

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**CARACTERIZAÇÃO DE POSTES DE MADEIRA PARA
USO NA REDE ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Eduardo Schneid

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

CARACTERIZAÇÃO DE POSTES DE MADEIRA PARA USO NA REDE ELÉTRICA

Eduardo Schneid

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**

Orientador: Profº. Darci Alberto Gatto

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Schneid, Eduardo
Caracterização de postes de madeira para uso na rede elétrica / Eduardo Schneid.-2013.
87 p.; 30cm

Orientador: Darci Alberto Gatto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2013

1. Propriedades mecânicas 2. Preservação da madeira. 3. CCA-C. I. Gatto, Darci Alberto II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO DE POSTES DE MADEIRA PARA
USO NA REDE ELÉTRICA**

elaborada por:
Eduardo Schneid

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

Comissão Examinadora:

Darci Alberto Gatto, Dr. (UFPeI/UFSM)
(Presidente/Orientador)

Jackson Roberto Eleotério, Dr. (FURB)

Marçal José Rodrigues Pires, Dr. (PUCRS)

Santa Maria, 06 de fevereiro de 2013.

DEDICO

Aos meus queridos e amados:
Pais, Paulo Giovani e Carmem;
Irmãs, Geovana e Tatiana;

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida;

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de participar do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal;

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Darci Alberto Gatto, por acreditar e confiar na minha capacidade, pelos conselhos e oportunidades que tornaram possível a minha formação acadêmica;

Ao meu colega e amigo, Pedro Henrique Cademartori, pelo companheirismo, respeito e contribuição durante toda a pós-graduação e, que de alguma forma contribuí para a realização do estudo.

A empresa Montana Química S/A pela atenção e realização das análises para a avaliação dos tratamentos preservativos.

Aos demais colegas e amigos, que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a minha formação.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Universidade Federal de Santa Maria
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

CARACTERIZAÇÃO DE POSTES DE MADEIRA PARA USO NA REDE ELÉTRICA

AUTOR: EDUARDO SCHNEID

ORIENTADOR: DARCI ALBERTO GATTO

Data e local da defesa: Santa Maria, 06 de fevereiro de 2013.

Os postes de madeira que são utilizados nas redes elétricas no Brasil são oriundos, na sua grande maioria, de madeira da espécie *Eucalyptus*. Esses postes devem apresentar características mecânicas adequadas garantindo segurança a estrutura das redes. Para garantir uma maior vida útil, a madeira dos postes deve receber tratamento preservativo com soluções capazes de resistir ataques de insetos e fungos degradadores da madeira. Sendo assim, o presente estudo tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas e qualificar o tratamento preservativo utilizado nos postes de madeira. A avaliação das propriedades mecânicas dos postes de madeira foi realizada por meio de testes não destrutivos de propagação de ondas de ultrassom e testes mecânicos destrutivos conforme a norma NBR 6231 (ABNT, 1980), a fim de estabelecer uma metodologia, com intuito de estimar as propriedades mecânicas da madeira por meio de ensaio não destrutivos. Também foram realizados tratamentos preservativos por meio do processo de célula cheia em períodos de 60, 90 e 120 minutos com pressão de 10 e 12 kgf/cm², utilizando a solução preservante Arseniato de Cobre Cromatado tipo C (CCA-C). Na avaliação do tratamento preservativo da madeira, foram realizados testes de penetração e retenção da solução preservativa. Ainda, realizaram-se análises químicas da madeira, por meio da quantificação de teor de extrativos, teor de lignina Klason e análises qualitativas com ensaios de espectroscopia no infravermelho (ATR-IR). Na avaliação das propriedades mecânicas dos postes de madeira, observaram-se coeficientes de correlação não significativos ente MOE_{eng.} e módulo de elasticidade dinâmico, evidenciando a ineficiência do método não destrutivo no presente estudo. Os resultados para os tratamentos preservativos mostraram que a penetração do CCA-C na madeira foi profunda e irregular em 50 a 70% dos postes de ambas as espécies. Já as análises de retenção, mostraram que a maioria dos postes de madeira não apresentaram as retenções mínimas exigidas pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984). Ainda, essas análises mostraram que quanto maior a pressão aplicada e maior o tempo de tratamento, melhores são os resultados para a retenção do CCA-C. As madeiras de ambas as espécies apresentaram resultados semelhantes tanto para o teor de extrativos quanto para o teor de lignina Klason. Já a técnica de espectroscopia no infravermelho (ATR-IR) não apresentou eficiência quanto à predição de modificações químicas na madeira tratada.

Palavras-chaves: Propriedades mecânicas. Preservação da madeira. CCA-C.

ABSTRACT

Master's Thesis
Santa Maria Federal University
Master's Degree Program in Forest Engineering

WOOD POLES CHARACTERISATION FOR USE IN ELECTRICAL LINES

AUTHOR: EDUARDO SCHNEID

SUPERVISOR: DARCI ALBERTO GATTO

Date and place of defense: Santa Maria, February 6th, 2013.

Wood poles used in electrical lines were from *Eucalyptus* species. These poles should present adequate mechanical characteristics in order to ensure the security and structure of electrical lines. Wood poles should be treated with products able to protect the wood against insects and fungus to increase service life. Taking these into account, this study aims to evaluate mechanical properties of wood poles and qualify preservative treatment used in the wood poles. Mechanical evaluation of wood poles was performed through nondestructive tests of ultrasonic wave propagation and destructive tests according to NBR 6231 (ABNT, 1980) in order to establish a method to estimate mechanical properties through nondestructive tests. Preservative treatments through full-cell method were carried out for 60, 90 and 120 minutes with pressure of 10 and 12 kgf/cm² using a CCA-C preservative solution. Tests of penetration and retention of the solution were performed to evaluating the preservative treatments. Chemical analysis of wood was done through extractives content, Klason lignin content and infrared spectroscopy (ATR-IR). The evaluation of mechanical properties showed not significant correlation coefficients between MOE_{eng.} and dynamic modulus of elasticity, proving the inefficiency of nondestructive method in this study. The results of preservative treatments showed that CCA-C penetration on wood was deep and irregular in 50-70% of poles for both species. On the other hand, retention did not present the minimum value required by NBR 8456 (ABNT, 1984). This analysis showed that higher pressure and time of treatment, higher is CCA-C retention. Wood from both species presented similar results for extractives content and Klason lignin content. Infrared spectroscopy (ATR-IR) technique did not show a efficiency to predict the chemical modification in treated wood.

Keywords: Mechanical properties. Wood preservation. CCA-C

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do ensaio de flexão engastada livre conforme norma NBR 6231 (Fonte: ABNT, 1980).	18
Figura 2 – Aparelho de emissão de ondas de ultrassom, cabos e transdutores de pontos secos (Fonte: autor).	35
Figura 3 – Esquema de um poste de madeira com os respectivos locais de leitura da velocidade de propagação da onda ultrassonora no sentido radial por transmissão direta (Fonte: autor).	36
Figura 4 – Esquema de um poste de madeira com respectivos locais de leituras da velