidade das correlações entre os dois métodos.

A movimentação dimensional da madeira proporcionada pela contração e inchamento gerados pela alta incidência da radiação e a ação da água, leva ao aparecimento de micro rachaduras na superfície da madeira. Em madeiras sem tratamentos, a umidade proporciona gradientes de tensões que são gerados a partir da superfície para o interior da madeira, e assim, rachaduras pronunciadas podem ser formadas com profundidades superiores a 10 mm (BARISKA et al., 1988).

Gonzalez et al. (2010) afirmam que existem diversas formas de prevenir a madeira da fotodegradação, como a aplicação de compostos químicos inorgânicos, a aplicação de produtos de acabamento como vernizes, stains e tintas, que embora forneçam algum tipo de proteção podem alterar o aspecto natural da madeira. Os autores avaliaram a alteração colorimétrica da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) tratada com seladora comercial e

polisten (*stain* impregnante transparente) frente ao intemperismo acelerado e observaram que os produtos alteraram a cor da madeira, escurecendo a superfície, sendo que o polisten conservou a cor após o período de envelhecimento simulado.

Nesse sentido, Silva et al. (2007) estudando cinco espécies de madeiras tropicais frente à resistência ao intemperismo artificial empregaram o verniz poliuretânico transparente e *stain* semitransparente pois ambos tendem a manter a beleza natural e proteger a madeira. Os resultados indicaram que a aplicação do verniz ou do *stain* escureceu todas as madeiras estudadas, em função da diminuição na intensidade da luz refletida. Hon (2001) relata que o escurecimento inicial é atribuído a formação de compostos quinoidais em função, sobretudo, da degradação da lignina pela radiação UV na presença de oxigênio. Esses compostos são lixiviados pela água, deixando a madeira mais áspera e esbranquiçada, causando um aumento do teor de celulose na madeira e, logo, o aumento da luminosidade.

### **3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Segundo Pellerin e Ross (2002), o ensaio não destrutivo (NDT) é a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de um dado material sem alterar as suas capacidades de usos finais, e usar essas informações para aplicações apropriadas do material. Nesse sentido, o NDT de madeiras assume um importante papel, pois permite obter e analisar o maior número de informações sobre o material, objetivando não apenas maior precisão dos resultados, como também estabelecer critérios práticos de classificação e caracterização do material. Em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plásticos e cerâmicos, o NDT detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente, e a sua influência sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada através de métodos não destrutivos (BUCUR, 2006).

Observa-se, de um modo geral, uma correlação significativa entre as propriedades elásticas da madeira com os métodos de NDT, sendo estes considerados válidos para a estimativa dessas propriedades (FALK, 1990; ROSS et al., 1999; PELLERIN e ROSS, 2002). Segundo SCHAD et al. (1996), todo método não destrutivo usa alguma forma de propagação de energia através ou em volta de um material para deduzir algumas características importantes do material examinado. Esta energia pode resultar de cargas estáticas ou dinâmicas ou ser gerada por ondas eletromagnéticas ou elásticas.

De acordo com Jayne (1959), a hipótese que fundamenta a avaliação não destrutiva da madeira propõe que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, que podem ser medidas por meio não destrutivo, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento deste material frente a solicitações estáticas. Dessa forma, em nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a definição das características de elasticidade da madeira nas solicitações estáticas, sendo essas propriedades a frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade de propagação da onda. Assim, a dissipação da energia na madeira ocorre à medida que as vibrações livres são minimizadas por conta de defeitos, aumento de espaços vazios ocasionados por deterioração, rachaduras e por conta do intemperismo natural.

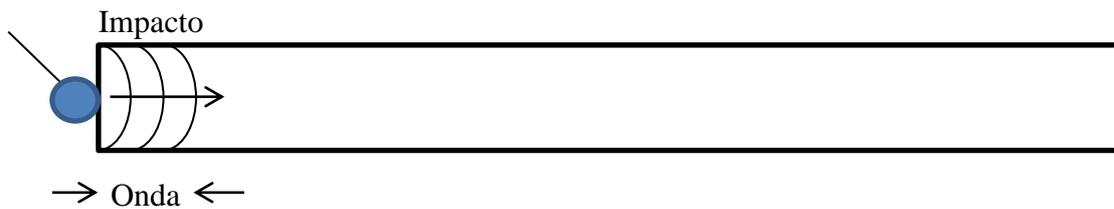
Dentre os métodos mais usuais de NDT de madeiras pode-se citar a avaliação química, a técnica da vibração transversal, a técnica das ondas de tensão e a técnica da propagação de ondas de ultrassom (ROSS e PELLERIN, 1994; PELLERIN e ROSS, 2002; TARGA, 2005). Essas três últimas técnicas são as que possuem um maior número de trabalhos desenvolvidos no Brasil, mas ainda em nível inicial de investigação. Merecem destaques as pesquisas com elementos estruturais de madeira laminada colada (ZANGIÁCOMO, 2003; TELES, 2009), de caracterização de madeiras amazônicas (DEL MENEZZI et al., 2008), da resistência de madeiras para dormentes (ROCHA, 2003) e de avaliação da sanidade de mourões de madeiras tratadas (COSTA, 2009). Entretanto, ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos com madeiras tropicais (ZANGIÁCOMO, 2006; DEL MENEZZI et al., 2008; TELES, 2009, TELES et al., 2009).

Ao se avaliar o desenvolvimento do emprego desses métodos na Europa e nos Estados Unidos, observa-se que os NDT estão em uma fase de desenvolvimento de avaliação em campo, estimando com precisão a resistência de madeiras de construções centenárias, como igrejas antigas (MANSON, 2005), pontes de madeira (TANNERT, 2009) e em estruturas históricas (PALAIA et al., 2008).

### **3.1 Ondas de tensão**

A técnica de ondas de tensão baseia-se na teoria de propagação de ondas unidirecionais em uma barra homogênea e elástica. Depois da aplicação de um impacto numa das extremidades da peça, uma onda é gerada. Essa onda imediatamente movimentada-se ao longo do seu

comprimento, com as partículas da extremidade tornando-se excitadas, enquanto partículas da extremidade livre permanecem em repouso. A onda caminha através da barra a uma velocidade constante, mas as partículas do material experimentam somente um leve movimento longitudinal, como resultado da passagem da onda por elas. Depois de caminhar por todo o seu comprimento, essa onda é refletida pela extremidade livre da barra, e retorna ao seu ponto de origem. (GORNIAK e MATOS, 2000; GABRIEL e BALLARIN, 2000). A Figura 6 ilustra o esquema de propagação da onda em uma barra elástica.



**Figura 6.** Esquema da barra elástica com a propagação da onda gerada por meio de um impacto.

A energia é dissipada ao longo dos sucessivos caminhamentos da onda. Assim, embora a velocidade da onda permaneça constante, o movimento das partículas da barra diminui a cada passagem sucessiva da onda. Depois de decorrido algum tempo, todas as partículas do material retornam à situação inicial de repouso. Monitorando-se o movimento da seção transversal da peça, próximo da extremidade excitada, em resposta à propagação da onda de tensão, observa-se uma série de pulsos igualmente espaçados, cuja amplitude diminui exponencialmente ao longo do tempo.

As suposições básicas para o equacionamento teórico da propagação da onda na vibração longitudinal foi proposto por Hearmon (1966) o qual desenvolveu o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico. Mesmo considerando que a madeira não é um material homogêneo nem tampouco isotrópico, diversos pesquisadores têm encontrado bons resultados com uso dessa teoria simplificada. A Equação 1 apresenta o cálculo utilizado para o módulo de elasticidade dinâmico.

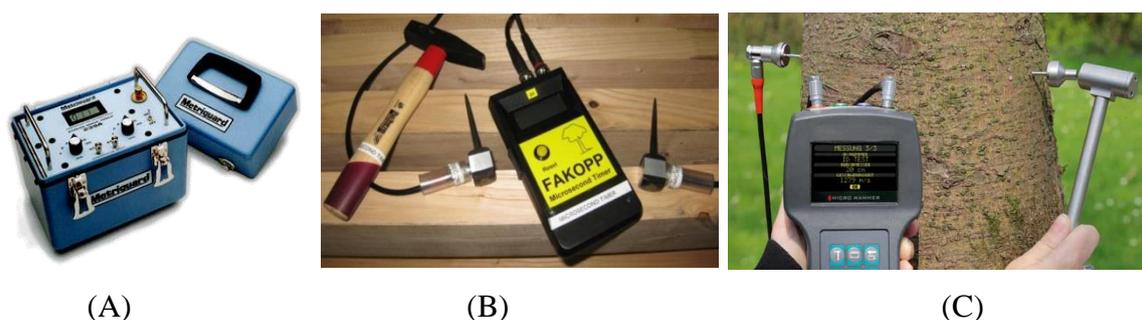
$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{g} \quad (1)$$

Onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico;  
 $V$  = velocidade de propagação da onda;  
 $\rho$  = densidade aparente do material;  
 $g$  = aceleração da gravidade.

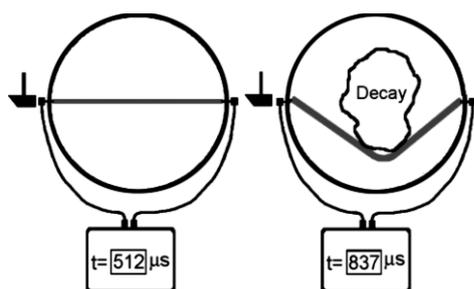
A técnica de ondas de tensão tem como vantagem o custo menor para sua implantação. Trata-se de um processo dinâmico que está internamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. A propagação de ondas de tensão apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo do interior da madeira, preservando as características físicas e mecânicas e seu uso final (PELLERIN e ROSS, 2002). O equipamento de ondas de tensão é capaz de detectar de forma não destrutiva a presença de furos, deterioração e rachaduras e pode atuar como referência quantitativa para a classificação de peças de madeira.

Dentre os equipamentos utilizados na avaliação com ondas de tensão destacam-se o *Stress Wave Timer 239A* da empresa Metriguard, *FAKOPP Microsecond Timer* da empresa FAKOPP Ent., e o *IML Impulse Hammer* da empresa IML. A Figura 7 ilustra três modelos de equipamentos de ondas de tensão.



**Figura 7.** Equipamentos de ondas de tensão. (A) *Stress Wave Timer*, (B) *FAKOPP Microsecond Timer* e (C) *IML Impulse Hammer* (METRIGUARD, 2011; FAKOPP ENTERPRISE, 2011; IML, 2011).

Wang et al. (2004) apresentam a metodologia de uso do *stress wave timer* como método de inspeção de deterioração biológica em árvores, madeira serrada e estruturas de madeira. A onda de tensão é induzida ao golpear a amostra de madeira com um dispositivo de impacto equipado com um acelerômetro, que emite um sinal de partida a um controlador. Um segundo acelerômetro, em contato do outro lado da amostra, recebe o sinal da onda de tensão e envia outro sinal de parar para o controlador. O tempo decorrido para a onda de tensão propagar entre os acelerômetros é exibido no controlador. Este tempo medido, quando convertido em tempo de transmissão por distância, ou seja, velocidade de propagação da onda, pode ser usada como um preditor das condições físicas da madeira. A Figura 8 ilustra o sistema de avaliação de deterioração com o equipamento.



**Figura 8.** Comparação entre os tempos de propagação da onda de tensão na avaliação da deterioração biológica em árvores. Fonte: Wang et al. (2004).

No sentido longitudinal, o alinhamento do conjunto de elementos celulares no sentido axial contribui para a propagação das ondas por conta do seu comprimento e pelo efeito de continuidade entre as células adjacentes. Dessa forma, qualquer irregularidade nos tecidos da madeira pode interferir de forma significativa na propagação da onda de tensão e, diretamente, na velocidade de propagação. A queda da velocidade de propagação reflete diretamente na diminuição da resistência mecânica da madeira, conforme observado por Ross e Pellerin (1994), e, sendo assim, pode ser considerado como um indicativo para o estado de sanidade para estacas de madeiras em campo. Resultado similar foi obtido por De Groot et al. (1998), os quais observaram a queda da resistência mecânica para a madeira de *Souther Pines* em campo de apodrecimento localizado em ambiente florestal com o uso do *stress wave timer*.

Como a madeira é um material de origem orgânica, a velocidade de propagação varia de acordo com a direção da grã. Ao induzir uma onda com o martelo em uma árvore no sentido transversal, uma onda sonora será aplicada no sentido transversal das células da madeira (perpendicular à grã). A velocidade do som perpendicular à grã está entre 1/5 a 1/3 do valor longitudinal (USDA, 2010). Dessa forma, a posição de aplicação da onda, o tipo de grã, defeitos como nós e rachaduras e o teor umidade são fatores que influenciam o comportamento da velocidade de propagação da onda de tensão.

Com o estudo da avaliação de deterioração biológica em campo, Ross et al. (1997) investigaram o comportamento da madeira de *Southern pine* nas dimensões 25 x 38 x 508 mm exposta à fungos e cupins com o uso de um equipamento próprio de ondas de tensão. A onda era induzida nas amostras por meio de um martelo acoplado com sistema de molas. O comportamento da onda correspondente em cada amostra foi monitorado utilizando um sensor piezofilme acoplado a um osciloscópio digital. Os resultados da velocidade de propagação

foram incorporados a um modelo de regressão multivariado e usado para estimar a resistência à compressão paralela às fibras das amostras. Os autores observaram concordância entre os valores previstos e reais de resistência à compressão e que a velocidade de transmissão de ondas de tensão e características de atenuação na madeira de *Southern pine* foram sensíveis à presença de deterioração causada por fungos e cupins.

Pellerin et al. (1985), demonstraram que o método de ondas de tensão pode ser aplicado para a identificação e monitoramento da deterioração causada por fungos de podridão parda, indicando um alta correlação ( $R^2 = 0,80$ ) entre a velocidade de propagação e a compressão paralela às fibras. Entretanto, os autores não obtiveram o mesmo resultado com a exposição da madeira à térmitas.

Ballarin et al. (2010) analisaram a influência do tipo de lenho, da posição da tora ao longo do fuste e das dimensões de peças desdobradas na velocidade de propagação das ondas de tensão na madeira de *Pinus taeda* L. com idade aproximada de 43 anos na condição verde e observaram diferenças significativas na velocidade de propagação nos lenhos adulto, juvenil e na medula, sendo na primeira com os maiores valores encontrados.

Del Menezzi et al. (2008) avaliaram a viabilidade do emprego da técnica de onda de tensão em seis espécies de madeiras amazônicas na estimativa das propriedades de flexão. De acordo com os autores, os resultados obtidos nos modelos de regressão foram altamente significativos para a predição das propriedades de flexão do conjunto de espécies, concluindo que o método é adequado para prever as propriedades de flexão onde há variação, por exemplo, entre espécies. No entanto, quando a variabilidade é baixa, como dentro da espécie, os modelos apresentaram baixa previsibilidade.

Ravenshorst et al. (2008) estudaram nove madeiras tropicais oriundas da América do Sul e África por meio da técnica de ondas de tensão. Os resultados apontaram para um  $R^2=0,63$  para a estimativa da rigidez. Argumentam que segundo os resultados não foi possível obter modelos precisos para as espécies individualmente, contrariamente do que pode ser obtido, para coníferas.

Cruz et al. (2009) verificaram a estimativa da umidade da madeira a partir da variação da velocidade de propagação de ondas de tensão em duas espécies do gênero *Eucalyptus*, analisando em conjunto a influência da área de nós, assim como da densidade básica das

tábuas na propagação das ondas de tensão por meio das análises de variância. Observaram que a umidade das madeiras pode ser estimada pelo método proposto por meio de modelos não-lineares ou ainda por um modelo linear múltiplo, utilizando a velocidade de propagação das ondas, a densidade básica e a área de nós como variáveis independentes.

Teles (2009) empregou três métodos não destrutivos para avaliar a rigidez em tábuas da espécie louro-vermelho (*Sextonia rubra*), cujas densidades variavam de 0,53 a 0,85 g/cm<sup>3</sup>, encontrando um R<sup>2</sup> superior a 0,83 para o método de ondas de tensão.

### 3.2 Ultrassom

O ultrassom é uma técnica não destrutiva baseada em propagação de ondas que apresenta muitas aplicações, tanto em árvores quanto em peças estruturais. A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ondas ultrassônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade. A Equação 2 representa a relação simplificada da velocidade de propagação de uma onda na madeira, derivada da Equação 1.

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (2)$$

Onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico;

$V$  = velocidade de propagação da onda;

$\rho$  = densidade aparente do material;

Essa técnica apresenta diversas vantagens, tais como: baixo custo de aquisição do equipamento, quando comparado ao custo de máquinas de classificação automática, facilidade de treinamento da mão-de-obra e utilização pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos por meio de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados.

De acordo com a faixa ou o espectro de frequências, as vibrações mecânicas e, conseqüentemente, as ondas a elas associadas podem ser classificadas, basicamente, em três grupos, como os infrassons, produzidos a partir de vibrações com frequências muito baixas, inferiores a 20 Hz; os sons, constituídos por frequências situadas entre 20 Hz e 20 kHz; e os ultrassons, produzidos por frequências superiores a 20 kHz (BUCUR e BÖHNKE, 1994).

Os métodos que utilizam as ondas ultrassônicas estão sendo empregados, principalmente, para determinar as constantes elásticas da madeira (GONÇALEZ et al., 2001; TRINCA, 2011), ilustrar as modificações biológicas em estruturas históricas de madeira (FIGUEROA, 2010; MARTINS e ROSSIGNOLO, 2010) e avaliar a qualidade de desdobro (CARREIRA et al., 2006). Métodos empregando a frequência de ressonância, velocidade de ultrassom e emissão acústica conseguem avaliar a integridade estrutural e funcional de diversos produtos à base de madeira.

Por meio das ondas ultrassônicas é possível estimar as constantes elásticas da madeira. As equações de Christoffel fornecem as relações entre as constantes elásticas e as velocidades ultrassônicas. Gonzalez et al. (2001), Carrasco e Azevedo Júnior (2003) e Trinca (2011) apresentam as relações matemáticas para a estimativa das constantes elásticas da madeira por meio da determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. As considerações teóricas desenvolvidas nesses princípios são baseadas no pressuposto do material madeira como um sólido viscoelástico linear, tendo uma simetria ortotrópica.

De acordo com Calegari et al. (2008) e de forma similar ao princípio de propagação de ondas de tensão, considerando o tipo mais comum de sistema de medida da propagação da onda de ultrassom em um material, um sinal elétrico é emitido por um gerador, transmitido por meio de cabos e transformado em pulso mecânico por um sensor ao atingir o material em teste. Esse pulso atravessa a amostra e é recuperado na face oposta à de transmissão por outro sensor, revertendo-o novamente em sinal elétrico. A medição do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal e da distância entre os sensores permite o cálculo da velocidade de propagação da onda.

O sensor responsável pela emissão e recepção das ondas denomina-se transdutor que se apresenta nos mais variados tipos, tamanhos e frequências. Os transdutores mais comuns são os de faces planas, que requerem o uso de acoplantes (óleo, gel, graxa ou vaselina) que devem ser aplicados entre a superfície da peça em ensaio e o transdutor, a fim de reduzir erros, uma vez que a ocorrência de ar entre esses meios proporciona maior tempo de propagação da onda, reduzindo sua velocidade.

Para madeira sólida, os valores das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas variam entre 1000 a 2000m/s no sentido perpendicular às fibras e entre 5000 a 6000m/s no sentido paralelo as fibras da madeira. A velocidade no plano radial é cerca de 50% maior do que no

plano tangencial. Em lâminas de madeira, as ondas de flexão também estão presentes, com velocidades de cerca de 1500 m/s longitudinalmente e cerca de 50% menor transversalmente. A maioria dos painéis de madeira apresentam velocidades de propagação em todas as direções semelhantes ao encontrado para a madeira no sentido perpendicular às fibras (GONÇALEZ et al., 2001; BEALL, 2002).

Bucur e Böhnke (1994) indicam que os parâmetros de propagação de uma onda ultrassônica em uma estrutura sólida podem ser influenciados por uma série de fatores como as propriedades físicas do substrato, características geométricas da amostra em níveis micro e macroscópico, as condições do meio (temperatura, teor de umidade, carregamento mecânico) e das condições de medições (sensibilidade e resposta de frequência dos transdutores, o seu tamanho e localização, o meio de acoplamento e a dinâmica característica do equipamento eletrônico).

Para Kabir et al. (2002), a propagação das ondas ultrassônicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. A densidade da parede celular é razoavelmente constante, mas há variação do módulo de elasticidade devido a variações na estrutura da parede celular, e desse modo, esperar-se um intervalo de valores para a propriedade acústica (BUCUR, 2006). O ataque de agentes deterioradores ocasiona principalmente a deterioração da parede celular, impedindo a livre propagação da onda ultrassônica na madeira, causando a sua dispersão e reflexão. Na presença de ataque de agente xilófagos, o tecido deteriorado aumenta a atenuação do sinal ocasionando a diminuição da velocidade de propagação (WANG, et al., 1980; LEMASTER e WILCOX, 1993).

Em aspectos anatômicos da madeira, Shimoyama (2005) indica que quanto maior a espessura celular, maior a área ou o caminho contínuo para propagação das ondas que se dissipam rapidamente. Em madeiras porosas, compostas por fibras com acentuados diâmetros de lume, os espaços vazios tornam-se barreiras para a propagação das ondas, reduzindo significativamente a velocidade de propagação. Quanto às relações entre a largura das fibras e a propagação das ondas, em geral, as fibras com maior diâmetro de lúmen são as mais largas e, conseqüentemente, relacionam-se de forma negativa com a velocidade. Bucur (2006) afirma que se a propagação da onda for aplicada no sentido longitudinal às fibras, as ondas percorrem a parede da fibra, ao longo de seu comprimento e, ao final, apresentam leve queda entre uma fibra e outra, quando então tomam a direção de percurso.

A atenuação da onda é afetada principalmente pela diminuição da energia de dissipação na madeira, sendo essa uma propriedade de grande importância na detecção dos defeitos oriundos de agentes xilófagos (ROSS e PELLERIN, 1988; MALLORY e DE GROOT, 1989; KABIR et al., 2002). A mensuração isolada do tempo de propagação entre dois pontos não permite que sejam feitas distinções sobre qual agente deteriorador está atribuído pela maior parte da deterioração da madeira, apenas indica um estado geral do material. Assim, caso seja de interesse a caracterização do tipo de deterioração que está presente no material, sugere-se o uso de equipamento que permita a mensuração da energia aplicada, bem como a visualização do comportamento da onda, como aparelhos de emissão acústica (KABIR et al., 2002).

Segundo Oliveira et al. (2005), há forte relação entre velocidade de propagação de ondas e a umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação, resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial. Calegari et al. (2008) observaram o aumento da velocidade de propagação com a redução do teor de umidade em programas de secagem para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, sendo essa relação válida desde a madeira verde até o final do processo de secagem.

Bucur (2006) afirma que em um baixo valor de umidade (menor que 18%), quando a água existente na madeira está ligada às moléculas de celulose da parede celular, o pulso ultrassônico é espalhado pelos elementos anatômicos e pelos contornos destes elementos. Nestes contornos, analogamente ao que ocorre nos contornos de grãos de um sólido policristalino, há descontinuidade do módulo de elasticidade e, conseqüentemente, da impedância acústica. A pressão que atua nas partículas das moléculas de celulose, resultante da passagem da onda ultrassônica, reorienta a posição da hidroxila (OH) ou outro radical pertencente àquelas moléculas. Neste caso, o mecanismo de atenuação relacionado às características das paredes celulares constitui, provavelmente, o fator mais importante. Em teores de umidade mais elevados, mas ainda abaixo do ponto de saturação das fibras, o espalhamento nos limites das células pode ser considerado o mais importante mecanismo de perdas. Após o ponto de saturação das fibras, quando a água está presente nas cavidades celulares, a porosidade do material intervém como fator predominante na dispersão ultrassônica.

Valle et al. (2004), relatam que a velocidade de propagação de ondas de ultrassom dependerá da elasticidade do material. Na madeira deteriorada, a onda terá que contornar os diversos

espaços vazios, como os deixados por insetos, e levará maior tempo para propagar do ponto de emissão ao ponto de recepção. Assim, uma baixa velocidade de transmissão poderá indicar ocorrência de defeitos. Outra propriedade que pode ser medida é a atenuação da onda propagada pelo material. Isto ocorre devido o fato da madeira degradada absorver mais energia da onda do que a madeira sã.

Mattos et al. (2012) estudaram a alteração na propagação de ondas de ultrassom provocada por dois tipos de tratamentos preservativos (borato de cobre cromatado – CCB e óleo queimado) pelo método sem pressão de imersão simples no cerne de madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus teretirconis* e *Corymbia citriodora*. Os autores empregaram para o estudo transdutores exponenciais do tipo ponto secos com frequência de 54 kHz e observaram que os tratamentos preservativos foram capazes de alterar significativamente a velocidade da onda ultrassônica na madeira, sugerindo que o incremento na massa das amostras em função da retenção dos produtos preservantes influenciou o comportamento da onda.

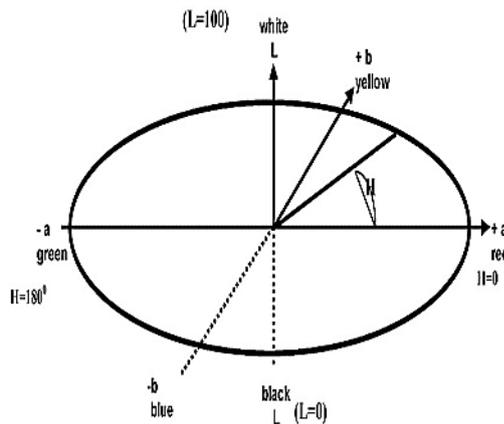
### **3.3 Colorimetria aplicada à madeira**

Segundo Burger e Richter (1991) a cor e o desenho estão intrinsecamente relacionados com a anatomia da madeira. Fatores como espessura e orientação de fibras, quantidade de parênquima axial, largura de raios, diâmetro, distribuição e frequência de poros e outros, contribuem sobremaneira para a figura e a cor da madeira. Ainda de acordo com os autores, a cor da madeira está associada à deposição de substâncias corantes nas paredes das células lenhosas, bem como as reações químicas dessas substâncias após a exposição aos elementos atmosféricos e à luz. Varia do quase branco ao negro, e tem importância do ponto de vista decorativo. Para a descrição da cor da madeira, normalmente são utilizadas observações macroscópicas visuais, onde as cores são nomeadas a partir de padrões de cores. Além desses fatores, destacam também o regime de crescimento da árvore e os tratamentos silviculturais que provocam o surgimento dos nós, de canais traumáticos e de irregularidade dos anéis de crescimento.

Para Mady (2000), a cor da madeira deriva da composição química das substâncias presentes no xilema: taninos, fenóis, flavonóides, estilbenos, quinonas e outros. Essas substâncias é que conferem cores diferenciadas ao lenho. A cor, entretanto, não é estável em uma madeira, uma

vez que ela tende a alterar-se com o passar do tempo, escurecendo devido à oxidação causada principalmente pela luz, que reage com os componentes químicos como a lignina.

Segundo Camargos (1999) o sistema CIE (*Comission International de L'Eclairage* ou Comissão Internacional de Iluminantes) é um método que define a sensação da cor e baseia-se em três elementos: a claridade ou luminosidade, a tonalidade ou matiz e a saturação ou cromaticidade. Os elementos claridade ( $L^*$ ), saturação ( $C$ ) e tonalidade ( $a^*$ ,  $b^*$  e  $h^*$ ) definem o sistema conhecido como CIEL\*a\*b\* atualmente utilizado na colorimetria (CIELab, 1976) (Figura 9). De acordo com Boschi (1999), as variações existentes entre as cores estão associadas a três propriedades: a tonalidade ou matiz, que corresponde ao comprimento de onda peculiar de uma cor; a saturação ou cromaticidade, que é a medida de pureza ou intensidade de uma cor; a luminosidade ou claridade, que corresponde à graduação de claridade ou obscuridade de uma cor.



**Figura 9.** Espaço colorimétrico do sistema CIELAB 1976. Fonte: Star Color, 2004.

A direção da diferença de cor, entre uma amostra e a referência, no espaço tridimensional é descrito pela magnitude e o sinal algébrico das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  (Equações 3, 4 e 5) (CAMARGOS, 1999).

$$\Delta L^* = \Delta L_a^* - \Delta L_b^* \quad (3)$$

$$\Delta a^* = \Delta a_a^* - \Delta a_b^* \quad (4)$$

$$\Delta b^* = \Delta b_a^* - \Delta b_b^* \quad (5)$$

Em que:

$L_a^*$ ,  $a_a^*$  e  $b_a^*$  são referentes a amostra em ensaio, e  $L_b^*$ ,  $a_b^*$  e  $b_b^*$  são referentes a amostra padrão (referência).

Dessa forma, valores de  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$  positivos indicam que a amostra em estudo é mais clara, avermelhada e amarelada, respectivamente, do que o padrão. Já os valores negativos dos mesmos parâmetros significam que a amostra é mais escura, esverdeada e azulada, respectivamente, do que o padrão.

A claridade define a escala cinza entre o branco e o preto. É expressa pela variável  $L^*$  e assume valor 0 para o preto absoluto e 100 para o branco total (CAMARGOS, 1999). A tonalidade é expressa pelas cores primárias vermelho, verde, amarelo e azul, sendo representada por um plano constituído por duas retas  $a^*$  e  $b^*$  perpendiculares que passam pelo centro. A saturação (C) é o desvio a partir do ponto correspondente ao cinza no eixo  $L^*$ .

Camargos e Gonzalez (2001) mediram a coloração de 350 espécies brasileiras e reuniram-nas em 33 grupos de cores homogêneas com o objetivo de confeccionar uma tabela de cores para facilitar a comercialização. Para os autores, o padrão de coloração de uma madeira pode variar em tonalidades que vão desde o bege claro até o marrom escuro, quase preto. Dentro dessa variação existem madeiras amareladas, avermelhadas, arroxeadas e alaranjadas. Camargos (1999) observa ainda que as características gerais (textura, grã e figura) e seus planos de orientação (transversal, longitudinal-tangencial e longitudinal-radial) também influenciam diretamente na cor da madeira.

Costa (2009) avaliou a alteração colorimétrica nas madeiras de marupá (*Simarouba amara*) e andiroba (*Carapa guianensis*) antes e após os ataques dos fungos de podridão branca (*Trametes versicolor*) e podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*). A autora observou que ambas as espécies de madeira se apresentaram mais escuras após o ataque do fungo *Gloeophyllum trabeum*, que a de andiroba apresentou-se mais clara após o ataque do fungo *Trametes versicolor*, e que a colorimetria mostrou ser uma técnica eficiente para determinar e diferenciar o ataque dos fungos.

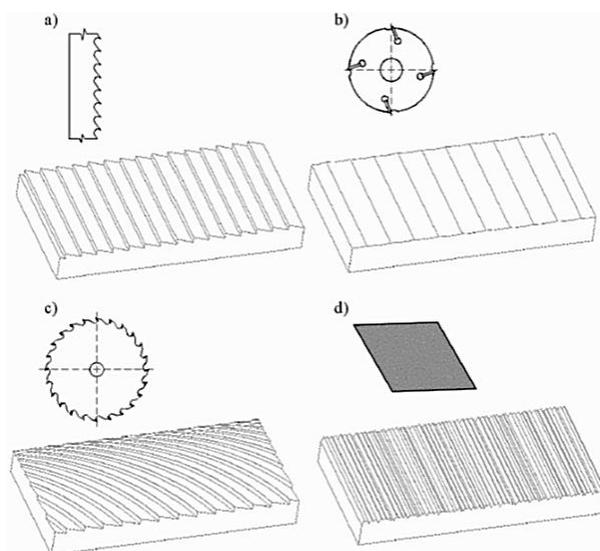
### **3.4 Rugosidade**

A superfície de um material pode ser avaliada por meio da sua rugosidade. Por definição, a rugosidade compreende o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e entrâncias presentes em uma superfície (ABNT, 2002). Estas irregularidades podem ser determinadas através da medição da altura, largura e forma dos

picos e vales produzidos por operações de usinagem na madeira ou por suas características anatômicas.

Para Magoss (2008) a qualidade da superfície do material depende de vários fatores que podem ser relacionados tanto às propriedades da madeira como as condições de usinagem do maquinário. Entre as propriedades da madeira podem ser citados a espécie, a densidade, o teor de umidade, bem como características anatômicas como o número, distribuição e diâmetro do lume das fibras, vasos e traqueídeos.

Com relação à usinagem da madeira, Sulaiman et al. (2009) afirmam que as propriedades e características da superfície da madeira lixada diferenciam-se muito daquelas obtidas em plainas. Os autores avaliaram o efeito do lixamento sobre a rugosidade superficial nas faces radial e tangencial na madeira de seringueira, indicando que a face radial apresentou ser mais áspera que a face tangencial, possivelmente em função da posição anatômica dos raios da madeira. A Figura 10 ilustra o efeito da usinagem na superfície da madeira produzida por diferentes equipamentos.

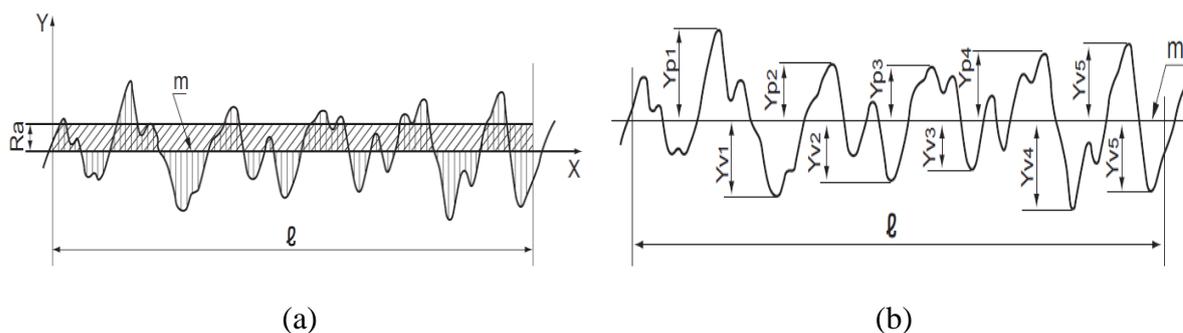


**Figura 10.** Características das superfícies da madeira produzida por diferentes tipos de usinagem. (a) serra de fita; (b) plaina mecânica; (c) serra circular; (d) lixamento (MAGOSS, 2008).

Stewart & Crist (2001) indicam que danos mecânicos podem ser provocados pelo processo de lixamento, como a compressão das paredes das células. As superfícies lixadas são também caracterizadas pela presença de fibras arrancadas e levantadas pela ação abrasiva.

Diversas técnicas têm sido aplicadas para avaliar a rugosidade da madeira, principalmente rugosímetros que funcionam por contato (palpação, pneumáticos, emissão acústica) ou sem contato (ópticos), tendo cada um as suas vantagens e inconvenientes (COELHO, 2005). Martins (2008) aponta que a técnica de palpação é a mais utilizada para avaliar a rugosidade na madeira, uma vez que mede mecanicamente o perfil da superfície ao longo de uma linha em uma pequena área da superfície. Ainda de acordo com os autores, a classificação da madeira em textura fina à grossa é subjetiva e vaga, quando não quantificada. Assim, a quantificação numérica por meio dos parâmetros de rugosidade é útil como forma de ajustar as variáveis do processo ou de monitorizar tarefas e máquinas.

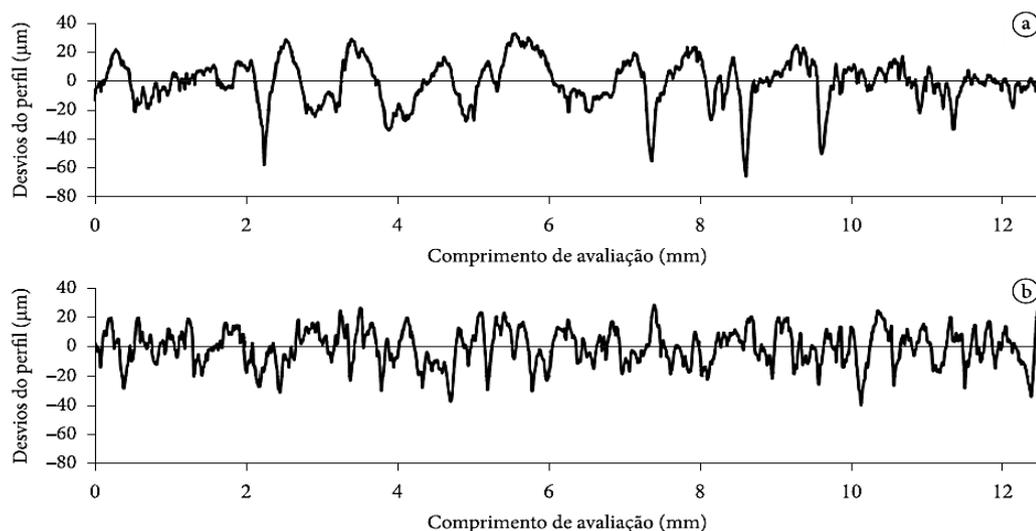
A qualidade da superfície é uma definição complexa sendo caracterizada por diferentes parâmetros, como os mais comuns  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{max}$ .  $R_a$  é referente a uma porção do afastamento ao longo de um comprimento da amostra na direção em que a linha média é cortada para fora a partir da curva da rugosidade. Esta porção é apresentada em um gráfico com o eixo X que se estende na mesma direção como a linha média, e no eixo Y representa a magnitude. O valor de  $R_z$  é obtido a partir do total, em micrômetros, do valor médio de cada distância entre cada linha média e 5 picos ( $Y_p$ ) a partir da mais alta, e o valor médio de cada distância entre a linha média e os 5 vales ( $Y_v$ ) a partir do menor da curva de rugosidade na amostra referência de comprimento "L". A Figura 11 ilustra graficamente o modo de obtenção dos valores de  $R_a$  e  $R_z$  (SULAIMAN et al., 2009).



**Figura 11.** Gráficos esquemáticos de variação da rugosidade em uma superfície como referências de aquisição dos valores de  $R_a$  (a) e  $R_z$  (b) (SULAIMAN et al., 2009).

Martins et al. (2011) analisaram o efeito da usinagem feita por plaina e lixa na rugosidade da superfície da madeira de *Eucalyptus benthamii* usando o rugosímetro SurfTest SJ – 301, da empresa Mytutoio. Os autores observaram diferenças entre as superfícies, sendo que a madeira com superfície lixada apresentou fibrilações e ranhuras, enquanto a superfície

aplainada apresentou células de vasos abertas. Essas diferenças foram observadas em imagens com aumento de 50x da superfície empregando um estereomicroscópio trinocular modelo 2000 C. A Figura 12 apresenta o perfil típico da superfície aplainada e lixada para a madeira em estudo.



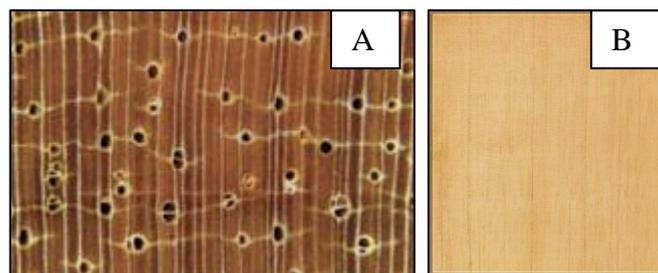
**Figura 12.** Perfil da superfície da madeira de *Eucalyptus benthamii* aplainada (a) e lixada (b). Fonte: Martins et al. (2011).

## 4. MADEIRAS ESTUDADAS

### 4.1 Marupá

A espécie florestal *Simarouba amara* Aubl., popularmente conhecida como marupá, caixeta, cajú-rana, malacacheta, entre outros, pertence a família Simaroubaceae e no Brasil distribui-se por toda a extensão da Região Amazônica, bem como em alguns estados do Nordeste, Bahia, Ceará e Pernambuco (RIZZINI, 1978).

De acordo com IBAMA (2002), a madeira caracteriza-se por apresentar coloração branco-amarelada, sendo o cerne e alburno indistintos, bem como os anéis de crescimento. Além disso, configura-se como moderadamente lisa ao tato, com pouco brilho, com grã direita e ausente de figura. A madeira dessa espécie é leve, com densidade básica com valor de 0,38 g/cm<sup>3</sup> (IBAMA, 2002), com composição química de acordo com Santana e Okino (2007), com valores de 19,5% de hemiceluloses, 48,5% de celulose, 32% de lignina, 0,3% de cinzas e 2,1% de extrativos. A Figura 13 apresenta a seção macroscópica transversal e tangencial da superfície da madeira de marupá.



**Figura 13.** Seção transversal (A) e tangencial (B) da madeira de marupá (*Simarouba amara*).

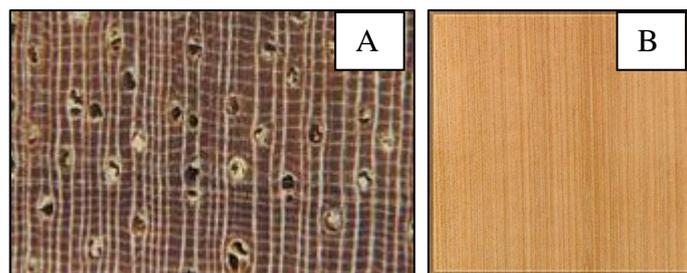
Costa (2009) e Stangerlin (2012) indicam que a madeira possui baixa resistência a fungos apodrecedores, sendo suscetível ao ataque de cupins e brocas (MARCONDES, 2011).

Quanto ao emprego, Slooten e Souza (1993) e IBAMA (2002) indicam a espécie para o uso em instrumentos musicais, caixotaria para produtos leves, em pequenos objetos de madeira (POM), em revestimentos internos (forros e lambris), e ainda com potencial na indústria de painéis laminados e de celulose e papel, além de grande emprego na indústria moveleira.

#### 4.2 Tauari

O tauari (*Couratari* sp.) pertence à família Lecythidaceae e é conhecida popularmente como imbirema, estopeiro, toari, tauari amarelo, tauari branco, tauari rosa. Possui ocorrência nas matas de terra firme, principalmente nos estados do Amazonas, Roraima, Amapá e Pará (GARCIA et al., 2012).

A madeira tem grande aceitação no mercado interno e no exterior. A altura comercial varia de 9 a 16 m, com diâmetros entre 50 e 75 cm; possui sapopemas com até 10 m de altura, tronco reto e cilíndrico, com casca lisa e levemente fissurada. O cerne e o alburno são indiferenciados quanto à cor, sendo branco-palha levemente rosado. Em algumas espécies, a madeira apresenta cheiro desagradável e forte, que se manifestam poucos dias após o corte. As características da madeira de tauari permitem classificá-la como de densidade, resistência mecânica e retratilidade médias, apresentando densidade aparente de 0,66g/cm<sup>3</sup> a 15% de umidade (IBAMA, 2002; LORENZI, 2009). A Figura 14 apresenta a seção macroscópica transversal e tangencial da superfície da madeira de tauari.



**Figura 14.** Seção transversal (A) e tangencial (B) da madeira de tauari (*Couratari* spp.).

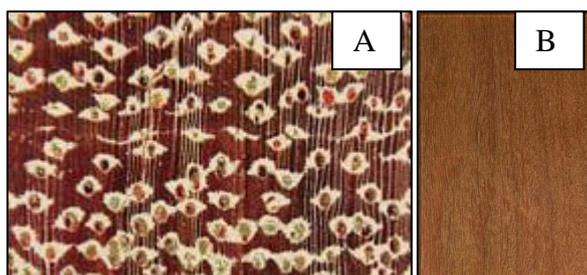
A madeira apresenta leve tendência ao empenamento e às rachaduras superficiais. A secagem artificial é rápida, sem defeitos significativos. A madeira é moderadamente macia ao corte, apresentando um bom acabamento, apesar de a superfície ficar às vezes com aparência felpuda. Algumas espécies possuem sílica, o que contribui para desgastar a afiação das ferramentas.

É utilizada para a fabricação de painéis compensados, embalagens, peças encurvadas e torneadas, móveis de uso geral e partes interiores na construção civil (caixilhos, esquadrias, forros, rodapés, lambris e similares).

### 4.3 Cumaru

Cumarú é o nome vulgar dado à espécie *Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild pertencente a família Fabaceae-Faboideae, a qual apresenta ampla distribuição na Região Amazônica, desde o estado do Acre até o Maranhão (LORENZI, 2009), tanto nas áreas de terra firme quanto de várzea em florestas pluviais.

IBAMA (2002) indica que a espécie apresenta cerne e alburno distintos, com coloração marrom a marrom-muito-pálido, respectivamente, bem como as camadas de crescimento. Apresenta grã reversa, textura média, figura destacada, superfície pouco brilhosa. A Figura 15 apresenta a seção macroscópica transversal e tangencial da superfície da madeira de cumaru.



**Figura 15.** Seção transversal (A) e tangencial (B) da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata*).

A madeira é classificada como de alta densidade básica (0,82 g/cm<sup>3</sup>) (MELO et al., 1990), sendo de difícil trabalhabilidade e elevada resistência mecânica (IBAMA, 2002), a 15% de teor de umidade. Apesar da secagem lenta, em câmaras convencionais, apresenta pequena propensão a defeitos (JANKOWSKY et al., 1990).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 154 - Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials**. Philadelphia, PA, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 4287. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002. 18p.

AYADI, N.; LEJEUNE, F.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 61, n. 3, p. 221–226, jun. 2003.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L.; HELLMEISTER, L. A. V. Ensaios não-destrutivos de propagação de ondas de tensão em toras e madeira serrada de *Pinus taeda* L. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 11, n. 26, p. 17- 29, 2010.

BARISKA M.; PIZZI A.; CONRADIE, W. E. Structural weakening of CCA-treated timber. **Holzforschung** v.52, n.5, p.339-345, 1988.

BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. **Wood and Science and Technology**, v. 36, p. 197–212, 2002.

BROWN, C. J; EATON R. A. Leaching of copper, chromium and arsenic from CCA-treated Scots pine exposed in sea water. In: ANNUAL MEETING, 31., Kona, 2000. **Proceedings**. Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation, 2000. 18p. (IRG/WP, 00-50149).

BUCUR V. **Acoustics of Wood**. 2rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag; 2006. 298p.

BUCUR, V.; BÖHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics**, v. 32, n.5, p. 385-390, 1994.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991 154p.

CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; CARMO, P. I. O.; SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultra-sônica na madeira. **Floresta**, v. 38, n. 4, p. 607-615, out./dez. 2008.

CAMARGOS, J. A. A. **Colorimetria aplicada na elaboração de uma tabela de cores para madeiras tropicais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

CAMARGOS, J.A.A.; GONÇALEZ, J.C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, v. 71, p. 30-41, 2001.

CAVALCANTE, M. S. Implantação e desenvolvimento da preservação de madeiras no Brasil. **Pesquisa & Desenvolvimento**, v.14, p. 1-57, 1983.

CHIRENJE T, Ma LQ, CLARK C, REEVES M. Cu, Cr and As distribution in soils adjacent to pressure-treated decks, fences and poles. **Environ. Pollut.**, v. 124, n.3 p.407-417. 2003

COELHO, C. **Influence de l' Usinage du Bois sur les Caractéristiques Objectives et sur la Perception Subjective de l' Aspect d'une Finition**. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.

COSTA, J. A.; GONÇALEZ, J. C./ CAMARGOS, J. A. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 133-139, jan./mar. 2011.

COSTA, M. A. **Avaliação de metodologias alternativas para caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. 83p.

COSTA, M. A.; COSTA, A. F.; PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 567-577, jul.-set., 2011.

CREEMERS, J.; MEIJER, M.; ZIMMERMANN, T.; SELL, J. Influence of Climatic Factors on the Weathering of Coated **Wood.Holz als Roh- und Werkstoff**,v.60, n. 6, p. 411–420, 2002.

CRUZ, C. R.; MUNIZ, G. I. B.; LIMA, J. T.; FERREIRA, D. F. Application of stress waves to estimate moisture content in *Eucalyptus* wood. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 430-438, out./dez. 2009.

CURLING, S.; WINANDY, J.E.; CLAUSEN, C.A. An experimental method to simulate incipient decay of wood by basidiomycete fungi. In: The International Research Group on Wood Preservation; IRG/WP 00-20200, 31., 2000, Kona, USA. **Proceedings...**Kona: IRG, 2000. 13p.

DAHLGREN, S. E. Kinetics and mechanism of fixation of Cu-Cr-As wood preservatives. VI. The length of the primary precipitation fixation period. **Holzforshung**, v. 29, n. 4, p. 130-133, 1975.

DE GROOT, R. C.; ROSS, R. J.; NELSON, W. J. Non-destructive assessment of wood decay and termite attack in southern pine sapwood. **Wood Protection**, v. 3, n.2, p.25-34, 1998.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SANTOS, A. P. DOS; SOUZA, M. R.; CAMARGOS, J. A. A. Evaluation of stress wave and colorimetric variables to predict flexural properties of Brazilian tropical woods. In: 10th World Conference on Timber Engineering, 2008, Miyazaki. **Proceedings...**, 2008. v. 1. p. 1-8.

DENCE, C.W.; LIN, S.Y. **Methods in lignin chemistry**. New York: Springer Verlag, 1992. 578p.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com semente**. São Paulo: Edgar Blucher, 1974.

EVANS, P. D.; BEUTEL, P. J.; DONNELLY, C.; CUNNINGHAM, R. B. Surface Checking of CCA-treated Radiata Pine Decking Timber Exposed to Natural Weathering. In: ANNUAL MEETING, 31., Kona, 2000. **Proceedings**. Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation, 2000. 12p. (IRG/WP/00-40165).

FALK, R. H.; PATTON-MALLORY, M.; MCDONALD, K. A. Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs. In: DOS REIS, H. L.M. Nondestructive testing and evaluation for manufacturing and construction. **Proceedings of conference**; 1988. New York: Hemisphere Publishing Corp.: 1990. p. 137-147.

FEIST, W.C.; HON, D.N.S. Chemistry of weathering e protection. In: ROWELL, R.M. **The chemistry of solid wood**. Washington D.C.: Am. Chem. Soc, 1984.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. New York: Walter de Gruyter, 1984. 613p.

FIGUEROA, F. M. Z. **Avaliação de madeira de peroba-rosa por método não destrutivo utilizando emissão de ondas de ultrassom para peças estruturais do patrimônio histórico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil – Universidade de São Paulo, 2010. 101p.

FREITAS, V. P. **Variações na retenção de CCA-A em estacas de Pinus após 21 anos de exposição em campo de apodrecimento**. 2002. 76 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

GABRIEL, M. S. C. **Uso do método das ondas de tensão na qualificação mecânica da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** Mestrado (Dissertação) – Mestrado em Agronomia Energia na Agricultura. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, UNESP, 200, 94p.

GABRIEL, M. S. C.; BALLARIN, A. W. Determinação do módulo de elasticidade da madeira de *P. taeda* com uso do método não-destrutivo das ondas de tensão (*Stress Wave Method*). VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2000.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. **Processos práticos para preservar a madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 49p.

GARCIA, R.; TRIBOULOT, M. C.; MERLIN, A.; DEGLISE, X. Variation of the viscoelastic properties of wood as a surface finishes substrate. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 2, p. 99-107, 2000.

GEORGE, B.; SUTTIEB, Ed.; MERLINA, A., DEGLISEA, X. Photodegradation and photostabilisation of wood - the state of the art. **Polymer degradation and Stability**, v. 88, n.1, p. 268-274, 2005.

GERALDO, F.C. Aspectos tecnológicos e econômicos da preservação de madeiras. In: II Congresso Ibero-Americano de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Florestais, 2002. Curitiba. **Anais...** Curitiba: 2002.

GONÇALEZ, J. C.; FÉLIZ, T. L.; GOUVEIA, F. N.; CAMARGOS, J. A. A.; RIBEIRO, P. G. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* huber) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 657-664, out.-dez., 2010.

GONÇALEZ, J.C.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v.7, n.2, p.081-092, 2001.

GORNIK, E.; MATOS, J. L. M. Métodos Não-Destrutivos para Determinação e Avaliação de Propriedades da Madeira. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2000.

GOUVEIA, F.N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. Brasília, 2008. 133f.

HAYGREEN, J. G.; BOYWER, J. L. **Forest products and wood science**. An introduction. 2ª ed. Iowa: Iowa State University Press, 1989.

HEARMON, R. F. S. Theory of the vibration testing of wood. **Forest Prod. J.**, Madison, v.16, n.8, p. 29-40, 1966.

HINGSTON, J.A.; COLLINS, C.D.; MURPHY, R.J.; LESTER, J.N. Leaching of chromated copper arsenate wood preservatives: a review. **Environmental Pollution**, v.111, n.1, p.53-66, 2011.

HIZIROGLU S.; JARUSOMBUTI, S.; FUEANGVIVAT, V. Surface characteristics of wood composites manufactured in Thailand. **Building and Environment**, 2004; 39:1359-1364.

HON, D.N.S. Weathering and photochemistry of wood. In: HON, D.N.S.; SHIRAIISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. 2.ed. New York, U. S. A. : Marcel Dekker, 2001. 928 p.

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

ISHIGURI, F. et al. Extractives relating to heartwood color changes in sugi (*Crytomeria japonica*) by a combination of smoke-heating and UV radiation exposure. **J. Wood Sci.**, Japão, v. 49, p. 135-139, 2003.

JANKOWSKY, I.P.; CHIMELO, J.P.; CAVALCANTE, A.A.; GALINA, I.C.; NAGAMURA, J.C.S. **Madeiras brasileiras**. Caxias do Sul: Spectrum, 172p. 1990.

JAYNE, B.A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**. v. 9, n. 11, p.413-416, 1959.

KLOCK 2005 - KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE,A.S. **Química da madeira**. 3 ed. Curitiba: FUPEF, 2005. 86p.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÊ, A. C. **Principles of Wood Science and Technology**. Vol I. Solid Wood. New York: Springer-Verlag, 1968, 592p.

LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. 2 v.

LEPAGE, E. S. Método padrão sugerido pela IUFRO para ensaios de campo com estacas de madeira. **Preservação de Madeiras**, v. 1, n. 4, p. 205-216, dezembro 1970.

LELIS, A.T.; BRAZOLIN, S.; FERNANDES, J.L.G.; LOPEZ, G.A.C.; MONTEIRO, M.B.B.; ZENID, G.J. **Biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 54p. 2001.

MAGOSS, E. General Regularities of wood surface roughness. **Acta Silv. Lign.**, v. 4, p. 81-93, 2008.

MARCONDES, 2011 - MARCONDES, E. Resistência natural da madeira de duas espécies amazônicas em ensaios de campo. 2011. 34f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2011.

MARTINS, D. A. L. **Caracterização de madeiras exóticas para acabamento com vernizes aquosos**. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008. 87p.

MARTINS, S. C. F.; ROSSIGNOLO, J. A. Ultrassom em Madeira: Diagnóstico de Conservação e Prevenção do Patrimônio Rural. **Revista Complexus**, ano 1, n.2, p. 128-142, setembro de 2010.

MASON, J. A. Nondestructive Analysis of and Strengthening Design for a Historic Church Tower in Kentucky. **APT Bulletin**, Vol. 36, No. 1, 2005, p. 45-52.

MATTOS, B. D.; GATTO, D. A.; MISSIO, A. L.; LOURENÇON, T. V. Influência de tratamentos preservativos na propagação da onda ultrassônica na madeira de eucalipto. **Scientia Plena**, v. 9, n. 44, p. 1-6, 2012.

MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. **In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO**, 6., Campos do Jordão, 1990. Anais... São Paulo: SBS/SBSF, 1990. v.3, p. 695-699.

MENDES, A.S.; ALVES, M.V. da S. **A deterioração da madeira e sua preservação**. Brasília: IBDF, 1988. 57p.

MITUTOYO CORPORATION. **SJ - 401 Surface Roughness Tester**: User's manual. 2004. 346p.

MORAES, M. A. F. D. **A indústria da madeira preservada no Brasil: um estudo de sua organização industrial**. Piracicaba, 1996a. 173 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MORESCHI, J.C. **Biodeterioração da madeira**. Curitiba: FUPEF. 2005. 43p.

NEUMANN, M. G. et al. A fotoquímica no Brasil. **Quim. Nova**, v. 25, p. 34-38, 2002. Supl. 1.

NICHOLAS, D. D. **Wood preservation and its prevention by preservatives treatments.** Suni: Syracuse University Press, 1985. v.1, 380p.

OLIVEIRA, A.M.F.; LELIS, A.T.; LEPAGE, E.S.; LOPEZ, G.A.C.; OLIVEIRA, L.C.S.; CAÑEDO, M.D.; MILANO, S. Agentes destruidores da madeira. In: LEPAGE, E.S. **Manual de preservação de madeiras.** São Paulo: IPT, 1986. v.1, p. 99-278.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultrassônica da madeira. **Revista Minerva – Pesquisa e Tecnologia**, v2, n.1, p. 25-31, 2005.

OZDEMIR T.; HIZIROGLU S. Evaluation of surface quality and adhesion strength of treated solid wood. **Journal of Materials Processing Technology**; 2007; 186:311-314.

PALA, H. Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira. **Construção Magazine**. n.20, p.54-62, 2007.

PALAIA, L.; SÁNCHEZ, R.; LÓPEZ, V.; GIL, L.; MONFORT, J.; TORMO, S.; NAVARRO, P.; ÁLVAREZ, M. A. Procedure for NDT and Traditional Methods of Ancient Building Diagnosis, by Using Thermograph, Digital Images and other instruments data Analysis. In: **Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing.** Shanghai, 2008. p. 25-28.

PANDEY, K. K. A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. **Polymer Degradation and Stability**, Inglaterra, v. 87, p. 375-379, 2005.

PASTORE, T.C.M. **Estudos do efeito da radiação ultravioleta em madeiras por espectroscopias Raman (FTRaman), de refletância difusa no infravermelho (DRIFT) e no visível (CIE-L\*a\*b\*).** Brasília: UnB, 2004. 117f. Tese (Doutorado em Química Analítica e Inorgânica) – Universidade de Brasília, 2004.

PELLERIN, R. F.; ROSS, J. R. **Nondestructive evaluation of wood.** Madison: USDA, Forest Service, 2002.

PIZZI, A. The chemistry and kinetics behavior of Cu-Cr-As wood preservatives. II. Fixation of the Cu/Cr system on wood. **Journal of Polymer Science**, v. 20, n. 1, p. 707-724, 1982.

PIZZI, A., CONRADIE, W.E., BARISKA, M., Polyflavanoid Tannins - From Cause of CCA Soft-rot Failure to the "Missing Link" Lignin and Microdistribution Theories (IRG/WP/3359). **Proceedings of The International Research Group on Wood Preservation**, Stockholm. 1986.

PIZZI, A.. Chromium interactions in CCA/CCB wood preservatives. Part II. Interactions with lignin. **Holzforschung**, v.44, n.1, p. 419-424, 1990.

RATU, R. N. **Development and testing of a weatherometer to accelerate the surface checking of wood.** Thesis (Master of Science). The University of British Columbia, 2009.

RAVENSHORST, G. J. P.; VAN DE KUILEN J. W. G; BRUNETTI, M.; CRIVELLARO, A. Species independent machine stress grading of hardwoods. In: World Conference On Timber Engineering, 10., Miyazaki. **Proceedings**... Miyazaki: Curran Associates, 2008.

- RIZZINI, C.R. **Árvores e madeiras úteis do Brasil**. São Paulo: Blücher, 1978. 296p.
- ROCHA, M. P. **Biodegradação e preservação da madeira**. Curitiba: FUPEF, Universidade Federal do Paraná, 2000. 94 p.
- ROSS, J. R.; PELLERIN, R. F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures**. 1ª. ed. Madison: USDA, v. 1, 1994.
- ROSS, R. J.; DEGROOT, R. C.; NELSON, W. J.; LEBOW, P. K. The relationship between stress wave transmission characteristics and the compressive strength of biologically degraded wood. **Forest Products Journal**, vol. 47, n.5, p. 89-93, 1997.
- ROSS, R.J.; Pellerin, R.F.; Volny, N.; Salsig, W.; Falk, R.H. **Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools**. A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rpt. FPL–GTR–114. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 15p.
- ROWELL, R.M. **Wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. 473p.
- SANTANA, M.A.E.; OKINO, E.Y.A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. **Holzforschung**, v.61, n.5, p.469-477, 2007.
- SANTINI, E.J. **Biodeterioração e preservação da madeira**. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1988. 125p.
- SCHAD, K. C.; SCHMOLDT, D. L.; ROSS, R. J. **Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs**. US Forest Laboratory. Research Paper FPL n. 546, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, fev. 1996.
- SHIMOYAMA, V.R. de S. **Estimativas de propriedades da madeira de Pinus taeda através do método não-destrutivo emissão de ondas de tensão, visando à geração de produtos de alto valor agregado**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. 151p.
- SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PASTORE JÚNIOR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 17-23, 2007.
- SIQUEIRA, K. P.; MONTEFUSCO, A. R. G.; GUIMARÃES NETO, A. B.; BONDUELLE, A. Principais metodologias de medição de estado de superfícies. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Vol 5, no 2, Jul/Dez 2003.
- SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 1993, 293p.
- SMITH, D. N. R.; WILLIAMS, A. I. The effect of composition on the effectiveness and fixation of cooper-chrome-arsenic and copper-chrome preservatives. Part I: effectiveness. *Repr. Wood Science Technology*, v. 7, n.1, p.60-76, 1973.

STANGERLIN, D. M. **Proposta de metodologia de ensaio acelerado de fungos apodrecedores em madeiras brasileiras**. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, 2012. 225p.

STEWART, H.A., CRIST, J.B. SEM examination of subsurface damage of wood after abrasive and knife planing. **Wood Science and Technology**, v. 14, n.3, p.106-109, 2001.

SUDIYANI, Y.; HORISAWA S.; CHEN, K.; DOI, S.; IMAMURA, Y. Changes in surface properties of tropical wood species exposed to Indonesian climate in relation to mold colonies. **Journal of Wood Science**. v. 48. p. 542 – 547. 2002.

SULAIMAN O, HASHIM R, SUBARI K, LIANG CK. Effect of sanding on surface roughness of rubberwood. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n.8, p.3949-3955, 2009.

TANNERT, T.; MÜLLER, A.; VOGEL, M. **Applications and limitations of NDT: a timber bridge case study**. In: **Proceedings of the Non-Destructive Testing in Civil Engineering**. France, 2009.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n°2, maio/agosto 2005. pg 291-299.

TAYLOR JB, CARRANO AL, LEMASTER RL. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. **Forest Products Journal**, v.49, n.9, p.41-46.

TELES, R. F. ; MENEZZI, C. H. S. ; SOUZA, F. ; SOUZA, M. R. Interrelationship between three nondestructive testing methods for predicting stiffness of louro-vermelho (*Sextonia rubra*) lumber. In: **Proceedings of the 16th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood**. Pequim, 2009. p. 106-111.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia rubra*)**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. 118p.

TOLVAJ, L. Discoloration and deterioration of wood surface by ultraviolet light. In: **Wood Structure and Properties'94 - The 2nd International Symposium**. September 5 – 9, 1994. Zvolen – Slovakia

TRINCA, A. J. **Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 153p.

TRUGILHO ET AL. 1996 - TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, v.2, n.1, p.94-111, 1996.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Wood Handbook: Wood as Engineering material**. USDA: Washington, 2010. 509p.

USTA, I.; AYDINLAR, E. Effects of bleaching process on the roughness values of wood surfaces of Lebanon cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) and Black poplar (*Populus nigra* L.) using NaOH (sodium hydroxide), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (hydrogen peroxide) and Ca(OH)<sub>2</sub> (calcium hydroxide). In: ANNUAL MEETING, 39th, Instabul, 2008. **Proceedings**. Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation, 2008. 10p. (IRG/WP/08-40403).

VALLE, A.; TEREZO, R. F., TELES, C. D. M. Uso de técnicas não destrutivas no diagnóstico de patologias em estruturas de madeiras. **Revista e-mat** – Revista de Ciência e tecnologia do ambiente construído, v. 1, n. 2, p. 148-157, Novembro de 2004.

WANG, X.; DIVOS, F.; PILON, C.; BRASHAW, B. K.; ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F.. **Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tool**. A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2004. 12 p.

WETZSTEIN, H. G. et al. Degradation of Ciprofloxacin by Basidiomycetes and Identification of Metabolites Generated by the Brown Rot Fungus *Gloeophyllum striatum*. **Applied and Environmental Microbiology**. v. 65, n.4, p. 1556-1563, abr., 1999.

WILLIAMS, R. S. Weathering of wood. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Florida: CRC Press, 2005.

ZABEL, R. A.; MORRELL, F. L. **Wood microbiology**. Decay and its prevention. California: Academic Press, 1992. 476p.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo São Carlos, 2003. 78p.

## CAPÍTULO I

---

### USO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DA MADEIRA EM CAMPO DE APODRECIMENTO

#### 1. INTRODUÇÃO

A forma mais usual para se determinar a durabilidade da madeira é por meio de ensaios de campo, conhecidos como campos de apodrecimento. Neste tipo de avaliação a madeira é exposta ao solo, às intempéries do ambiente e a presença de microrganismos e insetos xilófagos (LEPAGE, 1970). Esse ensaio é realizado para avaliar a resistência natural da madeira e a eficiência de produtos químicos durante o período de teste, com o objetivo de estimar a sua vida útil, tratada ou não quimicamente. Apesar dos altos custos envolvidos nos ensaios de campo, este é o método mais amplamente utilizado para prever o desempenho que a madeira apresentará em serviço e o seu potencial de utilização natural ou preservada.

Testes em campo têm reproduzido com fidelidade situações de uso da madeira com ou sem tratamento químico. Madeiras nestas situações estão expostas a períodos irregulares de lixiviação, secagem, exposição à luz solar, além dos agentes químicos presentes no solo e diversos microrganismos xilófagos que podem atuar em conjunto (COSTA et al., 2005).

Os campos de apodrecimento podem ser instalados com amostras de madeiras nas mais diferentes formas e dimensões. O método tradicionalmente utilizado é o campo com estacas padronizado pela IUFRO (*International Union of Forestry Research Organizations*) e empregado para avaliar a durabilidade da madeira natural ou tratada. Este consiste basicamente no soterramento parcial de amostras de madeira seguidos de inspeções periódicas, objetivando avaliar o seu estado de sanidade, sendo que após um determinado período de tempo, em geral anos, a vida útil da madeira em serviço é determinada.

De acordo com Nicholas (1985), a madeira quando está em contato com o solo deteriora muito mais rápido do que fora dele, devido ao equilíbrio da umidade da madeira em contato com o solo úmido, a possibilidade de lixiviação de produtos preservantes e a uma grande

quantidade de microrganismos que colonizam a madeira e/ou causam deterioração do preservante.

Os preservativos ou preservantes para madeiras são substâncias químicas que possuem a função de modificar a estrutura da madeira com o objetivo de torná-la resistente a ação de agentes biodeterioradores. Galvão et al. (2004) afirmam que para um produto ser considerado realmente um preservante, uma vez aplicado, este deve penetrar profundamente na madeira, não evaporar nem ser arrastado pelas águas da chuva ou umidade do solo. Também, não deverá ser tóxico ao homem e animais, nas concentrações usuais e ser relativamente barato.

O CCA é o produto químico responsável pelo maior volume de madeira tratada e tem sido utilizado amplamente no mundo inteiro, desde a sua descoberta em 1933 (APPEL et al., 2006), sendo considerado o produto químico de maior utilização em todo o mundo (GALVÃO et al., 2004). De acordo com Lepage (1986), esse produto químico apresenta três formulações básicas, sendo essas o CCA tipo A, B e C, onde todas contêm cerca de 19% de óxido de cobre (CuO). O tipo C é o mais usado para construções e uso em geral por apresentar maior resistência à lixiviação e melhor desempenho no campo, devendo a solução preservativa ser preparada com pureza acima de 95% na base anidra.

Para a avaliação do estado de sanidade de madeiras em campo de apodrecimento as amostras são inicialmente removidas por meio de leve impacto perpendicularmente ao topo da mesma. Quando não ocorre a quebra da amostra, esta é removida e classificada com base em um sistema de notas com valores que variam entre 10 e 0, os quais indicam desde amostras sadias até peças destruídas devido ao ataque de fungos ou insetos. Esse sistema é considerado subjetivo, e sugere que as inspeções sejam efetuadas por uma mesma pessoa ou pequeno grupo, com critérios homogêneos quanto à avaliação da sanidade (LOPEZ e MILANO, 1986).

Os métodos de avaliação não destrutivos (END) podem ser definidos, segundo Bucur (2006); Pellerin e Ross (2002), como sendo aqueles que permitem a estimativa de propriedades da madeira e subprodutos, tais como: biológicas, físicas, químicas e mecânicas, sem alterar sua característica estrutural e conseqüente seu emprego final.

Para minimizar possíveis divergências nas avaliações feitas por diferentes avaliadores em campos de apodrecimento, novas tecnologias começaram a ser empregadas. Os métodos de avaliação não destrutivos (END) podem ser definidos, segundo Bucur (2006); Pellerin e Ross

(2002), como sendo aqueles que permitem a estimativa de propriedades da madeira e subprodutos, tais como biológicas, físicas, químicas e mecânicas, sem alterar a característica estrutural e conseqüente emprego final.

Dentre os métodos mais usuais de END de madeiras pode-se citar a avaliação química, a técnica da vibração transversal, a de ondas de tensão e a técnica da propagação de ondas ultrassônicas (ROSS e PELLERIN, 1994; PELLERIN e ROSS, 2002; TARGA, 2005).

A técnica de ondas de tensão é conhecida como um processo dinâmico que está internamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. A propagação de ondas de tensão apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo da estrutura interna da madeira, preservando as características físicas e mecânicas e seu uso final. O equipamento de ondas de tensão é capaz de detectar, de forma não destrutiva, a presença de ocos, deterioração causada por fungos ou insetos e rachaduras podendo atuar como referência quantitativa para a classificação de peças de madeira (ROSS et al., 1999).

O ultrassom é uma técnica não destrutiva baseada em propagação de ondas que apresenta muitas aplicações, tanto em árvores quanto em peças estruturais. A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ondas ultrassônicas está baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade da espécie de madeira e a sua densidade. Os métodos que utilizam as ondas ultrassônicas estão sendo empregados, principalmente, para determinar as constantes elásticas da madeira (GONÇALEZ et al., 2001; TRINCA, 2011), ilustrar as modificações biológicas em estruturas históricas de madeira (FIGUEROA, 2010; MARTINS e ROSSIGNOLO, 2010) e avaliar a qualidade de desdobro (CARREIRA et al., 2006).

Diante do exposto, o presente capítulo teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento químico com o preservante CCA tipo C em três espécies de madeira tropicais e seus estados de sanidade em campo de apodrecimento por meio do método convencional de análise visual e do uso de duas técnicas de avaliação não destrutivas.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Material Lenhoso**

Para o estudo foram selecionadas três espécies de madeiras tropicais, sendo estas o marupá (*Simarouba amara* Aubl.), o tauari (*Couratari* sp.) e o cumarú (*Dipteryx odorata* (Aublet.) Willd.), representantes dos grupos de baixa, média e alta densidade, respectivamente, conforme classificação proposta por Melo et al. (1990).

De cada espécie foi adquirida uma prancha livre de preservante químico no mercado madeireiro do Distrito Federal (DF) com dimensões mínimas de 40 x 35 x 4000 mm (espessura x largura x comprimento) e mantidas no galpão de secagem natural no Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF/SFB) até o momento do processamento. As pranchas tiveram as suas dimensões medidas e aferido o seu teor de umidade por meio de um medidor de umidade elétrico capacitivo em cinco posições ao longo do seu comprimento, com valores médios de 16%, 18% e 22% para as pranchas de marupá, tauari e cumaru, respectivamente. Todo o material foi identificado macroscopicamente por meio da comparação com o material depositado na Xiloteca (*Index Xylarium FPBw*) do LPF/SFB.

As pranchas foram desdobradas em estacas nas dimensões de 30 x 20 x 500 mm (largura x espessura x comprimento) retirados da porção do cerne e sem defeitos. Foram produzidas 30 amostras para cada espécie de madeira, sendo 15 com orientação tangencial e 15 com orientação radial. Desse montante foram selecionados, de cada espécie, oito corpos de prova orientados no sentido tangencial e sete no sentido radial, totalizando um conjunto de 15 amostras.

### **2.2 Tratamento preservativo**

A impregnação das amostras de madeira foi realizada em autoclave industrial sob pressão com produto químico hidrossolúvel denominado arseniato de cobre cromatado tipo C (CCA-C) por meio do processo *Bethell* de célula cheia em uma usina de preservação de madeiras localizada no Distrito Federal. Ao final do tratamento químico, uma amostra da solução de tratamento empregada foi avaliada pelo método estequiométrico para a identificação da concentração dos ingredientes ativos presentes na solução.

Para o processo de impregnação, as amostras de madeira foram dispostas aleatoriamente dentro do cilindro de tratamento (autoclave) em uma embalagem de malha de polipropileno. Ao final do processo as amostras foram mantidas em ambiente aberto para a secagem natural e fixação dos ingredientes ativos por um período de 15 dias. A Figura 1 apresenta as amostras de madeira sem tratamento químico e tratadas com o CCA-C.



**Figura 1.** Estacas de madeira sem tratamento químico e tratadas com CCA-C.

Onde: MA – marupá sem tratamento; MT – marupá tratado; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado.

### 2.2.1 Ensaio de penetração e retenção do CCA-C

A análise de penetração foi realizada por meio de reação colorimétrica utilizando um produto químico denominado Cromoazurol S, conforme indicado na norma NBR 6232 (ABNT, 2013). A solução foi pulverizada por toda a superfície transversal exposta das amostras e o resultado avaliado pelo grau de penetração conforme padrões propostos por IBAMA (2002).

Para a análise de retenção, foram utilizadas duas amostras de cada espécie de madeira sem tratamento e tratadas quimicamente, retirando cinco baguetas de cada amostra para a determinação da concentração dos ingredientes ativos por espectrometria de raios-X. Para tanto, foi realizada a moagem das baguetas em um moinho Tipo Willye, modelo TE-680, sendo coletado o material com granulometria inferior a 30 mesh transferido para cubetas plásticas de 2,5 cm de diâmetro externo, montadas com filme Mylar para Raio-X, até o

preenchimento da metade da cubeta. Para a determinação dos ingredientes ativos foi utilizado um Espectrômetro de Raio-X Shimadzu –EDX-720.

A retenção, em kg de ingrediente ativo (i.a) por metro cúbico (m<sup>3</sup>), correspondeu aos componentes ativos do produto preservante por unidade de volume de madeira preservada, sendo calculada de forma individual para cada ingrediente ativo do CCA-C de acordo com a Equação 1. Para o cálculo da retenção total foi considerado o somatório das retenções individuais de cada ingrediente ativo do CCA-C.

$$R = LE * \rho * 10 \quad (1)$$

Onde:

R = retenção, em kg i.a\*m<sup>-3</sup>;

LE = leitura obtida no equipamento; e

$\rho$  = densidade aparente média, em g\*m<sup>-3</sup>.

## **2.3 Ensaio de durabilidade de madeira**

### **2.3.1 Campo de apodrecimento**

O ensaio de durabilidade das madeiras foi realizado por meio da formação de um campo de apodrecimento experimental instalado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB) no mês de setembro de 2011, com localização em S 15°56'40,8" e W 47°55'7,2". 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). O campo possuiu dimensões de 8m x 17m (largura x comprimento) e implementado em região de cerrado sentido restrito.

As amostras foram distribuídas de forma aleatória em seis linhas e quinze colunas com o uso da função "aleatório" no Microsoft Excel 2010, sem restrição quanto à proximidade de amostras de um mesmo tratamento. No campo, a distância entre as amostras foi de 1 metro nos dois sentidos, sendo soterradas até a metade do comprimento padrão (250 mm) com as maiores faces expostas para o norte. A Figura 2 ilustra o campo de apodrecimento instalado e a Figura 3 apresenta a posição das amostras no campo.



**Figura 2.** Campo de apodrecimento experimental instalado na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB).

Entrada ↓		Borda superior = 1 metro														
Borda Frente = 1 metro	CMT 15	CMT 06	TAT 14	MAT 14	CM 03	MA 07	TA 09	CMT 10	CMT 05	CMT 08	TAT 11	MA 10	CMT 14	CMT 04	CM 11	Borda Fundo = 1 metro
	MAT 05	CM 13	CMT 09	TAT 03	CMT 11	CMT 02	TAT 10	MA 08	MAT 06	MA 01	CM 04	TAT 08	TAT 12	TAT 09	CMT 07	
	TAT 01	CM 02	MAT 09	TA 04	CMT 01	TAT 15	TA 01	MA 02	TAT 06	MAT 10	TA 14	TAT 13	TAT 02	TA 15	TA 08	
	TA 02	CM 07	MA 14	TAT 04	CMT 12	MA 04	MAT 04	CM 10	MAT 03	MA 13	TA 13	MAT 08	MAT 07	TA 06	MA 12	
	MA 06	MA 03	TA 12	CM 06	TA 05	MA 15	CM 08	CM 14	CM 09	MAT 13	MAT 11	MAT 12	TAT 07	TA 03	TA 10	
		Borda inferior = 1 metro														

**Figura 3.** Posição das amostras de madeira no campo de apodrecimento.

Onde: MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado.

### 2.3.2 Informações climatológicas

Os dados climatológicos foram obtidos por meio de duas estações meteorológicas automáticas e uma estação meteorológica convencional localizadas na FAL/UnB situadas em S 15°56' e W 47°56' com 1080 metros de altitude, aonde foram coletados diariamente as informações sobre o total de precipitação (mm), total da radiação global (MJ/m<sup>2</sup> d), velocidade do vento máxima e média (m/s); direção do vento média (graus); temperatura média, máxima e mínima (°C) e umidade relativa média, máxima e mínima (%), os quais estão presentes na Tabela 1 do APÊNDICE I.

### 2.3.3 Avaliação do estado de sanidade e análise visual

As avaliações do estado de sanidade das amostras de madeiras ocorreram quadrimestralmente após a instalação do campo de apodrecimento, iniciando no mês de janeiro de 2012 (P4) e com a última análise realizada no mês de setembro 2013 (P24), com um total de seis análises e 24 meses de exposição, conforme apresentado na Tabela 1. Ao final do período de 24 meses, duas amostras de cada espécie de madeira tratada com CCA-C foram retiradas do campo e realizadas as análises de penetração e retenção, conforme o item 2.2.1.

**Tabela 1.** Períodos de avaliação do campo de apodrecimento.

Avaliação	Mês	Ano
P0 – Instalação do campo	Setembro	2011
P4	Janeiro	
P8	Mai	2012
P12	Setembro	
P16	Janeiro	
P20	Mai	2013
P24	Setembro	

Onde: P – refere-se ao período de avaliação.

No campo, todas as amostras de madeira foram avaliadas aplicando-se um leve impacto perpendicularmente ao topo de cada estaca para sua remoção. Quando não ocorria a quebra da amostra, a peça era removida do solo e examinada visualmente quanto ao seu estado de sanidade conforme sugestão da IUFRO (Tabela 2) citado por Lopez e Milano (1986).

**Tabela 2.** 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)

Após a análise visual as estacas foram retiradas do campo e tomadas as medidas de suas dimensões com o uso de um paquímetro digital com precisão de 0,01mm e aferidas as massas por meio de uma balança digital com precisão de 0,01g.

Nos meses de período chuvoso, as avaliações sempre se deram após uma semana de estiagem de chuvas a fim de evitar a análise em amostras úmidas e em solo saturado.

## **2.4 Avaliação não destrutiva - velocidade de propagação sonora**

Os métodos empregados para a avaliação não destrutiva das espécies de madeira foram a técnica de ondas de tensão e a com ondas ultrassônicas. Os ensaios foram realizados no mesmo conjunto de amostras de madeiras antes e após o tratamento químico e em todas as estacas nas avaliações quadrimestrais. Antes da realização dos ensaios no campo, todas as estacas foram limpas cuidadosamente com um pincel de cerda macia a fim de retirar os resíduos de solo, insetos e fungos da superfície das amostras.

### **2.4.1 Ondas de tensão**

Para a análise de onda de tensão foi utilizado o equipamento *stress wave timer* modelo 239A da empresa Metriguard. O equipamento foi empregado com dois transdutores com acelerômetros, sendo um o emissor em forma de martelo e o outro um receptor de face plana. Todo o sistema foi controlado por meio de um console onde todos os instrumentos foram conectados com cabos BNC e com controle de ganho de emissão e recepção do sinal com valor igual a 40. Neste ensaio, a propagação da onda foi aplicada no sentido longitudinal da madeira com três repetições por amostra, e no sentido transversal ao longo das madeiras com três repetições na metade superior e três na porção inferior da amostra, sendo retirada a média simples como valor final para cada um dos sentidos. A Figura 1 ilustra o equipamento empregado.



**Figura 4.** Equipamento Stress Wave Timer. Detalhes do transmissor tipo martelo e do receptor para uso em campo. (METRIGUARD, 2010).

Para o funcionamento do equipamento, um impacto pelo martelo na amostra é gerado e inicia-se a emissão do pulso de onda. O console começa a contagem do tempo de propagação após perceber o pulso da onda e o transforma em um sinal elétrico. A onda percorre toda a extensão da amostra até atingir o outro acelerômetro que então envia um sinal elétrico para o console que interrompe a contagem. O tempo decorrido é apresentado em uma tela de cristal líquido, no formato de microssegundos ( $\mu\text{s}$ ).

#### **2.4.2 Ondas ultrassônicas**

No ensaio com ondas ultrassônicas foram utilizados transdutores piezoelétricos com encapsulamento metálico de ondas longitudinais de 54 kHz de face plana. O equipamento possui capacidade de 500V, sendo a forma contínua de transmissão do sinal, com aquisição imediata de dados, análise da forma da onda e resolução de 0,1  $\mu\text{s}$ . Para um melhor acoplamento dos transdutores nas amostras de madeira foi aplicado gel condutor neutro. A Figura 5 apresenta o equipamento de ultrassom Pundit Lab da empresa Proceq empregado no experimento e a Figura 6 ilustra o esquema de posicionamento dos transdutores nas amostras de madeiras para ambos os ensaios e as partes avaliadas nas estacas. A Equação 2 apresenta o cálculo da velocidade de propagação sonora empregada na análise de velocidade de propagação sonora para ambos os métodos de avaliação não destrutiva.



**Figura 5.** Equipamento de ultrassom Pundit Lab - Proceq e medição de ondas ultrassônicas em uma amostra de madeira no sentido transversal.

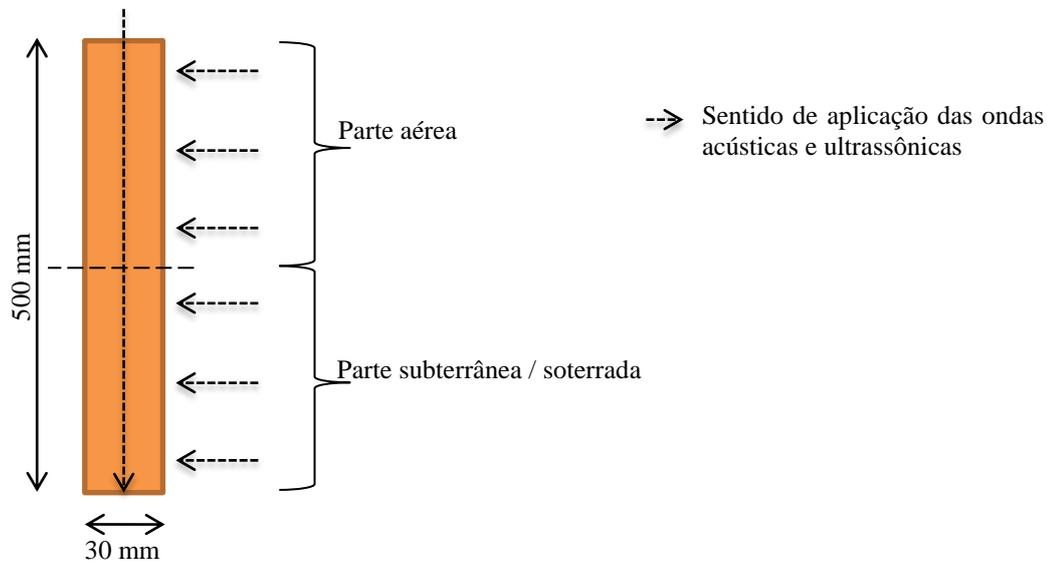
$$v_0 = \frac{L}{t * 10^{-6}} \quad (2)$$

Onde:

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

L = distância percorrida pela onda, m

t = tempo de trânsito da onda,  $\mu$ s.



**Figura 6.** Dimensões e esquema do sentido de aplicação das ondas acústicas e ultrassônicas nas amostras ensaiadas no campo de apodrecimento e avaliadas quanto à deterioração.

## 2.5 Análises dos resultados

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*) versão 20.0 da empresa IBM.

A avaliação da análise visual foi realizada por meio de uma análise estatística descritiva, considerando os valores médios das notas das amostras de madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C entre os períodos de avaliação.

Para a avaliação do efeito da deterioração no campo de apodrecimento utilizando os métodos não destrutivos, uma análise de variância fatorial foi realizada a fim de avaliar os efeitos da espécie de madeira, tratamento químico e período de avaliações sob a velocidade de propagação nos sentidos longitudinal e transversal, e as possíveis interações entre essas fontes de variações. Posteriormente, as análises foram separadas por espécie de madeira e por tratamento químico, sendo realizadas análises de variância (ANOVA) entre os períodos de avaliação com posterior comparação de médias realizada pelo teste de Tukey com 5% de significância ( $p < 0,05$ ).

Os efeitos das condições climáticas sobre as propriedades físicas e na velocidade de propagação das ondas sonoras e ultrassônicas nas madeiras foram examinados a partir de testes de correlação de Pearson entre as variáveis, aos níveis de 1 e 5% de significância.

Modelos estatísticos foram gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão de ultrassônico nas espécies de madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C nos sentidos longitudinal e transversal em função dos períodos de avaliações do campo de apodrecimento e em função das notas atribuídas pelo método de avaliação visual. Foram analisados os modelos lineares e quadráticos, sendo selecionados aqueles que apresentaram maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{adj}$ ), menor erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) e maior valor de F calculado ( $F_{calc}$ ).

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Retenção e penetração**

A Tabela 3 apresenta a concentração dos ingredientes ativos da solução de CCA empregado no tratamento preservativo e o grau de penetração. A concentração da solução foi de 1,37% e o pH igual a 2,3 sendo estes valores obtidos em função dos fatores operacionais da usina de preservação. De acordo com o fabricante do produto químico, a concentração dos ingredientes

ativos cromo, cobre e arsênio devem estar com valores de 47,5%, 18,5% e 34%, respectivamente. O pH encontrou-se em conformidade com os limites estabelecidos.

**Tabela 3.** Concentração dos ingredientes ativos da solução de CCA-C utilizados na impregnação das amostras de marupá, tauari e cumaru.

Ingrediente	Resultado da análise (%)	Concentração dos ingredientes ativos	
		balanceamento químico (%)	Valores indicados para o CCA-C* (%)
Cromo (CrO <sub>3</sub> )	0,69	50,4	47,5
Cobre (CuO)	0,29	21,2	18,5
Arsênio (As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,39	28,4	34,0
Total	1,37	100,0	100,0

\*Fonte: Montana (2013).

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de penetração e retenção dos ingredientes ativos impregnados nas amostras de madeiras estudadas para os períodos de 0 e 24 meses de exposição no campo de apodrecimento. Nota-se que apenas nas madeiras de marupá e tauari ocorreu penetração na porção permeável do cerne. Na madeira de cumaru ocorreu apenas a penetração superficial, onde de acordo com IBAMA (2002) o cerne dessa espécie não é impregnável nem mesmo em tratamentos sob pressão. Para as madeiras de marupá e tauari o citado autor classifica ambas as espécies como muito fácil de preservar com CCA aplicado sob pressão. A causa da deficiência na penetração está provavelmente relacionada a uma maior densidade e conseqüente menor permeabilidade da região do cerne. Zabel e Morrell (1992) afirmam que, de modo geral, uma maior densidade implica em menor permeabilidade e maior dificuldade de secagem e impregnação com soluções preservativas, devido a um volume de espaços vazios mais reduzidos. Para as madeiras de marupá e tauari, IBAMA (2002) classifica as espécies como muito fácil de preservar com CCA aplicado sob pressão.

**Tabela 4.** Resultados da análise de penetração e retenção dos ingredientes da solução de CCA-C impregnados nas madeiras de marupá, tauari e cumaru pelo processo *Bethell*.

Madeira	Penetração <sup>1</sup>	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Retenção (kg i.a/m <sup>3</sup> )				Balanço da solução (%)		
			CrO <sub>3</sub>	CuO	As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	i.a	CrO <sub>3</sub>	CuO	As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Marupá (0 meses)	PR	500	3,10	1,30	1,70	6,10	50,82	21,31	27,87
Marupá (24 meses)	PR	500	3,40	1,40	2,10	6,90	49,28	20,29	30,43
Tauari (0 meses)	PR	680	1,90	0,90	1,40	4,20	45,24	21,43	33,33
Tauari (24 meses)	PR	680	2,80	1,00	1,70	5,50	50,91	18,18	30,91
Cumaru (0 meses)	SU	1.040	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cumaru (24 meses)	SU	1.040	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

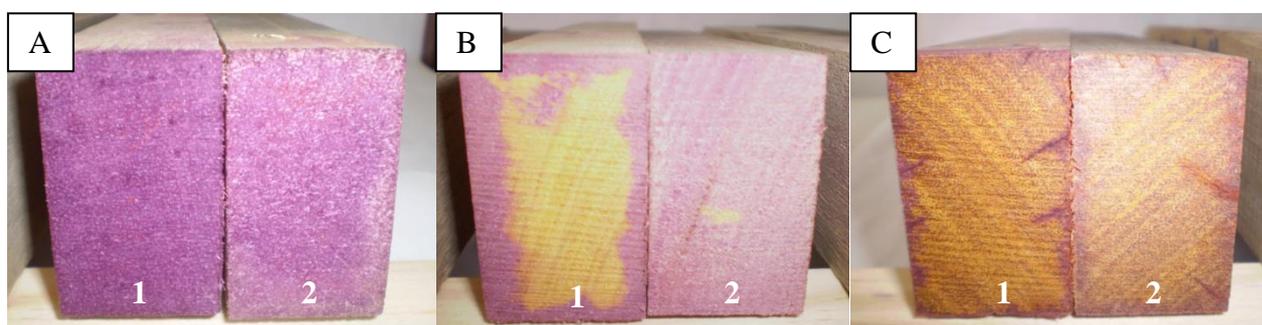
Onde: PR – penetração profunda e regular; SU – penetração superficial.  $\rho_{ap}$  – densidade aparente; i.a. – concentração de ingrediente ativo total. <sup>1</sup>IBAMA (2002).

As retenções dos ingredientes ativos foram superiores para as madeiras do período de 24 meses de exposição, observando valores de cobre, cromo e arsênio próximos aos indicados por Lepage (1986). Esse resultado pode ter ocorrido devido a posição das amostras no momento da impregnação na autoclave, mesmo estas dispostas de forma aleatória, e observa-se ainda que dentro desse período não foi observada lixiviação dos ingrediente ativos do CCA-C das madeiras tratadas, como era esperado, devido ao pouco tempo de exposição das amostras em campo, em relação a capacidade de fixação do CCA-C 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 6,5 kg i.a/m<sup>3</sup>. Dessa forma, apenas a madeira de marupá com 24 meses de exposição ficou com valor acima ao referido na norma.

Os maiores valores de retenção dos ingredientes ativos nas madeiras foram para o cromo e para o arsênio, visto que estes possuíram maiores concentrações no balanço estequiométrico. Tais elementos ficaram com valores de concentrações próximos aos indicados por Lepage (1986), sendo que o cobre e o cromo encontrados nas madeiras apresentaram valores acima do padrão.

A Figura 7 ilustra o resultado do ensaio de penetração com Cromoazurol S para as estacas com 0 e 24 meses de exposição no campo de apodrecimento. De acordo com IBAMA (1997); Vianez e Sales Neta (1989); INPA/CPPF (1991) o tipo de penetração da madeira de marupá foi classificado como total e uniforme, para o tauari como parcial e periférico, e para o cumaru como nula.



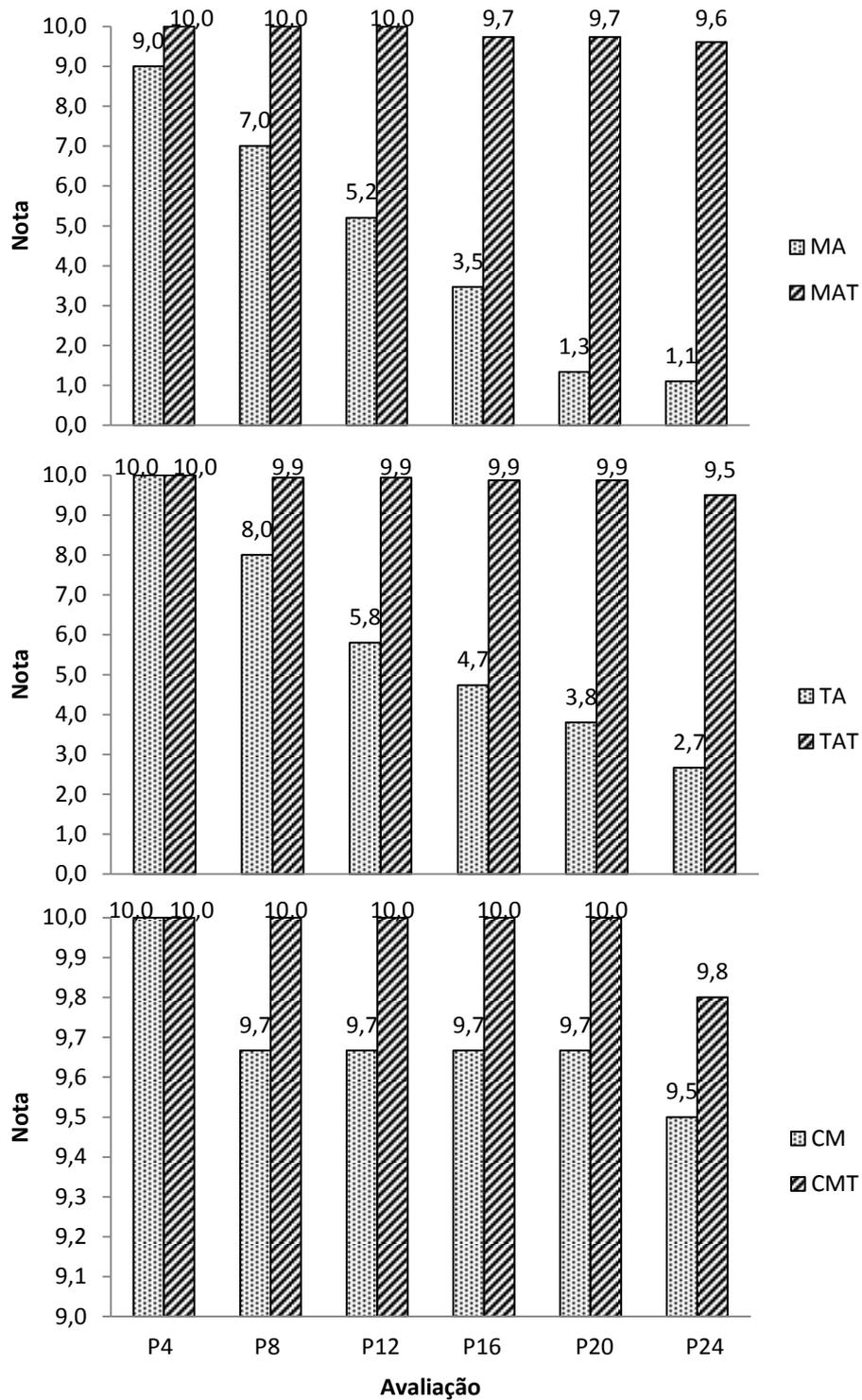
**Figura 7.** Identificação dos padrões de penetração do produto preservativo CCA-C na seção transversal das madeiras de marupá (A), tauari (B) e cumaru (C), com 0 meses (1) e 24 meses (2) de exposição no campo.

Observa-se que após o período de 24 meses de exposição as amostras retiradas do campo de apodrecimento estavam impregnadas com o CCA-C, sem indícios de lixiviação da solução preservante, mesmo na madeira de cumaru, que apresentou penetração superficial.

### **3.2 Ensaio de durabilidade de madeira**

#### **3.2.1 Avaliação visual**

A Figura 8 apresenta os valores médios das notas atribuídos às madeiras de marupá, tauari e cumaru pelo método de avaliação visual de acordo com as análises realizadas. Para as madeiras de marupá e tauari sem tratamento foi observada uma tendência do decréscimo das notas com o avanço do tempo em função da diminuição do número de estacas sadias, onde na primeira avaliação do campo de apodrecimento foi observado o aparecimento de fungos apodrecedores em ambas as madeiras. Com relação às estacas tratadas com CCA-C, não foram observadas ocorrências de ataques de térmitas, porém em algumas amostras foi notada a presença de fungos, sem podridão aparente.



**Figura 8.** Valores médios das notas atribuídas pela análise visual para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C nos seis períodos de avaliações. Onde: MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

A madeira de marupá sem tratamento foi a que apresentou maior deterioração com o passar do tempo, onde foi constatado o ataque de térmitas e fungos apodrecedores nas amostras sem tratamento desde a segunda avaliação do campo. A porção soterrada das estacas foi a que sofreu maior deterioração com presença de insetos e fungos, enquanto que na parte aérea foram notadas rachaduras e o escurecimento da superfície, ocasionado devido à ação das intempéries. Os resultados obtidos corroboram com IBAMA (2002), onde a madeira de marupá é classificada como suscetível ao ataque de fungos e insetos. Marcondes et al. (2013) estudando a resistência natural da madeira de marupá em campo aberto e floresta observaram comportamento semelhante, com o aumento da perda de massa em função do tempo de exposição nas duas situações. Em estudos de apodrecimento acelerado, Costa (2009) e Stangerlin (2012) caracterizaram a madeira como sendo não resistente à ação dos fungos de podridão branca e parda (*Trametes versicolor* e *Gloeophyllum trabeum*, respectivamente). Márquez et al. (2008) estudaram a resistência natural da madeira de marupá em contato direto com solo frente ao ataque de térmitas, classificando-a como de baixa resistência.

Para as estacas de tauari sem tratamento foi notado a presença de fungos na parte aérea e na porção soterrada desde a primeira avaliação do campo de apodrecimento. Nas demais avaliações foram observadas o aparecimento de rachaduras de topo na parte aérea com o posterior aumento da sua extensão no sentido longitudinal e fungos na porção soterrada, sendo estes os principais responsáveis pela ruptura das estacas. Mainieri e Chimelo (1989) classificam a madeira como de baixa resistência a organismos xilófagos, embora Matoski e Rocha (2006) relatam que a espécie apresentou resistência ao ataque brocas *Dinoderus minutus* (Coleoptera).

Para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C não foram observados ataques de térmitas nas extensões das amostras, seja na porção aérea ou soterrada, apenas manchas na superfície da porção soterrada das madeiras, sem evidências de podridão. Assim, o período de 24 meses de exposição não foi suficiente para a deterioração dessa espécie de madeira. Em estudo similar com 46 espécies de madeiras tropicais em ensaio em campo de apodrecimento localizado no estado do Amazonas, Jesus et al. (1998) mencionam que a durabilidade da madeira de cumaru pode ser considerada elevada, em razão de sua vida útil superior a 8 anos. Esse comportamento era esperado para essa madeira devido à sua alta densidade básica (0,93 g/cm<sup>3</sup>) (IBAMA, 2002) e elevado teor de extrativos (9,20%) (SANTANA e OKINO, 2007; STANGERLIN; 2012), o que lhe confere um alto grau de

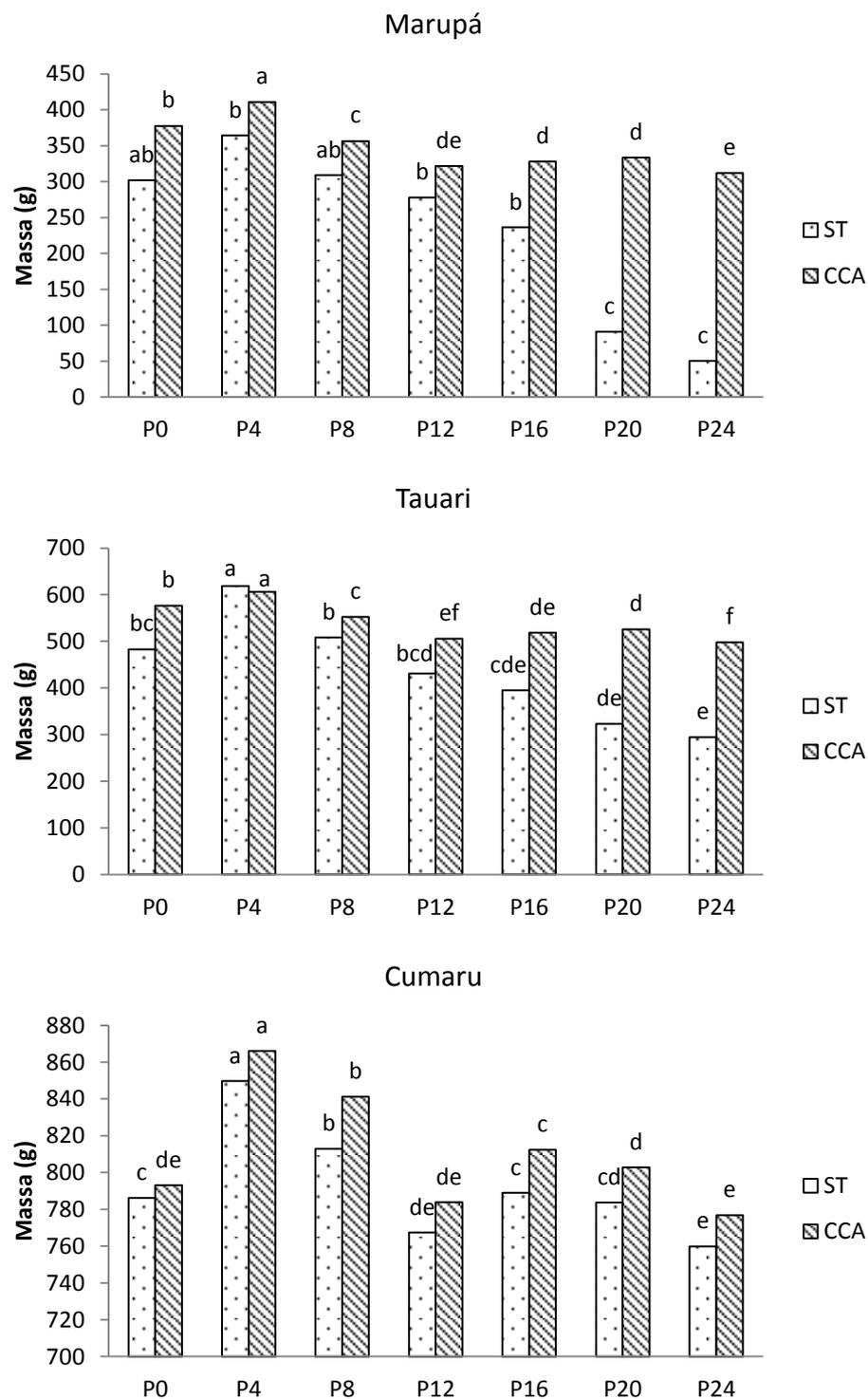
resistência biológica, sendo classificada como muito resistente ao ataque de fungos apodrecedores (CARNEIRO et al., 2009; STANGERLIN; 2012).

Lopez e Milano (1986) indicam que a vida média ou durabilidade natural de uma dada espécie de madeira em situação de avaliação de durabilidade em campo é definida como o tempo necessário para que 50% das amostras de um lote de uma madeira, sem tratamento químico ou com produtos preservantes, estejam intensamente atacados ou destruídos. Dessa forma, a durabilidade natural da madeira de marupá sem tratamento químico foi de 20 meses.

A partir do Ábaco de McLean (LOPEZ e MILANO, 1986), que correlaciona os anos de serviço com o percentual de substituições de amostras de madeira, pode-se estimar a durabilidade natural de uma espécie de madeira em campo. Por essa metodologia, a madeira de tauari sem tratamento químico possui uma vida média entre 2 e 3 anos, aproximadamente. Ressalta-se que esse método não considera as condições locais do campo nem características climáticas da região.

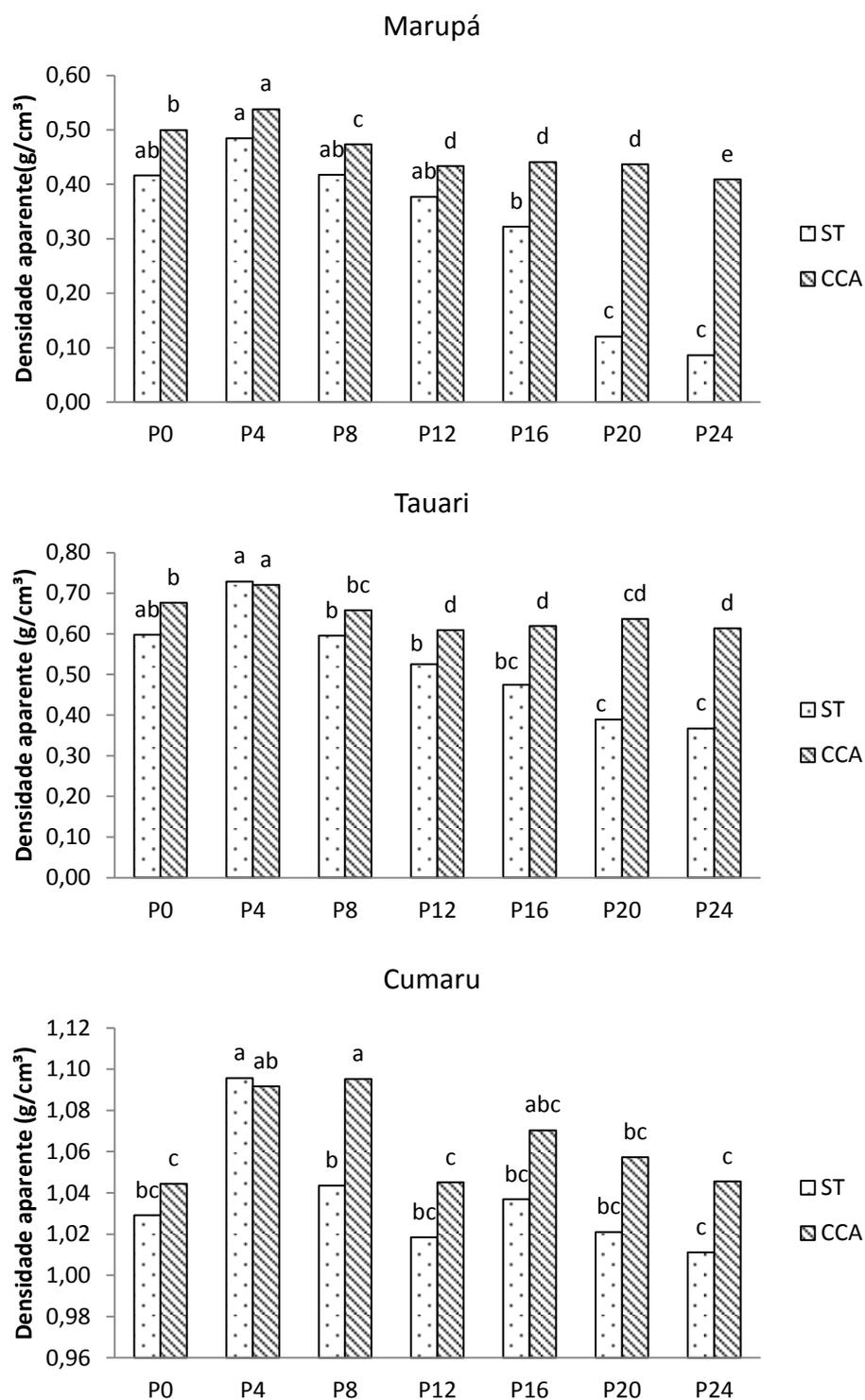
### **3.2.2 Avaliação das propriedades físicas**

As Figuras 9 e 10 apresentam a média da massa e densidade aparente para as madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C. As Tabelas 2 e 3 no APÊNDICE I apresentam os resultados da análise descritiva das propriedades físicas das madeiras estudadas em cada avaliação realizada no campo de apodrecimento. A Tabela 4 apresenta o resultado da análise de variância (ANOVA) e as Tabelas 5 a 17 apresentam os resultados do teste de Tukey (APÊNDICE I).



**Figura 9.** Massa das madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C de acordo com as avaliações realizadas no campo de apodrecimento.

Onde: P – período da avaliação; ST – sem tratamento. Colunas de mesma cor seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.



**Figura 10.** Densidade aparente das madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C de acordo com as avaliações realizadas no campo de apodrecimento. Onde: P – período da avaliação; ST – sem tratamento. Colunas de mesma cor seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Os resultados indicam que na primeira avaliação ocorreu o aumento da massa e densidade aparente enquanto que na terceira e sexta avaliação foi notado o decréscimo dessas propriedades. Essas alterações na massa e densidade aparente foram observadas em todas as madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C devido, principalmente, às características climáticas da região do Distrito Federal. Nos 24 meses de avaliação, entre os meses de outubro a fevereiro ocorreu o aumento da umidade no ambiente e no solo em função do aumento do nível de precipitação entre esses meses, enquanto que os meses de julho a setembro apresentam baixa umidade relativa do ar e pouca precipitação. Dessa forma, esse incremento de massa e densidade aparente pode estar associado ao aumento do teor de umidade nas estacas no campo, principalmente na porção soterrada.

De acordo com as avaliações realizadas foi possível observar que para as madeiras de marupá e tauari sem tratamento ocorreu a diminuição dos valores médios das propriedades físicas, motivado pela contabilidade de todas as amostras do campo (n=15) no valor médio das propriedades, mesmo com aquelas que foram retiradas do campo por conta da quebra das estacas ocasionada pela ação dos fungos e insetos.

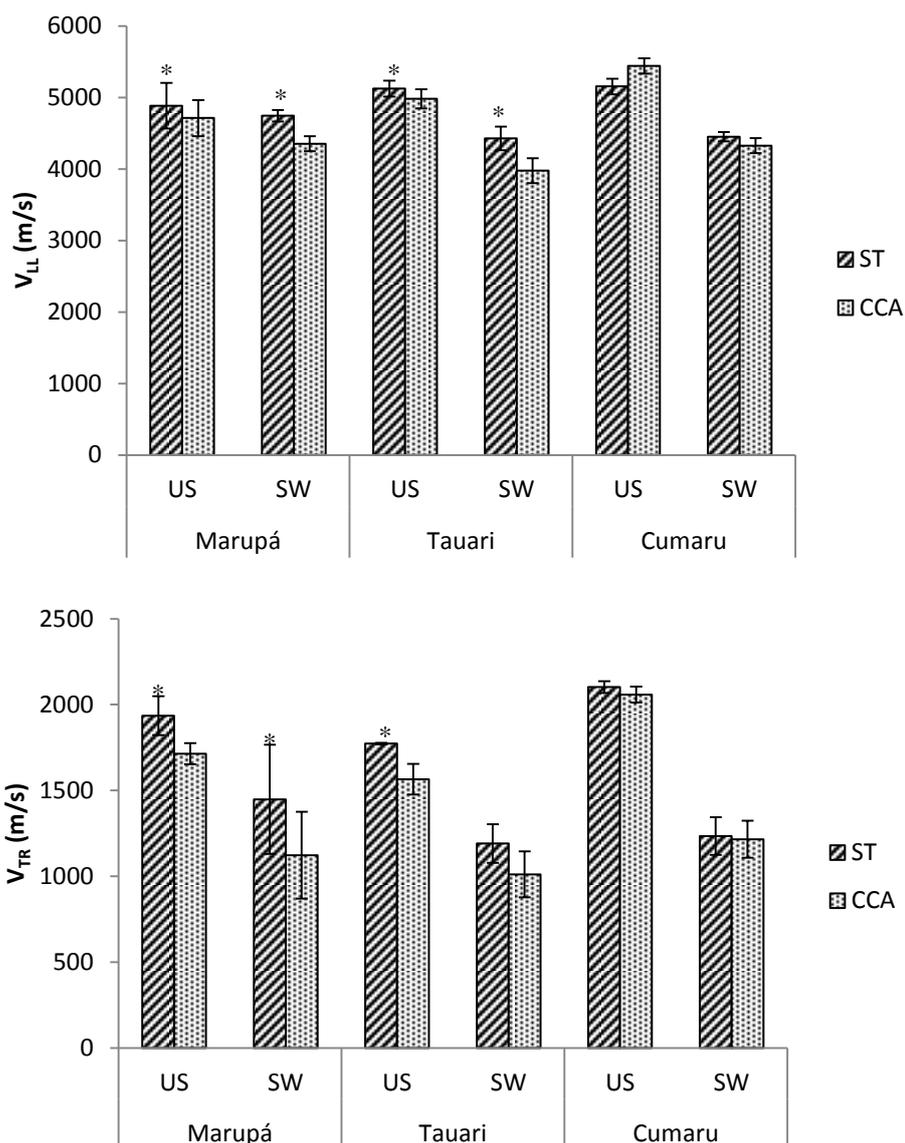
### **3.3 Avaliação não destrutiva**

Os resultados das análises de variância fatorial dos efeitos da espécie de madeira, tratamento químico e dos períodos de avaliação sobre a velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão e ultrassônico são apresentados nas Tabelas 17 e 18 do APÊNDICE I.

Efeitos significativos entre todas as fontes de variações e em todos os níveis de interações para ambos os métodos empregados foram identificados. Esse resultado é reflexo da diferença de densidade básica entre as espécies selecionadas, bem como do efeito do tratamento químico sobre a velocidade de propagação e do estado de deterioração das espécies florestais ao longo do tempo. Para melhor elucidação dos resultados, as análises posteriores foram separadas por espécie de madeira com ou sem tratamento químico, sendo determinadas para cada período de avaliação e sentido de aplicação das ondas nas estacas.

#### **3.3.1 Efeito do tratamento preservante na velocidade de propagação sonora e ultrassonora**

A Figura 11 apresenta o comportamento da velocidade de propagação sonora no sentido longitudinal e transversal nas amostras de madeiras estudadas sem tratamento químico e tratadas com CCA-C pela técnica de ondas ultrassônicas e das ondas de tensão. As Tabelas 19 e 20 no APÊNDICE I apresentam os resultados da análise descritiva e das análises de variância para a velocidade de propagação sonora de acordo com os métodos avaliados.



**Figura 11.** Velocidade de propagação sonora no sentido longitudinal e transversal nas madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C.

Onde: VL – velocidade de propagação no sentido longitudinal; VT – velocidade de propagação no sentido transversal; ST – sem tratamento químico; CCA – tratadas com CCA-C; US – velocidade de propagação com ultrassom; SW – velocidade de propagação com stress wave timer. \*Significativo pela ANOVA ao nível de  $\alpha = 0,05$ .

A velocidade de propagação no sentido longitudinal e transversal foi superior para o método ultrassônico comparado ao método de ondas de tensão em todas as madeiras e foram observadas diferenças significativas para o efeito do tratamento químico para as madeiras de marupá e tauari em ambos os métodos e nos dois sentidos de aplicação da onda. Para a madeira de cumaru não houve diferenças significativas para o efeito do CCA-C, o que pode ser explicado uma vez que não houve retenção da solução preservativa na madeira. A

velocidade de propagação média encontrada ficou entre 4000 e 5500 m/s e encontra-se em conformidade com o apresentado por Del Menezzi et al. (2008) para o método de ondas de tensão e com Gonzalez et al. (2001); Oliveira e Sales (2006) para o ultrassom utilizando madeiras tropicais sem tratamento químico, onde todos os autores avaliaram as madeiras no sentido longitudinal.

A diminuição da velocidade de propagação da onda sonora, nas amostras tratadas com CCA-C, em ambos os métodos (SW e US), pode estar associada à impregnação da solução preservante na parede celular da madeira. Lepage (1986) indica que o cromo, na forma trivalente, forma complexos com a lignina e o arsênio reage com o cromo. Dessa forma, os sais presentes na parede celular podem agir como agentes atenuadores da propagação da onda, impossibilitando a sua livre propagação.

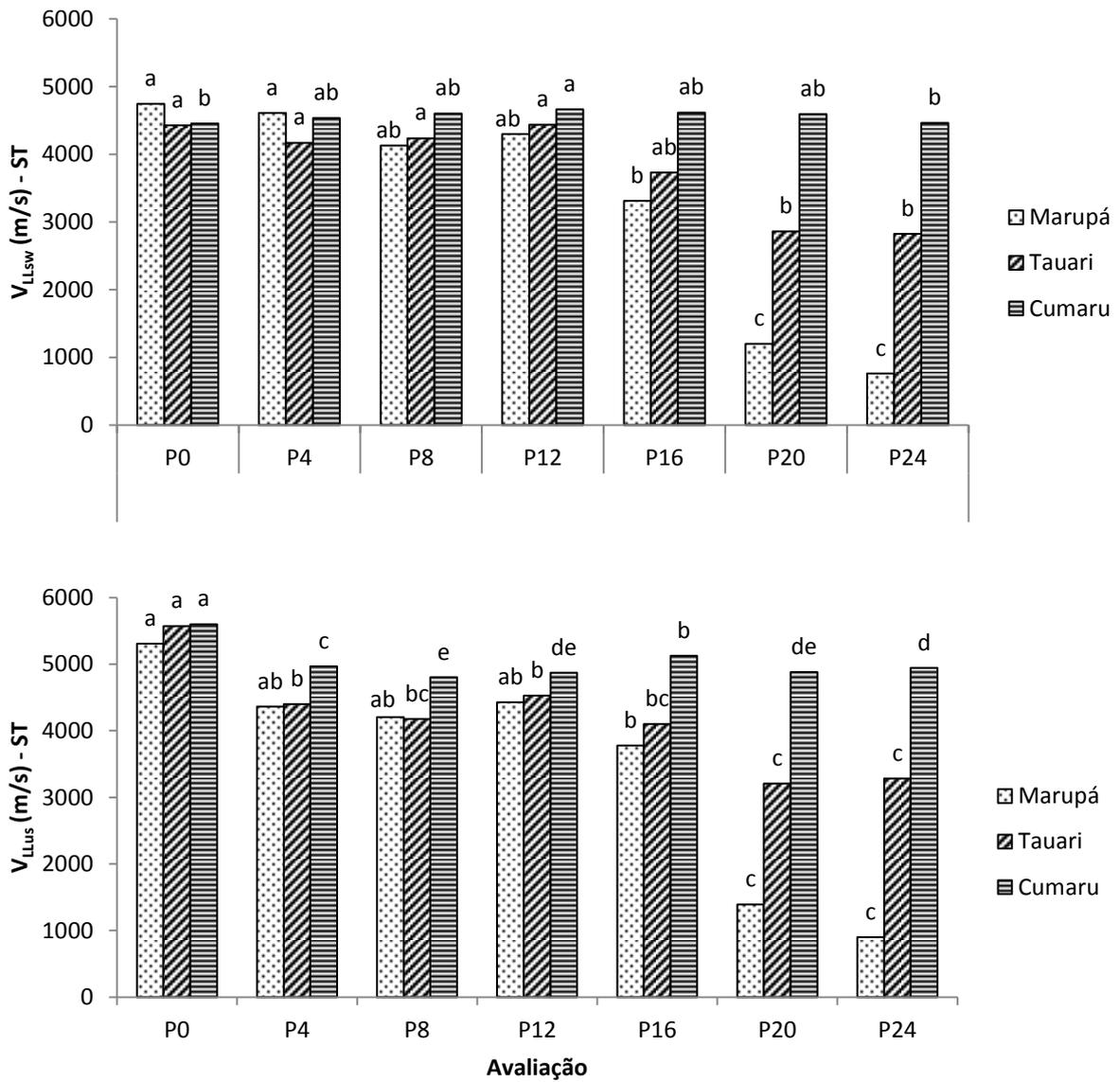
Bucur (2006) relata que o uso de preservantes hidrossolúveis diminui a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na madeira, podendo diminuir a resistência da madeira tratada. Nesse mesmo sentido, Evans (2000); Nicholas (1985); USDA, (2010) citam a perda de resistência da madeira tratada, sobretudo da tenacidade, que está relacionada com o aumento da retenção. Essa perda de resistência tende a estar ligada a alterações no pH ocorridas no primeiro estágio da reação de insolubilização do CCA.

Pellerin e Ross (2002); Ross et al. (2005) indicam que o efeito do tratamento com preservantes hidrossolúveis praticamente não possuem efeito significativo na transmissão da propagação de ondas de tensão em madeiras, sendo estas com dimensões estruturais. Tal afirmação pode estar associada ao fato do comum uso de madeiras de densidade elevada para emprego em elementos estruturais com baixa porosidade e, assim, de baixa tratabilidade e baixa retenção.

### **3.3.2 Velocidade de propagação no sentido longitudinal ( $V_{LL}$ )**

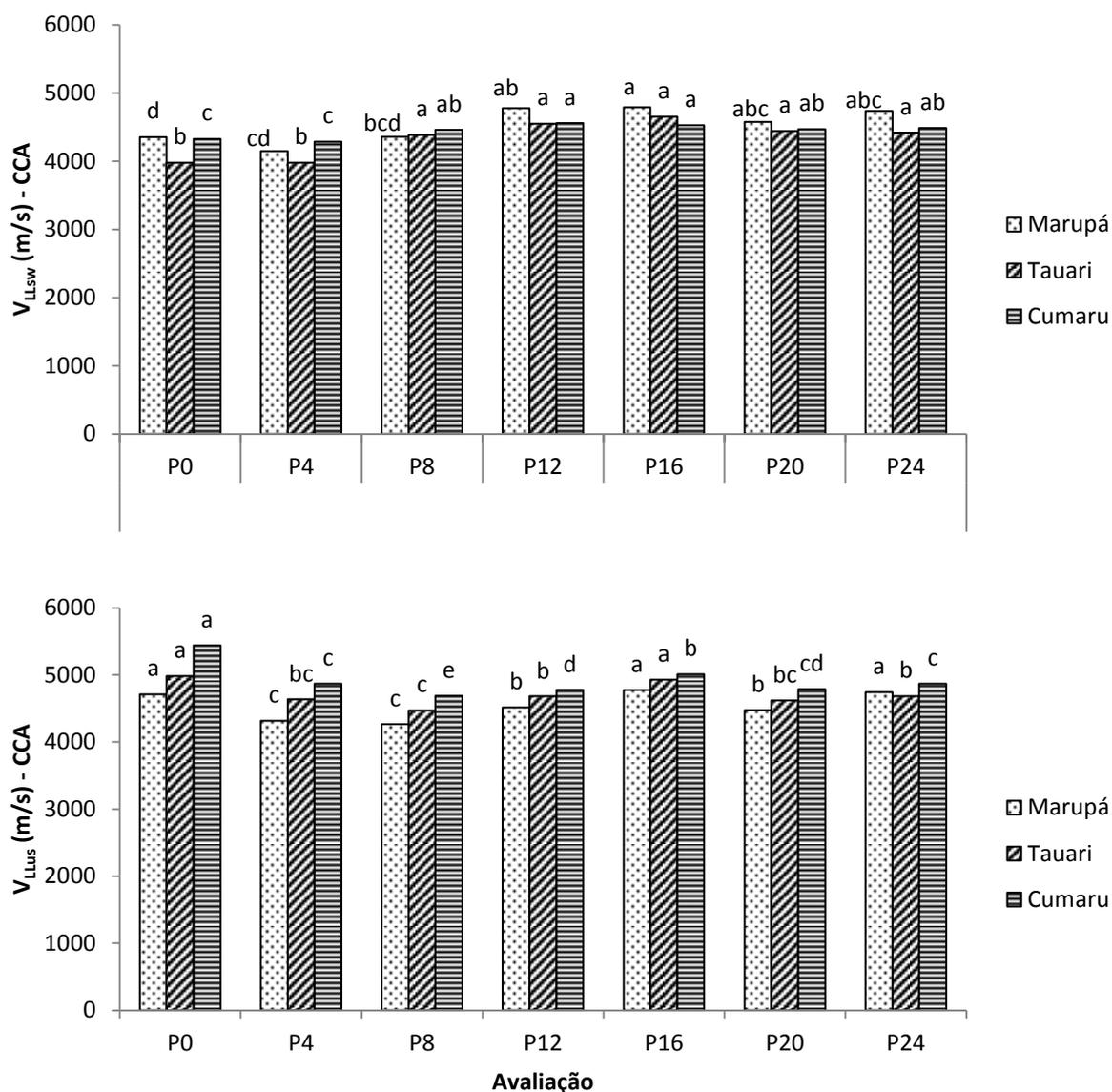
O teste de média detectou diferenças significativas na velocidade de propagação no sentido longitudinal de acordo com os períodos avaliados tanto para as madeiras sem tratamento como para as madeiras tratadas em ambos os métodos de avaliação não destrutiva (Figuras 12 e 13). As Tabelas 21 a 49 no APÊNDICE I apresentam os resultados da análise descritiva, da

análise de variância e do teste de Tukey para a velocidade de propagação no sentido longitudinal e transversal para as madeiras estudadas em função do tempo.



**Figura 12.** Efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido longitudinal para as madeiras sem tratamento químico.

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



**Figura 13.** Efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ondas de tensão e ultrassom para as madeiras tratadas com CCA-C.

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

O nível de deterioração das madeiras de marupá e tauari sem tratamento a partir do 2º ano de experimento foi de tal magnitude que implicou na diminuição do valor médio da velocidade de propagação para os dois métodos de avaliação não destrutiva empregados. Esse resultado é um indicativo da atividade biológica do campo de apodrecimento, onde foi possível observar um intenso ataque de fungos apodrecedores e cupins nas referidas madeiras. A partir de P16 ocorreu um queda significativa de  $V_{LL}$  para a madeira de marupá, fato devido ao número de estacas quebradas e deterioradas. Para a madeira de tauari esse comportamento iniciou-se a

partir de P20, porém manteve-se estável na avaliação posterior. A madeira de cumaru, apesar de notadas diferenças significativas entre os períodos, não foram observadas grandes alterações na velocidade de propagação (Figura 11).

Embora tenham sido constatadas diferenças significativas pelo teste estatístico para a velocidade de propagação no sentido longitudinal entre os períodos de avaliações para as madeiras tratadas com CCA-C, não fica evidente alguma tendência de comportamento padrão do efeito do campo de apodrecimento, seja pelo aumento ou diminuição da propriedade para os dois métodos de avaliação não destrutiva. Esse resultado pode estar relacionado ao curto período de avaliação das madeiras tratadas no campo, onde se espera que as mesmas apresentem alta durabilidade em função da eficiência do tratamento químico. A presença de substâncias preservantes na madeira diminui e altera substancialmente a colonização microbiológica, as quais tendem a ser mais seletivas às espécies com menor teor de extrativos (ZABEL e MORRELL, 1992). Agrega-se ainda o fato de existirem estacas sem tratamento químico, as quais são fontes de alimentos preferenciais para os agentes xilófagos (Figura 12).

Quando a madeira é colonizada ou deteriorada por agentes xilófagos, a sua habilidade de transmitir ou emitir o som geralmente é alterada. Essa modificação nas propriedades acústicas pode ser explorada para detectar vários estágios de deterioração. Quando a onda sonora move-se pela madeira, ela irá se propagar em torno do tecido apodrecido e pelos espaços vazios (NOGUSHI et al. 1986). Dessa forma, o tempo de propagação da onda tende a ser superior ao observado na madeira sadia, podendo assim determinar a sua condição interna (ZABEL e MORRELL, 1992), embora com essa propriedade não seja possível distinguir e classificar qual é o principal agente causador da deterioração na madeira (PELLERIN et al., 1985; WILCOX, 1988).

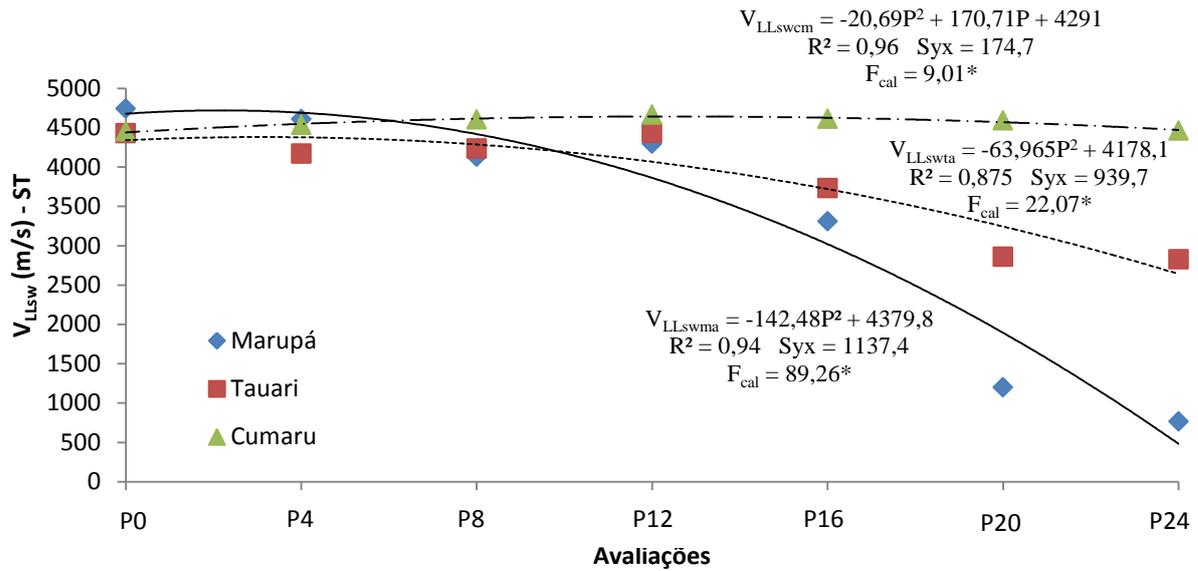
A queda da velocidade de propagação se reflete diretamente na diminuição da resistência mecânica da madeira, conforme observado por Ross e Pellerin (1994), e, sendo assim, pode ser considerado como um indicativo para o estado de sanidade para estacas de madeiras em campo. Resultado similar ao obtido no presente estudo foi observado por De Groot et al. (1998), os quais observaram a queda da resistência mecânica para a madeira de *Souther Pines* em campo de apodrecimento localizado em ambiente florestal com o uso do stress wave timer. Pellerin et al. (1985), demonstraram que o método de ondas de tensão pode ser aplicado para a identificação e monitoramento da deterioração causada por fungos de podridão parda, indicando uma alta correlação ( $R^2 = 0,80$ ) entre a velocidade de propagação e a compressão

paralela às fibras. Entretanto, os autores não obtiveram o mesmo resultado com a exposição da madeira à térmitas em laboratório.

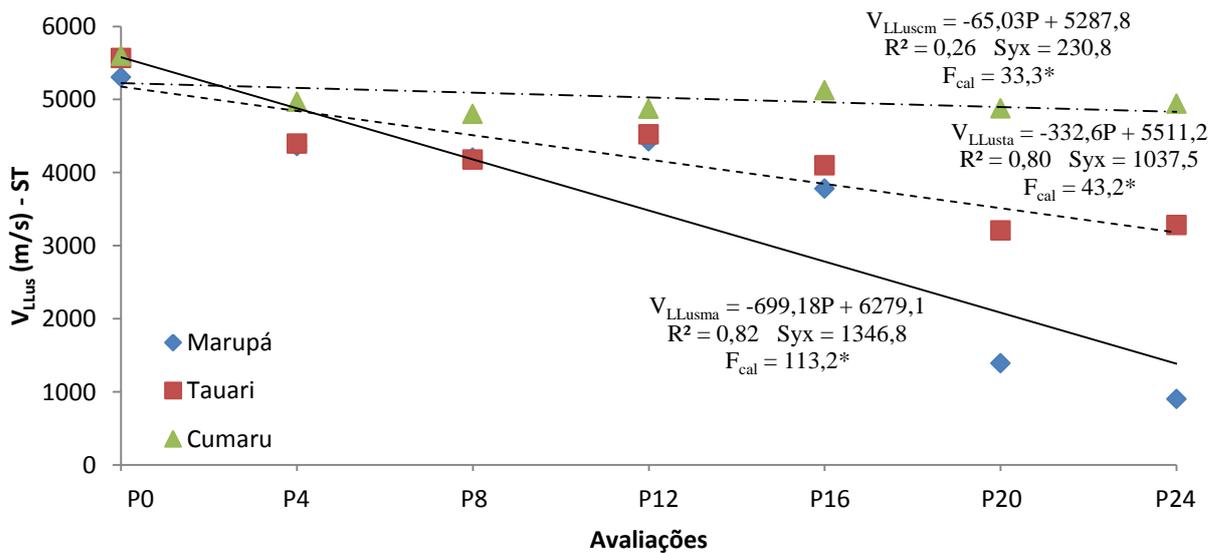
O ataque de agentes deterioradores ocasiona principalmente a deterioração da parede celular, impedindo a livre propagação da onda ultrassônica na madeira, causando a sua dispersão e reflexão. Na presença de ataque de agente xilófagos, o tecido deteriorado aumenta a atenuação do sinal ocasionando a diminuição da velocidade de propagação (KABIR et al., 2002; BUCUR, 2006; WANG, et al., 1980; LEMASTER e WILCOX, 1993).

A atenuação é afetada principalmente pela diminuição da energia de dissipação na madeira, sendo essa uma propriedade de grande importância da detecção dos defeitos oriundos de agentes xilófagos (ROSS e PELLERIN, 1988; MALLORY e DE GROOT, 1989; KABIR et al., 2002). A mensuração isolada do tempo de propagação entre dois pontos não permite que sejam feitas distinções sobre qual agente deteriorador está atribuído pela maior parte da deterioração da madeira, apenas indica um estado geral do material. Assim, caso seja de interesse a caracterização do tipo de deterioração que está presente no material, sugere-se o uso de equipamento que permita a mensuração da energia aplicada, bem como a visualização do comportamento da onda, como aparelhos de emissão acústica.

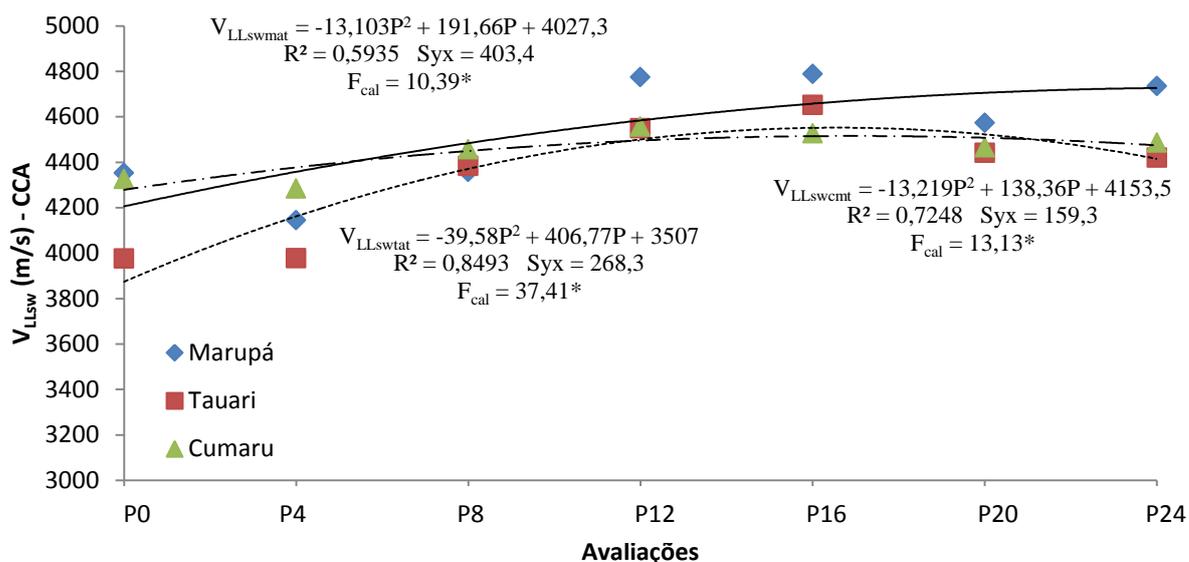
As Figuras 14 a 17 apresentam os modelos estatísticos de predição da velocidade de propagação nas madeiras em função do período de avaliação do campo de apodrecimento para os métodos de onda de tensão e ultrassônico. As Tabelas 34 e 35 do APÊNDICE I apresentam os resultados da análise de variância para as análises de regressões.



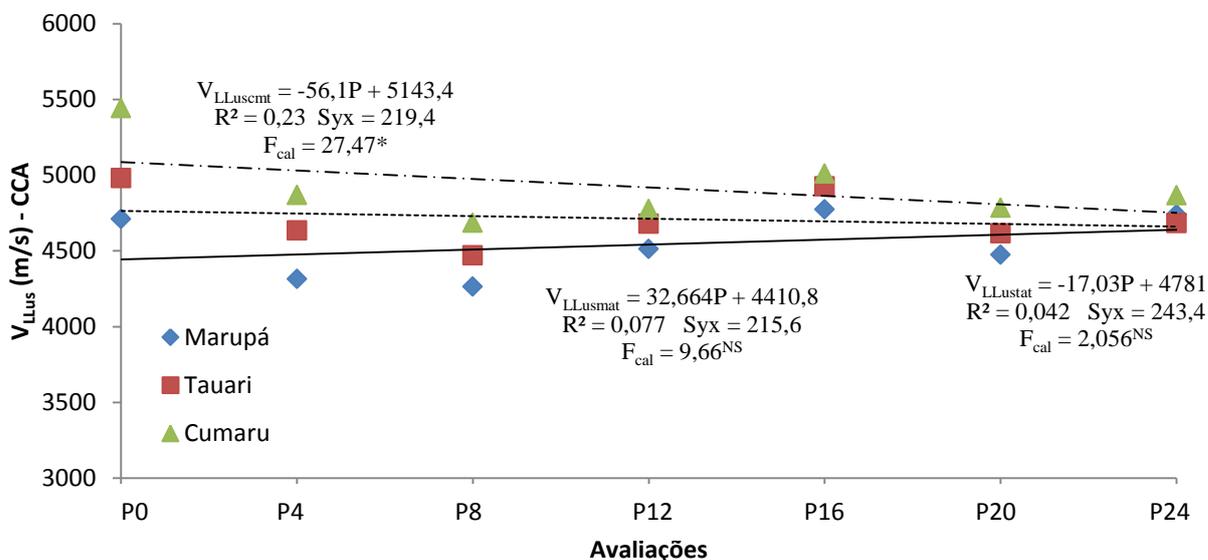
**Figura 14.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para ondas de tensão no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico. Onde: \*Significativo ao nível de 5% de significância.



**Figura 15.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para o ultrassom no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico. Onde: \*Significativo ao nível de 5% de significância.



**Figura 16.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para ondas de tensão no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C.  
Onde: \*Indica significância ao nível de 5% de significância. NS – não significativo.



**Figura 17.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação para o ultrassom no sentido longitudinal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C.  
Onde: \*Indica significância ao nível de 5% de significância. NS – não significativo.

Mediante a análise dos parâmetros estatísticos ( $R^2_{adj.}$ ,  $S_{yx}$  e F calculado) observa-se que os modelos estatísticos obtidos foram satisfatórios e significativos ao nível de 5% de probabilidade, exceto para  $V_{LLus}$  para as madeiras de marupá e tauari tratados. Para o método

de ondas de tensão, os melhores modelos apresentaram equações quadráticas, enquanto que para o ultrassom foram obtidos modelos lineares.

Com as equações obtidas para o método de ondas de tensão, estima-se que em 23, 33 e 80 meses as madeiras sem tratamento químico de marupá, tauari e cumaru, respectivamente, estarão completamente deterioradas, sem representantes no campo de apodrecimento. Pelo método ultrassônico, espera-se 36 e 66 meses de durabilidade natural para as madeiras de marupá e tauari. Pelos resultados estimados pelos modelos estatísticos nota-se que o método de ondas de tensão apresentou melhor previsibilidade, uma vez que poucas estacas de marupá ainda estão presentes no campo e em alto grau de deterioração.

Para as madeiras tratadas, todos os modelos obtidos pelo método de ondas de tensão foram significativos e, para o método ultrassônico, apenas o modelo gerado para a madeira de cumaru apresentou significância.

Mishiro (1996) não obteve relações consistentes entre a densidade aparente e a velocidade de propagação nos sentidos longitudinais e transversais, e dessa forma, observa-se que a densidade da madeira é sensivelmente afetada pelo teor de umidade, sendo este fator expressivo na rigidez do material (BUCUR, 2006). Todavia, pode-se associar tal resultado ainda como um período de adaptação das madeiras tratadas no campo, sendo necessárias avaliações sucessivas ao longo do tempo para a confirmação desse resultado. Entretanto, o resultado obtido pode estar relacionado ao efeito da umidade do solo, o qual entra em equilíbrio com a porção soterrada da madeira, diminuindo a velocidade de propagação no sentido longitudinal. A relação entre a velocidade de propagação no sentido longitudinal e transversal será discutida posteriormente.

Os resultados para a correlação entre  $V_{LLsw}$  e as variáveis climáticas não indicaram correlações significativas entre as propriedades estudadas (Tabelas 5 e 6). Para o método de ultrassom foram observadas correlações significativas positivas entre a radiação e a temperatura com a velocidade de propagação para madeira de marupá tratada, embora para as demais madeiras tratadas com CCA-C exista a mesma tendência, porém sem efeito estatístico significativo.

**Tabela 5.** Matriz de correlação entre a velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão e as variáveis climáticas.

	Precip.	Radiação Global	Temp.	UR	V <sub>LLma</sub>	V <sub>LLta</sub>	V <sub>LLcm</sub>	V <sub>LLmat</sub>	V <sub>LLtat</sub>	V <sub>LLcmt</sub>
Precipitação	1									
Radiação Global	-0,311	1								
Temp.	0,387	0,512	1							
UR	0,627	-0,874*	-0,271	1						
V <sub>LLma</sub>	0,139	-0,271	-0,190	0,086	1					
V <sub>LLta</sub>	0,019	-0,230	-0,257	-0,018	0,983**	1				
V <sub>LLcm</sub>	0,229	-0,493	-0,719	0,447	0,179	0,217	1			
V <sub>LLmat</sub>	0,056	0,371	0,083	-0,307	-0,508	-0,406	0,345	1		
V <sub>LLtat</sub>	0,212	-0,046	-0,231	0,128	-0,442	-0,361	0,657	0,869*	1	
V <sub>LLcmt</sub>	0,008	0,056	-0,276	-0,070	-0,409	-0,290	0,613	0,909**	0,969**	1

Onde: VL – velocidade de propagação no sentido longitudinal; MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

\*Correlação significativa ao nível de 5% (p<0,05). \*\* Correlação significativa ao nível de 1% (p<0,01).

**Tabela 6.** Matriz de correlação entre a velocidade de propagação pelo ultrassom e as variáveis climáticas.

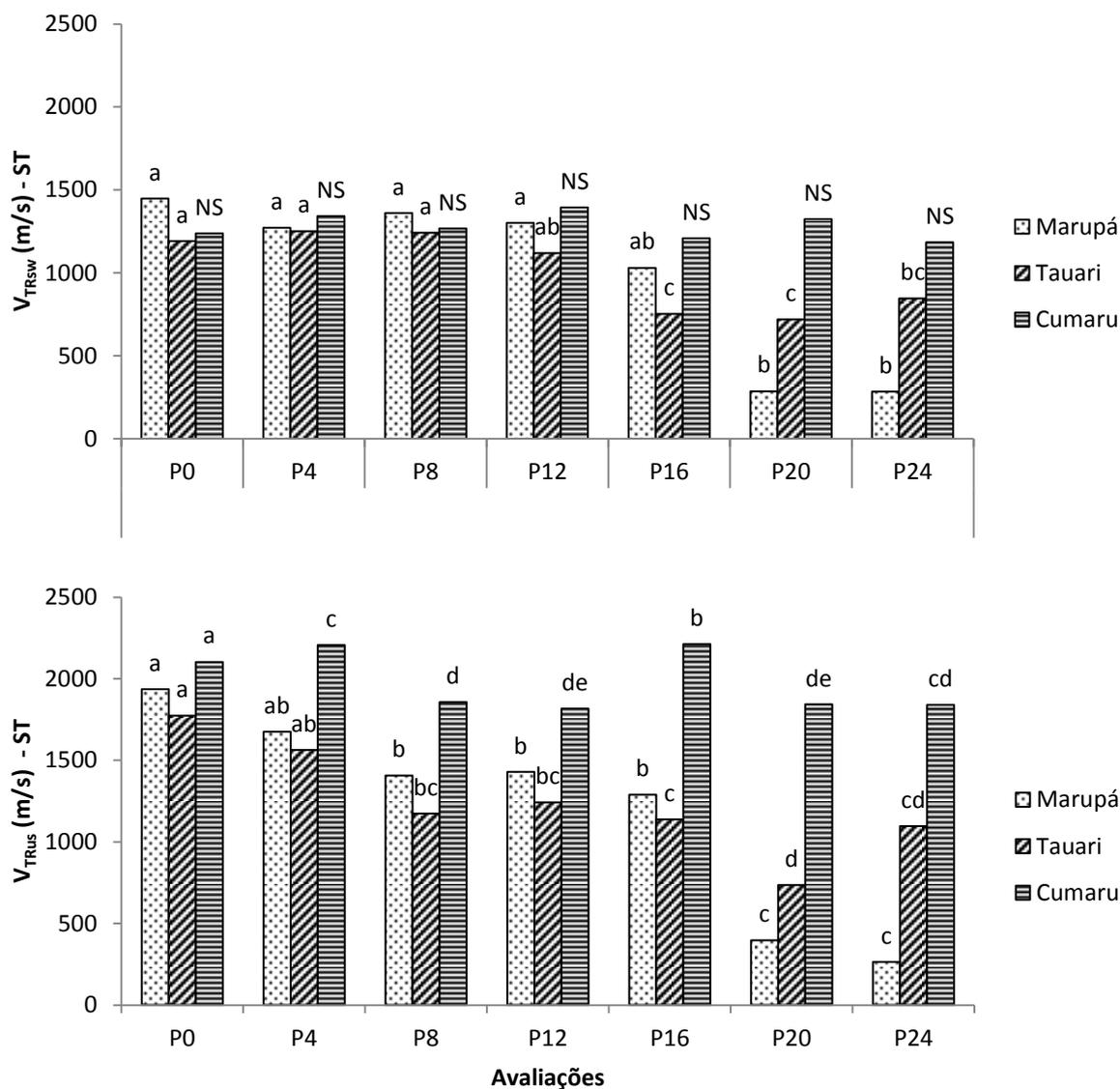
	Precip.	Radiação Global	Temp.	UR	V <sub>LLma</sub>	V <sub>LLta</sub>	V <sub>LLcm</sub>	V <sub>LLmat</sub>	V <sub>LLtat</sub>	V <sub>LLcmt</sub>
Precipitação	1									
Radiação Global	-0,311	1								
Temp.	0,387	0,512	1							
UR	0,627	-0,874*	-0,271	1						
V <sub>LLma</sub>	0,145	-0,141	-0,123	-0,009	1					
V <sub>LLta</sub>	-0,055	0,208	0,100	-0,355	0,921**	1				
V <sub>LLcm</sub>	0,032	0,714	0,630	-0,586	0,455	0,718	1			
V <sub>LLmat</sub>	0,161	0,811*	0,757*	-0,610	-0,205	0,045	0,575	1		
V <sub>LLtat</sub>	0,309	0,730	0,715	-0,517	0,311	0,520	0,872*	0,815*	1	
V <sub>LLcmt</sub>	0,031	0,734	0,660	-0,603	0,418	0,693	0,998**	0,604	0,883**	1

Onde: VL – velocidade de propagação no sentido longitudinal; MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

\*Correlação significativa ao nível de 5% (p<0,05). \*\* Correlação significativa ao nível de 1% (p<0,01).

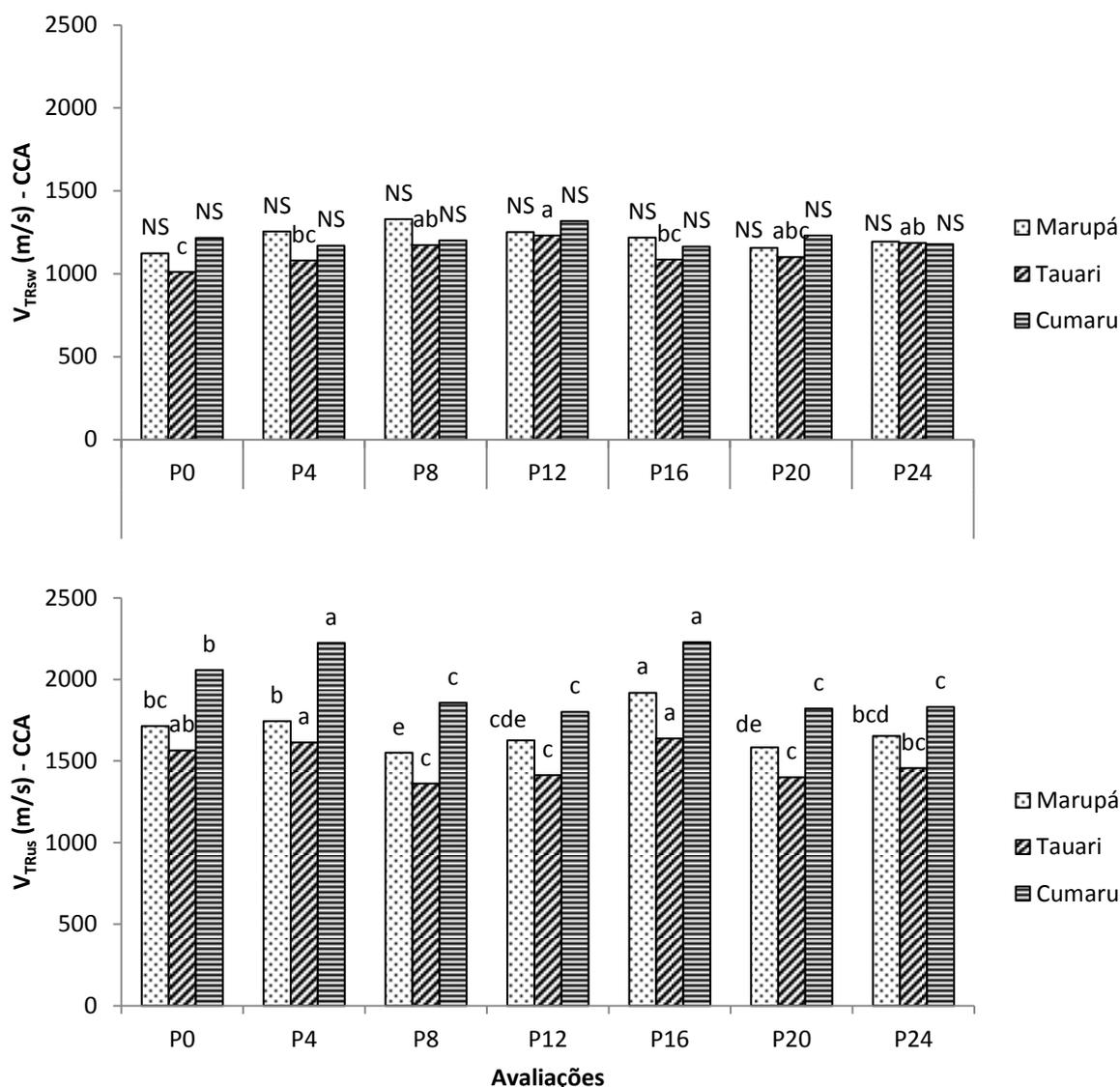
### 3.3.3 Velocidade de propagação no sentido transversal (V<sub>TR</sub>)

As Figuras 18 e 19 apresentam os resultados da velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras sem tratamento químico e tratadas com CCA-C para os métodos de avaliação não destrutiva de ondas de tensão e ultrassom, respectivamente.



**Figura 18.** Comparação do efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras sem tratamento químico.

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



**Figura 19.** Comparação do efeito do período de avaliação sobre a velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras tratadas com CCA-C.

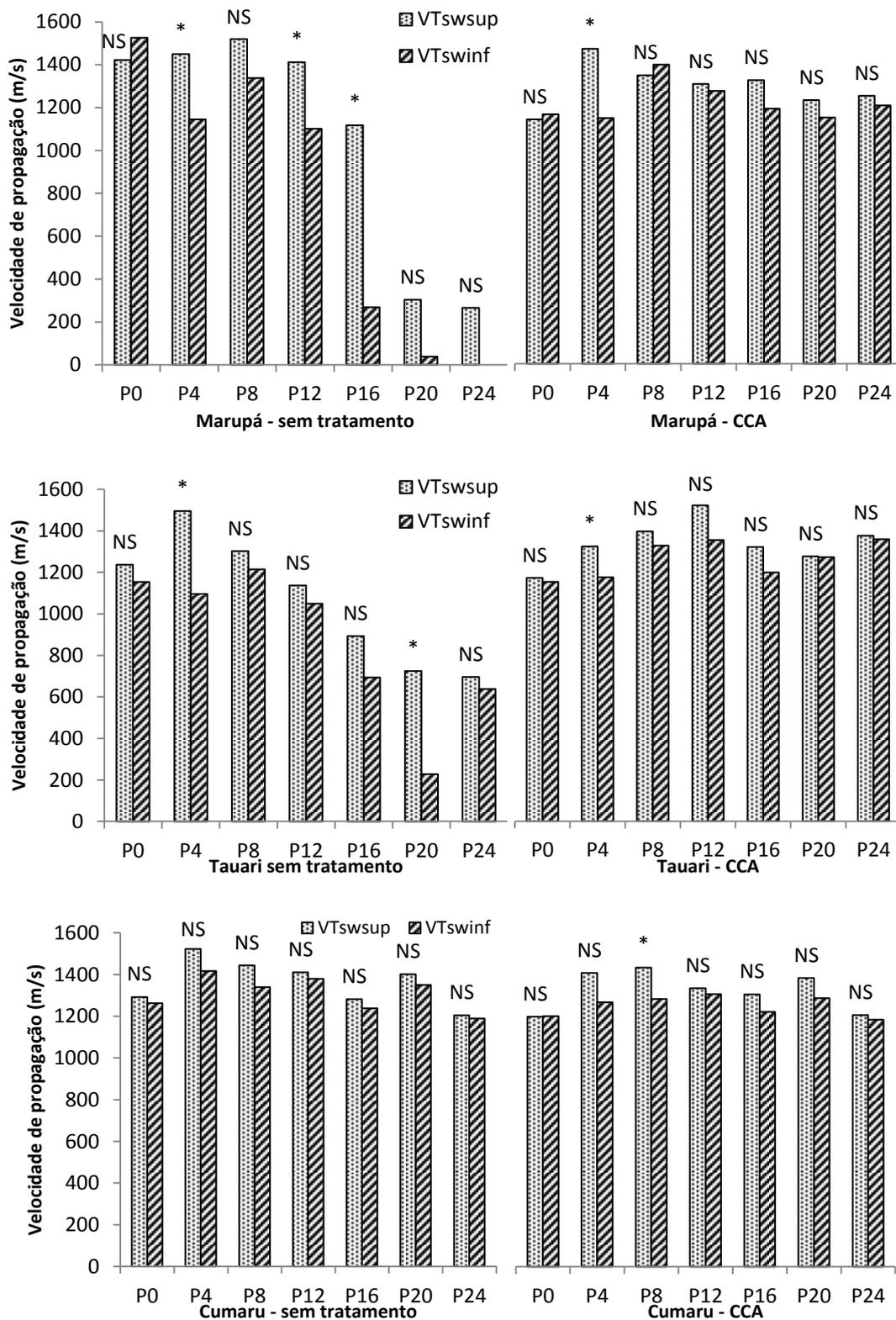
Nota: Colunas de mesma cor seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ( $p > 0,05$ ). NS – não significativo.

As madeiras sem tratamento apresentaram resultados semelhantes, tanto para a  $V_{TRsw}$  como para  $V_{TRus}$ . Para a madeira de cumaru o teste de médias não detectou diferenças significativas pelo método de ondas de tensão, enquanto que pelo método ultrassônico os períodos foram separados em cinco grupos. Para as madeiras de marupá e cumaru tratadas com CCA-C, não foram observadas diferenças significativas pelo método de ondas de tensão entre os períodos avaliados, apenas para a madeira de tauari. No método ultrassônico, todas as três espécies de madeiras apresentaram diferenças significativas nos períodos avaliados.

Essas diferenças entre os resultados observados pelos métodos empregados podem ser explicadas pelas diferenças na forma de emissão e recepção das ondas. Pelo método de ondas de tensão, a propagação da onda é induzida por meio do impacto gerado por uma fonte a qual inicia a contagem do tempo de passagem da onda até a sua chegada a um segundo transdutor. Assim, qualquer problema de alinhamento entre os transdutores poderá gerar diferenças entre as leituras realizadas no equipamento. O método exige que sejam realizadas diversas leituras em um mesmo ponto, e posteriormente, calculado um valor médio para a região analisada. Uma das principais dificuldades para esse método está relacionada à sensibilidade da propagação da onda em meios altamente deteriorados, aonde a taxa de atenuação é extremamente alta e o sinal não atinge o limite mínimo de leitura, mesmo sob alta amplificação (PELLERIN et al., 1985; WANG et al., 2004) e, de acordo com os autores, para valores acima de 80% de deterioração da madeira não é possível a propagação de ondas.

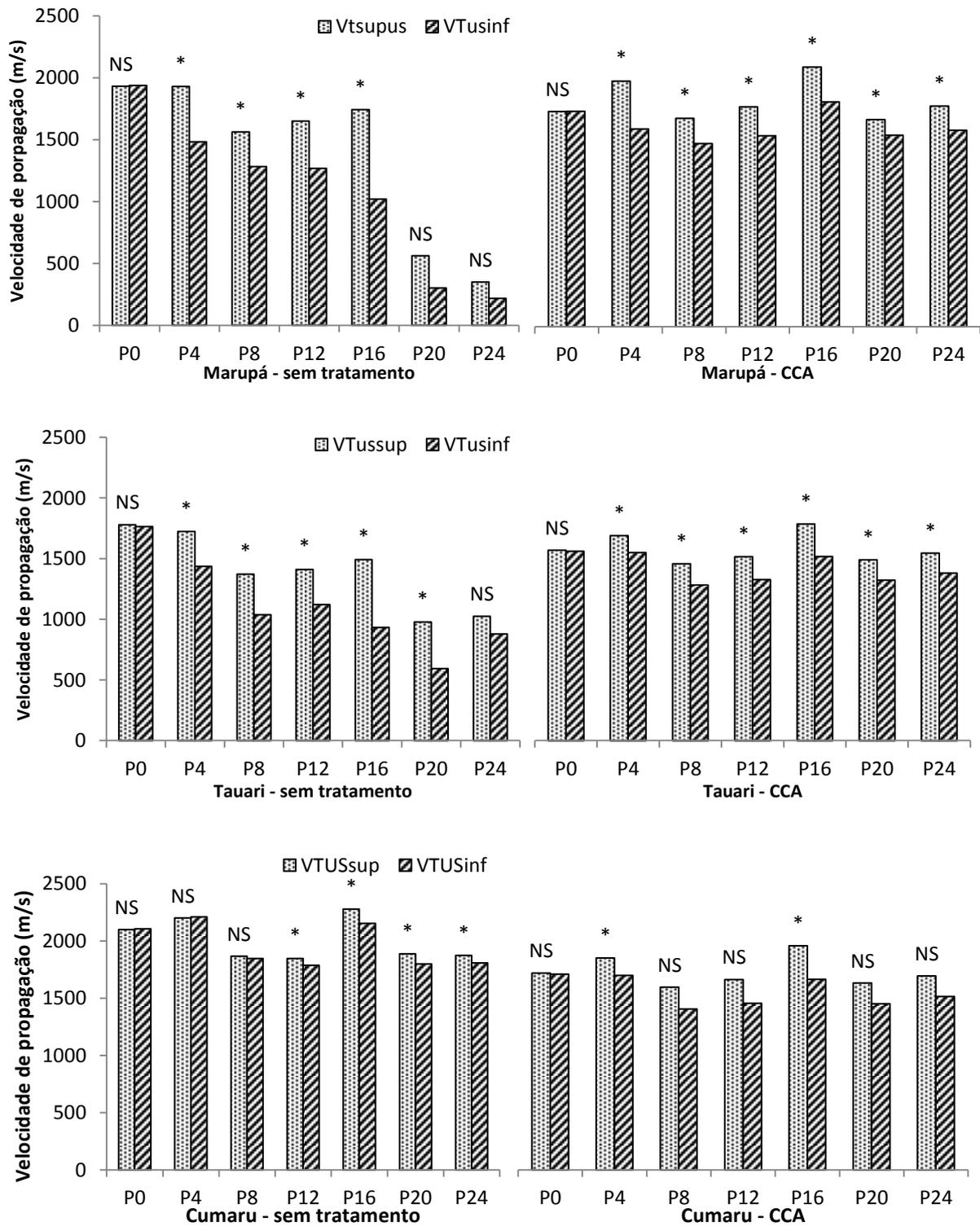
No método de ondas ultrassônicas, as principais variações entre as leituras ocorrem devido ao acoplamento entre os transdutores de emissão e recepção da onda, os quais devem estar perfeitamente alinhados. Após a emissão da onda ultrassônica, o valor do tempo de passagem estabiliza-se, sendo necessária apenas uma única leitura para a região analisada, não sendo necessário calcular um valor médio. Com o início do ataque de agentes deterioradores, ocorre uma alteração da superfície da madeira, podendo aparecer perfurações e amolecimento na região, dificultando o posicionamento dos transdutores.. Em regiões com alto nível de deterioração, ocorre o aumento da atenuação do sinal proporcionado pela reflexão da onda ultrassônica (BUCUR, 2006), diminuindo a resolução de leitura do aparelho.

Gonzalez et al. (2001) indicam que na direção radial, a continuidade do sinal é assegurada, principalmente, pelos raios lenhosos presentes em quantidades menores em relação às fibras, sendo assim os valores da velocidade radial são mais baixos que os valores da velocidade longitudinal. A direção tangencial é a mais desfavorável para a propagação das ondas ultrassônicas, pois o sinal não encontra nenhum substrato contínuo de propagação. A cada passagem de uma célula a outra, o sinal perde energia devido à própria parede celular. Para melhor entendimento do comportamento observado na propagação das ondas no sentido transversal, as Figuras 20 e 21 apresentam o resultado da análise da velocidade de propagação para as partes aérea e soterrada.



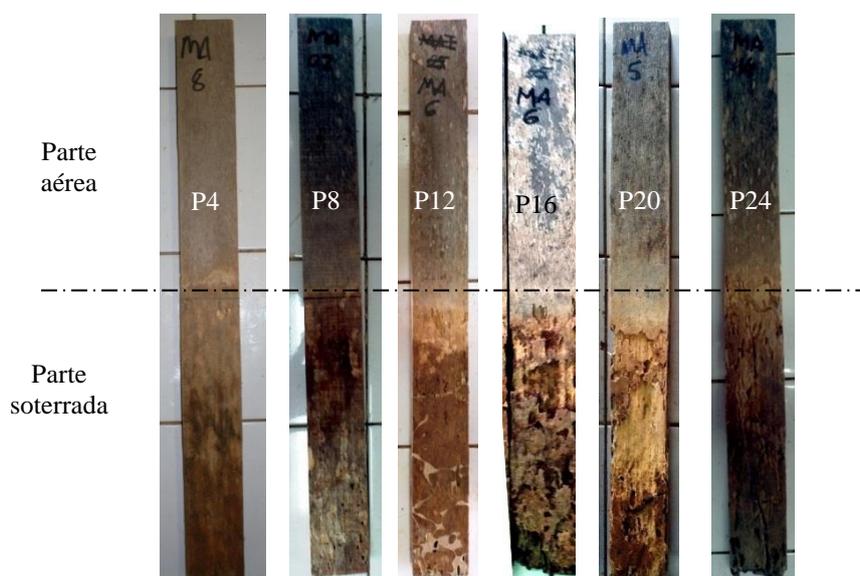
**Figura 20.** Comparação entre a velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão no sentido transversal nas posições superior e inferior de acordo com período de avaliação para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Onde: VTRswsup- velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ondas de tensão na porção superior; VTRswinf - velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ondas de tensão na porção soterrada; \*Significativo pela ANOVA ao nível de 5% ( $p < 0,05$ ). NS – não significativo.



**Figura 21.** Comparação entre a velocidade de propagação pelo método ultrassônico no sentido transversal nas posições superior e inferior de acordo com período de avaliação para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C. Onde: VTRussup- velocidade de propagação no sentido transversal pelo método ultrassônico na porção superior; VTRusinf - velocidade de propagação no sentido transversal pelo método ultrassônico na porção soterrada; \*Significativo pela ANOVA ao nível de 5% ( $p < 0,05$ ). NS – não significativo.

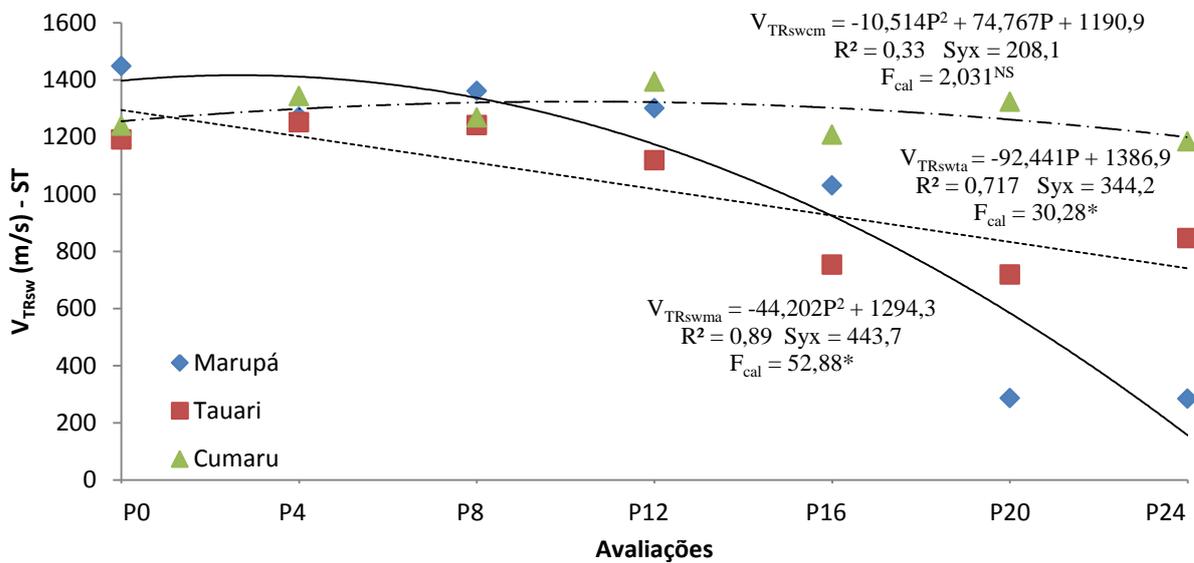
Observa-se que, de modo geral, a porção soterrada das estacas apresentou menor velocidade de propagação quando comparada com a parte aérea. Para as madeiras sem tratamento químico esse efeito foi devido à deterioração da madeira quando em contato com o solo, onde são observadas maiores taxas de deterioração devido ao equilíbrio da umidade da madeira em contato com o solo e a uma grande quantidade de microrganismos que colonizam a madeira nessa região (NICHOLAS, 1985). Assim, nessa região, a atividade biológica do solo deteriorou mais rapidamente os tecidos celulares das estacas sem tratamento, seja por ataque de fungo apodrecedores ou cupins, conforme observados para a madeira de marupá sem tratamento na Figura 22. O nível de deterioração na parte soterrada aumentou ao longo do tempo, impedindo a livre propagação das ondas nessa região. Dessa forma, o método de ondas de tensão não foi capaz de obter o tempo de passagem no período P24 para a madeira de marupá sem tratamento. Para o ultrassom foram observadas diferenças significativas entre as regiões analisadas após a instalação do campo, sendo este efeito proporcionado em função da umidade adquirida pelas madeiras em contato com o solo e pela parte aérea estar mais seca, o qual foi observado durante as inspeções no campo. Entretanto, a velocidade de propagação na parte aérea também foi influenciada pelos agentes deterioradores e pelo intemperismo natural, embora em menor intensidade quando comparado à parte soterrada.



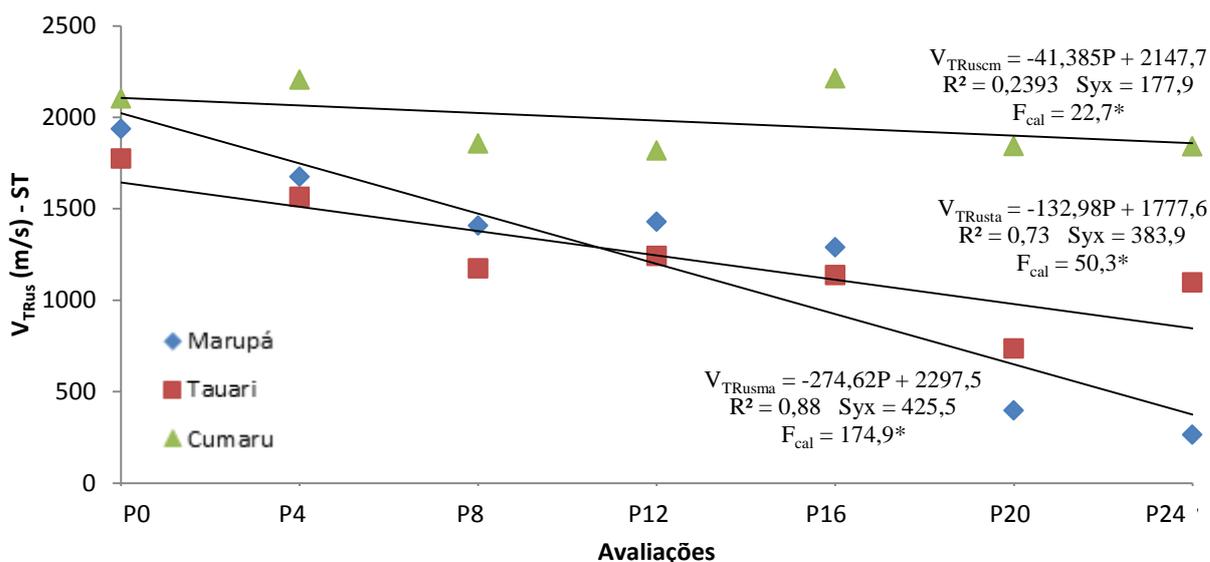
**Figura 22.** Efeito da deterioração causada por fungos apodrecedores e cupins na madeira de marupá sem tratamento químico ao longo do tempo.

Para as madeiras tratadas, o método de ondas de tensão apresentou poucas diferenças significativas, apenas em P4 para o marupá e o tauari e em P8 para o cumaru, com a parte aérea apresentando velocidade de propagação superior à parte soterrada. Para as ondas ultrassônicas, foram observadas diferenças significativas para o marupá e tauari após a instalação do campo de apodrecimento, porém com comportamentos semelhantes.

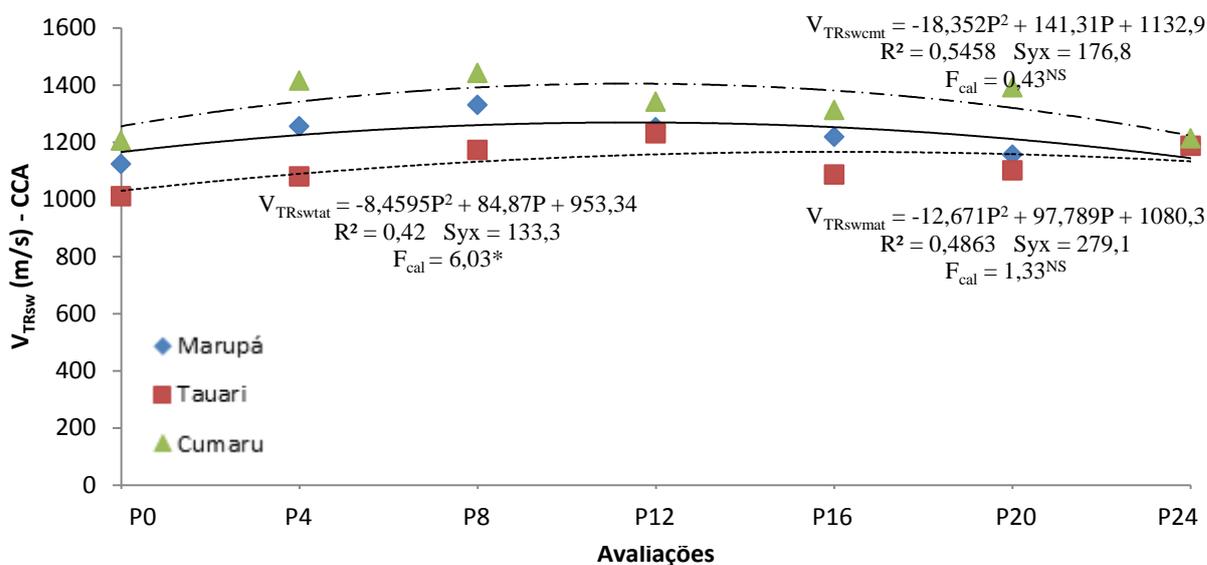
As Figuras 23 a 26 apresentam os modelos estatísticos de predição da velocidade de propagação no sentido transversal nas madeiras em função do período de avaliação do campo de apodrecimento. As Tabelas 34 e 35 do APÊNDICE I apresentam os resultados da análise de variância para as análises de regressões.



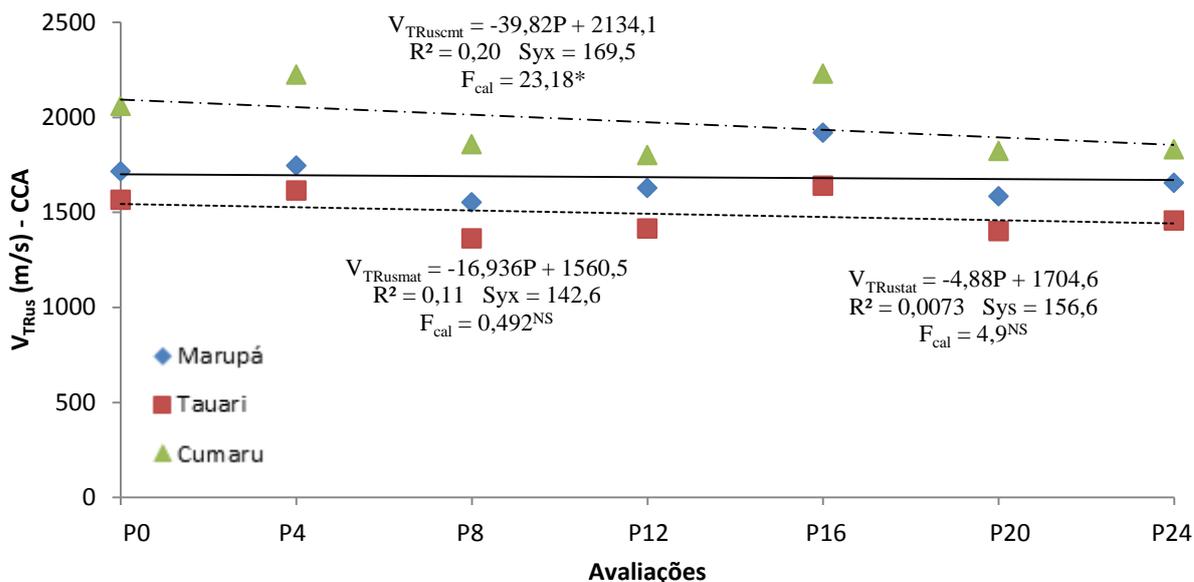
**Figura 23.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão no sentido transversal, em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico.



**Figura 24.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ultrassom no sentido transversal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras sem tratamento químico.



**Figura 25.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão no sentido transversal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C.



**Figura 26.** Modelos estatísticos gerados para a predição da velocidade de propagação pelo método de ultrassom no sentido transversal em função do tempo das amostras no campo de apodrecimento para madeiras tratadas com CCA-C.

De acordo com os modelos obtidos e a análise dos parâmetros estatísticos ( $R^2_{adj.}$ ,  $S_{yx}$  e  $F$  calculado) observa-se que os modelos foram satisfatórios e significativos ao nível de 5% de probabilidade para as madeiras sem tratamento, exceto para  $V_{TRsw}$  para a madeira de cumaru. Para as madeiras tratadas com CCA-C, apenas  $V_{TRsw}$  para o tauari e  $V_{TRus}$  para o cumaru apresentaram significância, porém baixa. O número de avaliações do campo pode ter sido insuficiente para a indicação das tendências das curvas obtidas, indicando assim, a necessidade de mais avaliações de campo.

Com as equações obtidas para o método de ondas de tensão, estima-se que em 24 e 60 meses as madeiras sem tratamento químico de marupá e tauari, respectivamente, estarão completamente deterioradas, sem representantes no campo de apodrecimento. Pelo método ultrassônico, espera-se 33, 54 e 260 meses de durabilidade natural para as madeiras de marupá, tauari e cumaru, sendo observado que os modelos estatísticos para ambos os métodos de avaliação não destrutiva apresentaram boa previsibilidade.

No método de ondas de tensão, foram observadas correlações significativas inversas entre  $V_{TR}$  e a radiação global, com valores superiores para a parte aérea das estacas (Tabela 7). Esse resultado pode ser explicado pela maior deterioração na porção aérea das estacas ocasionada pela ação do intemperismo natural, o qual agiu na superfície da madeira, provocando

rachaduras superficiais e microfissuras, que proporcionam a diminuição da velocidade de propagação e o escurecimento das superfícies em todas as madeiras. Resultado similar foi observado para o método ultrassônico, entretanto sem correlações significativas entre  $V_{TR}$  e as variáveis climáticas (Tabela 8).

**Tabela 7.** Matriz de correlação entre a velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ondas de tensão e as variáveis climáticas.

	Precip.	Radiação Global	Temp	UR	$V_{TRst}$	$V_{TRcca}$	$V_{TRSUPst}$	$V_{TRINFst}$	$V_{TRSUPcca}$	$V_{TRINFcca}$
Precipitação	1									
Radiação Global	-0,151	1								
Temp	0,566	0,376	1							
UR	0,606	-0,763	-0,020	1						
$V_{TRst}$	0,044	-0,838*	-0,448	0,390	1					
$V_{TRcca}$	-0,602	-0,224	-0,684	-0,387	0,600	1				
$V_{TRSUPst}$	0,200	-0,900*	-0,443	-0,586	0,966**	0,425	1			
$V_{TRINFst}$	-0,059	-0,873*	-0,530	-0,401	0,988**	0,627	0,954**	1		
$V_{TRSUPcca}$	0,024	-0,895*	-0,567	-0,512	0,960**	0,501	0,981**	0,968**	1	
$V_{TRINFcca}$	-0,644	-0,230	-0,744	-0,264	0,432	0,901*	0,289	0,505	0,368	1

Onde:  $V_{TRst}$  – velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras sem tratamento químico;  $V_{TRcca}$  – velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras tratadas com CCA-C;  $V_{TRSUP}$  – velocidade de propagação no sentido transversal na parte superior;  $V_{TRINF}$  – velocidade de propagação no sentido transversal na parte soterrada.

\*Correlação significativa ao nível de 5% ( $p < 0,05$ ).

\*\*Correlação significativa ao nível de 1% ( $p < 0,01$ ).

**Tabela 8.** Matriz de correlação entre a velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ultrassom e as variáveis climáticas.

	Precip.	Radiação Global	Temp	UR	$V_{Tst}$	$V_{Tcca}$	$V_{TSUPst}$	$V_{TINFst}$	$V_{TSUPcca}$	$V_{TINFcca}$
Precipitação	1									
Radiação Global	-0,151	1								
Temp	0,566	0,376	1							
UR	0,606	-0,763	-0,020	1						
$V_{Tst}$	-0,534	-0,765	-0,038	0,615	1					
$V_{Tcca}$	-0,646	-0,158	0,650	-0,527	0,600	1				
$V_{TSUPst}$	-0,659	-0,682	-0,021	-0,651	0,020	0,974**	1			
$V_{TINFst}$	-0,452	-0,809	-0,100	-0,608	-0,187	0,995**	0,539	1		
$V_{TSUPcca}$	-0,653	-0,139	0,642	-0,501	0,626	0,614	0,998**	0,700	1	
$V_{TINFcca}$	-0,630	-0,189	0,648	-0,558	0,557	0,611	0,997**	0,682	0,989**	1

Onde:  $V_{Tst}$  – velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras sem tratamento químico;  $V_{Tcca}$  – velocidade de propagação no sentido transversal para as madeiras tratadas com CCA-C;  $V_{TSUP}$  – velocidade de propagação no sentido transversal na parte superior;  $V_{TINF}$  – velocidade de propagação no sentido transversal na parte soterrada.

\*Correlação significativa ao nível de 5% ( $p < 0,05$ ).

\*\*Correlação significativa ao nível de 1% ( $p < 0,01$ ).

A Tabela 9 apresenta as correlações entre  $V_{LLsw}$  e  $V_{LLus}$  com a velocidade de propagação no sentido transversal na parte aérea e a parte soterrada. É possível observar que, de modo geral, as melhores correlações foram entre a  $V_{TR}$  na parte aérea com  $V_{LLsw}$  e  $V_{LLus}$ . Dessa forma, pode-se inferir que a velocidade de propagação no sentido longitudinal sofre um efeito retardante quando atinge a porção soterrada da estaca, diminuindo a sua propagação. Para as madeiras sem tratamento químico, esse fato ocorre pelo efeito da deterioração da porção soterrada das amostras, conforme discutido anteriormente. Para as amostras tratadas, a parte aérea apresentava-se claramente mais seca que a porção soterrada em todas as avaliações, sugerindo assim que um possível gradiente de umidade, ocasionado pela umidade do solo, afetou a velocidade de propagação no sentido longitudinal.

**Tabela 9.** Correlação de Pearson entre  $V_{LLsw}$  e  $V_{LLus}$  com a velocidade de propagação no sentido transversal na porção aérea e soterrada das amostras em campo.

		$V_{LLsw}$	$V_{LLus}$
MA	$V_{TR\ sup}$	0,858**	0,968**
	$V_{TR\ inf}$	0,699**	0,945**
TA	$V_{TR\ sup}$	0,766**	0,829**
	$V_{TR\ inf}$	0,650**	0,799**
CM	$V_{TR\ sup}$	0,243*	0,345**
	$V_{TR\ inf}$	0,230*	0,422**
MAT	$V_{TR\ sup}$	0,041	0,674**
	$V_{TR\ inf}$	0,043	0,688**
TAT	$V_{TR\ sup}$	0,253**	0,018
	$V_{TR\ inf}$	0,022	0,091
CMT	$V_{TR\ sup}$	0,017	0,447**
	$V_{TR\ inf}$	0,096	0,404**

Onde: MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.  $V_{LLsw}$  – velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ondas de tensão;  $V_{LLus}$  – velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ultrassom.  $V_{TRsup}$  – velocidade de propagação no sentido transversal na parte aérea;  $V_{TRinf}$  – velocidade de propagação no sentido transversal na parte soterrada.

\*Correlação significativa ao nível de 5% ( $p < 0,05$ ). \*\*Correlação significativa ao nível de 1% ( $p < 0,01$ ).

### 3.3.4 Relações entre a avaliação visual e os métodos não destrutivos

A Tabela 10 apresenta o resultado da correlação de Pearson entre as propriedades acústicas e as notas obtidas pela avaliação visual para as madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C. Observa-se que apenas as madeiras sem tratamento químico apresentaram correlações significativas entre os métodos de avaliação não destrutiva utilizados. Para as madeiras

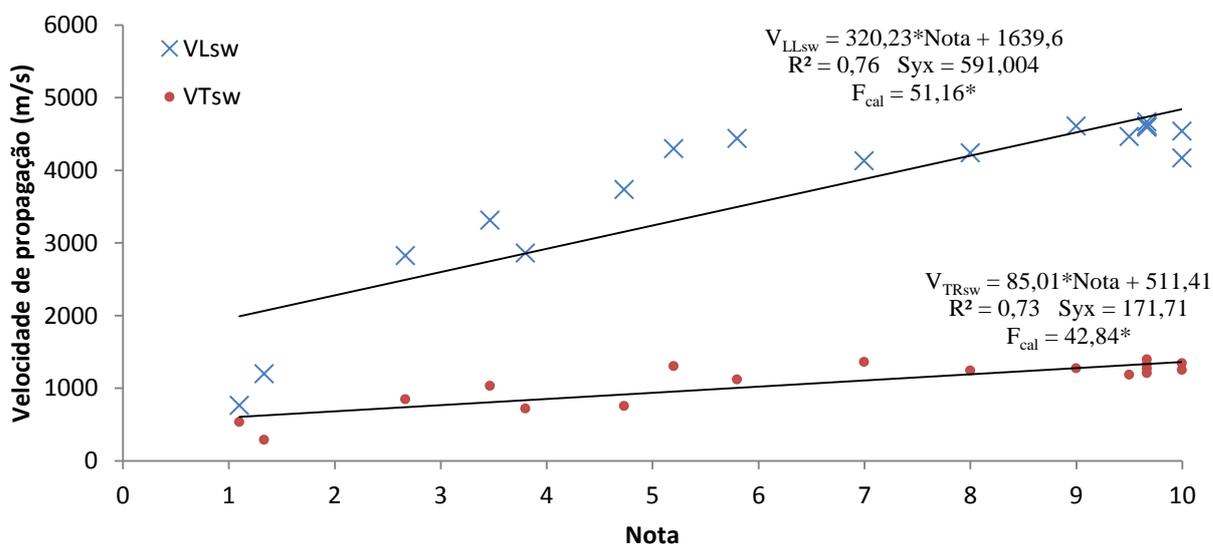
tratadas com CCA o resultado é devido à baixa variação dos dados obtidos e pelo curto período de avaliação para essas amostras de madeiras.

**Tabela 10.** Correlação de Pearson entre a velocidade de propagação no sentido longitudinal e transversal pelos métodos de onda de tensão e ultrassom para as madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C e as notas médias atribuídas pela avaliação visual.

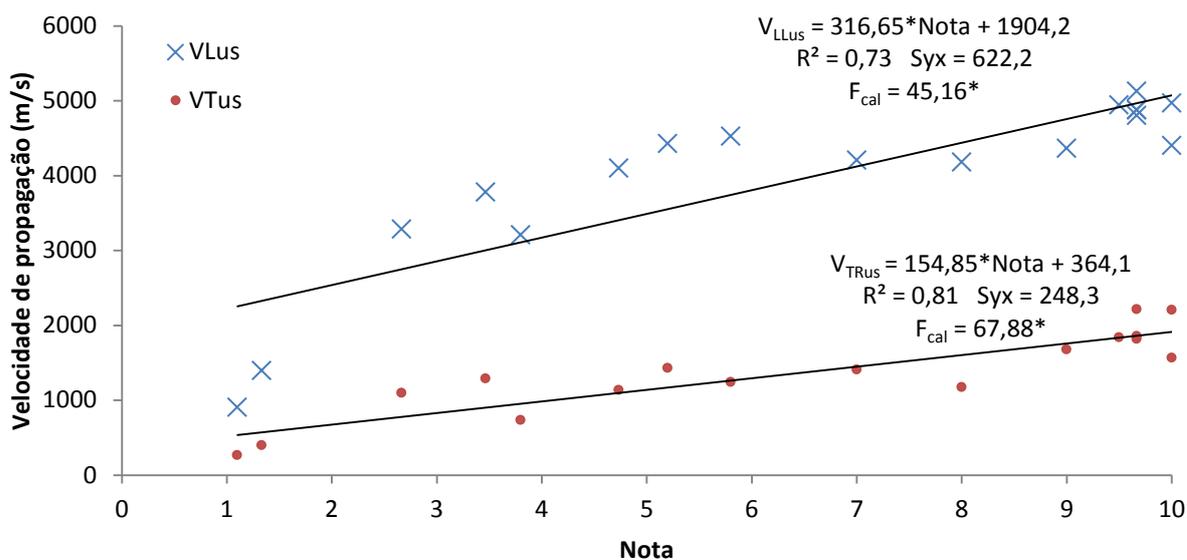
	$V_{LLsw}$	$V_{TRsw}$	$V_{LLus}$	$V_{TRus}$
Nota (ST)	0,873**	0,853**	0,859**	0,900**
Nota (CCA)	-0,380	0,177	-0,083	0,291

Onde:  $V_{LLsw}$  – velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ondas de tensão;  $V_{TRsw}$  – velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ondas de tensão;  $V_{LLus}$  – velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ultrassom;  $V_{TRus}$  – velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ultrassom. ST – madeiras sem tratamento; CCA – madeiras tratadas com CCA-C. \*\*Correlação significativa ao nível de 1% de significância ( $p < 0,01$ ).

A partir da boa relação entre o método de avaliação visual e os métodos não destrutivos, modelos estatísticos foram gerados para a predição da velocidade de propagação nos sentidos longitudinal e transversal para as madeiras sem tratamento químico em função da nota média atribuída às estacas pela avaliação visual (Figuras 27 e 28). A Tabela 49 do APÊNDICE I apresenta os resultados da análise de variância para as regressões entre a velocidade de propagação nos sentidos longitudinal e transversal e as notas atribuídas pela avaliação visual para as madeiras sem tratamento químico.



**Figura 27.** Modelos estatísticos de predição da velocidade de propagação nos sentidos longitudinal e transversal pelo método de ondas de tensão para as madeiras sem tratamento em função da nota média atribuída às estacas pela avaliação visual. \*Significativo ao nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ).



**Figura 28.** Modelos estatísticos de predição da velocidade de propagação nos sentidos longitudinal e transversal pelo método do ultrassom para as madeiras sem tratamento em função da nota média atribuída às estacas pela avaliação visual. \*Significativo ao nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ )

Os modelos estatísticos gerados foram considerados satisfatórios, sendo significativos ao nível de 5%. Verifica-se ainda que o comportamento da velocidade de propagação nos dois sentidos analisados e para os dois métodos não destrutivos estudados segue a mesma tendência da metodologia da análise visual, no qual madeiras sadias apresentam maiores pontuações e, diretamente, maiores velocidades de propagação.

Como pode ser verificado, a avaliação visual por atribuição de notas é um processo subjetivo, mesmo sendo executado por um mesmo técnico em todos os períodos de análise do experimento. Lopez e Milano (1986) citam que diversos autores utilizam, adicionalmente, um segundo parâmetro de avaliação, podendo ser um ensaio mecânico ou por perda de massa (MARCONDE et al., 2013; CORASSA et al., 2013). Assim, em função das correlações positivas e significativas obtida entre os métodos de avaliação visual e a velocidade de propagação, a Tabela 11 apresenta uma proposta de valores com base na velocidade de propagação e tempo de propagação nos sentidos longitudinais e transversais para os dois métodos de avaliação não destrutiva em conjunto com os índices de comportamento de sanidade sugeridos pelo método da IUFRO de avaliação de campos de apodrecimento.

**Tabela 11.** Valores de referência para o estado de sanidade das amostras de madeira instaladas em campo de apodrecimento pelo método proposto pela IUFRO e valores base de velocidade de propagação e tempo de propagação para os métodos de onda de tensão e ultrassônico.

Descrição	Nota	Ondas de Tensão				Ultrassom			
		$V_{LLsw}$ (m/s)	$V_{TRsw}$ (m/s)	TL ( $\mu s * m$ )	TT ( $\mu s * m$ )	$V_{LLus}$ (m/s)	$V_{TRus}$ (m/s)	TL ( $\mu s * m$ )	TT ( $\mu s * m$ )
Estaca sadia	10	4842	1362	207	734	5070	1913	197	523
Leve ataque	9	4522	1277	221	783	4753	1758	210	569
Ataque moderado	7	3881	1107	258	903	4120	1448	243	691
Ataque intenso	4	2921	851	342	1175	3170	984	315	1016
Destruído devido ao ataque	0	1640	511	610	1957	1904	364	525	2747

$V_{LLsw}$  – velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ondas de tensão;  $V_{TRsw}$  - velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ondas de tensão;  $V_{LLus}$  – velocidade de propagação no sentido longitudinal pelo método de ultrassom;  $V_{TRus}$  – velocidade de propagação no sentido transversal pelo método de ultrassom. TL – tempo de propagação no sentido longitudinal; TT – tempo de propagação no sentido transversal.

#### 4. CONCLUSÃO

O tratamento químico utilizando solução à base de arseniato de cobre cromatado (CCA-C) foi eficiente para proteção de amostras de madeiras de marupá e tauari pelo período de 24 meses de exposição em campo de apodrecimento em região de cerrado do Planalto Central. A impregnação das amostras de cumaru, apesar de superficial, também apresentou uma eficiente proteção sem indícios de deterioração.

O uso das técnicas de avaliação não destrutiva apresentou-se viável para o monitoramento do nível de deterioração das madeiras sem tratamento químico em campo de apodrecimento, tanto na propagação de ondas de tensão e ultrassônicas e nos sentidos longitudinal e transversal das amostras.

A porção aérea das estacas de madeira apresentou menor grau de deterioração quando comparada com a porção soterrada, sendo que esta última proporcionou a diminuição da propagação das ondas no sentido longitudinal.

Os modelos estatísticos gerados mostraram-se adequados para a predição da durabilidade das madeiras sem tratamento químico por ambos os métodos de avaliação não destrutiva.

As correlações significativas entre a velocidade de propagação para ambos os métodos de avaliação não destrutiva com a avaliação visual possibilitou a geração de uma proposta de valores base de velocidade de propagação como metodologia alternativa ao método proposto pela IUFRO.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPEL, J.S.L.; TERESCOVA, V.; RODRIGUES, V. C. B.; VARGAS, V. M. F. Aspectos toxicológicos do preservativo de madeira CCA (arseniato de cobre cromatado): revisão. **Revista Brasileira de Toxicologia**, v. 19, n.1. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6232 - penetração e retenção de preservativo em postes de madeira**. Rio de Janeiro, 1973. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9480 - peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.12 p.

CARNEIRO, J.S.; EMMERT, L.; STERNADT, G.H.; MENDES, J.C.; ALMEIDA, G.F. Decay susceptibility of Amazon wood species from Brazil against white rot and brown rot decay fungi. **Holzforschung**, v.63, p.767-772, 2009.

CARREIRA, M. R.; CHEUNG, A. B.; OLIVEIRA, G. R.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, C.; SALES, A.; CANDIAN, M. Classificação de peças estruturais de *Pinus* sp por ultrassom. **Anais...17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil: p. 8316-8328, 2006.

COSTA, A. F.; TELES, R. F. ; GONÇALVES, J. C. Stress wave and visual analysis of treated and non treated fence posts after 15 years in field test. In: IRG 41 Annual Meeting, 2010, Biarritz. **Proceedings...**, 2010. v. 1. p. 1-15.

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**, v.12, n.1, p. 07-14, 2005.

COSTA, M. A. **Avaliação de metodologias alternativas para caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. 83p.

DE GROOT, R. C.; ROSS, R. J.; NELSON, W. J. Non-destructive assessment of wood decay and termite attack in southern pine sapwood. **Wood Protection**, v. 3, n.2, p.25-34, 1998.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SANTOS, A. P. DOS; SOUZA, M. R.; CAMARGOS, J. A. A. Evaluation of stress wave and colorimetric variables to predict flexural properties of Brazilian tropical woods. In: 10th World Conference on Timber Engineering, 2008, Miyazaki. **Proceedings...**, 2008. v. 1. p. 1-8.

FIGUEROA, F. M. Z. **Avaliação de madeira de peroba-rosa por método não destrutivo utilizando emissão de ondas de ultrassom para peças estruturais do patrimônio histórico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil – Universidade de São Paulo, 2010. 101p.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. **Processos práticos para preservar a madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 49p.

GONÇALEZ, J.C.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v.7, n.2, p.081-092, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Madeiras da Amazônia, Características e utilização**. Amazônia Oriental, v. 3. Brasília: IBAMA, 1997. 141p.

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

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA / CENTRO DE PESQUISA DE PRODUTOS FLORESTAIS – INPA/CPPF. **Catálogo de madeiras da Amazônia: características tecnológicas; área da hidrelétrica de Balbina**. Manaus: 1991. 163 p.

JAYNE, B.A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**. v. 9, n. 11, p.413–416, 1959.

JESUS, M.A.; MORAES, J.W.; CARDIAS, M.F.C.; ABREU, R.L.S. Durabilidade natural de 46 espécies de madeira amazônicas em contato com o solo em ambiente florestal. **Scientia Forestalis**, v.54, p.81-92, 1998.

KABIR, M.F.; SCHMOLDT, D.L.; SCHAFER, M.E. Time domain ultrasonic signal characterization for defects in thin unsurfaced hardwood lumber. **Wood and fiber science**, v.34, n.1, p.165-182, 2002.

LEMASTER, R.L.; WILCOX, W.W. The use of acousto-ultrasonics to detect decay in wood-based products. In: Second International Conference on Acousto-Ultrasonics. Atlanta, GA., 1993. **Proceedings**... p. 188 – 190.

LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. 2 v.

LEPAGE, E. S. Método padrão sugerido pela IUFRO para ensaios de campo com estacas de madeira. **Preservação de Madeiras**, v. 1, n. 4, p. 205-216, dezembro 1970.

LOPEZ, G. A. C.; MILANO, S. Avaliação da durabilidade natural da madeira de produtos usados na sua proteção. In: LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. Vol II. São Paulo: IPT, 1986.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 418p.

MARCONDES, E.; RIBEIRO, M. A.; STANGERLIN, D. M.; SOUZA, A. P.; MELO, R. R.; GATTO, D. A. Resistência natural da madeira de duas espécies amazônicas em ensaios de deterioração de campo. **Scientia Plena**, v. 9, n. 6, p.1-9, 2013.

MARQUEZ, A.; CASTRO, F.; RAMIREZ, E.; GÓMEZ, L.; TORO, M. E.; VELÁSQUEZ, J. Resistencia natural de la madera de especies forestales latifoliadas en contacto con el suelo. **Revista COPÉRNICO** v.IV, n° 8. Janeiro-junho, 2008.

MARTINS, S. C. F.; ROSSIGNOLO, J. A. Ultrassom em Madeira: Diagnóstico de Conservação e Prevenção do Patrimônio Rural. **Revista Complexus**, ano 1, n.2, p. 128-142, setembro de 2010.

MATOSKI, S. L. S.; ROCHA, M. P. Influência do fotoperíodo no ataque de *Dinoderus minutus* Fabricius (Coleoptera: Bostrichidae) em lâminas torneadas de espécies tropicais. **Floresta**, v. 36, n. 3, 2006.

MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., Campos do Jordão, 1990. **Anais**... São Paulo: SBS/SBSF, 1990. v. 3, p. 695-699.

NICHOLAS, D. D. **Wood preservation and its prevention by preservatives treatments**. Suni: Syracuse University Press, 1985. v.1, 380p.

NOGUSHI, M.; NISHIMOTO K.; IMANURA, Y.; FUJII, Y.; OKAMURA, S.; MIYAUCHI, T. Detection of very early stages of decay in western hemlock wood using acoustic emission. **Forest Products Journal**, v.36, n.4, p.410-416, 1986.

PELLERIN, R. F.; ROSS, J. R. **Nondestructive evaluation of wood**. Madison: USDA, Forest Service, 2002.

ROCHA, M. P. **Biodegradação e preservação da madeira**. Curitiba: FUPEF, Universidade Federal do Paraná, 2000. 94 p.

ROSS, J. R.; PELLERIN, R. F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures**. 1ª. ed. Madison: USDA, v. 1, 1994.

ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F.; VOLNY, N.; SALSIG, W.; FALK, R.H. **Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools**. A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rpt. FPL–GTR–114. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 15p.

SANTANA, M.A.E.; OKINO, E.Y.A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. **Holzforschung**, v.61, n.5, p.469-477, 2007.

STANGERLIN, D. M. **Proposta de metodologia de ensaio acelerado de fungos apodrecedores em madeiras brasileiras**. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, 2012. 225p.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n°2, maio/agosto 2005. pg 291-299.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia rubra*)**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. 118p.

TRINCA, A. J. **Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 153p.

VIANEZ, B. F.; SALES NETA, C. Proposta de um método simples para interpretação dos resultados de tratabilidade de madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM PRESERVAÇÃO DE MADEIRAS, 3., 1989, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1989. 9 p.

WANG, S.C.; SUCHSLAND, O.; HART, J.H. Dynamic test for evaluating decay in wood. **Forest Products Journal**. v.30, n.7, p.35–37, 1990.

WILCOX, W. W. Detection of early decay stages of wood with ultrasonic pulse velocity. **Forest Products Journal**, v. 38, n. 5, p.68-73, 1988.

ZABEL, R. A.; MORRELL, F. L. **Wood microbiology**. Decay and its prevention. Califórnia: Academic Press, 1992. 476p.

## CAPÍTULO II

---

# AVALIAÇÃO DO EFEITO DO INTEMPERISMO ACELERADO EM TRÊS ESPÉCIES FLORESTAIS TROPICAIS UTILIZANDO TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS

### 1. INTRODUÇÃO

Intemperismo é o termo geral usado para definir a lenta deterioração dos materiais quando expostos ao tempo (WILLIAMS, 2005). O mecanismo de deterioração depende do tipo de material, mas a causa é uma combinação de fatores encontrados na natureza, tais como: umidade, irradiação solar, calor, frio, uso de produtos químicos no material e abrasão. Para Ishiguri et al. (2003) o intemperismo é considerado um problema para os consumidores de madeira porque, além de modificar a textura, a cor e o brilho, também afeta o desempenho dos produtos de proteção aplicados sobre esta.

A madeira quando submetida ao intemperismo sofre danos que são inicialmente observados pela variação da sua cor natural, podendo chegar a comprometer as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Nesse mesmo sentido, Silva et al. (2007) analisando o efeito do intemperismo sobre as cores da madeira afirmam que esta propriedade sofre com a ação do intemperismo sejam pela lixiviação ocasionada pela chuva ou ainda pela incidência da luz.

O processo de decomposição devido à radiação ultravioleta (UV) presente na luz do sol é considerado o mais prejudicial na superfície da madeira, pois dá início as modificações químicas da celulose, lignina e hemicelulose (FEIST e HON, 1984). Ainda de acordo com os autores, a ação da água causa a lixiviação tanto de extrativos como dos produtos fotodegradados expondo uma nova superfície à ação do tempo.

A radiação ultravioleta consegue penetrar até uma profundidade de 75 nm e a visível atinge cerca de 200 nm, dependendo da cor original da madeira. Apesar de a radiação visível penetrar mais profundamente, sua energia, menor do que 70 kcal/mol, é insuficiente para romper as ligações químicas em qualquer um dos constituintes da madeira (HON, 2001).

Com o intuito de reduzir custos e o tempo de duração dos testes em campo para a avaliação do intemperismo, foram desenvolvidos ensaios laboratoriais que simulam o intemperismo e permitem estimar e comparar a durabilidade natural das madeiras de diversas espécies (GONÇALEZ et al., 2010). O processo de incidência de raios ultravioletas (UV) pode ser simulado através de um reator fotoquímico. Esse, por sua vez, pode ser classificado quanto à fonte de radiação, sendo esta solar ou artificial. As fontes artificiais de radiação mais comum para tais reatores fotoquímicos são as lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa, média ou alta pressão, todas com emissão de luz UV. Essas lâmpadas, usualmente, são dispostas de forma que as amostras a serem expostas a radiação recebam a maior concentração de fótons possível (GONÇALEZ et al., 2010; NEUMANN et al., 2002).

A cor da madeira deriva da composição química das substâncias presentes no xilema, tais como: taninos, fenóis, flavonóides, estilbenos, quinonas e outros, as quais conferem cores diferenciadas ao lenho. A cor, entretanto, não é estável em uma peça de madeira, uma vez que ela tende a alterar-se com o passar do tempo, escurecendo devido à oxidação causada principalmente pela luz, que reage com os componentes químicos como, por exemplo, a lignina (HON, 2001).

A colorimetria descreve cada elemento da composição de uma cor, numericamente, por meio de aparelhos apropriados. Esta metodologia de análise de cor é usada em diferentes sistemas de produção fabril, como, por exemplo, indústrias têxteis, automotivas, químicas e plásticas.

Um dos sistemas mais utilizados para medição de cores é o CIEL\*a\*b\* (*Comission International de L'Eclairage* ou Comissão Internacional de Iluminantes) (CAMARGOS e GONÇALEZ, 2001). Segundo Camargos (1999) e Camargos e Gonçalves (2001) o sistema CIEL\*a\*b\* é um método que define a sensação da cor e baseia-se em três elementos: claridade ( $L^*$ ) ou luminosidade, tonalidade ou matiz ( $a^*$ ,  $b^*$  e  $h$ ) e saturação ( $C$ ) ou cromaticidade.

Camargos e Gonçalves (2001) mediram a coloração de 350 espécies de madeiras brasileiras baseado no sistema CIEL\*a\*b\* e reuniram-nas em 33 grupos de cores homogêneas com o objetivo de confeccionar uma tabela de cores para facilitar a comercialização. Para os autores, o padrão de coloração de uma madeira pode variar em tonalidades que vão desde o bege claro até o marrom escuro, quase preto. Dentro dessa variação existem madeiras amareladas, avermelhadas, arroxeadas e alaranjadas. Camargos (1999) indica ainda que as características

gerais (textura, grã e figura) e seus planos de orientação (transversal, longitudinal-tangencial e longitudinal-radial) também influenciam diretamente na cor da madeira.

A superfície de um material pode ser avaliada por meio da sua rugosidade. Por definição, a rugosidade compreende o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e entrâncias presentes em uma superfície (ABNT, 2002). Na madeira, estas irregularidades podem ser determinadas através da medição da altura, largura e forma dos picos e vales produzidos por operações de usinagem na madeira ou por suas características anatômicas.

Para Magoss (2008), a qualidade da superfície de uma peça de madeira depende de vários fatores que podem ser relacionados tanto com suas propriedades quanto como as condições de usinagem do maquinário. Entre as propriedades da madeira, podem ser citadas: a espécie, a densidade, o teor de umidade, bem como características anatômicas como o número, distribuição e diâmetro do lume das fibras, vasos e traqueídeos.

Os métodos de avaliação não destrutivos (END) podem ser definidos, segundo Bucur (2006); Pellerin e Ross (2002), como sendo aqueles que permitem a estimativa de propriedades da madeira e subprodutos, tais como: biológicas, físicas, químicas e mecânicas, sem alterar sua característica estrutural e, conseqüentemente, seu emprego final. A técnica de ondas de tensão é conhecida como um processo dinâmico que está internamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. A propagação de ondas de tensão apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo da estrutura interna da madeira, preservando as características físicas e mecânicas e seu uso final. O equipamento de ondas de tensão é capaz de detectar, de forma não destrutiva, a presença de ocos, deterioração causada por fungos ou insetos e rachaduras podendo atuar como referência quantitativa para a classificação de peças de madeira (ROSS et al., 1999).

O objetivo desse capítulo foi avaliar o efeito do intemperismo acelerado em três espécies florestais tropicais sem tratamento químico e tratadas com CCA-C utilizando técnicas de colorimetria, rugosidade e de ondas de tensão.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Material Lenhoso**

Para o estudo foram selecionadas três espécies de madeiras tropicais, sendo estas o marupá (*Simarouba amara* Aubl.), o tauari (*Couratari* sp.) e o cumarú (*Dipteryx odorata* (Aublet.) Willd.), representantes dos grupos de baixa, média e alta densidade, respectivamente, conforme classificação proposta por Melo et al. (1990).

De cada espécie foi adquirida uma prancha livre de preservante químico no mercado madeireiro do Distrito Federal (DF) com dimensões mínimas de 40 x 35 x 4000 mm (espessura x largura x comprimento) e mantidas no galpão de secagem natural no Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF/SFB) até o momento do processamento. As pranchas tiveram suas dimensões medidas e aferido o seu teor de umidade por meio de um medidor de umidade elétrico capacitivo em cinco posições ao longo do seu comprimento, com valores médios de 16%, 18% e 22% para as pranchas de marupá, tauari e cumaru, respectivamente. Todo o material foi identificado macroscopicamente por meio da comparação com o material depositado na Xiloteca (*Index Xylarium* FPBw) do LPF/SFB.

As pranchas foram desdobradas em amostras com formato retangular nas dimensões de 20 x 5 x 315 mm (largura x espessura x comprimento) retirados da porção do cerne e sem defeitos. Foram produzidas 30 amostras de cada espécie florestal, sendo 15 com orientação tangencial e 15 com orientação radial. Posteriormente, todo o material foi usinado com lixa para madeira grana 100 em uma máquina lixadeira de cinta automatizada para a padronização de suas superfícies.

### **2.2 Tratamento preservativo**

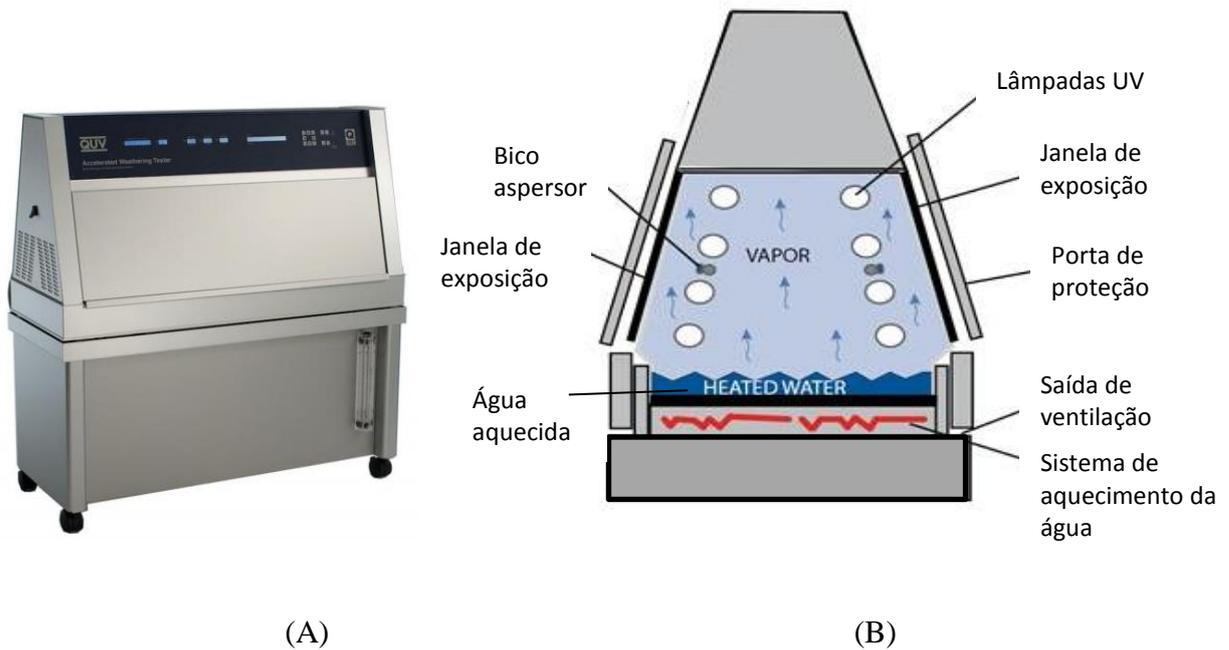
O tratamento preservativo foi realizado em autoclave industrial sob pressão com produto químico hidrossolúvel denominado arseniato de cobre cromatado tipo C (CCA-C) por meio do processo *Bethell* de célula cheia em uma usina de preservação de madeiras localizada no Distrito Federal. Uma amostra da solução utilizada no tratamento químico foi enviada à empresa Montana Química S.A e realizada a análise das propriedades do CCA. A concentração da solução foi de 1,37%, o pH igual a 2,3 e a concentração dos componentes cromo, cobre e arsênio com valores de 50,4%, 21,2% e 28,4%, respectivamente.

Para o processo de impregnação, 15 amostras de cada espécie foram dispostas aleatoriamente dentro do cilindro de tratamento (autoclave) em uma embalagem de malha de polipropileno. Desse montante, foram selecionadas oito amostras orientadas no sentido longitudinal tangencial e sete amostras orientadas no sentido longitudinal radial. Ao final do processo (*Bethell*), as amostras foram mantidas em ambiente aberto para a secagem natural e fixação dos ingredientes ativos por um período de 15 dias. Após esse período as amostras foram acondicionadas em uma câmara climática da marca Marconi modelo MA835/450UR com temperatura de 21°C e umidade controlada a 65%, sendo avaliadas periodicamente até atingirem massa constante.

### **2.3 Intemperismo acelerado**

O intemperismo acelerado foi realizado por meio de uma câmara de teste que simula os efeitos da deterioração causada pelo intemperismo natural na superfície de madeira e derivados de madeira. O equipamento utilizado foi o modelo QUV/Spray da empresa Q-Lab, o qual possui duas janelas de exposição dispostas em lados opostos. As amostras foram separadas em dois grupos, sendo um sem tratamento e as outras tratadas com CCA-C, posicionadas em janelas de exposição separadas a fim de evitar contaminação do material sem tratamento. Em cada grupo as amostras foram sorteadas e dispostas de forma aleatória ao longo da janela de exposição.

O efeito da radiação da luz solar foi simulado com o uso de lâmpadas fluorescentes UV de 340 nm, o orvalho e a chuva simulados com umidade de condensação e spray de água por meio de bicos aspersores. A Figura 1 apresenta o equipamento utilizado e o esquema técnico.



**Figura 1.** Câmara de intemperismo acelerado modelo QUV/Spray da empresa Q-Lab (A). Detalhes da abertura de exposição do equipamento (B).

As madeiras foram expostas em ciclos alternados de radiação, umidade e temperatura, controlados de acordo com o especificado na norma ASTM G 154/2006, APÊNDICE II, ciclo 7. O ciclo empregado foi escolhido por simular situações mais rigorosas de intemperismo, sendo indicado para materiais poliméricos. A Tabela 1 apresenta os parâmetros técnicos aplicados no ensaio.

**Tabela 1.** Parâmetros técnicos dos ciclos de intemperismo aplicados no ensaio de intemperismo acelerado nas madeiras tropicais.

Parâmetro	Característica
Lâmpada UVA 340	Comprimento de onda de aproximadamente 340 nm
Radiação	1,35 W/m <sup>2</sup> /nm
Exposição luminosa	8h na faixa do ultravioleta (UV) a 60 ± 3°C
Exposição à umidade	0,25h de umidade com spray (sem luz) em temperatura não controlada
Condensação	3,75 h de condensação a 50 ± 3°C.

As amostras foram avaliadas em períodos de exposição espaçados de 0, 240, 480, 720, 960 e 1200h de exposição no equipamento, com duração de 12 horas por ciclo, totalizando 100 ciclos em todo o ensaio.

Nos intervalos entre os períodos, as amostras foram retiradas do equipamento e tomadas as medidas de suas dimensões com o uso de um paquímetro digital com precisão de 0,01mm e aferidas as massas por meio de uma balança digital com precisão de 0,01g. Posteriormente, essas foram mantidas em câmara climática da marca Marconi modelo MA835/450UR com temperatura de 21°C e umidade controlada a 65% eletronicamente, por um período de 15 dias. Após esse período, as amostras foram ensaiadas conforme os métodos a seguir.

## 2.4 Colorimetria

Os parâmetros colorimétricos foram definidos utilizando a técnica de refletância difusa no intervalo visível do espectro eletromagnético. Para esse ensaio foi empregado um espectrofotocolorímetro *Color Eye - XTH - X-rite* acoplado a um microcomputador, com iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente. Em cada amostra de madeira foram determinadas 10 leituras na face exposta ao intemperismo acelerado.

A metodologia adotada para a determinação dos parâmetros colorimétricos foi o sistema CIEL\*a\*b\* 1976, conforme Camargos (1999). As propriedades colorimétricas determinadas foram L\* (claridade), coordenadas a\*, b\*, C (saturação) e h\* (ângulo de tinta). Os valores de todas as variáveis colorimétricas foram obtidos diretamente pelo *software* de aquisição de dados e posteriormente tabulados em planilha eletrônica.

A variação total da cor (Equação 1) foi determinada de acordo com a norma ASTM D 2244/2009.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^*} \quad (1)$$

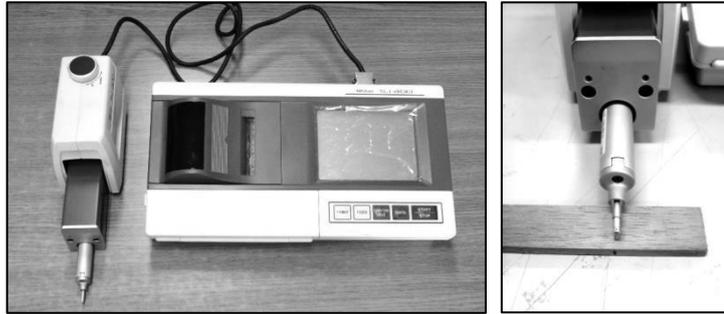
Em que:

$\Delta$  = variação entre uma leitura inicial e a leitura após o tratamento químico/período de intemperismo acelerado.

## 2.5 Rugosidade

A caracterização da superfície das amostras de madeira foi realizada por meio do equipamento rugosímetro *Surfetest SJ-401*, da marca Mitutoyo. O aparelho faz parte da classe dos equipamentos que utilizam o processo de apalpação para traçar os perfis das superfícies, o

qual é constituído por uma unidade de comando com uma impressora térmica integrada, uma unidade acionadora e um sensor. A Figura 2 apresenta o equipamento utilizado.



**Figura 2.** Equipamento rugosímetro *Surftest SJ-401* da empresa Mitutoyo.

A determinação dos parâmetros de rugosidade,  $R_a$  (média aritmética da rugosidade) e  $R_z$  (média das alturas no perfil de rugosidade) das superfícies foram realizadas conforme as especificações da norma JIS B 0601 (2001), com *cutt-off* de 0,8 mm e percurso de avaliação de 12,5 mm. Em cada amostra foram realizadas três medições no sentido perpendicular às fibras antes e após o tratamento químico e após os períodos de exposição do intemperismo acelerado.

Os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  foram determinados de acordo com as Equações 2 e 3, respectivamente, obtidos diretamente pelo equipamento utilizado (MITUTOYO CORPORATION, 2004).

$$R_a = 1/N \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (2)$$

$$R_z = 1/5 \sum_{i=1}^5 Y_{pi} + 1/5 \sum_{i=1}^5 Y_{vi} \quad (3)$$

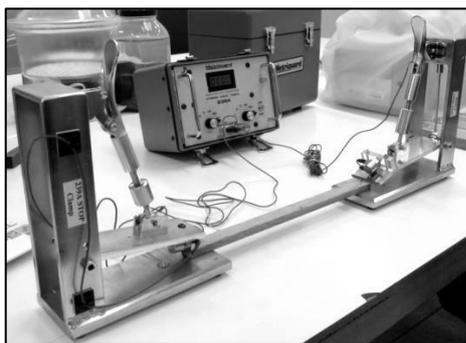
Em que:

- $R_a$  = média aritmética da rugosidade,  $\mu\text{m}$ ;
- $R_z$  = média da altura máxima,  $\mu\text{m}$ ;
- $Y_i$  = desvios do perfil,  $\mu\text{m}$ ;
- $Y_{pi}$  = picos mais altos,  $\mu\text{m}$ ;
- $Y_{vi}$  = vales mais profundos,  $\mu\text{m}$ ;
- $N$  = número de picos e vales do perfil.

## 2.6 Ondas de tensão

Para o método de onda de tensão foi utilizado o equipamento *Stress Wave Timer* modelo 239A da empresa Metriguard. O equipamento foi empregado com dois transdutores com

acelerômetros, sendo um o emissor em forma de pêndulo e o outro um receptor de face plana. Todo o sistema foi controlado por meio de um console onde todos os instrumentos foram conectados com cabos BNC e com controle de ganho de emissão e recepção do sinal com valor igual a 40. Neste ensaio, foi aplicada a propagação da onda no sentido longitudinal da amostra de madeira, com três repetições por amostra, sendo retirada a média simples como valor final do tempo de propagação. A Figura 3 ilustra o equipamento empregado e a forma de avaliação da amostra de madeira.



**Figura 3.** Equipamento *Stress Wave Timer* modelo 239A com sistema de emissão de ondas de tensão por meio de pêndulo.

Para o funcionamento do equipamento, um impacto é gerado pelo pêndulo iniciando a emissão do pulso de onda. O console começa a contagem do tempo de propagação após perceber o pulso da onda e o transforma em um sinal elétrico. A onda percorre toda a extensão da amostra até atingir o outro acelerômetro que então envia um sinal elétrico para o console que interrompe a contagem. O tempo decorrido é apresentado em uma tela de cristal líquido, no formato de microssegundos ( $\mu\text{s}$ ).

## 2.7 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*) versão 20.0 da empresa IBM. A influência do tratamento preservativo na massa, na densidade básica, nos parâmetros colorimétricos, na rugosidade e na velocidade de propagação, bem como o efeito do intemperismo acelerado foram avaliados por meio de uma Análise de Variância (ANOVA) seguida pelo teste de médias de Tukey ao nível de 5% de significância.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Propriedades físicas

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores obtidos para a massa e densidade aparente para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C para os períodos de avaliação do intemperismo acelerado. Observa-se que após o tratamento químico, as madeiras de marupá e tauari apresentaram aumento na massa e em suas densidades aparentes, enquanto que o cumaru apresentou valor inferior. Entretanto, o resultado obtido pela ANOVA não apresentou diferenças significativas para esse efeito em nenhuma das madeiras estudadas. Quanto ao intemperismo acelerado, foi observado um decréscimo dos valores das propriedades físicas ao longo do tempo de exposição. Porém, esse resultado não apresentou diferenças estatísticas significativas pela ANOVA entre os períodos de exposição. Dessa forma, embora o ciclo utilizado no intemperismo acelerado seja considerado o mais intenso de acordo com a norma ASTM G154/2006, esse não foi suficiente para causar modificações significativas nas propriedades físicas das madeiras utilizadas.

**Tabela 2.** Valores da massa (g) para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C de acordo com o período de exposição ao intemperismo acelerado.

Madeira	Período					
	0h	240h	480h	720h	960h	1200h
MA	12,84	12,85	12,39	12,22	12,10	11,88
	(1,13)	(1,20)	(1,10)	(1,10)	(1,10)	(1,11)
	9%	9%	9%	9%	9%	9%
MAT	13,67	13,52	13,30	13,03	12,99	13,02
	(0,87)	(0,86)	(0,85)	(0,80)	(0,82)	(0,82)
	6%	6%	6%	6%	6%	6%
TA	19,33	18,77	18,43	18,23	18,12	17,99
	(1,73)	(1,05)	(1,03)	(1,04)	(1,04)	(1,02)
	9%	6%	6%	6%	6%	6%
TAT	20,14	19,85	19,40	19,18	19,12	19,20
	(1,79)	(1,83)	(1,94)	(1,83)	(1,83)	(1,85)
	9%	9%	10%	10%	10%	10%
CM	31,14	30,38	29,97	29,82	29,74	29,65
	(1,89)	(1,77)	(1,76)	(1,73)	(1,73)	(1,74)
	6%	6%	6%	6%	6%	6%
CMT	30,87	30,08	29,86	29,59	29,53	29,60
	(1,71)	(1,62)	(1,58)	(1,60)	(1,60)	(1,61)
	6%	5%	5%	5%	5%	5%

Onde: valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão e em percentuais referem-se ao coeficiente de variação. MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

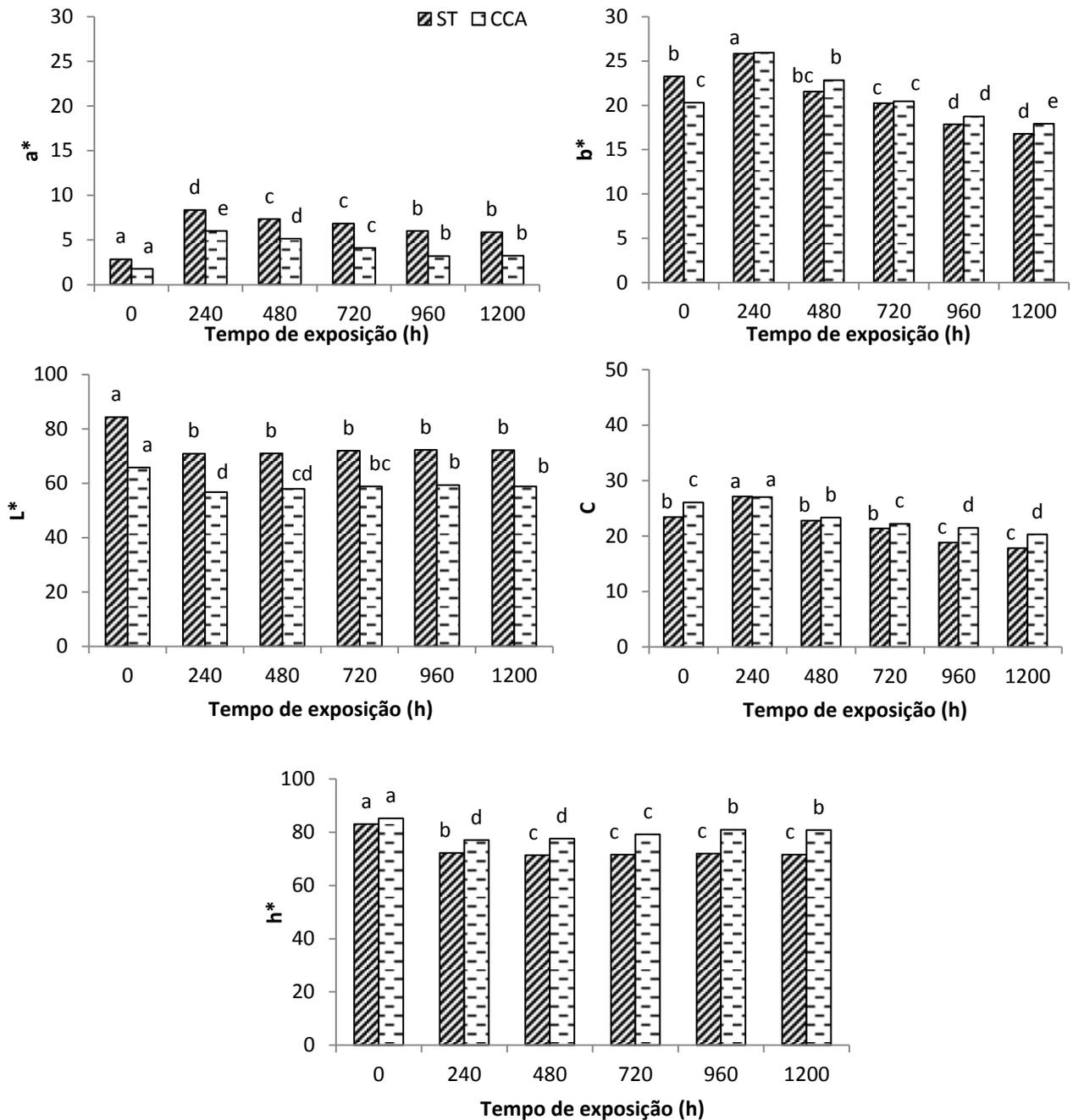
**Tabela 3.** Valores da densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C de acordo com o período de exposição ao intemperismo acelerado.

Madeira	Período					
	0h	240h	480h	720h	960h	1200h
MA	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,38
	(0,03)	(0,02)	(0,02)	(0,02)	(0,02)	(0,03)
	8%	5%	5%	5%	5%	7%
MAT	0,42	0,42	0,41	0,40	0,41	0,41
	(0,02)	(0,02)	(0,02)	(0,01)	(0,01)	(0,01)
	4%	4%	5%	3%	4%	3%
TA	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61	0,60
	(0,05)	(0,02)	(0,02)	(0,02)	(0,02)	(0,02)
	7%	3%	4%	4%	4%	3%
TAT	0,64	0,63	0,63	0,62	0,62	0,62
	(0,03)	(0,03)	(0,04)	(0,03)	(0,03)	(0,04)
	5%	5%	6%	5%	6%	6%
CM	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00
	(0,03)	(0,03)	(0,03)	(0,03)	(0,03)	(0,03)
	3%	3%	3%	3%	3%	3%
CMT	1,03	1,03	1,02	1,03	1,02	1,02
	(0,02)	(0,02)	(0,02)	(0,03)	(0,02)	(0,03)
	2%	2%	2%	3%	2%	2%

Onde: valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Valores em percentuais referem-se ao coeficiente de variação. MA – marupá sem tratamento; MAT – marupá tratado com CCA-C; TA – tauari sem tratamento; TAT – tauari tratado com CCA-C; CM – cumaru sem tratamento; CMT – cumaru tratado com CCA-C.

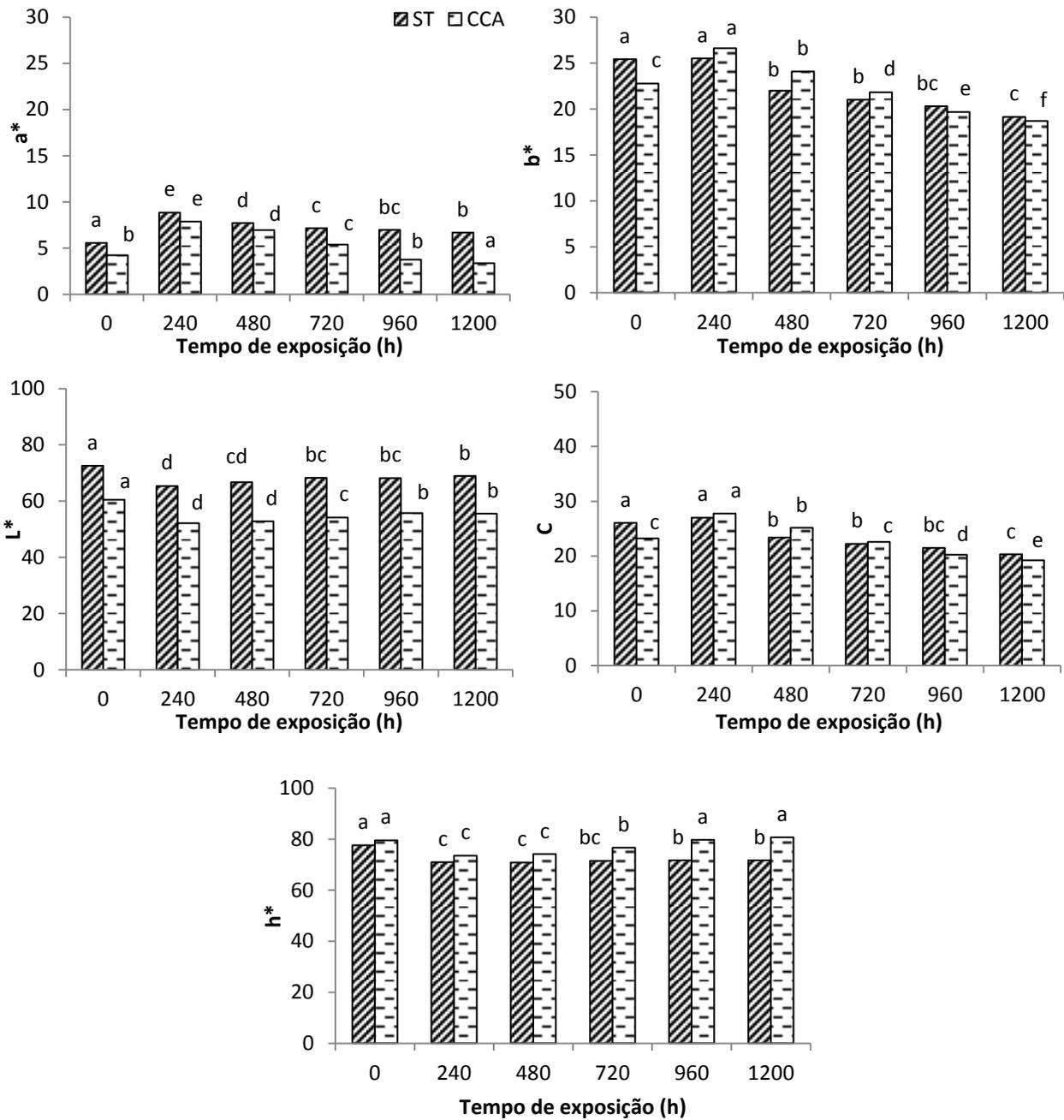
### 3.1 Colorimetria

As Figuras 4 a 6 apresentam os valores dos parâmetros colorimétricos para as madeiras estudadas sem tratamento e tratadas com CCA-C para cada período de intemperismo acelerado. Os resultados da ANOVA e do teste de médias indicaram diferenças significativas das propriedades colorimétricas entre as madeiras sem tratamento químico e tratadas com CCA-C, bem como entre os ciclos de intemperismo acelerado (Tabelas 1 a 15, APÊNDICE III). Dessa forma, as Tabelas 16 a 57 do APÊNDICE II apresentam os resultados da análise estatística descritiva, da ANOVA e do teste de Tukey das variáveis colorimétricas para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C em cada período de exposição ao intemperismo acelerado.



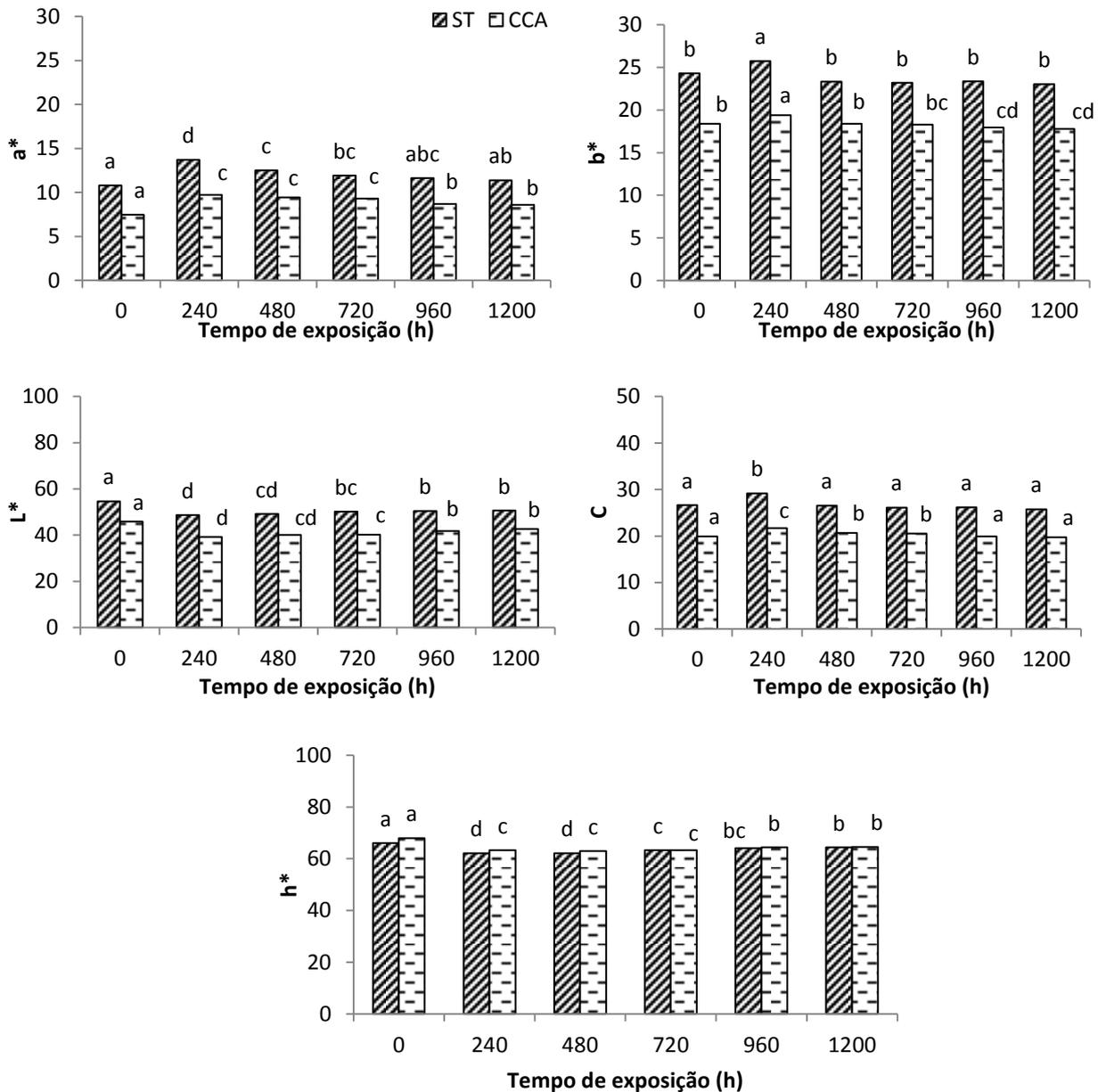
**Figura 4.** Valores das coordenadas cromáticas ( $a^*$  e  $b^*$ ), luminosidade ( $L^*$ ) saturação ( $C$ ) e ângulo de tinta ( $h^*$ ) de acordo com o tempo de exposição ao intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).

Onde: colunas com mesmo preenchimento seguidas pela mesma letra minúscula não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade ( $p > 0,05$ ).



**Figura 5.** Valores das coordenadas cromáticas ( $a^*$  e  $b^*$ ), luminosidade ( $L^*$ ) saturação ( $C$ ) e ângulo de tinta ( $h^*$ ) de acordo com o tempo de exposição ao intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).

Onde: colunas com mesmo preenchimento seguidas pela mesma letra minúscula não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade ( $p > 0,05$ ).



**Figura 6.** Valores das coordenadas cromáticas ( $a^*$  e  $b^*$ ), luminosidade ( $L^*$ ) saturação (C) e ângulo de tinta ( $h^*$ ) de acordo com o tempo de exposição ao intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).

Onde: colunas com mesmo preenchimento seguidas pela mesma letra minúscula não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade ( $p > 0,05$ ).

As madeiras tratadas com CCA-C apresentaram uma redução estatisticamente significativa para os parâmetros  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  e C quando comparadas com as madeiras sem tratamento químico (período 0h). O tratamento químico proporcionou a diminuição dos valores nas coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$  e  $L^*$  ocasionando o escurecimento das superfícies das madeiras. Essa queda da pigmentação na coordenada vermelho-verde foi proporcionada pela fixação do cobre na parede celular, principalmente na camada S1 (LEPAGE, 1986), o qual comumente resulta na coloração verde, característico do preservante CCA.

Com a exposição da madeira ao intemperismo acelerado, um notável aumento das coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  foram observados após as primeiras 240 horas. Após esse período, o eixo amarelo-azul ( $b^*$ ) apresentou a diminuição do pigmento amarelo ficando ao final do último ciclo de intemperismo, abaixo do valor para a madeira sem exposição, enquanto que o eixo vermelho-verde ( $a^*$ ) apresentou comportamento semelhante, porém com a tendência à estabilização após 960 horas de exposição, com exceção para a madeira de cumaru. Este comportamento foi mais intenso para as madeiras de marupá e tauari, as quais evidentemente perderam sua principal característica colorimétrica, a superfície amarelada. O efeito do intemperismo na luminosidade ( $L^*$ ) foi notado por meio de uma queda após as primeiras 240h de exposição com posterior incremento positivo. Resultado similar foi obtido por Nzokou et al. (2011), os quais trabalharam com as madeiras de ash (*Fraxinus americana*), red oak (*Quercus rubra*) e hard maple (*Acer nigrum*) com intemperismo acelerado em ciclos de radiação e spray de água, porém com intervalos de 0, 24, 120, 200, 450 e 1000 h de exposição, sendo observado a tendência de estabilização colorimétrica após 450 horas de exposição.

Para o parâmetro C, que representa a saturação da cor da madeira, o tratamento químico alterou a cromaticidade das madeiras, ocorrendo um aumento dessa propriedade para o marupá e a diminuição para o tauari e cumaru. Esse fato está relacionando à alteração dos valores das coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  juntamente com a diminuição do  $L^*$ , conforme observados anteriormente. Durante o intemperismo acelerado, a cromaticidade apresentou comportamento semelhante ao observado para o eixo amarelo-azul, sendo esse um indicativo da importância do pigmento amarelo na formação e alteração das madeiras, sendo estas tratadas ou não com CCA-C. O marupá e tauari apresentaram alterações importantes nessa propriedade quando comparados os valores sem exposição e após 1200 horas de intemperismo acelerado, indicando uma perda significativa da saturação colorimétrica. Para a madeira de cumaru, esse parâmetro alterou-se somente no primeiro ciclo de 240 horas, não apresentando diferenças significativas nas demais avaliações.

O tratamento químico aumentou o ângulo de tinta ( $h^*$ ), ocasionado principalmente pela diminuição do pigmento vermelho das madeiras, em função da fixação do cobre, o que confere o aumento da pigmentação ao eixo verde. Após o primeiro ciclo de intemperismo acelerado ocorreu uma queda no valor dessa propriedade devido ao incremento na coordenada  $a^*$ . Porém, após esse período foi possível observar o aumento do valor dessa propriedade para

as madeiras tratadas com CCA-C, indicando que mesmo com a alteração dos pigmentos colorimétrico, ocorre a tendência ao retorno da coloração inicial. Para as madeiras sem tratamento químico esse parâmetro não se alterou após o período de 240 horas de exposição ao intemperismo acelerado.

A Tabela 4 apresenta a variação dos valores dos parâmetros colorimétricos  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  e  $\Delta E$  durante a exposição ao intemperismo acelerado para todas as madeiras estudadas sem tratamento químico e tratadas com CCA-C, bem como a classificação da variação total da cor proposta por Cui et al. (2004).

**Tabela 3.** Variação dos parâmetros colorimétricos das madeiras de marupá, tauari e cumaru durante a exposição ao intemperismo acelerado juntamente com a classificação da variação total da cor.

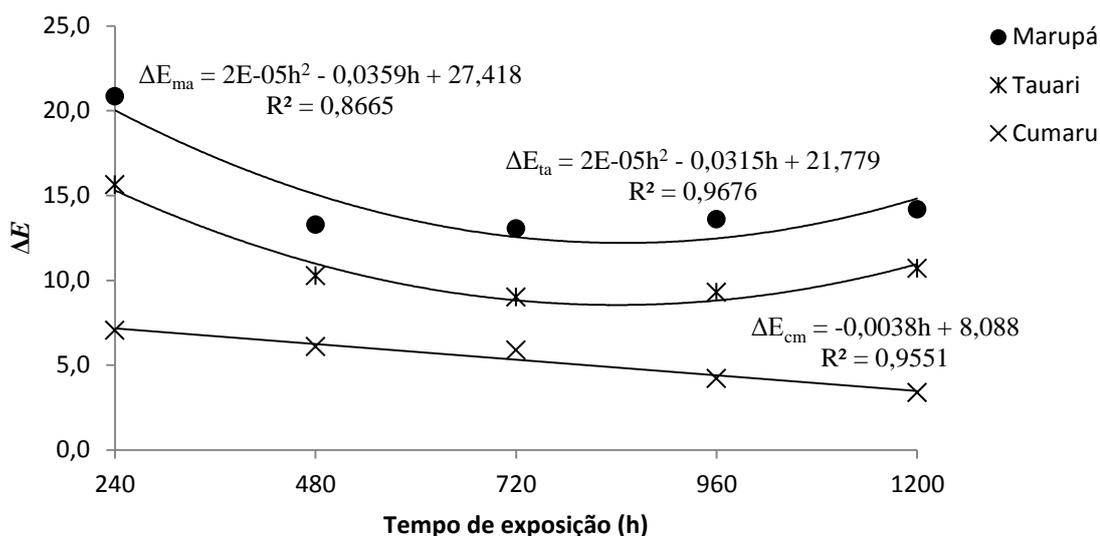
Madeira	Tratamento	Período	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E$	Classificação <sup>+</sup>
Marupá	ST	240h	-9,1	4,3	5,6	20,8	MA
		480h	-7,9	3,4	2,5	13,3	MA
		720h	-6,9	2,3	0,1	13,1	MA
		960h	-6,4	1,4	-1,6	13,6	MA
		1200h	-7,0	1,5	-2,4	14,2	MA
	CCA	240h	-13,4	5,5	2,6	14,7	MA
		480h	-13,3	4,5	-1,7	14,1	MA
		720h	-12,3	4,0	-3,0	13,3	MA
		960h	-12,0	3,2	-5,4	13,6	MA
		1200h	-12,1	3,0	-6,5	14,1	MA
Tauari	ST	240h	-8,4	3,7	3,8	15,6	MA
		480h	-7,7	2,7	1,3	10,3	MA
		720h	-6,3	1,2	-1,0	9,0	MA
		960h	-4,7	-0,4	-3,1	9,3	MA
		1200h	-4,9	-0,8	-4,1	10,7	MA
	CCA	240h	-7,2	3,3	0,1	7,9	MA
		480h	-5,9	2,1	-3,4	7,1	MA
		720h	-4,3	1,6	-4,4	6,4	MA
		960h	-4,4	1,4	-5,1	6,9	MA
		1200h	-3,7	1,1	-6,3	7,4	MA
Cumaru	ST	240h	-6,6	2,3	1,0	7,0	MA
		480h	-5,8	2,0	-0,1	6,1	MA
		720h	-5,6	1,8	-0,1	5,9	A
		960h	-4,0	1,2	-0,5	4,2	A
		1200h	-3,1	1,1	-0,7	3,4	A
	CCA	240h	-5,9	2,9	1,4	6,7	MA
		480h	-5,4	1,7	-1,0	5,8	A
		720h	-4,4	1,1	-1,1	4,7	A
		960h	-4,1	0,8	-0,9	4,3	A
		1200h	-3,9	0,6	-1,3	4,2	A

Onde: ST – refere-se a madeira sem tratamento químico e CCA refere-se a madeira tratada com CCA-C. A- apreciável; MA – muito apreciável. <sup>+</sup>Fonte: Cui et al. (2004).

A partir dos resultados obtidos é possível observar que o escurecimento da superfície de todas as madeiras, sendo estas tratadas ou não quimicamente, está associado a maior contribuição dos parâmetros  $\Delta L^*$  e  $\Delta b^*$ . Esses dois parâmetros apresentaram maiores valores negativos ao longo do período de exposição ao intemperismo acelerado, indicando a diminuição da intensidade do padrão colorimétrico das madeiras. Analisando o  $\Delta L^*$  pode-se notar ainda que, embora o parâmetro tenha apresentado resultado de escurecimento após o intemperismo, observou-se a tendência do aumento da luminosidade com o passar do tempo, sugerindo uma renovação da superfície das madeiras em função da lixiviação ocasionada pela água entre os ciclos. Esse resultado ocorre uma vez que a celulose não é dissolúvel em água ficando esta na superfície da madeira, enquanto que a lignina deteriorada é solubilizada e lixiviada.

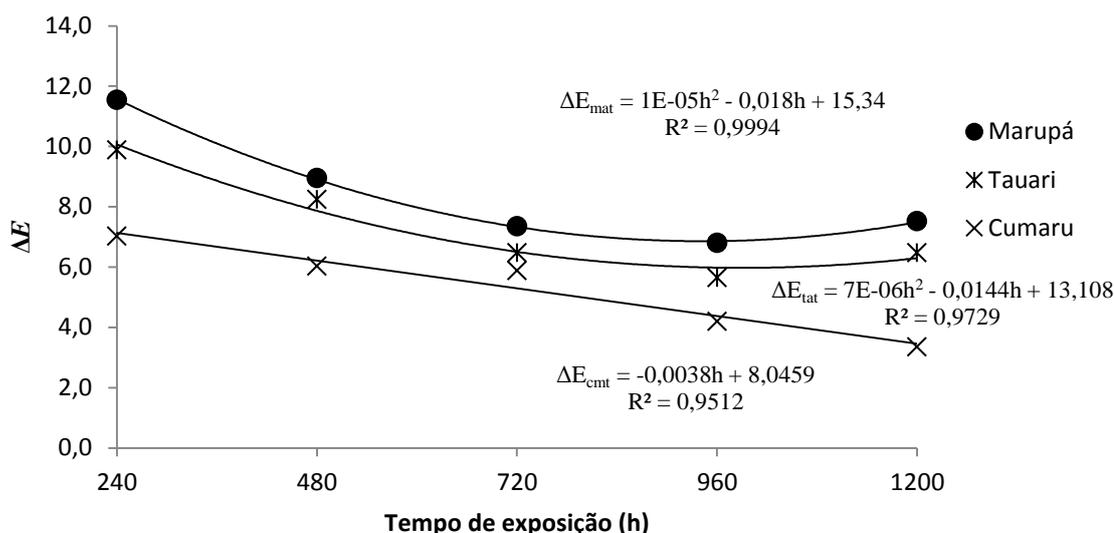
A madeira de cumaru foi a que apresentou maior estabilização colorimétrica, uma vez que apresentou menores variações dos parâmetros colorimétricos. Esse resultado ocorre devido ao alto teor de extrativos que a madeira apresenta (STANGERLIN, 2012), e conforme observado por Gierlinger et al. (2003) e Moya e Marín (2011), existe uma forte relação positiva entre os parâmetros colorimétricos, principalmente a variável  $a^*$  e compostos fenólicos e uma relação oposta entre a luminosidade com o aumento do teor de extrativos.

Na alteração total da cor ( $\Delta E$ ), foi observada uma mudança muito apreciável em relação à cor original das madeiras sem tratamento químico (Tabela 2, Figura 7). Notou-se que, enquanto as primeiras 240 horas de exposição a mudança colorimétrica foi elevada, com o passar do tempo houve uma diminuição no  $\Delta E$  até a sua posterior estabilização. O cumaru foi a espécie que apresentou a menor alteração de cor, indicando que a madeira apresenta um bom grau de durabilidade do padrão colorimétrico à ação do intemperismo, uma vez que o aumento do tempo de exposição ocasionou um aumento pouco perceptível na modificação colorimétrica no material. Para o marupá e tauari foi observado que o valor no  $\Delta E$  para o período final de exposição apresentou o mesmo valor obtido para as primeiras 240h. Tolvaj (1994) e Martins et al. (2011) observaram um efeito similar na influência da radiação ultravioleta sobre diferentes espécies de madeira, concluindo que as mudanças trazidas pela ação da radiação foram mais intensas durante as primeiras 20 horas de exposição, com um pronunciado escurecimento em todas as superfícies de espécies.



**Figura 7.** Alteração total da cor ( $\Delta E$ ) para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico após o intemperismo acelerado.

As madeiras tratadas com CCA-C apresentaram menores  $\Delta E$  ao longo da exposição ao intemperismo acelerado (Tabela 2, Figura 8). Esse comportamento está associado ao cromo presente na formulação do CCA, o qual contribui para a estabilização da cor da madeira contra a deterioração causada pela ação da luz UV. Os efeitos positivos do cromo estão atribuídos à formação de complexos entre as unidades de cromo e unidades de guaiacil da lignina (ZHANG e KAMDEM, 2000; TEMIZ et al., 2007). Portanto, embora o tratamento químico tenha alterado a coloração das madeiras, o mesmo diminuiu o efeito causado pelo intemperismo acelerado. Esse resultado é relevante, uma vez que o tratamento químico com o CCA não possui o caráter principal de proteger a madeira de agentes deterioradores causados pelo intemperismo, e sim contra agente xilófagos.

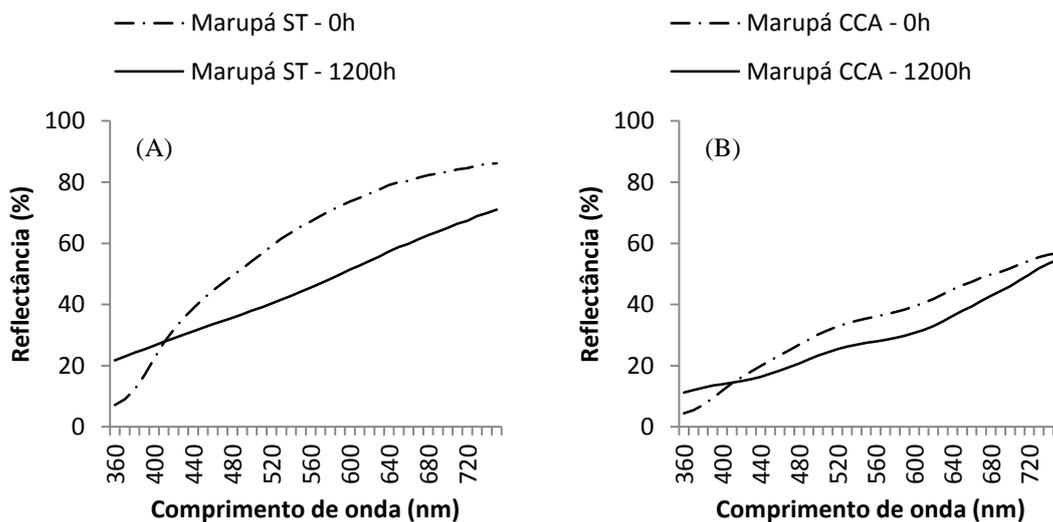


**Figura 8.** Alteração total da cor para as madeiras de marupá, tauari e cumaru tratadas com CCA-C após o intemperismo acelerado.

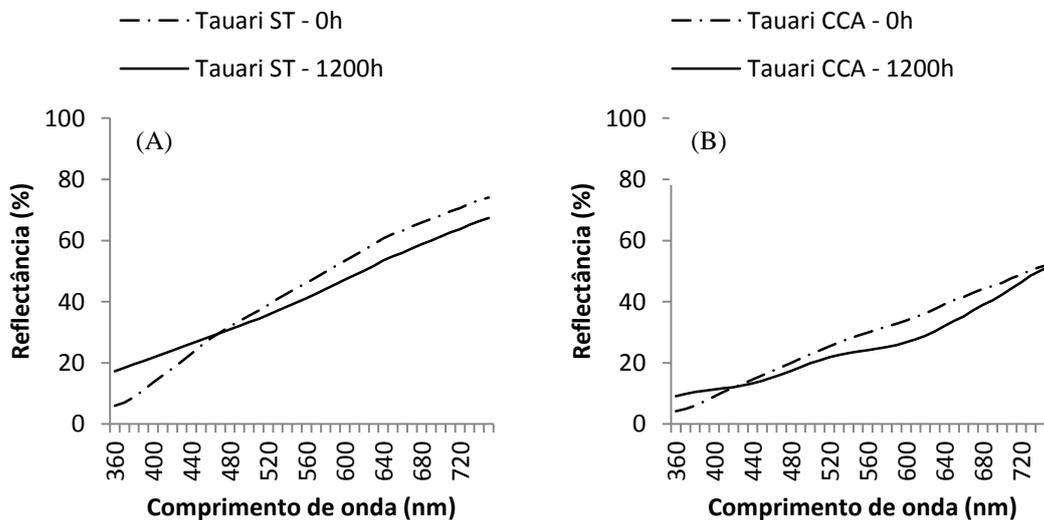
Os fatores de deterioração da superfície da madeira são desencadeados pela dissociação e modificação da lignina presente nos grupos cromóforos que são capazes de absorver a radiação de luz UV entre os comprimentos de onda nos intervalos de 300 e 400 nm, com a posterior formação de radicais livres (MOORE e OWEN, 2001). Os polímeros constituintes da madeira apresentam diferentes capacidades de absorção de luz UV para a formação desses radicais (PANDEY, 2005), sendo a lignina extremamente sensível à radiação UV, conduzindo a formação de radicais aromáticos fenoxil, que ainda reagem com o oxigênio para produzir grupos carbonilo e carboxilo, estes estando relacionados com a descoloração da madeira por ocorrência de compostos de carbonilos insaturados (quinona). Dessa forma, esses compostos são lixiviados pela água, deixando a camada superficial com coloração cinza, causando um aumento do teor da celulose parcialmente degradada e por lignina em baixa concentração, e posteriormente o aumento da luminosidade (HON, 2001).

As Figuras 9 a 11 ilustram as curvas de reflectância das madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C antes e após o intemperismo acelerado. Observa-se que o tratamento químico com CCA alterou as curvas de reflectância em todas as madeiras, causando um escurecimento da superfície com menor reflexão da luz incidente. Esse resultado é reflexo da impregnação do CCA na superfície da madeira, mesmo para o cumaru, que embora não seja tratável com a solução (IBAMA, 2002), apresentou modificação

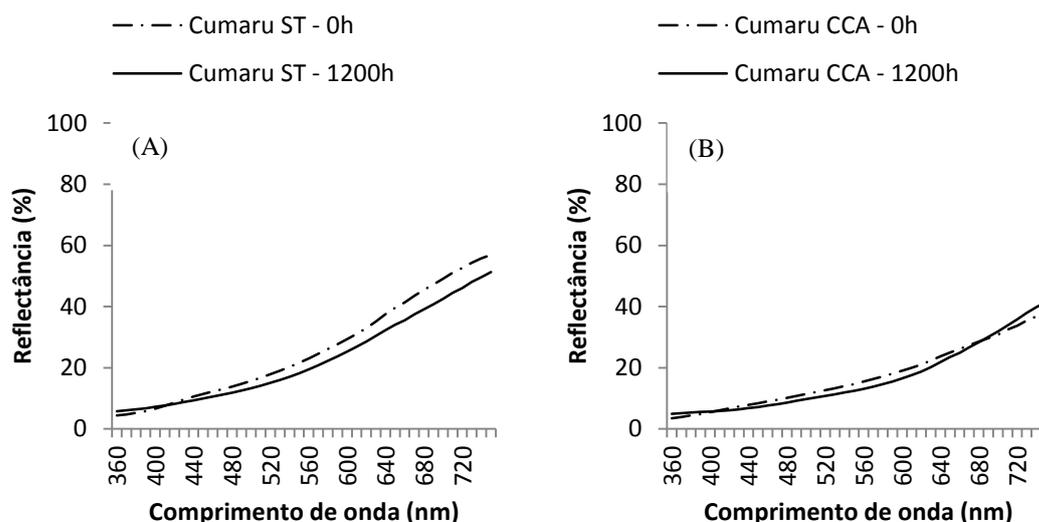
colorimétrica. Esse resultado ocorre principalmente em função da diminuição dos pigmentos amarelo e vermelho, bem como da claridade.



**Figura 9.** Curvas de reflectância da madeira de marupá sem tratamento químico (A) e tratada com CCA-C (B) antes e após o intemperismo acelerado. Onde: ST – refere-se a madeira sem tratamento químico e CCA refere-se a madeira tratada com CCA-C.



**Figura 10.** Curvas de reflectância da madeira de tauari sem tratamento químico (A) e tratada com CCA-C (B) antes e após o intemperismo acelerado. Onde: ST – refere-se a madeira sem tratamento químico e CCA refere-se a madeira tratada com CCA-C.

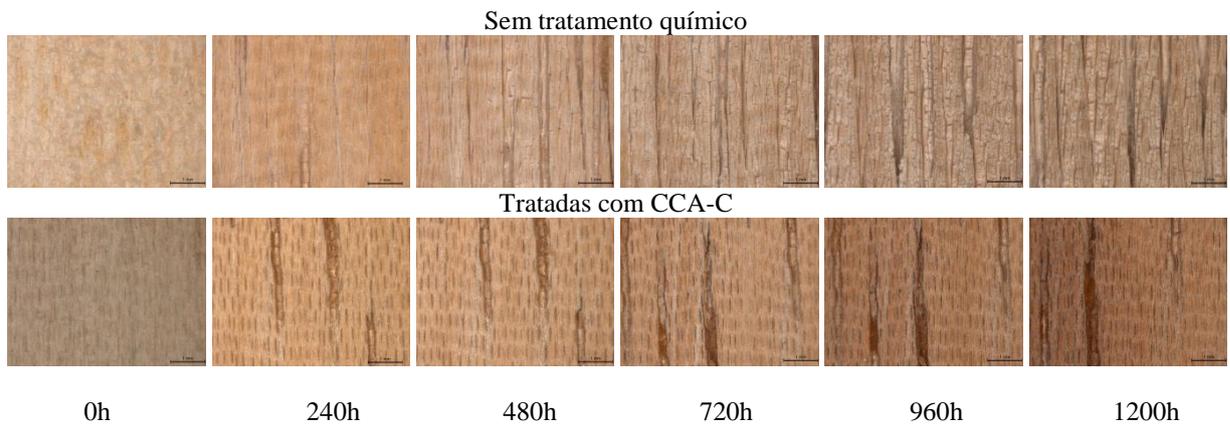


**Figura 11.** Curvas de reflectância da madeira de cumaru sem tratamento químico (A) e tratada com CCA-C (B) antes e após o intemperismo acelerado. Onde: ST – refere-se a madeira sem tratamento químico e CCA refere-se a madeira tratada com CCA-C.

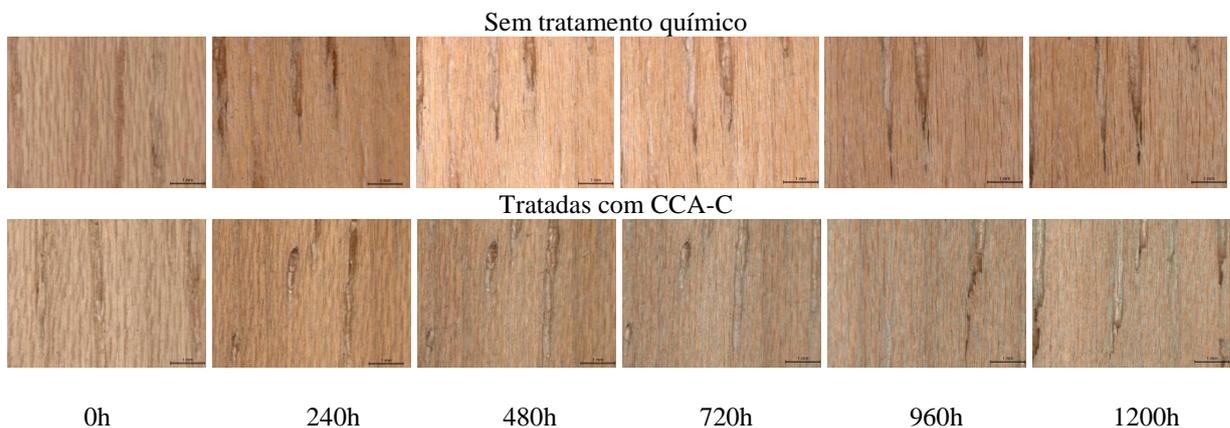
O marupá foi a espécie que apresentou maior queda da reflectância, quando comparada com as demais madeiras estudadas. Essa diminuição da reflectância pode ser considerada um efeito negativo se o destino final da madeira envolver fatores estéticos, como em projetos de mobiliários. Entretanto, ressalta-se que o efeito do tratamento químico com CCA proporciona maior proteção a madeira contra agentes deterioradores e, conseqüentemente, o aumento de sua durabilidade.

Quanto ao intemperismo acelerado, as madeiras de marupá e tauari apresentaram comportamento semelhante, com o aumento da reflectância na região entre o violeta e azul (400 a 440nm) e a diminuição na região do amarelo ao vermelho (560 a 740nm). Para as espécies tratadas com CCA-C o efeito do intemperismo foi pouco pronunciado, deixando apenas a superfície levemente escurecida. A madeira de cumaru apresentou pouca alteração na reflectância com e sem tratamento químico.

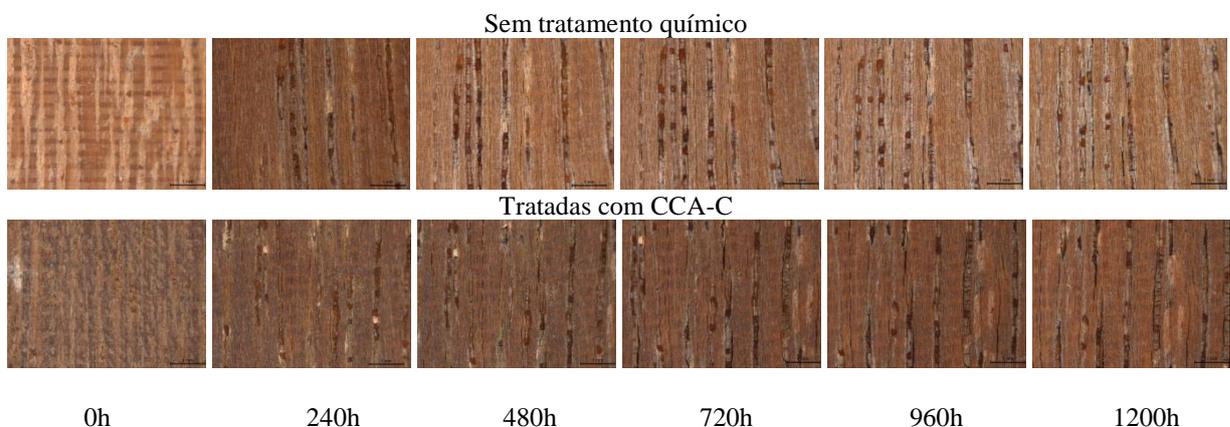
As Figuras 12 a 14 apresentam o aspecto visual da superfície das madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento químico e tratadas com CCA-C de acordo com o período de exposição ao intemperismo acelerado.



**Figura 12.** Superfície da madeira de marupá sem tratamento químico e tratadas com CCA-C antes e após a exposição ao intemperismo acelerado com o aumento de 20x.



**Figura 13.** Superfície da madeira de tauari antes e após a exposição ao intemperismo acelerado com o aumento de 20x.



**Figura 14.** Superfície da madeira de cumaru antes e após a exposição ao intemperismo acelerado com o aumento de 20x.

### 3.2 Rugosidade

Pelos resultados obtidos não foram observadas diferenças significativas para os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  entre as faces orientadas no sentido tangencial e radial para todas as madeiras estudadas sem tratamento e tratadas com CCA-C (Tabelas 58 a 60, APÊNDICE II). Dessa forma, para as análises estatísticas posteriores foram considerados todo o conjunto de amostras para cada espécie/tratamento, sem separação quanto à orientação.

Quanto ao efeito do tratamento químico na rugosidade das madeiras tratadas e sem tratamento, foram observadas diferenças significativas pela ANOVA ao nível de 5% de significância. A Tabela 3 apresenta os resultados da rugosidade antes e após o tratamento químico com CCA-C.

**Tabela 4.** Valores dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  para as madeiras de cumaru, marupá e tauari sem tratamento químico e tratadas com CCA-C.

Parâmetro	Marupá		Tauari		Cumaru	
	ST	CCA	ST	CCA	ST	CCA
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	4,8	9,4*	4,6	6,8*	4,0	6,1*
	(0,8)	(2,1)	(0,6)	(0,6)	(0,6)	(1,3)
	17%	22%	14%	9%	14%	21%
$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	30,3	50,1*	27,9	39,2*	25,9	35,9*
	(5,8)	(7,7)	(4,2)	(5,2)	(4,3)	(5,2)
	19%	15%	15%	13%	16%	14%

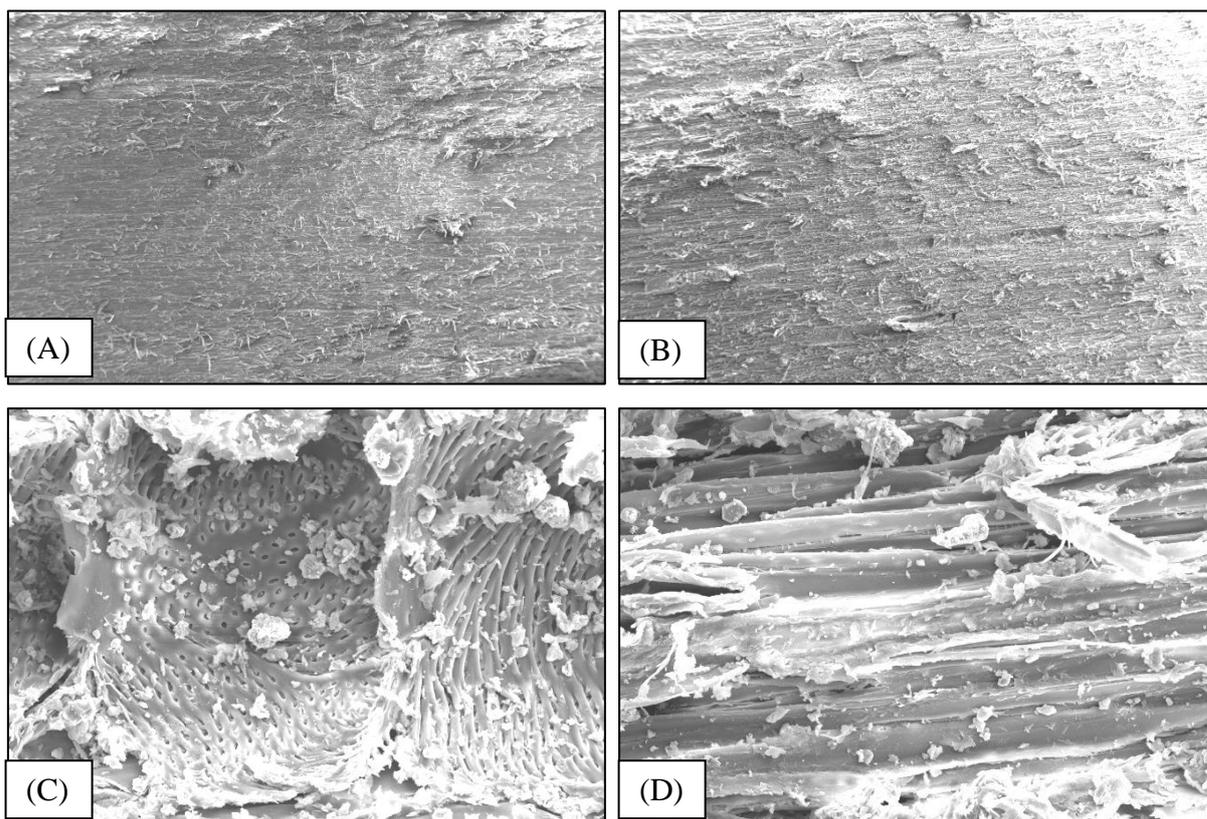
Onde: ST – madeiras sem tratamento e CCA – madeiras tratadas com CCA-C. Os valores apresentados entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Valores em percentual referem-se ao coeficiente de variação. \*refere-se a diferença significativa pela ANOVA ao nível de  $\alpha=0,05$ .

Amorim et al. (2013) observaram por meio de análise de regressão linear a tendência do aumento da média da rugosidade com a diminuição da densidade aparente para 11 espécies de madeiras tropicais. De forma similar, no presente estudo as madeiras que apresentaram maiores rugosidades foram o marupá, seguido do tauari e do cumaru, representantes dos grupos de baixa, média e alta densidade, de acordo com Melo et al. (1990).

De acordo com os resultados, observa-se a tendência do aumento da rugosidade em função da presença do CCA. Resultado semelhante foi obtido por Temiz et al. (2005) estudando o efeito do CCA na superfície da madeira de *scot pine* e *alder*. Taylor et al. (1999), indicam que a rugosidade da superfície da madeira é influenciada pela estrutura anatômica, particularmente, as cavidades celulares. Dessa forma, o resultado pode estar associado, além das características

anatômicas das espécies florestais estudadas, à pressão aplicada para a penetração e impregnação da solução preservante pelo método com pressão utilizado no presente estudo.

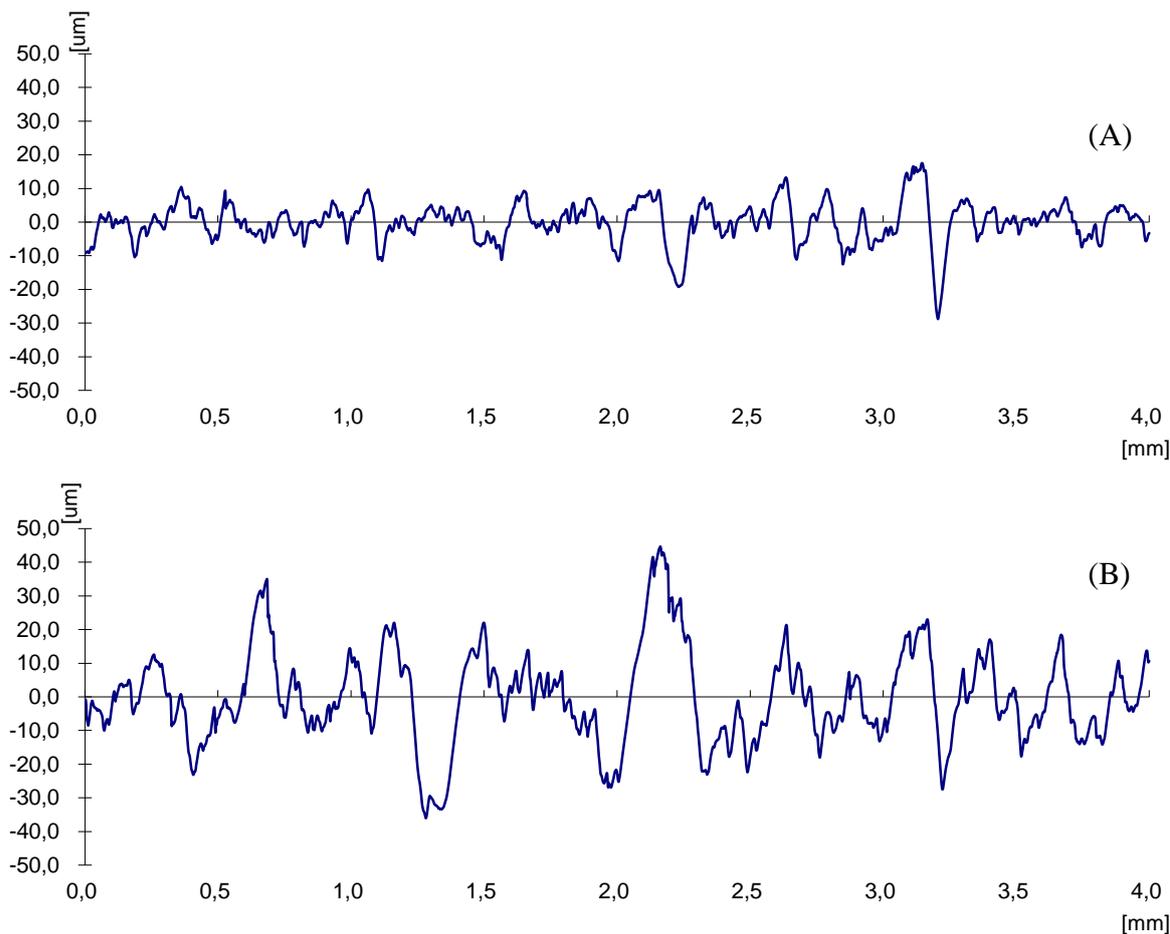
A Figura 15 apresenta a superfície da madeira de marupá antes e após o tratamento químico com CCA-C adquirido por microscopia eletrônica de varredura (MEV). É possível observar a modificação da textura da madeira de marupá após o tratamento químico (Figuras 15 B), indicado o aumento da rugosidade da superfície, bem como o rompimento de elementos de vasos e fibras da madeira. Entretanto, a ruptura dos elementos celulares não pode ser considerada um evento generalizado, uma vez que a impregnação com o CCA ocorre na parede celular da madeira, sendo o resultado observado apenas em sua superfície. Além do efeito nos elementos celulares da madeira, é possível observar a presença de resíduos, os quais podem ser oriundos de impurezas na solução preservante, ficando aderidos após o tratamento químico.



**Figura 15.** Imagens obtidas por MEV da superfície da madeira de marupá sem tratamento químico (A) e tratadas com CCA (B) (aumento de 20x), apresentando a estrutura dos elementos de vasos com resíduos (C) e fibras rompidas (D) (aumento de 500x).

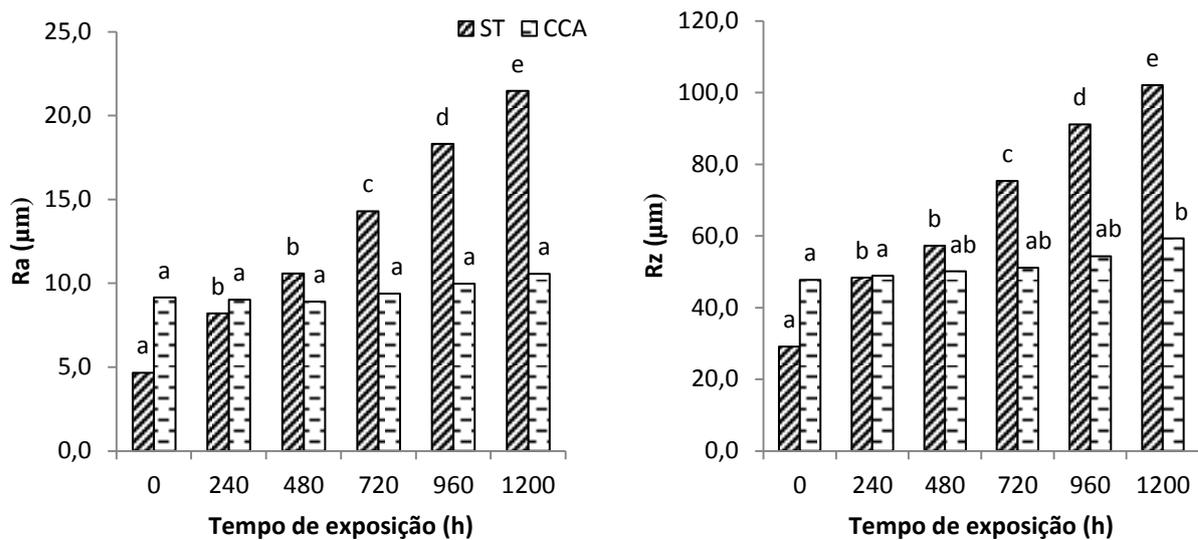
A Figura 16 apresenta os perfis do parâmetro  $R_a$  das superfícies da madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C, na qual a superfície da madeira tratada apresenta-se com

maiores distâncias entre as alturas dos picos e vales, sendo esses reflexos do aumento de impurezas na superfície, bem como alterações nos elementos celulares causadas pelo preservante.



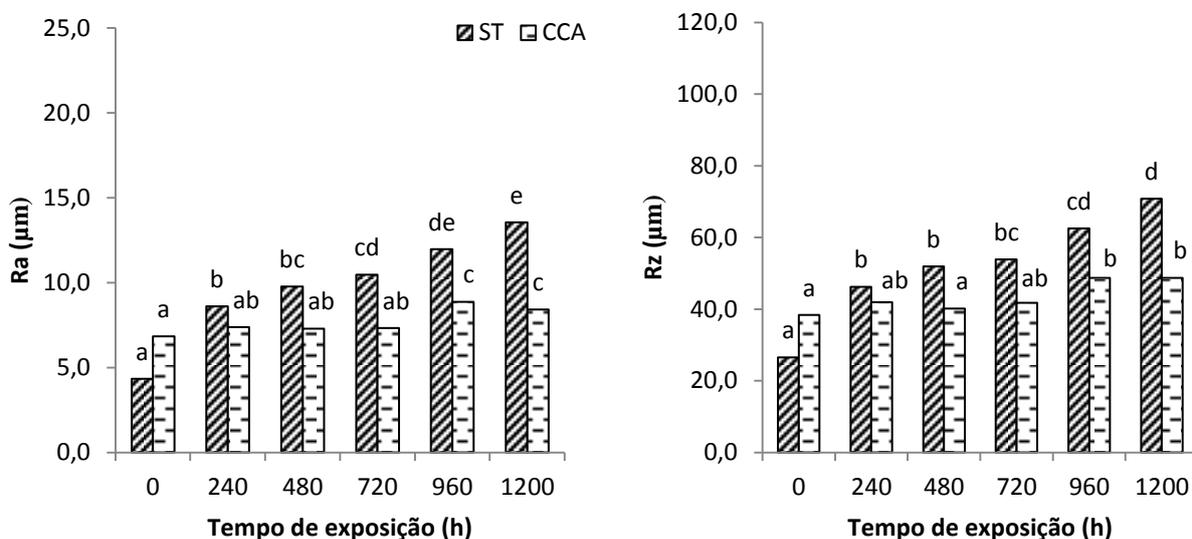
**Figura 16.** Perfil da rugosidade ( $R_a$ ) da madeira de marupá sem tratamento (A) e tratada com CCA-C (B).

As Figuras 17 a 19 apresentam os resultados dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C para cada período de exposição ao intemperismo acelerado. As Tabelas 61 a 75 do APÊNDICE II apresentam o resultado da análise descritiva, da ANOVA e do teste de Tukey para cada espécie florestal sem tratamento e tratadas para os períodos de exposição ao intemperismo acelerado.



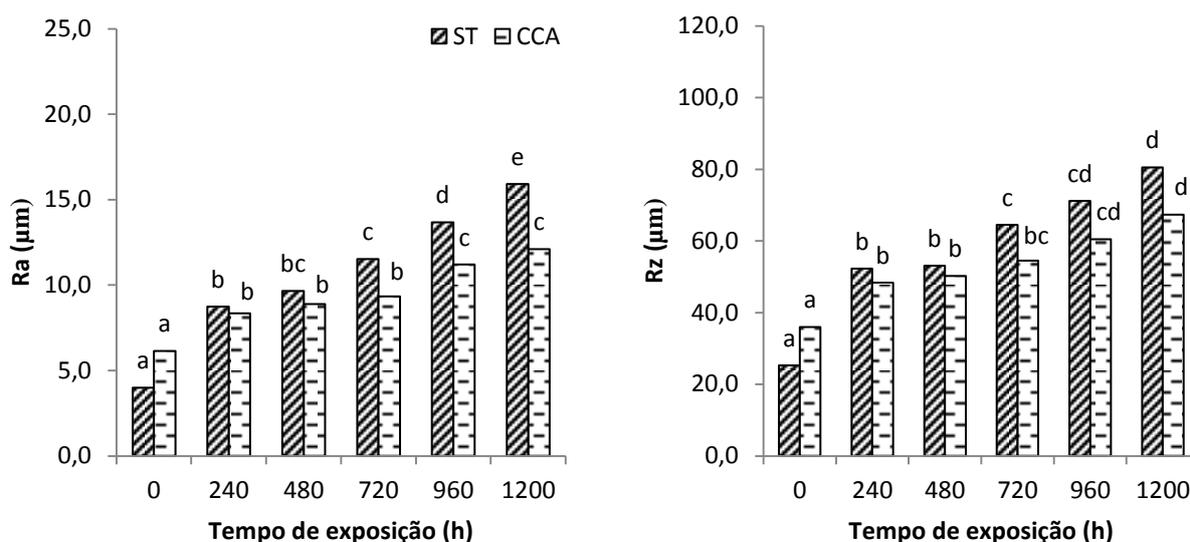
**Figura 17.** Resultados dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento (ST) e tratada com CCA-C (CCA).

Onde: colunas com mesmo preenchimento seguidas pela mesma letra minúsculas não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ( $p > 0,05$ ).



**Figura 18.** Resultados dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento (ST) e tratada com CCA-C (CCA).

Onde: colunas com mesmo preenchimento seguidas pela mesma letra minúsculas não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ( $p > 0,05$ ).



**Figura 19.** Resultados dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento (ST) e tratada com CCA-C (CCA).

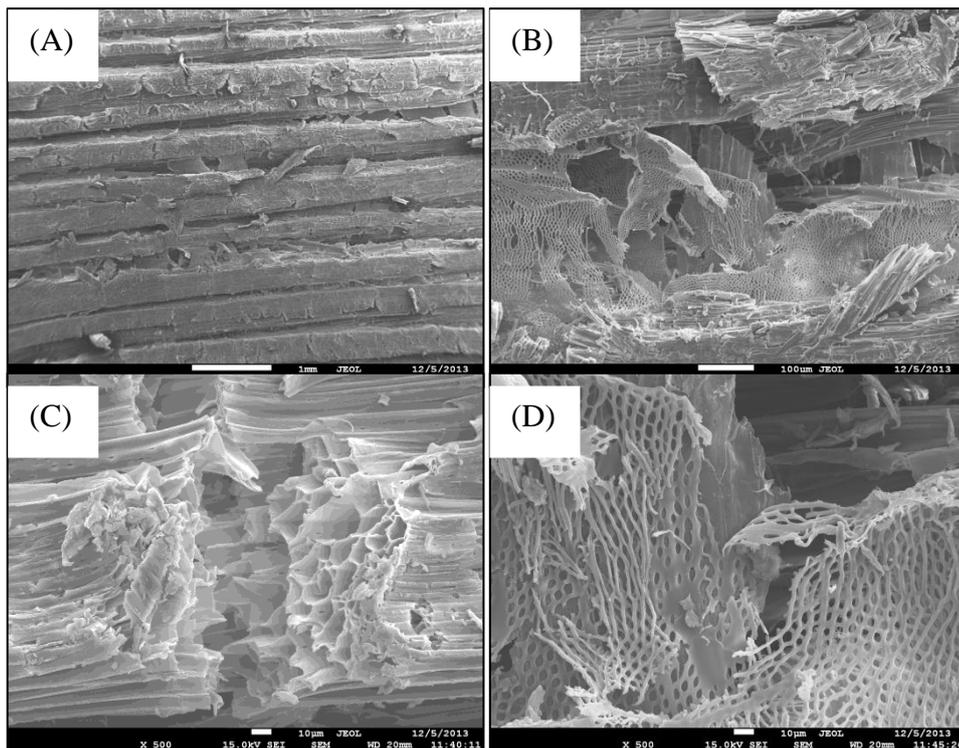
Onde: colunas com mesmo preenchimento seguidas pela mesma letra minúsculas não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ( $p > 0,05$ ).

Entre as madeiras sem tratamento químico, o marupá foi o que sofreu maior deterioração após a exposição de 1200 horas de intemperismo, com um aumento superior a quatro vezes aos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  quando comparados ao valor inicial. O tauari e o cumaru apresentaram comportamentos similares, entretanto em menor magnitude. Feist e Hon (1984) e Williams (2005) atribuem o aparecimento de micro rachaduras causadas pelo intemperismo na madeira a fotodegradação, principalmente, da lamela média em função do teor de lignina presente nessa região, causando rupturas intercelulares. Considerando o efeito conjunto da radiação e da ação da água nos ciclos de intemperismo acelerado, o fenômeno de contração e inchamento ocorre causando a ruptura de elementos celulares e as posteriores lixiviações dos produtos deteriorados, causando erosões superficiais repetitivas. Efeito similar foi observado por Williams (2001) em 10 madeiras de folhosas de origem boliviana, as quais apresentaram rachaduras severas após 30 ciclos de intemperismo acelerado, com parâmetros similares aos aplicados no presente estudo.

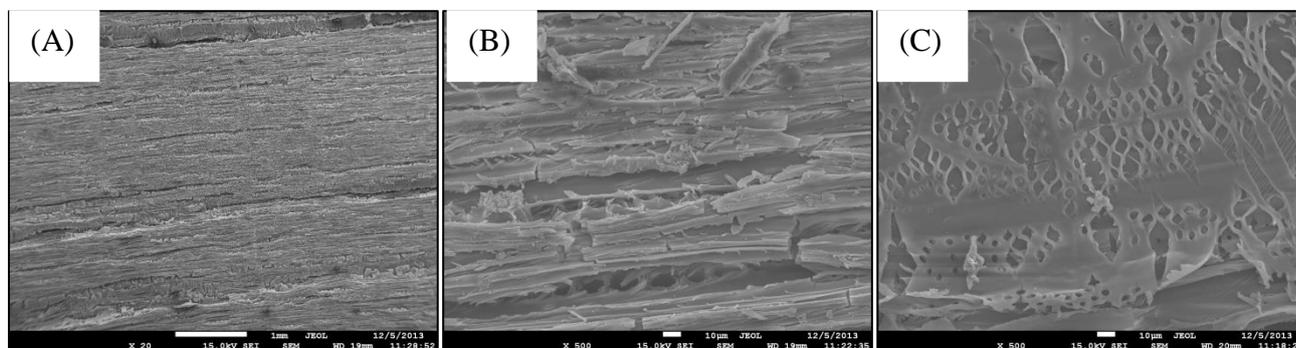
Para as madeiras tratadas com CCA-C, foi possível observar que o tratamento químico preservou a superfície das madeiras de marupá e tauari após a exposição ao intemperismo acelerado. A madeira de cumaru apresentou comportamento semelhante, porém com tendência ao aumento dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  após 960 horas exposição, uma vez que a

madeira de cumaru não é tratável com CCA (IBAMA, 2002). Dessa forma, a solução preservante fixou-se apenas na superfície da madeira, sem penetração e retenção.

As Figuras 20 e 21 apresentam a superfície da madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C, respectivamente, após o período de 1200 horas de exposição ao intemperismo acelerado adquirido por microscopia eletrônica de varredura (MEV).



**Figura 20.** Superfície da madeira de marupá sem tratamento (A e B, aumentos de 20x e 120x, respectivamente), e detalhes do rompimento dos elementos celulares (C e D, aumentos de 500x) após 1200 horas de exposição ao intemperismo acelerado.

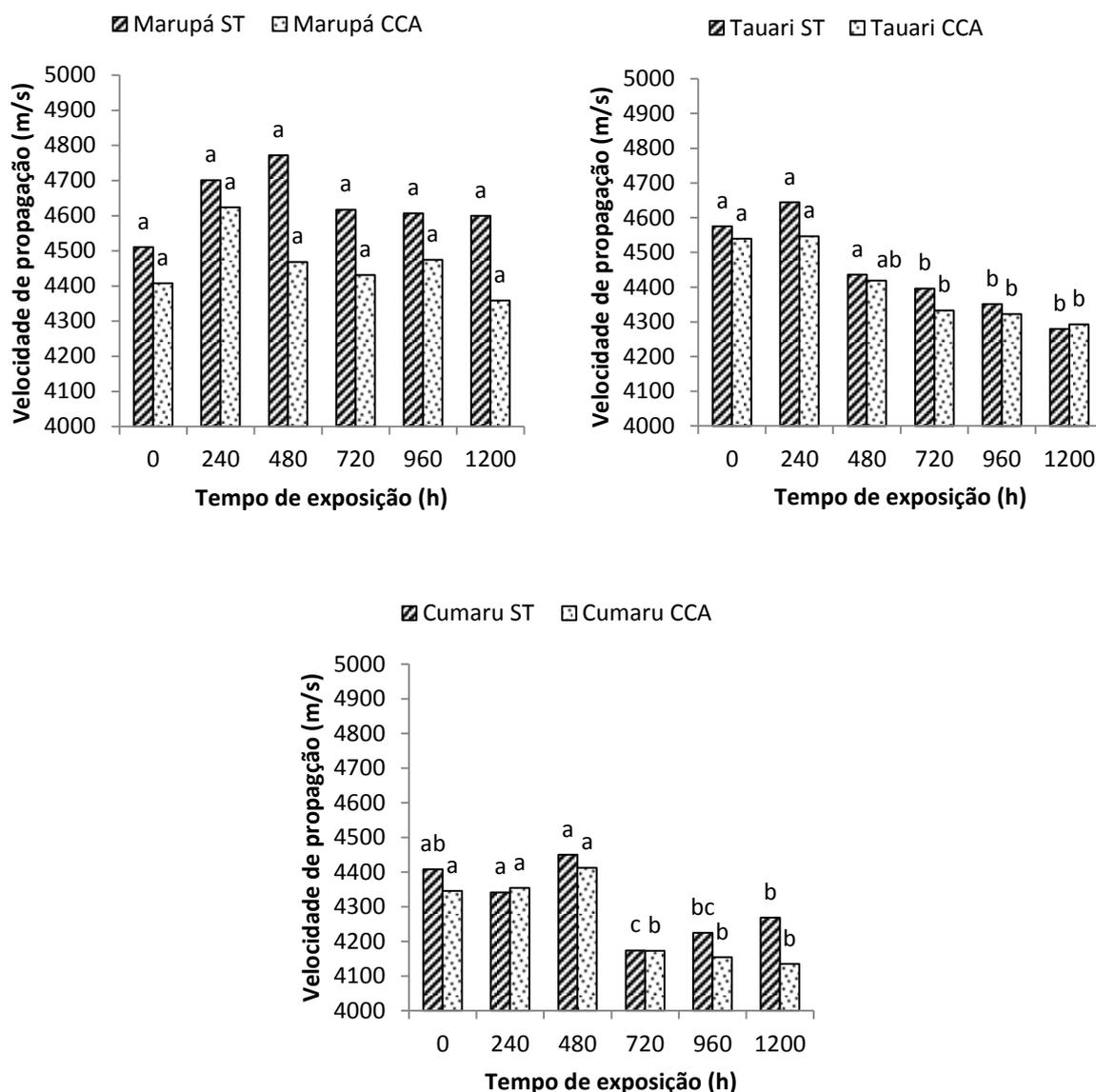


**Figura 21.** Superfície da madeira de marupá tratada com CCA-C (A) e detalhes dos elementos celulares (B e C, aumento de 500x) após 1200 horas de exposição ao intemperismo acelerado.

Nas imagens obtidas pelo MEV é possível observar o rompimento de fibras e vasos da madeira de marupá sem tratamento químico (Figura 20). Notou-se ainda o aumento de fissuras na região das pontoações, estendendo para camadas internas dos elementos celulares. Os vasos exibiram maior grau de deterioração, com rupturas extensas e dissociações com os demais elementos celulares. A superfície do marupá tratado com CCA-C (Figura 21) apresentou um estado mais preservado, embora com algumas fibras rompidas e levantadas, porém em menor magnitude quando comparado com a madeira sem tratamento. Conforme observado por Temiz et al. (2005) e Hon (2001), o cobre presente na formulação do CCA forma complexos com os componentes da madeira capazes de reduzir a deterioração da superfície da madeira, embora contribuam com uma importante modificação da rugosidade após o tratamento químico. Os complexos de íons-madeira formados na superfície da madeira promovem uma proteção ao bloquear a formação de radicais livres de grupos fenólicos, os quais são os sítios reativos das reações fotoquímicas.

### **3.3 Ondas de tensão**

O resultado da ANOVA não apresentou diferenças significativas para as velocidades de propagação entre as madeiras sem tratamento químico e tratadas com CCA-C (Tabela 75, APÊNDICE II). Entre os ciclos de intemperismo acelerado foram observadas diferenças significativas pelo teste de média para a madeira de tauari e cumaru (Tabelas 76 a 79, APÊNDICE II), após o período de 480 horas de exposição. A Figura 22 apresenta os resultados da velocidade de propagação para as madeiras estudadas sem tratamento e tratadas com CCA-C para cada período de intemperismo acelerado.



**Figura 22.** Resultados da velocidade de propagação no sentido longitudinal de acordo com o tempo de exposição de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C (CCA).

Onde: colunas com mesmo preenchimento seguidas pela mesma letra minúsculas apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

As madeiras tratadas com CCA-C apresentam velocidade de propagação inferior quando comparadas com as amostras sem tratamento químico, embora o teste estatístico não tenha apresentado diferenças significativas entre essas. O resultado encontrado está de acordo com o observado por Pellerin e Ross (2002) e Ross et al. (2005), os quais indicam que o efeito do tratamento com preservantes hidrossolúveis praticamente não possuem efeito significativo na transmissão da propagação de ondas de tensão em madeiras, principalmente com dimensões estruturais.

O intemperismo acelerado proporcionou uma leve diminuição na propagação das ondas de tensão nas madeiras de tauari e cumaru, entretanto significativa estatisticamente. Embora o efeito do intemperismo esteja associado à superfície da madeira, os resultados indicam que após o período de 480 horas a deterioração da madeira afeta de forma significativa a propagação das ondas. Esse resultado ocorre, provavelmente, devido às rupturas das estruturas celulares da madeira após a exposição ao intemperismo, conforme observado na Figura 20, as quais impedem a livre propagação da onda, causando a sua reflexão e atenuação.

#### **4. CONCLUSÃO**

As massas e as densidades aparentes de todas as madeiras estudadas não foram influenciadas pelo tratamento químico, tampouco pelo intemperismo acelerado.

As cores de todas as madeiras foram alteradas de forma significativa pelo tratamento químico com o CCA-C, ficando escuras e com diminuição dos pigmentos vermelhos e amarelos. As madeiras tratadas com CCA-C apresentaram menor variação na alteração total da cor após o intemperismo acelerado, sendo o cumaru a espécie que exibiu menor vulnerabilidade sob as condições aplicadas.

Com relação à rugosidade, todas as madeiras apresentaram um aumento dos parâmetros Ra e Rz, após o tratamento químico com CCA-C. O intemperismo acelerado causou o aumento da aspereza da superfície com o rompimento de elementos celulares. O tratamento químico preservou a superfície das madeiras ao longo da exposição ao intemperismo, diminuindo a deterioração dos elementos celulares.

A velocidade de propagação sonora foi pouco influenciada pelo intemperismo acelerado, provocando uma pequena diminuição da propagação da onda de tensão.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2244 - Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates**. Philadelphia, PA; 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 154 - Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure for Nonmetallic materials**. Philadelphia, PA; 2006.

AMORIM, M.R.S; RIBEIRO, P.G.; MARTINS S. A.; DEL MENEZZI, C. H. S., SOUZA, M. R. Surface Wettability and Roughness of 11 Amazonian Tropical Hardwoods. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n.1, p99-109, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 4287. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro; 2002. 18p.

BUCUR V. **Acoustics of Wood**. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag; 2006. 298p.

CAMARGOS, J.A.A.; GONÇALEZ, J.C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, v. 71, p. 30-41, 2001.

CAMARGOS, JAA. **Colorimetria aplicada na elaboração de uma tabela de cores para madeiras tropicais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

CUI, W.; KAMDEM, D.P.; RYSPTRA, T. Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. **Wood and Fiber Science**, v.46, p.289-290, 2004.

FEIST, W.C.; HON, D.N.S. Chemistry of weathering e protection. In: ROWELL, R.M. **The chemistry of solid wood**. Washington D.C.: Am. Chem. Soc, 1984.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRABNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L.E. Colour of larch heart wood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees**, v.18, p.102-108, 2003.

GONÇALEZ, JC.; FÉLIZ, TL.; GOUVEIA, FN.; CAMARGOS, JAA.; RIBEIRO, PG. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* huber) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal** 2010 out/dez 20(4):657-664.

HON, D. N. S. Weathering and photochemistry of wood. In: HON, DNS.; SHIRAIISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. 2.ed. New York, U. S. A. : Marcel Dekker; 2001.

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

ISHIGURI, F. et al. Extractives relating to heartwood color changes in sugi (*Crytomeria japonica*) by a combination of smoke-heating and UV radiation exposure. **J. Wood Sci.**, Japão, v. 49, p. 135-139, 2003.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD – **JIS. JIS B 0601: Geometrical Products Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters**. Tokyo: JIS, 2001.

KILIC, M; HIZIROGLU, S; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment** 2006 41(8):1074-1078.

- LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. 2v. São Paulo: IPT; 1986.
- MAGOSS, E. General Regularities of wood surface roughness. **Acta Silv. Lign.** 2008 4(1):,81-93.
- MARTINS S. A.; FERRAZ, J. M.; SANTOS, C. M. T, DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R. Efeito da Usinagem na Rugosidade da Superfície da Madeira de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta e Ambiente** v. 18, n.2, p.135-143, 2011.
- MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: **Congresso Florestal Brasileiro**, 6., Campos do Jordão, 1990. *Anais...* São Paulo: SBS/SBSF, 1990. v. 3, p. 695-699.
- MITUTOYO CORPORATION. **SJ - 401 Surface Roughness Tester**: User's manual. 2004.
- MOORE, A.K.; OWEN, N.L. Infrared spectroscopic studies of solid wood. **Appl. Spectroscopy Reviews**, v.36, p.65-68, 2001.
- MOYA, R.; MARÍN, J.D. Grouping of *Tectona grandis* (L.f.) clones using wood color and stiffness. **New Forests**, v.42, n.3, p.329-345, 2011.
- NEUMANN, M. G. et al. A fotoquímica no Brasil. **Quim. Nova**, 2002 25(1):34-38.
- PANDEY, K. K. A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. **Polymer Degradation and Stability**, Inglaterra, v. 87, p. 375-379, 2005.
- PELLERIN, R. F.; ROSS, J. R. **Nondestructive evaluation of wood**. Madison: USDA, Forest Service, 2002.
- ROSS, R.J.; Pellerin, R.F.; Volny, N.; Salsig, W.; Falk, R.H. **Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools**. A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rpt. FPL-GTR-114. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 15p.
- SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PASTORE JÚNIOR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 17-23, 2007.
- STANGERLIN, D. M. **Proposta de metodologia de ensaio acelerado de fungos apodrecedores em madeiras brasileiras**. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, 2012. 225p.
- TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. **Forest Products Journal**. v.49, n.5, p.41-46, 1999.
- TEMIZ, A.; TERZIEV, N.; EIKENES, M.; HAFREN J. Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood, **Applied Surface Science**, v.253, n.1, p.5355–5362, 2007.

TEMİZ, A.; YILDIZ, U. C.; AYDIN, I.; EIKENES, M.; ALFREDSEN, G.; ÇOLAKOĞLU, G. Surface roughness and color characteristics of wood treated with preservatives after accelerated weathering test. **Applied Surface Science**, v.250, n.1 p35–42, 2005.

TOLVAJ, L. Discoloration and deterioration of wood surface by ultraviolet light. **In: Wood Structure and Properties'94 - The 2nd International Symposium**. September 5 – 9, 1994. Zvolen – Slovakia

USTA, I; AYDINLAR, E. Effects of bleaching process on the roughness values of wood surfaces of Lebanon cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) and Black poplar (*Populus nigra* L.) using NaOH (sodium hydroxide), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (hydrogen peroxide) and Ca(OH)<sub>2</sub> (calcium hydroxide). **In: ANNUAL MEETING**, 39th, Instabul, 2008. **Proceedings**. Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation.. 10p. (IRG/WP/08-40403).

WILLIAMS, R. S. Weathering of wood. **In: ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites**. Florida: CRC Press, 2005.

WILLIAMS, R.S.; MILLER, R., GANGSTAD, J. Characteristics of ten tropical hardwoods from certified forests in Bolivia: Part 1, Weathering characteristics and dimensional change. **Wood and Fiber Sci.** v.33, n.4, p.618–626, 2001

ZHANG, J., KAMDEM, D.P. Weathering of copper amine treated wood, **In: International Research Group on Wood Preservation (IRG 00-40155)** Kona, Hawii, 14–19 May 2000, 2000, 16 p.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

### CONCLUSÕES GERAIS

O tratamento químico com a formulação à base de arseniato de cobre cromatado (CCA-C) diminuiu a velocidade de propagação de ondas de tensão e ultrassônicas nas madeiras de marupá, tauari e cumaru em relação às amostras não tratadas. Esse efeito não pode ser considerado negativo, uma vez que o tratamento com a formulação testada protegeu as madeiras tratadas contra a ação de fungos apodrecedores e cupins, durante o período de dois anos de exposição em campo de apodrecimento, não tendo sido observado interferência dos fatores climáticos do local sobre as amostras tratadas.

A velocidade de propagação das ondas de tensão sobre as amostras tratadas com CCA-C, de um modo geral, permaneceu inalterada durante o período de dois anos de exposição em campo de apodrecimento, não necessitando de monitoramento.

Os métodos de avaliação não destrutivos de ondas de tensão e ultrassônicas apresentaram-se como ferramentas úteis e viáveis para avaliação do estado de sanidade de amostras de madeira em campo de apodrecimento.

Com o subsídio dos métodos, foi possível estabelecer uma proposta de velocidades de propagação para os métodos de ondas de tensão e ultrassônico como metodologia alternativa à avaliação visual.

Embora o uso do preservante CCA-C tenha modificado os parâmetros colorimétricos e da rugosidade das madeiras estudadas, foi possível observar uma ação protetora desse produto químico sobre o efeito deteriorador do foto-intemperismo e da ação da água sobre a superfície das madeiras durante o período avaliado de exposição ao intemperismo acelerado.

## RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos, sugere-se para futuros estudos:

- Avaliar o efeito de diferentes concentrações da solução de CCA e outras soluções preservantes nas velocidades de propagação de ondas em madeiras tropicais;
- Acompanhar periodicamente, com os métodos de avaliação não destrutivos de ondas de tensão e ultrassom, o campo de apodrecimento instalado a fim de confirmar as predições dos modelos estatísticos gerados sobre a durabilidade das madeiras sem tratamento e tratadas com CCA-C;
- Realizar ensaios de intemperismo acelerado com madeiras e painéis de madeira visando o aprimoramento do método;
- Correlacionar os dados do intemperismo acelerado com o intemperismo em campo.

## APÊNDICE I

Tabela 1. Valores médios para as variáveis climáticas fornecidas pela estação climatológica para o período de avaliação do campo de apodrecimento.

Ano	Mês	Precipitação (mm)	Rad. Global (MJ/m <sup>2</sup> d)	Vento Máx. (m/s)	Vento Méd. (m/s)	Dir. Vento (Grau)	Temp. Méd. (°C)	Temp. Máx (°C)	Temp. Mín. (°C)	UR Méd (%)	UR Máx (%)	UR min (%)
2011	Set	7,2	649,3	11,9	1,3	148,4	21,0	34,7	5,5	47,1	98,4	9,7
	Out	421,6	443,7	10,9	1,2	156,6	20,4	32,4	11,2	81,4	99,2	21,5
	Nov	269,6	506,4	13,7	1,2	163,7	20,4	31,2	-	81,0	99,1	-
	Dez	433,8	471,4	14,3	1,0	198,1	20,8	29,9	14,5	84,6	99,0	37,9
2012	Jan	200,9	289,1	7,5	1,2	158,2	20,1	28,8	13,9	93,2	100,0	47,8
	Fev	189,0	388,5	8,2	1,2	143,7	20,5	31,7	12,6	89,6	100,0	33,5
	Mar	136,9	379,0	6,3	1,1	145,2	20,8	31,6	10,7	89,4	100,0	26,2
	Abr	88,9	349,0	6,9	1,0	152,5	21,2	30,5	11,5	89,1	100,0	28,6
	Mai	61,0	292,0	9,2	1,0	143,3	18,3	29,6	9,0	88,3	100,0	32,1
	Jun	15,2	329,4	5,9	1,0	144,0	18,6	29,0	7,8	82,5	100,0	34,4
	Jul	0,3	378,7	5,9	1,1	146,9	17,6	26,7	4,8	71,9	100,0	21,2
	Ago	0,0	441,3	6,8	1,6	114,5	18,4	30,2	6,3	61,7	100,0	24,6
	Set	0,0	440,2	6,8	1,6	113,3	18,3	30,0	6,3	62,1	100,0	24,6
	Out	72,9	479,8	8,1	1,3	145,6	22,0	34,6	8,8	66,9	100,0	14,6
	Nov	365,8	328,2	8,7	1,2	195,8	21,3	33,9	15,9	91,1	100,0	29,8
	Dez	138,2	410,7	11,3	1,2	157,5	21,7	32,2	13,0	86,5	100,0	25,5
2013	Jan	368,8	461,8	12,4	0,9	203,2	21,1	31,5	13,5	84,4	99,5	27,5
	Fev	128,2	533,9	12,0	0,9	170,6	21,8	31,8	12,1	76,8	99,4	30,6
	Mar	196,2	486,8	11,2	0,8	185,0	21,7	31,9	13,3	82,8	99,5	36,7
	Abr	132,8	446,7	11,3	0,7	183,4	20,0	29,6	10,2	82,7	99,5	41,3
	Mai	36,2	495,7	9,2	0,7	189,9	18,9	29,5	8,8	75,8	99,7	23,5
	Jun	3,2	417,3	9,1	0,8	139,5	18,6	29,0	8,3	78,5	99,5	26,3
	Jul	0,0	499,1	10,3	1,0	143,4	18,0	30,7	6,9	67,9	99,2	23,8
	Ago	0,0	578,4	11,5	1,2	140,0	19,0	31,2	4,9	57,5	95,0	17,3
	Set	27,2	522,6	11,4	1,3	148,1	21,3	34,1	8,3	61,5	98,5	21,2
Média	131,8	440,8	8,9	1,2	151,7	20,1	31,1	9,5	79,1	99,7	25,7	

Tabela 2. Análise descritiva da massa e densidade aparente para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	Massa (g)	P0	15	301,6	7,4	2%	1,9	290,0	317,5
		P4	15	364,0	18,1	5%	4,7	341,2	394,4
		P8	15	308,8	8,4	3%	2,2	293,1	321,9
		P12	15	277,6	10,3	4%	2,7	257,2	294,9
		P16	15	236,2	96,8	41%	25,0	0,0	297,6
		P20	15	90,9	133,2	147%	34,4	0,0	283,6
		P24	15	50,3	104,1	207%	26,9	0,0	255,5
		Total	105	232,8	131,1	56%	12,8	0,0	394,4
	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	P0	15	0,42	0,01	3%	0,004	0,39	0,44
		P4	15	0,48	0,03	5%	0,007	0,46	0,53
		P8	15	0,42	0,02	6%	0,006	0,39	0,50
		P12	15	0,38	0,01	3%	0,003	0,36	0,40
		P16	15	0,32	0,13	41%	0,034	0,00	0,41
		P20	15	0,12	0,18	146%	0,046	0,00	0,38
P24		15	0,09	0,15	172%	0,038	0,00	0,34	
Total		105	0,32	0,17	55%	0,017	0,00	0,53	
CCA-C	Massa (g)	P0	15	377,4	20,3	5%	5,2	346,3	411,2
		P4	15	410,7	14,6	4%	3,8	379,3	432,8
		P8	15	356,3	8,8	2%	2,3	330,9	370,1
		P12	15	321,6	6,4	2%	1,7	305,6	329,2
		P16	15	328,0	7,7	2%	2,0	311,9	337,2
		P20	15	333,4	7,2	2%	1,9	318,6	343,6
		P24	15	311,7	24,9	8%	6,4	226,1	329,4
		Total	105	348,4	35,8	10%	3,5	226,1	432,8
	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	P0	15	0,50	0,03	6%	0,008	0,45	0,55
		P4	15	0,54	0,02	4%	0,006	0,49	0,57
		P8	15	0,47	0,01	2%	0,003	0,45	0,50
		P12	15	0,43	0,01	2%	0,002	0,42	0,45
		P16	15	0,44	0,01	2%	0,002	0,43	0,46
		P20	15	0,44	0,02	5%	0,005	0,42	0,50
P24		15	0,41	0,03	8%	0,008	0,30	0,43	
Total		105	0,46	0,05	10%	0,005	0,30	0,57	

Onde: P – período de exposição; CV – coeficiente de variação.

Tabela 3. Análise descritiva da massa e densidade aparente para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	Massa (g)	P0	15	482,9	10,3	2%	2,6	457,5	500,1
		P4	15	618,4	46,4	8%	12,0	527,7	690,9
		P8	15	507,7	25,9	5%	6,7	471,9	554,5
		P12	15	430,4	18,7	4%	4,8	398,8	463,9
		P16	15	394,9	111,8	28%	28,9	0,0	471,4
		P20	15	322,7	169,2	52%	43,7	0,0	471,3
		P24	15	294,5	155,3	53%	40,1	0,0	443,3
		Total	105	435,9	141,7	32%	13,8	0,0	690,9
	Dens. Ap. (g/cm <sup>3</sup> )	P0	15	0,60	0,02	4%	0,006	0,55	0,63
		P4	15	0,73	0,06	8%	0,016	0,64	0,83
		P8	15	0,60	0,03	6%	0,009	0,53	0,66
		P12	15	0,53	0,02	3%	0,004	0,49	0,55
		P16	15	0,47	0,14	29%	0,035	0,00	0,56
		P20	15	0,39	0,20	52%	0,052	0,00	0,54
P24		15	0,37	0,19	53%	0,050	0,00	0,55	
Total		105	0,53	0,17	32%	0,016	0,00	0,83	
CCA-C	Massa (g)	P0	15	576,4	23,7	4%	6,1	535,9	619,9
		P4	15	606,4	32,1	5%	8,3	561,9	674,1
		P8	15	551,9	11,0	2%	2,9	533,5	572,1
		P12	15	505,1	8,7	2%	2,2	483,6	520,2
		P16	15	518,7	10,2	2%	2,6	493,1	529,6
		P20	15	525,9	9,5	2%	2,5	504,2	537,1
		P24	15	497,3	8,3	2%	2,1	479,0	509,4
		Total	105	540,2	40,7	8%	4,0	479,0	674,1
	Dens. Ap. (g/cm <sup>3</sup> )	P0	15	0,68	0,04	6%	0,010	0,61	0,74
		P4	15	0,72	0,06	8%	0,015	0,65	0,82
		P8	15	0,66	0,05	7%	0,012	0,61	0,80
		P12	15	0,61	0,02	3%	0,005	0,58	0,64
		P16	15	0,62	0,02	3%	0,005	0,59	0,66
		P20	15	0,64	0,01	2%	0,003	0,62	0,66
P24		15	0,61	0,01	2%	0,003	0,60	0,64	
Total		105	0,65	0,05	8%	0,005	0,58	0,82	

Onde: P – período de exposição; CV – coeficiente de variação.

Tabela 4. Análise descritiva da massa e densidade aparente para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	Massa (g)	P0	15	786,3	18,3	2%	4,7	761,6	813,7
		P4	15	849,8	18,8	2%	4,8	805,9	875,8
		P8	15	812,9	15,3	2%	3,9	787,7	830,8
		P12	15	767,4	13,9	2%	3,6	748,4	788,7
		P16	15	788,9	12,7	2%	3,3	770,2	806,6
		P20	15	783,8	13,4	2%	3,5	759,5	802,4
		P24	15	759,8	14,3	2%	3,7	739,5	785,9
		Total	105	792,7	31,9	4%	3,1	739,5	875,8
	Dens. Ap. (g/cm <sup>3</sup> )	P0	15	1,03	0,02	2%	0,005	1,01	1,06
		P4	15	1,10	0,03	2%	0,007	1,04	1,14
		P8	15	1,04	0,05	5%	0,013	0,87	1,08
		P12	15	1,02	0,02	2%	0,005	0,99	1,05
		P16	15	1,04	0,01	1%	0,004	1,01	1,07
		P20	15	1,02	0,03	3%	0,007	0,94	1,06
P24		15	1,01	0,02	2%	0,005	0,98	1,05	
Total		105	1,04	0,04	4%	0,004	0,87	1,14	
CCA-C	Massa (g)	P0	15	793,2	15,9	2%	4,1	761,3	821,1
		P4	15	866,1	17,1	2%	4,4	839,7	899,5
		P8	15	841,2	16,2	2%	4,2	813,3	873,9
		P12	15	783,9	17,9	2%	4,6	756,0	820,9
		P16	15	812,3	17,4	2%	4,5	786,0	849,5
		P20	15	802,8	17,8	2%	4,6	774,0	842,7
		P24	15	776,9	18,6	2%	4,8	746,5	811,9
		Total	105	810,9	34,4	4%	3,4	746,5	899,5
	Dens. Ap. (g/cm <sup>3</sup> )	P0	15	1,04	0,02	2%	0,005	1,00	1,07
		P4	15	1,09	0,07	6%	0,018	0,96	1,14
		P8	15	1,10	0,02	2%	0,005	1,05	1,13
		P12	15	1,05	0,02	2%	0,006	1,00	1,08
		P16	15	1,07	0,02	2%	0,005	1,03	1,11
		P20	15	1,06	0,02	2%	0,005	1,01	1,10
P24		15	1,05	0,04	3%	0,009	0,98	1,15	
Total		105	1,06	0,04	4%	0,004	0,96	1,15	

Onde: P – período de exposição; CV – coeficiente de variação.

Tabela 5. Análise de variância para a massa e densidade aparente para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C.

		Fonte de Variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05)	
Marupá	ST	Entre grupos	1247824,8	6	207970,80	37,81	0,000	
		Massa (g) Dentro dos grupos	539061,8	98	5500,63			
		Total	1786886,6	104				
	CCA	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) Entre grupos	2,2	6	0,36	34,95	0,000	
		Dentro dos grupos	1,0	98	0,01			
		Total	3,2	104				
	Tauari	ST	Entre grupos	112304,5	6	18717,42	88,79	0,000
			Massa (g) Dentro dos grupos	20658,7	98	210,80		
			Total	132963,2	104			
		CCA	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) Entre grupos	0,2	6	0,03	66,51	0,000
			Dentro dos grupos	0,0	98	0,00		
			Total	0,2	104			
Cumaru	ST	Entre grupos	1127879,7	6	187979,95	19,20	0,000	
		Massa (g) Dentro dos grupos	959282,4	98	9788,60			
		Total	2087162,1	104				
	CCA	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) Entre grupos	1,5	6	0,24	16,76	0,000	
		Dentro dos grupos	1,4	98	0,01			
		Total	2,9	104				
	Tauari	ST	Entre grupos	143546,1	6	23924,36	81,59	0,000
			Massa (g) Dentro dos grupos	28737,0	98	293,23		
			Total	172283,1	104			
		CCA	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) Entre grupos	0,1	6	0,02	21,48	0,000
			Dentro dos grupos	0,1	98	0,00		
			Total	0,3	104			
Cumaru	ST	Entre grupos	82802,4	6	13800,40	58,27	0,000	
		Massa (g) Dentro dos grupos	23208,9	98	236,83			
		Total	106011,3	104				
	CCA	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) Entre grupos	0,1	6	0,01	15,79	0,000	
		Dentro dos grupos	0,1	98	0,00			
		Total	0,1	104				
Tauari	ST	Entre grupos	93552,7	6	15592,11	52,18	0,000	
		Massa (g) Dentro dos grupos	29284,6	98	298,82			
		Total	122837,3	104				
	CCA	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) Entre grupos	0,0	6	0,01	6,40	0,000	
		Dentro dos grupos	0,1	98	0,00			
		Total	0,2	104				

Tabela 6. Teste de Tukey para a massa (g) da madeira de marupá sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P24	15	50,28		
P20	15	90,88		
P16	15		236,20	
P12	15		277,62	
P0	15		301,56	301,56
P8	15		308,76	308,76
P4	15			364,00
Sig.		0,74	0,11	0,25

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 7. Teste de Tukey para a massa (g) da madeira de marupá tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
P24	15	311,69				
P12	15	321,60	321,60			
P16	15		328,05			
P20	15		333,35			
P8	15			356,27		
P0	15				377,40	
P4	15					410,67
Sig.		0,50	0,30	1,00	1,00	1,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 8. Teste de Tukey para a massa (g) da madeira de tauari sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
P24	15	294,48				
P20	15	322,72	322,72			
P16	15	394,95	394,95	394,95		
P12	15		430,37	430,37	430,37	
P0	15			482,94	482,94	
P8	15				507,70	
P4	15					618,40
Sig.		0,09	0,05	0,20	0,34	1,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 9. Teste de Tukey para a massa (g) da madeira de tauari tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )					
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
P24	15	497,31					
P12	15	505,10	505,10				
P16	15		518,66	518,66			
P20	15			525,86			
P8	15				551,90		
P0	15					576,41	
P4	15						606,39
Sig.		0,87	0,32	0,91	1,00	1,00	1,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 10. Teste de Tukey para a massa (g) da madeira de cumaru sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
P24	15	759,81				
P12	15	767,44	767,44			
P20	15		783,78	783,78		
P0	15			786,25		
P16	15			788,95		
P8	15				812,88	
P4	15					849,78
Sig.		0,82	0,07	0,97	1,00	1,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 11. Teste de Tukey para a massa (g) da madeira de cumaru tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
P24	15	776,85				
P12	15	783,92	783,92			
P0	15	793,20	793,20			
P20	15		802,84	802,84		
P16	15			812,34		
P8	15				841,19	
P4	15					866,15
Sig.		0,14	0,05	0,74	1,00	1,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 12. Teste de Tukey para a densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) da madeira de marupá sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P24	15	0,09		
P20	15	0,12		
P16	15		0,32	
P12	15		0,38	0,38
P0	15		0,42	0,42
P8	15		0,42	0,42
P4	15			0,48
Sig.		0,97	0,14	0,06

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 13. Teste de Tukey para a densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) da madeira de marupá tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
P24	15	0,41				
P12	15		0,43			
P20	15		0,44			
P16	15		0,44			
P8	15			0,47		
P0	15				0,50	
P4	15					0,54
Sig.		10,00	0,96	10,00	10,00	10,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 14. Teste de Tukey para a densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) da madeira de tauari sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P24	15	0,37		
P20	15	0,39		
P16	15	0,47	0,47	
P12	15		0,53	
P8	15		0,60	
P0	15		0,60	0,60
P4	15			0,73
Sig.		0,19	0,09	0,06

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 15. Teste de Tukey para a densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) da madeira de tauari tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
P12	15	0,61			
P24	15	0,61			
P16	15	0,62			
P20	15	0,64	0,64		
P8	15		0,66	0,66	
P0	15			0,68	
P4	15				0,72
Sig.		0,30	0,58	0,75	10,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 16. Teste de Tukey para a densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) da madeira de cumaru sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P24	15	1,01		
P12	15	1,02	1,02	
P20	15	1,02	1,02	
P0	15	1,03	1,03	
P16	15	1,04	1,04	
P8	15		1,04	
P4	15			1,10
Sig.		0,15	0,18	1,00

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 17. Teste de Tukey para a densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) da madeira de cumaru tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P0	15	1,04		
P12	15	1,05		
P24	15	1,05		
P20	15	1,06	1,06	
P16	15	1,07	1,07	1,07
P4	15		1,09	1,09
P8	15			1,10
Sig.		0,35	0,09	0,41

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 18. Análise de variância fatorial dos efeitos da espécie, tratamento químico e dos períodos de avaliação sobre a velocidade de propagação pelo método de ondas de tensão.

Fonte de variação	Propriedade	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Significância
Espécie	VLL	38795530,8	2	19397765,4	49,9	0,000
	VTR	3358961,1	2	1679480,5	17,0	0,000
	VTR sup	6059179,4	2	3029589,7	35,8	0,000
	VTR inf	12513376,1	2	6256688,0	97,7	0,000
Tempo	VLL	70734555,2	6	11789092,5	30,3	0,000
	VTR	8161033,7	6	1360172,3	13,8	0,000
	VTR sup	15727293,2	6	2621215,5	31,0	0,000
	VTR inf	17148494,6	6	2858082,4	44,6	0,000
Tratamento	VLL	47786361,6	1	47786361,6	123,0	0,000
	VTR	869566,3	1	869566,3	8,8	0,003
	VTR sup	1275540,3	1	1275540,3	15,1	0,000
	VTR inf	6364689,2	1	6364689,2	99,4	0,000
Espécie * Tempo	VLL	56113625,9	12	4676135,5	12,0	0,000
	VTR	5652057,3	12	471004,8	4,8	0,000
	VTR sup	6633246,3	12	552770,5	6,5	0,000
	VTR inf	10457334,1	12	871444,5	13,6	0,000
Espécie * Tratamento	VLL	48351794,8	2	24175897,4	62,2	0,000
	VTR	1777364,5	2	888682,2	9,0	0,000
	VTR sup	1521260,4	2	760630,2	9,0	0,000
	VTR inf	6135871,8	2	3067935,9	47,9	0,000
Tempo * Tratamento	VLL	107150629,1	6	17858438,2	46,0	0,000
	VTR	6626015,8	6	1104336,0	11,2	0,000
	VTR sup	10487376,3	6	1747896,0	20,7	0,000
	VTR inf	15281874,2	6	2546979,0	39,8	0,000
Espécie * Tempo * Tratamento	VLL	68881320,5	12	5740110,0	14,8	0,000
	VTR	4529535,8	12	377461,3	3,8	0,000
	VTR sup	6497927,0	12	541493,9	6,4	0,000
	VTR inf	8698295,0	12	724857,9	11,3	0,000
Erro	VLL	228449969,4	588	388520,4		
	VTR	57987699,9	588	98618,5		
	VTR sup	49768182,9	588	84639,8		
	VTR inf	37652909,6	588	64035,6		
Total	VLL	11587495674,2	630			
	VTR	917848437,8	630			
	VTR sup	1025245140,7	630			
	VTR inf	855730614,1	630			

Tabela 19. Análise de variância fatorial dos efeitos da espécie, tratamento químico e dos períodos de avaliação sobre a velocidade de propagação pelo método de ultrassom.

Fonte de variação	Propriedade	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Significância
Espécie	VLL	97417859,3	2	48708929,6	115,8	0,000
	VTR	47321777,7	2	23660888,8	513,8	0,000
	VTR sup	30127343,7	2	15063671,9	194,5	0,000
	VTR inf	62406790,9	2	31203395,5	785,7	0,000
Tempo	VLL	122990590,6	6	20498431,8	48,7	0,000
	VTR	27813890,6	6	4635648,4	100,7	0,000
	VTR sup	29946774,8	6	4991129,1	64,4	0,000
	VTR inf	29239478,2	6	4873246,4	122,7	0,000
Tratamento	VLL	38977598,6	1	38977598,6	92,6	0,000
	VTR	9668769,3	1	9668769,3	210,0	0,000
	VTR sup	5526590,8	1	5526590,8	71,4	0,000
	VTR inf	12423788,3	1	12423788,3	312,8	0,000
Espécie * Tempo	VLL	47416395,6	12	3951366,3	9,4	0,000
	VTR	7089408,1	12	590784,0	12,8	0,000
	VTR sup	7324391,3	12	610365,9	7,9	0,000
	VTR inf	7370417,7	12	614201,5	15,5	0,000
Espécie * Tratamento	VLL	35961985,9	2	17980992,9	42,7	0,000
	VTR	6415100,6	2	3207550,3	69,7	0,000
	VTR sup	4888394,0	2	2444197,0	31,6	0,000
	VTR inf	6849286,5	2	3424643,3	86,2	0,000
Tempo * Tratamento	VLL	89297538,9	6	14882923,1	35,4	0,000
	VTR	11914956,3	6	1985826,0	43,1	0,000
	VTR sup	11326533,0	6	1887755,5	24,4	0,000
	VTR inf	12418218,5	6	2069703,1	52,1	0,000
Espécie * Tempo * Tratamento	VLL	67878225,5	12	5656518,8	13,4	0,000
	VTR	8703880,0	12	725323,3	15,8	0,000
	VTR sup	8671465,3	12	722622,1	9,3	0,000
	VTR inf	8401952,4	12	700162,7	17,6	0,000
Erro	VLL	247011692,7	588	420803,6		
	VTR	27030988,7	588	46049,4		
	VTR sup	45458868,8	588	77442,7		
	VTR inf	23312947,6	588	39715,4		
Total	VLL	13356271462,3	630			
	VTR	1745059826,9	630			
	VTR sup	1943739887,9	630			
	VTR inf	1619667161,3	630			

Tabela 20. Análise de variância para a velocidade de propagação sonora para os métodos de ultrassom e ondas de tensão.

Madeira	Fonte de Variação	Soma dos quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05)
	Entre grupos	4026,2	1	4026,2	1,29	0,225
	VLLus Dentro dos grupos	90582,1	28	3123,5		
	Total	381118,0	29			
	Entre grupos	6039,3	1	6039,3	1,24	0,221
	VTRus Dentro dos grupos	135873,1	28	4852,6		
	Total	569087,1	29			
Cumaru	Entre grupos	2904,6	1	2904,6	0,37	0,548
	VLLsw Dentro dos grupos	212141,0	28	7857,1		
	Total	215045,5	29			
	Entre grupos	2013,1	1	2013,1	1,20	0,283
	VTRsw Dentro dos grupos	45291,0	28	1677,4		
	Total	47304,1	29			
	Entre grupos	593676,7	1	593676,7	13,38	0,001
	VLLus Dentro dos grupos	1109173,3	28	44366,9		
	Total	1702850,1	29			
	Entre grupos	454780,2	1	454780,2	5,46	0,027
	VTRus Dentro dos grupos	2250930,6	28	83367,8		
	Total	2705710,8	29			
Marupá	Entre grupos	2809952,6	1	2809952,6	317,12	0,000
	VLLsw Dentro dos grupos	230383,8	28	8860,9		
	Total	3040336,5	29			
	Entre grupos	399076,4	1	399076,4	48,05	0,000
	VTRsw Dentro dos grupos	232568,9	28	8306,0		
	Total	631645,3	29			
	Entre grupos	810747,3	1	810747,3	30,88	0,000
	VLLus Dentro dos grupos	682579,1	28	26253,0		
	Total	1493326,4	29			
	Entre grupos	56,0	1	56,0	0,00	0,952
	VTRus Dentro dos grupos	428171,9	28	15291,9		
	Total	428227,9	29			
Tauari	Entre grupos	2647695,8	1	2647695,8	91,24	0,000
	VLLsw Dentro dos grupos	812557,7	28	29019,9		
	Total	3460253,5	29			
	Entre grupos	303492,5	1	303492,5	78,77	0,000
	VTRsw Dentro dos grupos	104022,7	28	3852,7		
	Total	407515,2	29			

VLL – velocidade de propagação no sentido longitudinal; VTR – velocidade de propagação no sentido transversal. US – ultrassom; SW - stress wave timer.

Tabela 21. Análise de variância para as regressões entre a velocidade de propagação e a densidade básica para os métodos de ultrassom e ondas de tensão.

Fonte de variação		Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05)	
ST	VLLus	Regressão	519125,8	2	259562,9	8,04	0,001
		Resíduo	1162243,9	36	32284,6		
		Total	1681369,7	38			
	VTRus	Regressão	548224,4	2	274112,2	7,00	0,003
		Resíduo	1408762,5	36	39132,3		
		Total	1956986,9	38			
	VLLsw	Regressão	366690,6	2	183345,3	17,33	0,000
		Resíduo	380790,2	36	10577,5		
		Total	747480,8	38			
	VTRsw	Regressão	475346,4	2	237673,2	50,25	0,000
		Resíduo	170268,1	36	4729,7		
		Total	645614,4	38			
CCA	VLLus	Regressão	658909,6	2	329454,8	13,88	0,000
		Resíduo	807133,2	34	23739,2		
		Total	1466042,7	36			
	VTRus	Regressão	1448,1	2	724,1	0,03	0,969
		Resíduo	786950,5	34	23145,6		
		Total	788398,7	36			
	VLLsw	Regressão	2573182,7	1	2573182,7	117,74	0,000
		Resíduo	764943,4	35	21855,5		
		Total	3338126,1	36			
	VTRsw	Regressão	1647954,5	2	823977,2	134,38	0,000
		Resíduo	208471,2	34	6131,5		
		Total	1856425,6	36			

VLL – velocidade de propagação no sentido longitudinal; VTR – velocidade de propagação no sentido transversal. US – ultrassom; SW - stress wave timer.

Tabela 22. Análise descritiva para a VLLsw e VTRsw para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	VLLsw (m/s)	P0	15	4743,6	301,8	6%	77,9	4390,2	5444,4
		P4	15	4607,4	524,6	11%	135,4	3848,2	5787,4
		P8	15	4129,6	243,2	6%	62,8	3798,4	4495,4
		P12	15	4295,9	508,6	12%	131,3	3164,8	5365,0
		P16	15	3309,7	1431,8	43%	369,7	0,0	4711,5
		P20	15	1198,3	1781,9	149%	460,1	0,0	4273,3
		P24	15	763,1	1587,6	208%	409,9	0,0	4298,0
		Total	105	3292,5	1868,0	57%	182,3	0,0	5787,4
	VTRsw (m/s)	P0	15	1448,4	259,4	18%	67,0	1104,4	1873,8
		P4	15	1270,7	399,8	31%	103,2	758,5	2226,6
		P8	15	1360,9	344,8	25%	89,0	953,6	2362,7
		P12	15	1300,7	275,0	21%	71,0	847,2	1962,1
		P16	15	1030,3	526,3	51%	135,9	0,0	1821,9
		P20	15	286,5	504,7	176%	130,3	0,0	1270,5
P24		15	531,9	1120,5	211%	289,3	0,0	3211,2	
Total		105	1032,8	687,6	67%	67,1	0,0	3211,2	
CCA-C	VLLsw (m/s)	P0	15	4352,7	337,4	8%	87,1	3920,0	5231,3
		P4	15	4144,0	271,9	7%	70,2	3798,4	4768,2
		P8	15	4357,2	377,2	9%	97,4	3923,7	5333,3
		P12	15	4774,3	454,4	10%	117,3	4349,1	6125,0
		P16	15	4788,3	549,2	11%	141,8	4260,4	6521,7
		P20	15	4572,5	314,0	7%	81,1	4126,1	5122,0
		P24	15	4733,8	288,8	6%	74,6	4411,8	5263,2
		Total	105	4531,8	438,4	10%	42,8	3798,4	6521,7
	VTRsw (m/s)	P0	15	1123,3	318,0	28%	82,1	797,6	1862,9
		P4	15	1255,2	382,3	30%	98,7	908,5	2382,1
		P8	15	1329,9	317,8	24%	82,1	1026,2	1991,2
		P12	15	1251,3	203,7	16%	52,6	935,7	1557,5
		P16	15	1217,9	268,0	22%	69,2	880,3	1761,7
		P20	15	1155,6	235,6	20%	60,8	872,1	1586,3
P24		15	1193,5	186,5	16%	48,2	980,4	1476,7	
Total		105	1218,1	280,0	23%	27,3	797,6	2382,1	

Tabela 23. Análise descritiva para a VLLsw e VTRsw para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	VLLsw (m/s)	P0	15	4428,1	258,8	6%	66,8	4137,9	5104,2
		P4	15	4169,8	319,7	8%	82,5	3732,1	4829,7
		P8	15	4236,4	283,8	7%	73,3	3804,9	4800,0
		P12	15	4434,3	353,8	8%	91,4	3778,9	4952,4
		P16	15	3730,6	1101,2	30%	284,3	0,0	4814,8
		P20	15	2859,3	1499,8	52%	387,2	0,0	4116,1
		P24	15	2825,0	1479,0	52%	381,9	0,0	3978,8
		Total	105	3811,9	1112,8	29%	108,6	0,0	5104,2
	VTRsw (m/s)	P0	15	1190,7	133,2	11%	34,4	973,5	1429,4
		P4	15	1251,0	134,0	11%	34,6	1047,0	1451,9
		P8	15	1241,8	200,3	16%	51,7	931,4	1639,8
		P12	15	1119,0	68,7	6%	17,7	994,7	1207,2
		P16	15	753,1	275,5	37%	71,1	0,0	1145,5
		P20	15	719,0	428,1	60%	110,5	0,0	1193,1
P24		15	845,4	656,5	78%	169,5	0,0	2588,2	
Total		105	1017,1	389,7	38%	38,0	0,0	2588,2	
CCA-C	VLLsw (m/s)	P0	15	3975,9	200,8	5%	51,8	3594,5	4298,0
		P4	15	3977,5	162,6	4%	42,0	3687,9	4285,7
		P8	15	4383,7	229,9	5%	59,4	4094,5	4829,7
		P12	15	4549,1	210,3	5%	54,3	4321,3	5016,1
		P16	15	4651,2	329,8	7%	85,1	4038,5	5208,3
		P20	15	4440,4	309,6	7%	79,9	3888,9	4932,9
		P24	15	4419,4	296,2	7%	76,5	3957,8	5084,7
		Total	105	4342,5	349,8	8%	34,1	3594,5	5208,3
	VTRsw (m/s)	P0	15	1010,6	133,6	13%	34,5	770,0	1193,1
		P4	15	1079,9	156,4	14%	40,4	843,0	1351,5
		P8	15	1172,4	116,3	10%	30,0	1004,3	1382,3
		P12	15	1229,7	141,0	11%	36,4	949,4	1553,2
		P16	15	1086,2	113,3	10%	29,2	900,1	1239,5
		P20	15	1100,4	98,2	9%	25,4	876,6	1240,5
P24		15	1186,2	100,1	8%	25,8	919,7	1333,2	
Total		105	1123,6	139,6	12%	13,6	770,0	1553,2	

Tabela 24. Análise descritiva para a VLLsw e VTRsw para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	VLLsw (m/s)	P0	15	4452,8	98,6	2%	25,5	4322,8	4707,7
		P4	15	4535,4	183,0	4%	47,3	4261,8	4841,8
		P8	15	4602,7	135,9	3%	35,1	4434,8	4807,7
		P12	15	4664,5	276,1	6%	71,3	4238,2	5349,7
		P16	15	4613,8	144,1	3%	37,2	4398,8	4888,2
		P20	15	4589,9	217,5	5%	56,2	4168,9	5016,4
		P24	15	4461,1	121,2	3%	31,3	4191,8	4664,6
		Total	105	4560,0	187,7	4%	18,3	4168,9	5349,7
	VTRsw (m/s)	P0	15	1238,7	103,2	8%	26,6	1117,5	1456,7
		P4	15	1342,7	257,0	19%	66,4	1101,3	1946,6
		P8	15	1267,7	213,5	17%	55,1	1022,4	1783,6
		P12	15	1393,6	269,6	19%	69,6	1071,1	1923,0
		P16	15	1207,7	146,0	12%	37,7	1036,3	1621,1
		P20	15	1322,8	242,8	18%	62,7	986,4	1818,5
P24		15	1184,8	125,0	11%	32,3	977,0	1437,5	
Total		105	1279,7	210,2	16%	20,5	977,0	1946,6	
CCA-C	VLLsw (m/s)	P0	15	4325,9	118,2	3%	30,5	4155,1	4526,6
		P4	15	4283,5	209,7	5%	54,1	3913,0	4601,2
		P8	15	4456,1	126,0	3%	32,5	4249,3	4687,5
		P12	15	4555,8	239,4	5%	61,8	4261,4	5119,5
		P16	15	4526,3	113,4	3%	29,3	4285,7	4717,0
		P20	15	4464,6	117,9	3%	30,4	4273,5	4658,4
		P24	15	4486,2	94,8	2%	24,5	4249,3	4672,9
		Total	105	4442,6	177,0	4%	17,3	3913,0	5119,5
	VTRsw (m/s)	P0	15	1215,7	122,9	10%	31,7	1016,6	1441,5
		P4	15	1168,9	195,6	17%	50,5	798,3	1476,8
		P8	15	1201,3	239,1	20%	61,7	894,3	1724,6
		P12	15	1317,3	205,6	16%	53,1	1088,0	1715,9
		P16	15	1163,1	104,0	9%	26,9	1012,2	1337,5
		P20	15	1230,5	174,0	14%	44,9	995,5	1482,2
P24		15	1179,2	133,5	11%	34,5	996,1	1574,7	
Total		105	1210,9	175,9	15%	17,2	798,3	1724,6	

Tabela 25. Análise de variância para a VLLsw e VTRsw para as madeiras de marupá, tauri e cumaru sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C.

		Fonte de Variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05)	
Marupá	ST	VLLsw (m/s)	Entre grupos	244888205,2	6	40814700,9	33,9	0,000
		Dentro dos grupos	118016082,1	98	1204245,7			
		Total	362904287,3	104				
		VTRsw (m/s)	Entre grupos	18248229,0	6	3041371,5	9,6	0,000
		Dentro dos grupos	30922275,6	98	315533,4			
		Total	49170504,5	104				
	CCA	VLLsw (m/s)	Entre grupos	5700172,8	6	950028,8	6,5	0,000
		Dentro dos grupos	14283640,6	98	145751,4			
		Total	19983813,4	104				
		VTRsw (m/s)	Entre grupos	427086,2	6	71181,0	0,9	0,496
		Dentro dos grupos	7725934,6	98	78836,1			
		Total	8153020,8	104				
Tauari	ST	VLLsw (m/s)	Entre grupos	44454159,0	6	7409026,5	8,6	0,000
		Dentro dos grupos	84338324,2	98	860595,1			
		Total	128792483,2	104				
		VTRsw (m/s)	Entre grupos	5005595,6	6	834265,9	7,6	0,000
		Dentro dos grupos	10789213,1	98	110094,0			
		Total	15794808,6	104				
	CCA	VLLsw (m/s)	Entre grupos	6341460,3	6	1056910,0	16,2	0,000
		Dentro dos grupos	6386267,1	98	65166,0			
		Total	12727727,4	104				
		VTRsw (m/s)	Entre grupos	512572,4	6	85428,7	5,5	0,000
		Dentro dos grupos	1514601,7	98	15455,1			
		Total	2027174,0	104				
Cumaru	ST	VLLsw (m/s)	Entre grupos	576143,6	6	96023,9	3,0	0,009
		Dentro dos grupos	3089176,9	98	31522,2			
		Total	3665320,5	104				
		VTRsw (m/s)	Entre grupos	522162,7	6	87027,1	2,1	0,061
		Dentro dos grupos	4071970,4	98	41550,7			
		Total	4594133,1	104				
	CCA	VLLsw (m/s)	Entre grupos	919989,9	6	153331,6	6,4	0,000
		Dentro dos grupos	2336478,5	98	23841,6			
		Total	3256468,4	104				
		VTRsw (m/s)	Entre grupos	252996,8	6	42166,1	1,4	0,225
		Dentro dos grupos	2963704,6	98	30241,9			
		Total	3216701,4	104				

Tabela 26. Teste de Tukey para a VLLsw (m/s) para a madeira de marupá sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P24	15	763,1		
P20	15	1198,3		
P16	15		3309,7	
P8	15		4129,6	4129,6
P12	15		4295,9	4295,9
P4	15			4607,4
P0	15			4743,6
Sig.		0,931	0,185	0,725

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 27. Teste de Tukey para a VTRsw (m/s) para a madeira de marupá sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P20	15	286,5		
P24	15	531,9	531,9	
P16	15		1030,3	1030,3
P4	15			1270,7
P12	15			1300,7
P8	15			1360,9
P0	15			1448,4
Sig.		0,894	0,198	0,398

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 28. Teste de Tukey para a VTRsw (m/s) para a madeira de marupá tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
P4	15	4144,0			
P0	15	4352,7	4352,7		
P8	15	4357,2	4357,2	4357,2	
P20	15		4572,5	4572,5	4572,5
P24	15		4733,8	4733,8	4733,8
P12	15			4774,3	4774,3
P16	15				4788,3
Sig.		0,727	0,101	0,052	0,715

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 29. Teste de Tukey para a VLLsw (m/s) para a madeira de tauari sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
P24	15	2825,0	
P20	15	2859,3	
P16	15	3730,6	3730,6
P4	15		4169,8
P8	15		4236,4
P0	15		4428,1
P12	15		4434,3
Sig.		0,116	0,374

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 30. Teste de Tukey para a VTRsw (m/s) para a madeira de tauari sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P20	15	719,0		
P16	15	753,1		
P24	15	845,4	845,4	
P12	15		1119,0	1119,0
P0	15		1190,7	1190,7
P8	15			1241,8
P4	15			1251,0
Sig.		0,942	0,076	0,930

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 31. Teste de Tukey para a VLLsw (m/s) para a madeira de tauari tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
P0	15	3975,9	
P4	15	3977,5	
P8	15		4383,7
P24	15		4419,4
P20	15		4440,4
P12	15		4549,1
P16	15		4651,2
Sig.		1,000	0,072

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 32. Teste de Tukey para a VTRsw (m/s) para a madeira de tauari tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P0	15	1010,6		
P4	15	1079,9	1079,9	
P16	15	1086,2	1086,2	
P20	15	1100,4	1100,4	1100,4
P8	15		1172,4	1172,4
P24	15		1186,2	1186,2
P12	15			1229,7
Sig.		0,436	0,235	0,076

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 33. Teste de Tukey para a VLLsw (m/s) para a madeira de cumaru sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
P0	15	4452,8	
P24	15	4461,1	
P4	15	4535,4	4535,4
P20	15	4589,9	4589,9
P8	15	4602,7	4602,7
P16	15	4613,8	4613,8
P12	15		4664,5
Sig.		0,177	0,427

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 34. Teste de Tukey para a VTRLsw (m/s) para a madeira de cumaru tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P4	15	4283,5		
P0	15	4325,9	4325,9	
P8	15		4456,1	4456,1
P20	15		4464,6	4464,6
P24	15		4486,2	4486,2
P16	15			4526,3
P12	15			4555,8
Sig.		0,989	0,077	0,573

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 35. Análise descritiva para a VLLus e VTRus para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	VLLus (m/s)	P0	15	5307,2	173,2	3,3%	44,7	5090,1	5671,3
		P4	15	4362,4	149,7	3,4%	38,7	4134,4	4596,6
		P8	15	4204,2	135,5	3,2%	35,0	4016,7	4414,4
		P12	15	4427,6	201,6	4,6%	52,0	4217,9	4845,0
		P16	15	3779,5	1554,4	41,1%	401,3	0,0	4880,5
		P20	15	1392,6	2042,0	146,6%	527,2	0,0	4426,4
		P24	15	903,0	1870,1	207,1%	482,9	0,0	4664,2
		Total	105	3482,4	1941,8	55,8%	189,5	0,0	5671,3
	VTRus (m/s)	P0	15	1935,4	107,1	5,5%	27,7	1758,6	2097,7
		P4	15	1674,5	96,9	5,8%	25,0	1496,3	1829,9
		P8	15	1406,7	124,7	8,9%	32,2	1159,3	1589,2
		P12	15	1428,3	201,4	14,1%	52,0	953,0	1651,6
		P16	15	1288,0	559,3	43,4%	144,4	0,0	1908,0
		P20	15	396,0	582,6	147,1%	150,4	0,0	1329,7
P24		15	264,2	551,0	208,6%	142,3	0,0	1500,1	
Total		105	1199,0	695,6	58,0%	67,9	0,0	2097,7	
CCA-C	VLLus (m/s)	P0	15	4710,8	117,4	2,5%	30,3	4498,6	4916,4
		P4	15	4315,2	126,4	2,9%	32,6	4106,1	4495,4
		P8	15	4264,3	107,4	2,5%	27,7	4064,4	4450,5
		P12	15	4512,2	93,8	2,1%	24,2	4312,7	4669,3
		P16	15	4773,0	119,6	2,5%	30,9	4545,5	4964,5
		P20	15	4474,9	117,3	2,6%	30,3	4259,1	4651,2
		P24	15	4739,6	151,3	3,2%	39,1	4537,2	5025,1
		Total	105	4541,4	224,4	4,9%	21,9	4064,4	5025,1
	VTRus (m/s)	P0	15	1714,8	62,1	3,6%	16,0	1619,9	1823,3
		P4	15	1744,8	91,6	5,2%	23,6	1632,8	1903,7
		P8	15	1551,9	73,1	4,7%	18,9	1442,7	1662,2
		P12	15	1627,3	74,2	4,6%	19,2	1526,5	1740,8
		P16	15	1918,5	116,8	6,1%	30,1	1765,4	2138,3
		P20	15	1583,8	94,0	5,9%	24,3	1371,8	1706,8
P24		15	1654,5	84,6	5,1%	21,8	1527,5	1778,7	
Total		105	1685,1	142,3	8,4%	13,9	1371,8	2138,3	

Tabela 36. Análise descritiva para a VLLus e VTRus para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	VLLus (m/s)	P0	15	5569,2	149,8	2,7%	38,7	5279,2	5829,6
		P4	15	4399,0	111,9	2,5%	28,9	4190,2	4597,7
		P8	15	4178,0	148,9	3,6%	38,4	3837,6	4358,8
		P12	15	4525,8	106,5	2,4%	27,5	4315,4	4622,6
		P16	15	4098,8	1154,2	28,2%	298,0	0,0	4823,7
		P20	15	3208,8	1673,0	52,1%	432,0	0,0	4391,9
		P24	15	3284,0	1707,5	52,0%	440,9	0,0	4401,4
		Total	105	4180,5	1230,1	29,4%	120,0	0,0	5829,6
	VTRus (m/s)	P0	15	1773,1	117,8	6,6%	30,4	1399,0	1864,9
		P4	15	1563,8	85,2	5,4%	22,0	1293,6	1665,2
		P8	15	1172,8	89,2	7,6%	23,0	995,1	1327,6
		P12	15	1241,5	87,8	7,1%	22,7	1060,8	1348,7
		P16	15	1136,7	340,7	30,0%	88,0	0,0	1490,3
		P20	15	734,8	416,9	56,7%	107,7	0,0	1251,1
		P24	15	1096,7	748,5	68,2%	193,3	0,0	2875,7
Total		105	1245,7	466,3	37,4%	45,5	0,0	2875,7	
CCA-C	VLLus (m/s)	P0	15	4980,8	175,8	3,5%	45,4	4659,5	5236,7
		P4	15	4635,0	155,6	3,4%	40,2	4347,8	4966,6
		P8	15	4470,5	165,8	3,7%	42,8	4163,1	4727,3
		P12	15	4679,8	179,0	3,8%	46,2	4375,0	4891,8
		P16	15	4925,1	198,4	4,0%	51,2	4588,0	5280,2
		P20	15	4615,9	171,5	3,7%	44,3	4321,0	4919,7
		P24	15	4683,0	233,1	5,0%	60,2	4417,0	5230,1
		Total	105	4712,9	244,6	5,2%	23,9	4163,1	5280,2
	VTRus (m/s)	P0	15	1565,1	99,4	6,4%	25,7	1340,8	1693,9
		P4	15	1613,2	84,2	5,2%	21,7	1430,4	1707,7
		P8	15	1362,0	132,1	9,7%	34,1	1066,6	1488,8
		P12	15	1413,3	131,0	9,3%	33,8	1131,0	1539,6
		P16	15	1638,5	160,6	9,8%	41,5	1256,7	1798,4
		P20	15	1400,3	126,0	9,0%	32,5	1074,7	1510,9
		P24	15	1456,8	127,4	8,7%	32,9	1168,1	1571,2
Total		105	1492,7	159,5	10,7%	15,6	1066,6	1798,4	

Tabela 37. Análise descritiva para a VLLus e VTRus para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de avaliação no campo de apodrecimento.

Tratamento	Propriedade	Avaliação	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Sem tratamento	VLLus (m/s)	P0	15	5600,1	100,6	1,8%	26,0	5382,1	5723,9
		P4	15	4968,5	66,5	1,3%	17,2	4882,8	5079,7
		P8	15	4801,9	78,0	1,6%	20,1	4712,5	4975,6
		P12	15	4873,1	68,6	1,4%	17,7	4766,4	4970,8
		P16	15	5126,2	87,1	1,7%	22,5	5010,0	5379,7
		P20	15	4879,2	68,5	1,4%	17,7	4743,8	4980,5
		P24	15	4944,7	68,4	1,4%	17,7	4830,9	5074,6
		Total	105	5027,7	264,3	5,3%	25,8	4712,5	5723,9
	VTRus (m/s)	P0	15	2102,4	89,2	4,2%	23,0	2007,3	2308,2
		P4	15	2205,5	105,1	4,8%	27,1	2041,7	2442,6
		P8	15	1856,5	108,4	5,8%	28,0	1727,5	2093,0
		P12	15	1816,7	90,4	5,0%	23,3	1708,3	2020,1
		P16	15	2212,4	120,1	5,4%	31,0	2087,3	2463,0
		P20	15	1842,2	96,4	5,2%	24,9	1723,7	2036,5
P24		15	1839,7	83,8	4,6%	21,6	1752,3	2041,5	
	Total	105	1982,2	195,7	9,9%	19,1	1708,3	2463,0	
CCA-C	VLLus (m/s)	P0	15	5441,3	92,3	1,7%	23,8	5313,5	5685,6
		P4	15	4869,1	73,2	1,5%	18,9	4780,1	5009,8
		P8	15	4685,5	86,2	1,8%	22,3	4587,2	4866,4
		P12	15	4776,8	76,7	1,6%	19,8	4690,4	4965,9
		P16	15	5008,8	71,0	1,4%	18,3	4916,4	5161,9
		P20	15	4785,1	69,9	1,5%	18,0	4699,2	4927,5
		P24	15	4865,8	74,7	1,5%	19,3	4748,3	5054,5
		Total	105	4918,9	245,7	5,0%	24,0	4587,2	5685,6
	VTRus (m/s)	P0	15	2058,7	45,3	2,2%	11,7	2001,3	2170,4
		P4	15	2224,2	53,1	2,4%	13,7	2141,4	2325,6
		P8	15	1857,5	54,5	2,9%	14,1	1776,9	1965,0
		P12	15	1800,7	63,1	3,5%	16,3	1730,9	1941,6
		P16	15	2229,0	68,8	3,1%	17,8	2128,3	2392,4
		P20	15	1822,8	45,6	2,5%	11,8	1761,9	1919,2
P24		15	1830,7	52,4	2,9%	13,5	1689,5	1932,6	
	Total	105	1974,8	186,7	9,5%	18,2	1689,5	2392,4	

Tabela 38. Análise de variância para a VLLus e VTRus para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento (ST) e tratadas com CCA-C.

		Fonte de Variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05)	
Marupá	ST	VLLus (m/s)	Entre grupos	249417436,7	6	41569572,8	28,5	0,000
			Dentro dos grupos	142724925,9	98	1456376,8		
			Total	392142362,6	104			
		VTRus (m/s)	Entre grupos	35861111,9	6	5976852,0	40,5	0,000
			Dentro dos grupos	14459465,5	98	147545,6		
			Total	50320577,3	104			
	CCA	VLLus (m/s)	Entre grupos	3822632,7	6	637105,5	44,1	0,000
			Dentro dos grupos	1414640,3	98	14435,1		
			Total	5237273,0	104			
		VTRus (m/s)	Entre grupos	1368366,3	6	228061,0	30,3	0,000
			Dentro dos grupos	737882,1	98	7529,4		
			Total	2106248,4	104			
Tauari	ST	VLLus (m/s)	Entre grupos	57747499,9	6	9624583,3	9,5	0,000
			Dentro dos grupos	99609804,7	98	1016426,6		
			Total	157357304,6	104			
		VTRus (m/s)	Entre grupos	10197378,4	6	1699563,1	13,4	0,000
			Dentro dos grupos	12416915,2	98	126703,2		
			Total	22614293,6	104			
	CCA	VLLus (m/s)	Entre grupos	2894980,4	6	482496,7	14,2	0,000
			Dentro dos grupos	3328524,1	98	33964,5		
			Total	6223504,5	104			
		VTRus (m/s)	Entre grupos	1113984,8	6	185664,1	11,9	0,000
			Dentro dos grupos	1532565,6	98	15638,4		
			Total	2646550,3	104			
Cumaru	ST	VLLus (m/s)	Entre grupos	6670280,6	6	1111713,4	184,0	0,000
			Dentro dos grupos	592080,3	98	6041,6		
			Total	7262360,9	104			
		VTRus (m/s)	Entre grupos	3006254,2	6	501042,4	50,3	0,000
			Dentro dos grupos	975534,2	98	9954,4		
			Total	3981788,4	104			
	CCA	VLLus (m/s)	Entre grupos	5682168,9	6	947028,2	155,2	0,000
			Dentro dos grupos	597867,9	98	6100,7		
			Total	6280036,9	104			
		VTRus (m/s)	Entre grupos	3326366,9	6	554394,5	181,4	0,000
			Dentro dos grupos	299583,2	98	3057,0		
			Total	3625950,1	104			

Tabela 39. Teste de Tukey para a VLLus (m/s) para a madeira de marupá sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P24	15	903,0		
P20	15	1392,6		
P16	15		3779,5	
P8	15		4204,2	4204,2
P4	15		4362,4	4362,4
P12	15		4427,6	4427,6
P0	15			5307,2
Sig.		,923	,761	,170

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 40. Teste de Tukey para a VTRus (m/s) para a madeira de marupá sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P24	15	264,2		
P20	15	396,0		
P16	15		1288,0	
P8	15		1406,7	
P12	15		1428,3	
P4	15		1674,5	1674,5
P0	15			1935,4
Sig.		,965	,096	,512

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 41. Teste de Tukey para a VLLus (m/s) para a madeira de marupá tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P8	15	4264,3		
P4	15	4315,2		
P20	15		4474,9	
P12	15		4512,2	
P0	15			4710,8
P24	15			4739,6
P16	15			4773,0
Sig.		,907	,979	,791

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 42. Teste de Tukey para a VLLus (m/s) para a madeira de marupá tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
P8	15	1551,9				
P20	15	1583,8	1583,8			
P12	15	1627,3	1627,3	1627,3		
P24	15		1654,5	1654,5	1654,5	
P0	15			1714,8	1714,8	
P4	15				1744,8	
P16	15					1918,5
Sig.		,218	,289	,094	,075	1,000

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 43. Teste de Tukey para a VLLsw (m/s) para a madeira de tauari sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P20	15	3208,8		
P24	15	3284,0		
P16	15	4098,8	4098,8	
P8	15	4178,0	4178,0	
P4	15		4399,0	
P12	15		4525,8	4525,8
P0	15			5569,2
Sig.		,128	,907	,079

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 44. Teste de Tukey para a VTRus (m/s) para a madeira de tauari sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
P20	15	734,8			
P24	15	1096,7	1096,7		
P16	15		1136,7		
P8	15		1172,8	1172,8	
P12	15		1241,5	1241,5	
P4	15			1563,8	1563,8
P0	15				1773,1
Sig.		,089	,922	,050	,676

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 45. Teste de Tukey para a VLLus (m/s) para a madeira de tauari tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P8	15	4470,5		
P20	15	4615,9	4615,9	
P4	15	4635,0	4635,0	
P12	15		4679,8	
P24	15		4683,0	
P16	15			4925,1
P0	15			4980,8
Sig.		,192	,953	,982

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 46. Teste de Tukey para a VTRus (m/s) para a madeira de tauari tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P8	15	1362,0		
P20	15	1400,3		
P12	15	1413,3		
P24	15	1456,8	1456,8	
P0	15		1565,1	1565,1
P4	15			1613,2
P16	15			1638,5
Sig.		,374	,222	,677

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 47. Teste de Tukey para a VLLus (m/s) para a madeira de cumaru sem tratamento para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
P8	15	4801,9				
P12	15	4873,1	4873,1			
P20	15	4879,2	4879,2			
P24	15		4944,7	4944,7		
P4	15			4968,5		
P16	15				5126,2	
P0	15					5600,1
Sig.		,104	,163	,980	1,000	1,000

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 48. Teste de Tukey para a VTRus (m/s) para a madeira de cumaru tratada com CCA-C para os períodos de avaliação, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
P12	15	1816,7		
P24	15	1839,7		
P20	15	1842,2		
P8	15	1856,5		
P0	15		2102,4	
P4	15		2205,5	2205,5
P16	15			2212,4
Sig.		,929	,080	1,000

Onde: P – período da avaliação.

Tabela 49. Análise de variância para as regressões entre a velocidade de propagação e as notas atribuídas pela avaliação visual para as madeiras sem tratamento químico.

	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05)
VLLsw	Regressão	17870430,7	1	17870430,7	51,1	0,000
	Resíduo	5588572,8	16	349285,8		
	Total	23459003,6	17			
VTRsw	Regressão	1263203,01	1	1263203,1	42,8	0,000
	Resíduo	471777,4	16	29486,09		
	Total	1734980,4	17			
VLLus	Regressão	17484454,5	1	17484454,5	45,1	0,000
	Resíduo	6194503,2	16	387156,4		
	Total	23678957,778	17			
VTRus	Regressão	4185676,2	1	4185676,2	67,8	0,000
	Resíduo	986560,8	16	61660,1		
	Total	5172237,1	17			

VLL – velocidade de propagação no sentido longitudinal; VTR – velocidade de propagação no sentido transversal.

## APÊNDICE II

Tabela 1. Análise de variância para o parâmetro L\* para a madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	L*	Entre grupos	5754,6	1	5754,6	1063,3	0,00
		Dentro dos grupos	1612,8	298	5,4		
		Total	7367,5	299			
240h	L*	Entre grupos	6711,1	1	6711,1	1536,8	0,00
		Dentro dos grupos	1310,1	298	4,4		
		Total	8021,2	299			
480h	L*	Entre grupos	6132,3	1	6132,3	928,9	0,00
		Dentro dos grupos	1967,2	298	6,6		
		Total	8099,5	299			
720h	L*	Entre grupos	7365,7	1	7365,7	710,3	0,00
		Dentro dos grupos	3090,3	298	10,4		
		Total	10456,0	299			
960h	L*	Entre grupos	5603,5	1	5603,5	516,8	0,00
		Dentro dos grupos	3231,4	298	10,8		
		Total	8834,9	299			
1200h	L*	Entre grupos	4725,0	1	4725,0	279,1	0,00
		Dentro dos grupos	5044,7	298	16,9		
		Total	9769,7	299			

Onde: L\* - luminosidade.

Tabela 2. Análise de variância para o parâmetro a\* para a madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	a*	Entre grupos	840,3	1	840,3	856,8	0,00
		Dentro dos grupos	292,2	298	,9		
		Total	1132,6	299			
240h	a*	Entre grupos	1189,1	1	1189,1	389,1	,000
		Dentro dos grupos	916,6	298	3,0		
		Total	2105,8	299			
480h	a*	Entre grupos	711,1	1	711,141	135,7	,000
		Dentro dos grupos	1560,6	298	5,2		
		Total	2271,7	299			
720h	a*	Entre grupos	519,0	1	519,0	67,9	,000
		Dentro dos grupos	2276,8	298	7,6		
		Total	2795,9	299			
960h	a*	Entre grupos	649,5	1	649,5	79,9	,000
		Dentro dos grupos	2421,8	298	8,1		
		Total	3071,4	299			
1200h	a*	Entre grupos	591,5	1	591,5	58,1	,000
		Dentro dos grupos	3031,4	298	10,1		
		Total	3623,0	299			

Onde: a\* - coordenada vermelho-verde.

Tabela 3. Análise de variância para o parâmetro b\* para a madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	b*	Entre grupos	2623,7	1	2623,7	1340,7	,000
		Dentro dos grupos	583,2	298	2,0		
		Total	3206,9	299			
240h	b*	Entre grupos	3029,7	1	3029,7	585,0	,000
		Dentro dos grupos	1553,7	300	5,2		
		Total	4583,4	301			
480h	b*	Entre grupos	1829,9	1	1829,9	224,9	,000
		Dentro dos grupos	2424,3	298	8,1		
		Total	4254,2	299			
720h	b*	Entre grupos	1806,0	1	1806,0	148,8	,000
		Dentro dos grupos	3616,4	298	12,1		
		Total	5422,4	299			
960h	b*	Entre grupos	2203,3	1	2203,3	192,9	,000
		Dentro dos grupos	3404,2	298	11,4		
		Total	5607,6	299			
1200h	b*	Entre grupos	2058,5	1	2058,5	131,9	,000
		Dentro dos grupos	4650,2	298	15,6		
		Total	6708,7	299			

Onde: b\* - coordenada amarelo-azul.

Tabela 4. Análise de variância para o parâmetro C\* para a madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	C*	Entre grupos	3361,6	1	3361,6	1487,2	,000
		Dentro dos grupos	673,6	298	2,3		
		Total	4035,2	299			
240h	C*	Entre grupos	4186,4	1	4186,4	558,9	,000
		Dentro dos grupos	2247,0	300	7,5		
		Total	6433,4	301			
480h	C*	Entre grupos	2577,3	1	2577,3	206,1	,000
		Dentro dos grupos	3726,0	298	12,5		
		Total	6303,3	299			
720h	C*	Entre grupos	2368,0	1	2368,0	128,8	,000
		Dentro dos grupos	5480,4	298	18,4		
		Total	7848,4	299			
960h	C*	Entre grupos	2890,7	1	2890,7	160,8	,000
		Dentro dos grupos	5357,0	298	18,0		
		Total	8247,7	299			
1200h	C*	Entre grupos	2687,6	1	2687,6	113,8	,000
		Dentro dos grupos	7037,8	298	23,6		
		Total	9725,4	299			

Onde: C\* - cromaticidade

Tabela 5. Análise de variância para o parâmetro  $h^\circ$  para a madeira de cumaru sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	$h^\circ$	Entre grupos	261,6	1	261,6	58,7	,000
		Dentro dos grupos	1328,5	298	4,5		
		Total	1590,1	299			
240h	$h^\circ$	Entre grupos	121,9	1	121,9	32,1	,000
		Dentro dos grupos	1137,1	300	3,8		
		Total	1258,9	301			
480h	$h^\circ$	Entre grupos	52,3	1	52,3	9,6	,002
		Dentro dos grupos	1617,7	298	5,4		
		Total	1670,0	299			
720h	$h^\circ$	Entre grupos	0,0	1	0,0	0,0	,945
		Dentro dos grupos	2315,3	298	7,8		
		Total	2315,3	299			
960h	$h^\circ$	Entre grupos	6,9	1	6,9	0,8	,379
		Dentro dos grupos	2654,6	298	8,9		
		Total	2661,5	299			
1200h	$h^\circ$	Entre grupos	0,3	1	0,3	0,0	,884
		Dentro dos grupos	4031,5	298	13,5		
		Total	4031,8	299			

Onde:  $h^\circ$  - ângulo de tinta.

Tabela 6. Análise de variância para o parâmetro  $L^*$  para a madeira de tauari sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	$L^*$	Entre grupos	11014,7	1	11014,7	2914,4	,000
		Dentro dos grupos	1126,2	298	3,8		
		Total	12140,9	299			
240h	$L^*$	Entre grupos	12769,4	1	12769,4	2189,5	,000
		Dentro dos grupos	1679,6	288	5,8		
		Total	14449,0	289			
480h	$L^*$	Entre grupos	14030,3	1	14030,3	1108,8	,000
		Dentro dos grupos	3644,2	288	12,7		
		Total	17674,5	289			
720h	$L^*$	Entre grupos	14356,4	1	14356,4	640,0	,000
		Dentro dos grupos	6460,5	288	22,4		
		Total	20816,9	289			
960h	$L^*$	Entre grupos	11242,2	1	11242,2	327,7	,000
		Dentro dos grupos	9881,5	288	34,3		
		Total	21123,7	289			
1200h	$L^*$	Entre grupos	12968,9	1	12968,9	261,5	,000
		Dentro dos grupos	14285,0	288	49,6		
		Total	27253,9	289			

Onde:  $L^*$  - luminosidade.

Tabela 7. Análise de variância para o parâmetro a\* para a madeira de tauari sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	a*	Entre grupos	134,9	1	134,9	251,3	,000
		Dentro dos grupos	160,0	298	0,5		
		Total	294,8	299			
240h	a*	Entre grupos	70,1	1	70,1	40,3	,000
		Dentro dos grupos	500,9	288	1,7		
		Total	571,0	289			
480h	a*	Entre grupos	42,8	1	42,8	10,8	,001
		Dentro dos grupos	1143,2	288	4,0		
		Total	1186,0	289			
720h	a*	Entre grupos	225,0	1	225,0	36,9	,000
		Dentro dos grupos	1756,2	288	6,1		
		Total	1981,1	289			
960h	a*	Entre grupos	744,2	1	744,2	88,6	,000
		Dentro dos grupos	2418,2	288	8,4		
		Total	3162,4	289			
1200h	a*	Entre grupos	796,8	1	796,8	71,8	,000
		Dentro dos grupos	3198,0	288	11,1		
		Total	3994,7	289			

Onde: a\* - coordenada vermelho-verde.

Tabela 8. Análise de variância para o parâmetro b\* para a madeira de tauari sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	b*	Entre grupos	528,9	1	528,9	464,6	,000
		Dentro dos grupos	339,3	298	1,1		
		Total	868,2	299			
240h	b*	Entre grupos	87,5	1	87,5	18,1	,000
		Dentro dos grupos	1388,1	288	4,8		
		Total	1475,6	289			
480h	b*	Entre grupos	314,8	1	314,8	23,5	,000
		Dentro dos grupos	3860,2	288	13,4		
		Total	4175,1	289			
720h	b*	Entre grupos	47,7	1	47,7	2,3	,134
		Dentro dos grupos	6083,5	288	21,1		
		Total	6131,2	289			
960h	b*	Entre grupos	26,8	1	26,8	1,1	,303
		Dentro dos grupos	7248,9	288	25,2		
		Total	7275,7	289			
1200h	b*	Entre grupos	14,1	1	14,1	0,5	,484
		Dentro dos grupos	8256,6	288	28,7		
		Total	8270,6	289			

Onde: b\* - coordenada amarelo-azul.

Tabela 9. Análise de variância para o parâmetro C\* para a madeira de tauari sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	C*	Entre grupos	601,7	1	601,7	527,8	,000
		Dentro dos grupos	339,7	298	1,1		
		Total	941,4	299			
240h	C*	Entre grupos	41,4	1	41,4	6,9	,009
		Dentro dos grupos	1726,8	288	6,0		
		Total	1768,2	289			
480h	C*	Entre grupos	233,6	1	233,6	14,2	,000
		Dentro dos grupos	4734,7	288	16,4		
		Total	4968,4	289			
720h	C*	Entre grupos	9,2	1	9,2	0,4	,548
		Dentro dos grupos	7285,3	288	25,3		
		Total	7294,4	289			
960h	C*	Entre grupos	120,7	1	120,7	3,9	,051
		Dentro dos grupos	8900,6	288	30,9		
		Total	9021,3	289			
1200h	C*	Entre grupos	89,5	1	89,5	2,5	,115
		Dentro dos grupos	10311,6	288	35,8		
		Total	10401,1	289			

Onde: C\* - cromaticidade

Tabela 10. Análise de variância para o parâmetro h° para a madeira de tauari sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	h°	Entre grupos	278,7	1	278,7	99,0	,000
		Dentro dos grupos	838,9	298	2,8		
		Total	1117,6	299			
240h	h°	Entre grupos	477,4	1	477,4	198,2	,000
		Dentro dos grupos	693,8	288	2,4		
		Total	1171,1	289			
480h	h°	Entre grupos	776,9	1	776,9	137,0	,000
		Dentro dos grupos	1633,6	288	5,7		
		Total	2410,4	289			
720h	h°	Entre grupos	1896,3	1	1896,3	166,1	,000
		Dentro dos grupos	3287,6	288	11,4		
		Total	5183,9	289			
960h	h°	Entre grupos	4729,2	1	4729,2	249,9	,000
		Dentro dos grupos	5450,7	288	18,9		
		Total	10179,9	289			
1200h	h°	Entre grupos	5854,1	1	5854,1	177,2	,000
		Dentro dos grupos	9515,0	288	33,0		
		Total	15369,1	289			

Onde: h° - ângulo de tinta.

Tabela 11. Análise de variância para o parâmetro L\* para a madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	L*	Entre grupos	25518,4	1	25518,4	10715,5	,000
		Dentro dos grupos	709,7	298	2,4		
		Total	26228,1	299			
240h	L*	Entre grupos	15042,5	1	15042,5	2465,9	,000
		Dentro dos grupos	1817,9	298	6,1		
		Total	16860,3	299			
480h	L*	Entre grupos	12768,9	1	12768,9	829,7	,000
		Dentro dos grupos	4586,2	298	15,4		
		Total	17355,1	299			
720h	L*	Entre grupos	12944,3	1	12944,3	648,0	,000
		Dentro dos grupos	5953,1	298	20,0		
		Total	18897,4	299			
960h	L*	Entre grupos	12473,7	1	12473,7	428,5	,000
		Dentro dos grupos	8674,4	298	29,1		
		Total	21148,0	299			
1200h	L*	Entre grupos	13223,6	1	13223,6	298,3	,000
		Dentro dos grupos	13209,5	298	44,3		
		Total	26433,1	299			

Onde: L\* - luminosidade.

Tabela 12. Análise de variância para o parâmetro a\* para a madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	a*	Entre grupos	85,6	1	85,6	305,1	,000
		Dentro dos grupos	83,6	298	0,3		
		Total	169,2	299			
240h	a*	Entre grupos	410,7	1	410,7	149,5	,000
		Dentro dos grupos	818,6	298	2,7		
		Total	1229,3	299			
480h	a*	Entre grupos	359,8	1	359,8	74,6	,000
		Dentro dos grupos	1437,5	298	4,8		
		Total	1797,3	299			
720h	a*	Entre grupos	556,9	1	556,9	110,3	,000
		Dentro dos grupos	1504,6	298	5,0		
		Total	2061,5	299			
960h	a*	Entre grupos	592,2	1	592,2	94,4	,000
		Dentro dos grupos	1868,6	298	6,3		
		Total	2460,8	299			
1200h	a*	Entre grupos	525,8	1	525,8	56,3	,000
		Dentro dos grupos	2780,7	298	9,3		
		Total	3306,5	299			

Onde: a\* - coordenada vermelho-verde.

Tabela 13. Análise de variância para o parâmetro b\* para a madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	b*	Entre grupos	662,5	1	662,5	245,6	,000
		Dentro dos grupos	803,9	298	2,7		
		Total	1466,4	299			
240h	b*	Entre grupos	1,0	1	1,0	0,1	,759
		Dentro dos grupos	3273,3	298	11,0		
		Total	3274,3	299			
480h	b*	Entre grupos	122,5	1	122,5	5,7	,018
		Dentro dos grupos	6442,9	298	21,6		
		Total	6565,4	299			
720h	b*	Entre grupos	3,5	1	3,5	0,1	,699
		Dentro dos grupos	6956,4	298	23,3		
		Total	6959,9	299			
960h	b*	Entre grupos	61,3	1	61,3	2,1	,145
		Dentro dos grupos	8567,2	298	28,7		
		Total	8628,5	299			
1200h	b*	Entre grupos	94,1	1	94,1	2,8	,093
		Dentro dos grupos	9895,8	298	33,2		
		Total	9989,9	299			

Onde: b\* - coordenada amarelo-azul.

Tabela 14. Análise de variância para o parâmetro C\* para a madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	C*	Entre grupos	677,0	1	677,0	247,1	,000
		Dentro dos grupos	816,4	298	2,7		
		Total	1493,4	299			
240h	C*	Entre grupos	15,7	1	15,7	1,2	,271
		Dentro dos grupos	3838,3	298	12,9		
		Total	3854,0	299			
480h	C*	Entre grupos	29,1	1	29,1	1,2	,283
		Dentro dos grupos	7503,1	298	25,2		
		Total	7532,2	299			
720h	C*	Entre grupos	13,3	1	13,3	0,5	,484
		Dentro dos grupos	8067,3	298	27,1		
		Total	8080,6	299			
960h	C*	Entre grupos	2,1	1	2,1	0,1	,800
		Dentro dos grupos	9967,0	298	33,4		
		Total	9969,1	299			
1200h	C*	Entre grupos	18,6	1	18,6	0,5	,494
		Dentro dos grupos	11816,6	298	39,7		
		Total	11835,3	299			

Onde: C\* - cromaticidade

Tabela 15. Análise de variância para o parâmetro  $h^\circ$  para a madeira de marupá sem tratamento e tratadas com CCA-C.

Período	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
0h	$h^\circ$	Entre grupos	311,7	1	311,7	191,1	,000
		Dentro dos grupos	486,2	298	1,6		
		Total	797,9	299			
240h	$h^\circ$	Entre grupos	1728,5	1	1728,5	491,3	,000
		Dentro dos grupos	1048,5	298	3,5		
		Total	2777,0	299			
480h	$h^\circ$	Entre grupos	2928,3	1	2928,3	415,7	,000
		Dentro dos grupos	2099,3	298	7,0		
		Total	5027,5	299			
720h	$h^\circ$	Entre grupos	4323,2	1	4323,2	444,5	,000
		Dentro dos grupos	2898,1	298	9,7		
		Total	7221,3	299			
960h	$h^\circ$	Entre grupos	6082,7	1	6082,7	482,8	,000
		Dentro dos grupos	3754,7	298	12,6		
		Total	9837,5	299			
1200h	$h^\circ$	Entre grupos	6446,7	1	6446,7	261,3	,000
		Dentro dos grupos	7351,5	298	24,7		
		Total	13798,2	299			

Onde:  $h^\circ$  - ângulo de tinta.

Tabela 16. Análise descritiva dos parâmetros colorimétricos para a madeira de marupá sem tratamento químico de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
L*	0h	150	84,2	0,97	1%	0,08	81,1	86,6
	240h	150	70,8	2,66	4%	0,22	65,5	82,3
	480h	150	71,0	4,42	6%	0,36	58,7	83,2
	720h	150	72,0	5,12	7%	0,42	60,8	85,4
	960h	150	72,2	6,35	9%	0,52	55,1	84,9
	1200h	150	72,1	7,16	10%	0,58	48,4	86,1
a*	0h	150	2,8	0,33	12%	0,03	2,1	3,6
	240h	150	8,3	1,84	22%	0,15	4,2	12,0
	480h	150	7,3	2,47	34%	0,20	2,7	15,1
	720h	150	6,8	2,49	37%	0,20	1,9	13,4
	960h	150	6,0	2,89	48%	0,24	1,3	14,1
	1200h	150	5,9	3,26	56%	0,27	,9	15,6
b*	0h	150	23,3	2,19	9%	0,18	19,2	27,8
	240h	150	25,8	4,45	17%	0,36	11,0	35,1
	480h	150	21,6	6,21	29%	0,51	7,0	35,2
	720h	150	20,2	6,35	31%	0,52	5,5	31,0
	960h	150	17,8	7,10	40%	0,58	5,4	32,3
	1200h	150	16,8	7,56	45%	0,62	3,9	32,8
C*	0h	150	23,4	2,20	9%	0,18	19,4	28,0
	240h	150	27,1	4,79	18%	0,39	11,8	37,1
	480h	150	22,8	6,65	29%	0,54	7,5	38,3
	720h	150	21,4	6,79	32%	0,55	5,8	33,6
	960h	150	18,8	7,63	41%	0,62	5,5	34,5
	1200h	150	17,8	8,20	46%	0,67	4,0	36,3
h°	0h	150	83,1	0,56	1%	0,05	80,9	84,2
	240h	150	72,2	1,19	2%	0,10	69,0	74,5
	480h	150	71,3	1,77	2%	0,14	65,5	74,5
	720h	150	71,5	1,83	3%	0,15	65,5	75,1
	960h	150	71,9	2,13	3%	0,17	66,0	76,9
	1200h	150	71,5	2,64	4%	0,22	63,1	77,9

Tabela 17. Análise descritiva dos parâmetros colorimétricos para a madeira de marupá tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
L*	0h	150	65,8	1,95	3%	0,16	59,0	71,0
	240h	150	56,7	2,26	4%	0,18	50,0	62,0
	480h	150	57,9	3,35	6%	0,27	45,0	65,0
	720h	150	58,8	3,71	6%	0,30	49,0	68,0
	960h	150	59,3	4,24	7%	0,35	47,0	70,0
	1200h	150	58,8	6,11	10%	0,50	40,0	72,0
a*	0h	150	1,8	0,67	38%	0,05	0,0	3,0
	240h	150	6,0	1,45	24%	0,12	2,0	10,0
	480h	150	5,1	1,88	37%	0,15	2,0	11,0
	720h	150	4,1	1,97	48%	0,16	0,0	10,0
	960h	150	3,2	2,05	64%	0,17	0,0	10,0
	1200h	150	3,2	2,83	88%	0,23	-1,0	12,0
b*	0h	150	20,3	0,78	4%	0,06	19,0	23,0
	240h	150	25,9	1,47	6%	0,12	22,0	30,0
	480h	150	22,8	2,17	9%	0,18	18,0	28,0
	720h	150	20,4	2,52	12%	0,21	15,0	27,0
	960h	150	18,7	2,66	14%	0,22	12,0	26,0
	1200h	150	17,9	3,04	17%	0,25	11,0	24,0
C*	0h	150	20,4	0,80	4%	0,07	19,0	23,0
	240h	150	26,7	1,69	6%	0,14	23,0	31,0
	480h	150	23,4	2,48	11%	0,20	18,0	30,0
	720h	150	20,9	2,83	14%	0,23	15,0	29,0
	960h	150	19,0	2,93	15%	0,24	12,0	28,0
	1200h	150	18,3	3,47	19%	0,28	11,0	27,0
h°	0h	150	85,1	1,72	2%	0,14	82,0	91,0
	240h	150	77,0	2,37	3%	0,19	71,0	85,0
	480h	150	77,6	3,31	4%	0,27	67,0	86,0
	720h	150	79,1	4,01	5%	0,33	70,0	90,0
	960h	150	80,9	4,55	6%	0,37	68,0	90,0
	1200h	150	80,8	6,51	8%	0,53	63,0	93,0

Tabela 18. Análise descritiva dos parâmetros colorimétricos para a madeira de tauari sem tratamento químico de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
L*	0h	150	72,6	1,92	3%	0,16	66,3	75,6
	240h	150	65,4	2,70	4%	0,22	56,8	73,8
	480h	150	66,7	4,01	6%	0,33	54,6	78,8
	720h	150	68,2	5,34	8%	0,44	56,3	83,5
	960h	150	68,2	6,83	10%	0,56	52,1	84,8
	1200h	150	68,9	8,07	12%	0,66	47,9	85,7
a*	0h	150	5,6	0,58	10%	0,05	4,1	6,9
	240h	150	8,8	1,35	15%	0,11	6,0	13,3
	480h	150	7,7	2,13	28%	0,17	3,3	13,5
	720h	150	7,1	2,57	36%	0,21	2,0	13,1
	960h	150	7,0	3,12	45%	0,25	1,6	15,1
	1200h	150	6,7	3,50	52%	0,29	1,1	16,0
b*	0h	150	25,4	1,33	5%	0,11	22,5	28,8
	240h	150	25,5	2,72	11%	0,22	18,6	31,7
	480h	150	22,0	4,81	22%	0,39	8,9	31,6
	720h	150	21,0	6,01	29%	0,49	5,3	31,7
	960h	150	20,3	6,66	33%	0,54	5,2	33,3
	1200h	150	19,1	7,06	37%	0,58	4,5	32,1
C*	0h	150	26,0	1,30	5%	0,11	23,3	29,4
	240h	150	27,0	2,99	11%	0,24	19,7	34,4
	480h	150	23,3	5,23	22%	0,43	9,4	34,3
	720h	150	22,2	6,50	29%	0,53	5,7	34,2
	960h	150	21,5	7,30	34%	0,60	5,5	36,6
	1200h	150	20,3	7,80	38%	0,64	4,7	35,9
h°	0h	150	77,6	1,40	2%	0,11	73,7	81,6
	240h	150	71,0	1,06	1%	0,09	67,2	73,4
	480h	150	70,9	1,45	2%	0,12	66,4	74,4
	720h	150	71,5	1,69	2%	0,14	67,2	75,1
	960h	150	71,7	2,31	3%	0,19	65,6	77,3
	1200h	150	71,7	3,17	4%	0,26	63,4	81,5

Tabela 19. Análise descritiva dos parâmetros colorimétricos para a madeira de tauari tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
L*	0h	150	60,5	1,97	3%	0,16	53,0	64,0
	240h	150	52,1	2,06	4%	0,17	45,0	57,0
	480h	150	52,8	2,99	6%	0,25	41,0	59,0
	720h	150	54,2	3,98	7%	0,34	41,0	61,0
	960h	150	55,8	4,59	8%	0,39	41,0	63,0
	1200h	150	55,5	5,74	10%	0,48	37,0	66,0
a*	0h	150	4,2	0,86	20%	0,07	2,0	6,0
	240h	150	7,9	1,29	16%	0,11	5,0	12,0
	480h	150	6,9	1,84	26%	0,16	4,0	12,0
	720h	150	5,4	2,36	44%	0,20	2,0	11,0
	960h	150	3,8	2,64	70%	0,22	0,0	12,0
	1200h	150	3,4	3,14	93%	0,27	-1,0	12,0
b*	0h	150	22,8	0,71	3%	0,06	21,0	24,0
	240h	150	26,6	1,43	5%	0,12	22,0	29,0
	480h	150	24,1	1,71	7%	0,14	19,0	28,0
	720h	150	21,8	2,26	10%	0,19	16,0	28,0
	960h	150	19,7	2,13	11%	0,18	15,0	26,0
	1200h	150	18,7	2,44	13%	0,21	13,0	24,0
C*	0h	150	23,2	0,76	3%	0,06	21,0	25,0
	240h	150	27,8	1,68	6%	0,14	22,0	32,0
	480h	150	25,1	2,18	9%	0,18	19,0	30,0
	720h	150	22,6	2,68	12%	0,23	16,0	30,0
	960h	150	20,2	2,62	13%	0,22	15,0	28,0
	1200h	150	19,2	2,99	16%	0,25	13,0	27,0
h°	0h	150	79,6	1,92	2%	0,16	74,0	85,0
	240h	150	73,5	1,95	3%	0,16	68,0	77,0
	480h	150	74,2	3,08	4%	0,26	65,0	81,0
	720h	150	76,6	4,54	6%	0,38	66,0	84,0
	960h	150	79,8	5,79	7%	0,49	64,0	89,0
	1200h	150	80,7	7,59	9%	0,64	61,0	94,0

Tabela 20. Análise descritiva dos parâmetros colorimétricos para a madeira de cumaru sem tratamento químico de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
L*	0h	150	54,5	2,19	4%	0,18	50,1	60,0
	240h	150	48,6	2,08	4%	0,17	44,2	53,5
	480h	150	49,1	2,68	5%	0,22	42,8	54,8
	720h	150	50,1	3,66	7%	0,30	41,3	63,6
	960h	150	50,4	3,70	7%	0,30	38,6	60,0
	1200h	150	50,6	4,53	9%	0,37	31,7	62,2
a*	0h	150	10,8	1,16	11%	0,09	8,3	14,4
	240h	150	13,7	2,24	16%	0,18	9,3	18,5
	480h	150	12,5	2,95	24%	0,24	7,3	19,2
	720h	150	11,9	3,65	31%	0,30	3,9	20,5
	960h	150	11,6	3,75	32%	0,31	4,6	20,9
	1200h	150	11,4	4,09	36%	0,33	2,8	20,2
b*	0h	150	24,3	1,36	6%	0,11	20,9	27,8
	240h	150	25,7	2,95	11%	0,24	19,1	31,9
	480h	150	23,3	3,82	16%	0,31	14,8	30,8
	720h	150	23,2	4,74	20%	0,39	8,2	32,0
	960h	150	23,4	4,65	20%	0,38	10,9	33,0
	1200h	150	23,0	5,36	23%	0,44	8,1	32,5
C*	0h	150	26,6	1,55	6%	0,13	22,6	30,6
	240h	150	29,2	3,61	12%	0,29	21,3	36,4
	480h	150	26,5	4,73	18%	0,39	16,5	36,3
	720h	150	26,1	5,85	22%	0,48	9,1	37,3
	960h	150	26,1	5,80	22%	0,47	11,8	38,7
	1200h	150	25,7	6,55	25%	0,53	8,6	37,5
h°	0h	150	66,1	1,93	3%	0,16	61,3	69,9
	240h	150	62,1	1,58	3%	0,13	57,7	65,4
	480h	150	62,1	2,15	3%	0,18	56,7	66,4
	720h	150	63,3	2,79	4%	0,23	56,6	68,8
	960h	150	64,2	3,07	5%	0,25	56,1	69,9
	1200h	150	64,5	3,64	6%	0,30	48,9	71,5

Tabela 21. Análise descritiva dos parâmetros colorimétricos para a madeira de cumaru tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
L*	0h	150	45,8	2,45	5%	0,20	37,0	51,0
	240h	150	39,2	2,10	5%	0,17	33,0	43,0
	480h	150	40,1	2,46	6%	0,20	32,0	44,0
	720h	150	40,2	2,71	7%	0,22	33,0	45,0
	960h	150	41,8	2,83	7%	0,23	33,0	47,0
	1200h	150	42,7	3,65	9%	0,30	31,0	48,0
a*	0h	150	7,4	0,78	11%	0,06	6,0	9,0
	240h	150	9,7	1,04	11%	0,09	7,0	13,0
	480h	150	9,4	1,33	14%	0,11	7,0	13,0
	720h	150	9,3	1,41	15%	0,12	6,0	13,0
	960h	150	8,7	1,48	17%	0,12	5,0	13,0
	1200h	150	8,6	1,90	22%	0,16	4,0	13,0
b*	0h	150	18,4	1,44	8%	0,12	15,0	22,0
	240h	150	19,4	1,26	7%	0,10	16,0	22,0
	480h	150	18,4	1,30	7%	0,11	15,0	22,0
	720h	150	18,3	1,34	7%	0,11	15,0	23,0
	960h	150	18,0	1,11	6%	0,09	14,0	22,0
	1200h	150	17,8	1,56	9%	0,13	12,0	22,0
C*	0h	150	19,9	1,46	7%	0,12	17,0	23,0
	240h	150	21,7	1,36	6%	0,11	18,0	25,0
	480h	150	20,6	1,64	8%	0,13	17,0	26,0
	720h	150	20,5	1,61	8%	0,13	17,0	25,0
	960h	150	19,9	1,50	8%	0,12	15,0	24,0
	1200h	150	19,7	2,07	11%	0,17	13,0	25,0
h°	0h	150	68,0	2,28	3%	0,19	59,0	75,0
	240h	150	63,4	2,26	4%	0,18	55,0	69,0
	480h	150	63,0	2,49	4%	0,20	54,0	69,0
	720h	150	63,3	2,79	4%	0,23	55,0	69,0
	960h	150	64,5	2,90	4%	0,24	55,0	71,0
	1200h	150	64,5	3,72	6%	0,30	53,0	73,0

Tabela 22. Análise de variância para os parâmetros colorimétricos entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento.

Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
L*	Entre grupos	20194,14	5	4038,83	166,72	0,00
	Dentro dos grupos	21656,78	894	24,22		
	Total	41850,92	899			
a*	Entre grupos	2668,68	5	533,74	91,97	0,00
	Dentro dos grupos	5187,97	894	5,80		
	Total	7856,65	899			
b*	Entre grupos	8529,99	5	1706,00	48,49	0,00
	Dentro dos grupos	31454,88	894	35,18		
	Total	39984,87	899			
C*	Entre grupos	8548,06	5	1709,61	42,11	0,00
	Dentro dos grupos	36292,63	894	40,60		
	Total	44840,70	899			
h°	Entre grupos	16229,40	5	3245,88	990,06	0,00
	Dentro dos grupos	2930,95	894	3,28		
	Total	19160,35	899			

Tabela 23. Análise de variância para os parâmetros colorimétricos entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá tratada com CCA-C.

Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
L*	Entre grupos	7670,22	5	1534,04	103,16	0,00
	Dentro dos grupos	13293,89	894	14,87		
	Total	20964,11	899			
a*	Entre grupos	1732,18	5	346,44	93,69	0,00
	Dentro dos grupos	3305,60	894	3,70		
	Total	5037,78	899			
b*	Entre grupos	6469,86	5	1293,97	257,95	0,00
	Dentro dos grupos	4484,65	894	5,02		
	Total	10954,51	899			
C*	Entre grupos	7249,08	5	1449,82	226,75	0,00
	Dentro dos grupos	5716,23	894	6,39		
	Total	12965,31	899			
h°	Entre grupos	6476,95	5	1295,39	78,74	0,00
	Dentro dos grupos	14707,29	894	16,45		
	Total	21184,24	899			

Tabela 24. Análise de variância para os parâmetros colorimétricos entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento.

Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
L*	Entre grupos	4462,08	5	892,42	31,97	0,00
	Dentro dos grupos	24951,69	894	27,91		
	Total	29413,76	899			
a*	Entre grupos	888,58	5	177,72	30,25	0,00
	Dentro dos grupos	5251,72	894	5,87		
	Total	6140,31	899			
b*	Entre grupos	5381,63	5	1076,33	39,70	0,00
	Dentro dos grupos	24239,76	894	27,11		
	Total	29621,39	899			
C*	Entre grupos	5207,42	5	1041,48	32,14	0,00
	Dentro dos grupos	28966,10	894	32,40		
	Total	34173,52	899			
h°	Entre grupos	5026,06	5	1005,21	257,17	0,00
	Dentro dos grupos	3494,38	894	3,91		
	Total	8520,45	899			

Tabela 25. Análise de variância para os parâmetros colorimétricos entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C.

Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
L*	Entre grupos	6519,64	5	1303,93	90,76	0,00
	Dentro dos grupos	12125,33	894	14,37		
	Total	18644,97	899			
a*	Entre grupos	2315,92	5	463,18	99,61	0,00
	Dentro dos grupos	3924,67	894	4,65		
	Total	6240,59	899			
b*	Entre grupos	5891,18	5	1178,24	338,61	0,00
	Dentro dos grupos	2936,78	894	3,48		
	Total	8827,96	899			
C*	Entre grupos	6977,34	5	1395,47	271,84	0,00
	Dentro dos grupos	4332,62	894	5,13		
	Total	11309,96	899			
h°	Entre grupos	6684,74	5	1336,95	62,95	0,00
	Dentro dos grupos	17925,14	894	21,24		
	Total	24609,88	899			

Tabela 26. Análise de variância para os parâmetros colorimétricos entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento.

Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
L*	Entre grupos	3272,12	5	654,42	61,49	0,00
	Dentro dos grupos	9536,54	894	10,64		
	Total	12808,66	899			
a*	Entre grupos	773,18	5	154,64	15,71	0,00
	Dentro dos grupos	8819,79	894	9,84		
	Total	9592,97	899			
b*	Entre grupos	811,23	5	162,25	9,95	0,00
	Dentro dos grupos	14616,31	894	16,31		
	Total	15427,54	899			
C*	Entre grupos	1167,36	5	233,47	9,44	0,00
	Dentro dos grupos	22167,86	894	24,74		
	Total	23335,22	899			
h°	Entre grupos	1755,10	5	351,02	51,15	0,00
	Dentro dos grupos	6148,43	894	6,86		
	Total	7903,53	899			

Tabela 27. Análise de variância para os parâmetros colorimétricos entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C.

Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
L*	Entre grupos	4291,83	5	858,37	114,19	0,00
	Dentro dos grupos	6719,97	894	7,52		
	Total	11011,80	899			
a*	Entre grupos	506,60	5	101,32	53,92	0,00
	Dentro dos grupos	1680,04	894	1,88		
	Total	2186,64	899			
b*	Entre grupos	238,61	5	47,72	26,41	0,00
	Dentro dos grupos	1615,70	894	1,81		
	Total	1854,31	899			
C*	Entre grupos	401,20	5	80,24	30,47	0,00
	Dentro dos grupos	2353,96	894	2,63		
	Total	2755,16	899			
h°	Entre grupos	2545,73	5	509,15	65,62	0,00
	Dentro dos grupos	6936,15	894	7,76		
	Total	9481,88	899			

Tabela 28. Resultado do teste de Tukey para L\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
240h	150	70,82	
480h	150	70,95	
720h	150	71,97	
1200h	150	72,09	
960h	150	72,23	
0h	150		84,24
Sig.		0,13	1,00

Tabela 29. Resultado do teste de Tukey para a\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
0h	150	2,83			
1200h	150		5,87		
960h	150		6,00		
720h	150			6,83	
480h	150			7,33	
240h	150				8,35
Sig.		1,00	1,00	0,46	1,00

Tabela 30. Resultado do teste de Tukey para b\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1200h	150	16,78			
960h	150	17,84			
720h	150		20,23		
480h	150		21,56	21,56	
0h	150			23,26	
240h	150				25,81
Sig.		0,63	0,38	0,13	1,00

Tabela 31. Resultado do teste de Tukey para C\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
1200h	150	17,80		
960h	150	18,84		
720h	150		21,36	
480h	150		22,78	
0h	150		23,43	
240h	150			27,13
Sig.		0,72	0,06	1,00

Tabela 32. Resultado do teste de Tukey para h° entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
480h	150	71,32		
720h	150	71,52		
1200h	150	71,54		
960h	150	71,89	71,89	
240h	150		72,19	
0h	150			83,06
Sig.		0,07	0,71	1,00

Tabela 33. Resultado do teste de Tukey para L\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
240h	150	56,66			
480h	150	57,91	57,91		
1200h	150		58,81	58,81	
720h	150		58,83	58,83	
960h	150			59,33	
0h	150				65,79
Sig.		0,06	0,30	0,85	1,00

Tabela 34. Resultado do teste de Tukey para a\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0h	150	1,76				
960h	150		3,19			
1200h	150		3,23			
720h	150			4,10		
480h	150				5,14	
240h	150					6,01
Sig.		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 35. Resultado do teste de Tukey para b\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
1200h	150	17,90				
960h	150		18,75			
0h	150			20,29		
720h	150			20,45		
480h	150				22,83	
240h	150					25,93
Sig.		1,00	1,00	0,99	1,00	1,00

Tabela 36. Resultado do teste de Tukey para C\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1200h	150	18,29			
960h	150	19,01			
0h	150		20,43		
720h	150		20,94		
480h	150			23,40	
240h	150				26,67
Sig.		0,14	0,49	1,00	1,00

Tabela 37. Resultado do teste de Tukey para h° entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
240h	150	76,99			
480h	150	77,57			
720h	150		79,11		
1200h	150			80,81	
960h	150			80,90	
0h	150				85,10
Sig.		0,83	1,00	1,00	1,00

Tabela 38. Resultado do teste de Tukey para L\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
240h	150	65,38			
480h	150	66,71	66,71		
960h	150		68,22	68,22	
720h	150		68,24	68,24	
1200h	150			68,90	
0h	150				72,58
Sig.		0,25	0,12	0,87	1,00

Tabela 39. Resultado do teste de Tukey para a\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
0h	150	5,57			
1200h	150		6,68		
960h	150		6,97	6,97	
720h	150		7,15	7,15	
480h	150			7,70	
240h	150				8,84
Sig.		1,00	0,55	0,09	1,00

Tabela 40. Resultado do teste de Tukey para b\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
1200h	150	19,13		
960h	150	20,29	20,29	
720h	150		21,02	
480h	150		22,01	
0h	150			25,44
240h	150			25,51
Sig.		0,38	0,05	1,00

Tabela 41. Resultado do teste de Tukey para C\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
1200h	150	20,30		
960h	150	21,48	21,48	
720h	150		22,21	
480h	150		23,33	
0h	150			26,05
240h	150			27,00
Sig.		0,47	0,06	0,69

Tabela 42. Resultado do teste de Tukey para h° entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento químico, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
480h	150	70,87		
240h	150	70,96		
720h	150	71,49	71,49	
960h	150		71,67	
1200h	150		71,74	
0h	150			77,63
Sig.		0,08	0,89	1,00

Tabela 43. Resultado do teste de Tukey para L\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
240h	150	52,10			
480h	150	52,79			
720h	150		54,16		
1200h	150			55,52	
960h	150			55,76	
0h	150				60,46
Sig.		0,65	1,00	1,00	1,00

Tabela 44. Resultado do teste de Tukey para a\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
1200h	150	3,36				
960h	150	3,76	3,76			
0h	150		4,23			
720h	150			5,39		
480h	150				6,94	
240h	150					7,86
Sig.		0,62	0,46	1,00	1,00	1,00

Tabela 45. Resultado do teste de Tukey para b\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )					
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
1200h	150	18,69					
960h	150		19,69				
720h	150			21,83			
0h	150				22,78		
480h	150					24,09	
240h	150						26,61
Sig.		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 46. Resultado do teste de Tukey para C\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
1200h	150	19,19				
960h	150		20,19			
720h	150			22,56		
0h	150			23,21		
480h	150				25,12	
240h	150					27,76
Sig.		1,00	1,00	0,15	1,00	1,00

Tabela 47. Resultado do teste de Tukey para h° entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
240h	150	73,53		
480h	150	74,15		
720h	150		76,61	
0h	150			79,55
960h	150			79,75
1200h	150			80,73
Sig.		0,87	1,00	0,26

Tabela 48. Resultado do teste de Tukey para L\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
240h	150	48,63			
480h	150	49,13	49,13		
720h	150		50,10	50,10	
960h	150			50,43	
1200h	150			50,62	
0h	150				54,53
Sig.		0,78	0,10	0,75	1,00

Tabela 49. Resultado do teste de Tukey para a\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
0h	150	10,79			
1200h	150	11,38	11,38		
960h	150	11,62	11,62	11,62	
720h	150		11,92	11,92	
480h	150			12,51	
240h	150				13,69
Sig.		0,19	0,67	0,14	1,00

Tabela 50. Resultado do teste de Tukey para b\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
1200h	150	23,02	
720h	150	23,20	
480h	150	23,35	
960h	150	23,37	
0h	150	24,31	
240h	150		25,73
Sig.		0,06	1,00

Tabela 51. Resultado do teste de Tukey para C\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
1200h	150	25,73	
720h	150	26,11	
960h	150	26,14	
480h	150	26,50	
0h	150	26,61	
240h	150		29,16
Sig.		0,63	1,00

Tabela 52. Resultado do teste de Tukey para  $h^{\circ}$  entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
240h	150	62,12			
480h	150	62,13			
720h	150		63,32		
960h	150		64,16	64,16	
1200h	150			64,45	
0h	150				66,11
Sig.		1,00	0,07	0,93	1,00

Tabela 53. Resultado do teste de Tukey para  $L^*$  entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
240h	150	39,21			
480h	150	40,09	40,09		
720h	150		40,19		
960h	150			41,79	
1200h	150			42,68	
0h	150				45,77
Sig.		0,06	1,00	0,05	1,00

Tabela 54. Resultado do teste de Tukey para  $a^*$  entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0h	150	7,44		
1200h	150		8,57	
960h	150		8,68	
720h	150			9,29
480h	150			9,43
240h	150			9,72
Sig.		1,00	0,98	0,07

Tabela 55. Resultado do teste de Tukey para  $b^*$  entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1200h	150	17,78			
960h	150	17,95	17,95		
720h	150		18,29	18,29	
0h	150			18,40	
480h	150			18,41	
240h	150				19,40
Sig.		0,87	0,24	0,98	1,00

Tabela 56. Resultado do teste de Tukey para C\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
1200h	150	19,74		
0h	150	19,92		
960h	150	19,93		
720h	150		20,49	
480h	150		20,64	
240h	150			21,71
Sig.		0,91	0,97	1,00

Tabela 57. Resultado do teste de Tukey para C\* entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
480h	150	62,96		
720h	150	63,35		
240h	150	63,39		
960h	150		64,46	
1200h	150		64,51	
0h	150			67,97
Sig.		0,76	1,00	1,00

Tabela 58. Análise de variância entre as faces tangencial e radial para os parâmetros Ra e Rz para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C.

Tratamento	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância ( $p<0,05$ ).
ST	Ra	Entre grupos	58,49	1	58,49	1,37	0,24
		Dentro dos grupos	7491,98	177	42,81		
		Total	7550,47	178			
	Rz	Entre grupos	1527,54	1	1527,54	1,84	0,18
		Dentro dos grupos	146941,21	177	830,18		
		Total	148468,75	178			
CCA	Ra	Entre grupos	15,37	1	15,37	2,17	0,14
		Dentro dos grupos	1256,63	177	7,10		
		Total	1272,00	178			
	Rz	Entre grupos	210,97	1	210,97	1,21	0,27
		Dentro dos grupos	30162,00	177	174,35		
		Total	30372,98	178			

Onde: ST – sem tratamento químico; CCA – tratamento com CCA-C.

Tabela 59. Análise de variância entre as faces tangencial e radial para os parâmetros Ra e Rz para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C.

Tratamento	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
ST	Ra	Entre grupos	21,47	1	21,47	1,62	0,20
		Dentro dos grupos	2301,89	177	13,23		
		Total	2323,36	178			
	Rz	Entre grupos	794,76	1	794,76	2,42	0,12
		Dentro dos grupos	57399,88	177	328,00		
		Total	58194,64	178			
CCA	Ra	Entre grupos	6,00	1	6,00	1,76	0,19
		Dentro dos grupos	588,28	177	3,40		
		Total	594,28	178			
	Rz	Entre grupos	533,77	1	533,77	4,95	0,13
		Dentro dos grupos	18342,87	177	107,90		
		Total	18876,65	178			

Onde: ST – sem tratamento químico; CCA – tratamento com CCA-C.

Tabela 60. Análise de variância entre as faces tangencial e radial para os parâmetros Ra e Rz para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C.

Tratamento	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
ST	Ra	Entre grupos	0,36	1	0,36	0,02	0,90
		Dentro dos grupos	3878,04	176	22,03		
		Total	3878,40	177			
	Rz	Entre grupos	323,10	1	323,10	0,70	0,40
		Dentro dos grupos	80508,77	175	460,05		
		Total	80831,87	176			
CCA	Ra	Entre grupos	9,28	1	9,28	0,97	0,33
		Dentro dos grupos	1680,51	177	9,60		
		Total	1689,79	178			
	Rz	Entre grupos	169,81	1	169,81	0,86	0,35
		Dentro dos grupos	34198,76	177	196,54		
		Total	34368,58	178			

Onde: ST – sem tratamento químico; CCA – tratamento com CCA-C.

Tabela 61. Análise descritiva dos parâmetros Ra e Rz para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Tratamento	Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
ST	Ra	0h	30	4,66	1,01	22%	0,19	3,46	7,16
		240h	30	8,21	2,19	27%	0,41	4,15	12,93
		480h	30	10,57	2,94	28%	0,54	5,98	16,61
		720h	30	14,30	3,94	28%	0,72	7,23	22,29
		960h	30	18,30	3,74	20%	0,68	11,27	25,28
		1200h	30	21,46	4,02	19%	0,75	14,85	29,97
	Rz	0h	30	29,11	6,67	23%	1,24	19,70	44,30
		240h	30	48,30	11,88	25%	2,17	25,30	73,90
		480h	30	57,23	14,05	25%	2,56	33,70	89,10
		720h	30	75,32	17,15	23%	3,13	42,80	105,10
		960h	30	91,10	15,22	17%	2,78	57,70	111,90
		1200h	30	102,06	19,31	19%	3,53	56,20	135,70
CCA	Ra	0h	30	9,14	2,48	27%	0,46	4,40	13,75
		240h	30	9,01	2,32	26%	0,42	4,29	13,31
		480h	30	8,91	2,27	25%	0,41	4,66	13,97
		720h	30	9,38	3,38	36%	0,62	4,66	17,06
		960h	30	9,96	2,62	26%	0,48	5,59	15,82
		1200h	30	10,57	2,65	25%	0,48	6,33	15,87
	Rz	0h	30	47,70	9,23	19%	1,74	27,20	64,70
		240h	30	48,90	10,66	22%	1,98	27,40	70,90
		480h	30	50,10	11,67	23%	2,13	31,50	71,00
		720h	30	51,13	16,96	33%	3,15	28,30	87,90
		960h	30	54,31	12,11	22%	2,25	35,90	81,20
		1200h	30	59,25	14,53	25%	2,65	34,80	88,70

Tabela 62. Análise de variância entre os períodos de exposição ao intemperismo acelerado para os parâmetros Ra e Rz para a madeira de marupá sem tratamento e tratada com CCA-C.

Tratamento	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
ST	Ra	Entre grupos	5827,82	5	1165,56	115,70	0,00
		Dentro dos grupos	1722,65	173	10,07		
		Total	7550,47	178			
	Rz	Entre grupos	111341,11	5	22268,22	103,76	0,00
		Dentro dos grupos	37127,63	173	214,61		
		Total	148468,75	178			
CCA	Ra	Entre grupos	62,32	5	12,46	1,78	0,12
		Dentro dos grupos	1209,68	173	6,99		
		Total	1272,00	178			
	Rz	Entre grupos	2656,51	5	531,30	3,24	0,01
		Dentro dos grupos	27716,46	173	164,00		
		Total	30372,98	178			

Onde: ST – sem tratamento químico; CCA – tratamento com CCA-C.

Tabela 63. Análise descritiva dos parâmetros Ra e Rz para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Tratamento	Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
ST	Ra	0h	30	4,33	0,78	18%	0,15	2,79	5,69
		240h	30	8,60	1,86	22%	0,34	6,02	12,59
		480h	30	9,77	2,08	21%	0,38	6,21	14,35
		720h	30	10,46	2,31	22%	0,43	6,23	14,65
		960h	30	11,96	2,61	22%	0,49	6,75	16,62
		1200h	30	13,54	3,17	23%	0,58	7,66	18,78
	Rz	0h	30	26,49	5,52	21%	1,04	17,00	39,30
		240h	30	46,20	7,78	17%	1,42	29,50	63,80
		480h	30	51,93	10,74	21%	1,96	30,60	75,40
		720h	30	53,87	11,49	21%	2,13	32,20	74,10
		960h	30	62,51	14,24	23%	2,60	36,60	91,60
		1200h	30	70,80	18,06	26%	3,30	40,30	111,60
CCA	Ra	0h	30	6,84	1,15	17%	0,21	4,61	9,48
		240h	30	7,38	1,54	21%	0,28	4,65	10,88
		480h	30	7,28	1,19	16%	0,22	4,58	9,35
		720h	30	7,32	1,54	21%	0,29	4,83	11,04
		960h	30	8,87	2,54	29%	0,46	5,47	14,24
		1200h	30	8,41	1,99	24%	0,38	5,24	13,59
	Rz	0h	30	38,31	6,64	17%	1,23	26,30	52,80
		240h	30	41,89	9,42	22%	1,72	26,90	59,00
		480h	30	40,13	5,52	14%	1,06	27,50	48,60
		720h	30	41,73	9,62	23%	1,82	26,40	66,90
		960h	30	48,73	12,74	26%	2,37	30,20	84,20
		1200h	30	48,71	12,55	26%	2,33	31,20	80,10

Tabela 64. Análise de variância entre os períodos de exposição ao intemperismo acelerado para os parâmetros Ra e Rz para a madeira de tauari sem tratamento e tratada com CCA-C.

Tratamento	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
ST	Ra	Entre grupos	1449,64	5	289,93	56,41	0,00
		Dentro dos grupos	873,72	173	5,14		
		Total	2323,36	178			
	Rz	Entre grupos	33238,31	5	6647,66	45,55	0,00
		Dentro dos grupos	24956,32	173	145,94		
		Total	58194,64	178			
CCA	Ra	Entre grupos	88,90	5	17,78	5,95	0,00
		Dentro dos grupos	505,38	173	2,99		
		Total	594,28	178			
	Rz	Entre grupos	2827,32	5	565,46	5,85	0,00
		Dentro dos grupos	16049,32	173	96,68		
		Total	18876,65	178			

Onde: ST – sem tratamento químico; CCA – tratamento com CCA-C.

Tabela 63. Análise descritiva dos parâmetros Ra e Rz para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Tratamento	Parâmetro	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
ST	Ra	0h	30	3,98	0,82	21%	0,15	2,84	5,76
		240h	30	8,73	1,87	21%	0,35	6,09	13,41
		480h	30	9,65	2,23	23%	0,41	4,68	14,23
		720h	30	11,51	2,75	24%	0,51	6,53	17,32
		960h	30	13,67	3,46	25%	0,63	6,92	20,12
		1200h	30	15,91	4,00	25%	0,73	8,89	22,93
	Rz	0h	30	25,30	4,68	19%	0,87	16,70	32,40
		240h	30	52,26	11,33	22%	2,10	38,20	84,90
		480h	30	53,07	8,43	16%	1,57	33,60	73,30
		720h	30	64,48	13,05	20%	2,38	38,10	93,50
		960h	30	71,17	15,62	22%	2,85	41,70	99,20
		1200h	30	80,49	16,92	21%	3,09	50,60	109,10
CCA	Ra	0h	30	6,14	1,62	26%	0,30	3,51	9,46
		240h	30	8,34	2,12	25%	0,39	5,41	13,68
		480h	30	8,88	2,21	25%	0,41	5,70	14,22
		720h	30	9,33	2,40	26%	0,45	6,63	16,84
		960h	30	11,20	3,05	27%	0,56	7,42	16,79
		1200h	30	12,10	2,92	24%	0,53	8,05	18,27
	Rz	0h	30	35,92	7,42	21%	1,36	24,60	50,20
		240h	30	48,33	9,43	20%	1,75	36,20	73,20
		480h	30	50,19	8,28	17%	1,54	38,20	68,90
		720h	30	54,49	11,25	21%	2,05	36,30	77,80
		960h	30	60,40	10,49	17%	1,98	42,80	84,50
		1200h	30	67,35	12,24	18%	2,23	50,00	87,20

Tabela 65. Análise de variância entre os períodos de exposição ao intemperismo acelerado para os parâmetros Ra e Rz para a madeira de cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C.

Tratamento	Parâmetro	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
ST	Ra	Entre grupos	2593,60	5	518,72	69,44	0,00
		Dentro dos grupos	1284,80	172	7,47		
		Total	3878,40	177			
	Rz	Entre grupos	54323,55	5	10864,71	70,09	0,00
		Dentro dos grupos	26508,32	171	155,02		
		Total	80831,87	176			
CCA	Ra	Entre grupos	673,36	5	134,67	22,66	0,00
		Dentro dos grupos	1016,43	171	5,94		
		Total	1689,79	176			
	Rz	Entre grupos	17372,09	5	3474,42	34,75	0,00
		Dentro dos grupos	16996,49	170	99,98		
		Total	34368,58	175			

Onde: ST – sem tratamento químico; CCA – tratamento com CCA-C.

Tabela 66. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Ra entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0h	30	4,6648				
240h	30		8,2066			
480h	30		10,5720			
720h	30			14,2960		
960h	30				18,3013	
1200h	30					21,4628
Sig.		1,000	,053	1,000	1,000	1,000

Tabela 67. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Rz entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0h	30	29,1069				
240h	30		48,2967			
480h	30		57,2300			
720h	30			75,3167		
960h	30				91,0967	
1200h	30					102,0600
Sig.		1,000	,178	1,000	1,000	1,000

Tabela 68. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Ra entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0h	30	4,3268				
240h	30		8,5950			
480h	30		9,7670	9,7670		
720h	30			10,4555	10,4555	
960h	30				11,9597	11,9597
1200h	30					13,5400
Sig.		1,000	,359	,854	,118	,087

Tabela 69. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Rz entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
0h	30	26,4893			
240h	30		46,2033		
480h	30		51,9267		
720h	30		53,8690	53,8690	
960h	30			62,5100	62,5100
1200h	30				70,8000
Sig.		1,000	,150	,072	,095

Tabela 70. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Ra entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )				
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0h	30	3,9827				
240h	30		8,7338			
480h	30		9,6487	9,6487		
720h	30			11,5145		
960h	30				13,6707	
1200h	30					15,9063
Sig.		1,000	,791	,096	1,000	1,000

Tabela 71. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Rz entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru sem tratamento, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
0h	30	25,2966			
240h	30		52,2552		
480h	30		53,0690		
720h	30			64,4833	
960h	30			71,1733	71,1733
1200h	30				80,4933
Sig.		1,000	1,000	,312	,051

Tabela 71. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Rz entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de marupá tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
0h	30	47,7036	
240h	30	48,9034	
480h	30	50,0967	50,0967
720h	30	51,1276	51,1276
960h	30	54,3069	54,3069
1200h	30		59,2500
Sig.		,365	,075

Tabela 72. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Ra entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0h	30	6,8443		
480h	30	7,2824	7,2824	
720h	30	7,3211	7,3211	
240h	30	7,3833	7,3833	
1200h	30			8,4064
960h	30			8,8680
Sig.		,841	,136	,911

Tabela 73. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Rz entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de tauari tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
		Grupo 1	Grupo 2
0h	30	38,3103	
480h	30	40,1259	
720h	30	41,7286	41,7286
240h	30	41,8867	41,8867
1200h	30		48,7138
960h	30		48,7276
Sig.		,741	,082

Tabela 74. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Ra entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0h	30	6,1443		
240h	30		8,3407	
480h	30		8,8828	
720h	30		9,3314	
960h	30			11,1963
1200h	30			12,1003
Sig.		1,000	,626	,713

Tabela 75. Resultado do teste de Tukey para o parâmetro Rz entre os períodos de intemperismo acelerado para a madeira de cumaru tratada com CCA-C, com 5% de significância.

Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
0h	30	35,9233			
240h	30		48,3345		
480h	30		50,1897		
720h	30		54,4867	54,4867	
960h	30			60,4036	60,4036
1200h	30				67,3467
Sig.		1,000	,178	,214	,089

Tabela 76. Análise de variância entre os períodos de exposição ao intemperismo acelerado para a velocidade de propagação no sentido longitudinal para as madeiras de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C.

Madeira	Tratamento	Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	Significância (p<0,05).
Marupá	ST	Entre grupos	600972,61	5	150243,15	2,10	0,09
		Dentro dos grupos	5003085,88	84	71472,66		
		Total	5604058,50	89			
	CCA	Entre grupos	613967,22	5	122793,44	2,33	0,051
		Dentro dos grupos	4424359,99	84	52670,95		
		Total	5038327,21	89			
Tauari	ST	Entre grupos	807525,70	5	201881,43	10,27	0,00
		Dentro dos grupos	1376354,02	84	19662,20		
		Total	2183879,72	89			
	CCA	Entre grupos	1352127,82	5	270425,56	13,90	0,00
		Dentro dos grupos	1536422,69	84	19448,39		
		Total	2888550,51	89			
Cumaru	ST	Entre grupos	729454,52	5	182363,63	26,51	0,00
		Dentro dos grupos	481446,14	84	6877,80		
		Total	1210900,66	89			
	CCA	Entre grupos	1108685,40	5	221737,08	22,36	0,00
		Dentro dos grupos	832849,73	84	9914,88		
		Total	1941535,13	89			

Tabela 77. Análise descritiva da velocidade de propagação no sentido longitudinal para a madeira de marupá, tauari e cumaru sem tratamento e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Madeira	Tratamento	Período	N	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Marupá	ST	0h	15	4510,54	227,17	5%	58,66	4181,42	4871,13
		240h	15	4701,26	290,47	6%	75,00	4256,76	5135,87
		480h	15	4771,94	283,36	6%	73,16	4354,84	5220,99
		720h	15	4616,64	279,58	6%	72,19	4126,64	5053,48
		960h	15	4606,51	269,45	6%	62,06	4116,51	5043,35
		1200h	15	4600,01	250,85	5%	64,77	4181,42	5080,65
	CCA	0h	15	4407,35	225,84	5%	58,31	4004,24	4871,13
		240h	15	4623,49	293,09	6%	75,67	4200,00	5220,99
		480h	15	4468,15	211,35	5%	54,57	4108,70	4947,64
		720h	15	4431,20	217,36	5%	56,12	4090,91	4921,88
		960h	15	4474,01	212,98	5%	54,99	4126,64	4921,88
		1200h	15	4358,31	204,57	5%	52,82	4055,79	4796,95
Tauari	ST	0h	15	4539,69	132,73	3%	34,27	4256,76	4701,49
		240h	15	4546,34	120,89	3%	31,21	4256,76	4701,49
		480h	15	4419,07	162,26	4%	41,90	3937,50	4632,35
		720h	15	4333,28	131,88	3%	34,05	4090,91	4632,35
		960h	15	4322,92	121,52	3%	23,69	4080,55	4621,99
		1200h	15	4292,65	149,52	3%	38,61	3970,59	4500,00
	CCA	0h	15	4575,17	140,73	3%	36,34	4334,86	4796,95
		240h	15	4644,46	140,53	3%	37,56	4354,84	4846,15
		480h	15	4436,10	155,37	4%	41,52	3970,59	4632,35
		720h	15	4395,79	124,21	3%	33,20	4090,91	4543,27
		960h	15	4351,13	126,15	3%	33,72	4073,28	4543,27
		1200h	15	4279,46	147,07	3%	39,31	3937,50	4457,55
Cumaru	ST	0h	15	4407,71	81,52	2%	21,05	4218,75	4500,00
		240h	15	4341,55	80,21	2%	20,71	4218,75	4500,00
		480h	15	4449,99	62,78	1%	16,21	4315,07	4521,53
		720h	15	4174,24	108,79	3%	28,09	4004,24	4334,86
		960h	15	4224,44	112,20	3%	22,12	4054,44	4385,06
		1200h	15	4268,23	74,38	2%	19,21	4090,91	4375,00
	CCA	0h	15	4345,76	85,92	2%	22,18	4200,00	4478,67
		240h	15	4354,78	132,38	3%	34,18	3987,34	4478,67
		480h	15	4412,82	106,45	2%	27,49	4200,00	4543,27
		720h	15	4172,98	78,95	2%	20,38	4021,28	4295,45
		960h	15	4154,84	84,28	2%	21,76	3987,34	4295,45
		1200h	15	4134,97	99,57	2%	25,71	3857,14	4256,76

Tabela 78. Resultado do teste de Tukey para a velocidade de propagação no sentido longitudinal para a madeira de tauari sem tratamento (ST) e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Tratamento	Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )	
			Grupo 1	Grupo 2
ST	1200h	15	4292,65	
	960h	15	4333,28	
	720h	15	4322,92	41,7286
	480h	15	4419,07	4419,07
	0h	15		4539,69
	240h	15		4546,34
	Sig.			,741
CCA	0h	15	4279,46	
	480h	15	4351,13	4351,13
	720h	15	4395,79	4395,79
	240h	15		4436,10
	1200h	15		4575,17
	960h	15		4644,46
	Sig.			,241

Tabela 79. Resultado do teste de Tukey para a velocidade de propagação no sentido longitudinal para a madeira de cumaru sem tratamento (ST) e tratada com CCA-C de acordo com os períodos de intemperismo acelerado.

Tratamento	Período	N	Nível de significância ( $\alpha=0,05$ )		
			Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
ST	720h	15	4174,24		
	960h	15	4224,44	4224,44	
	1200h	15		4268,23	
	0h	15		4341,55	4341,55
	240h	15			4407,71
	480h	15			4449,99
	Sig.			1,000	,122
CCA	1200h	15	4134,97		
	960h	15	4154,84		
	720h	15	4172,98		
	0h	15		4345,76	
	240h	15		4354,78	
	480h	15		4412,82	
	Sig.			,901	,443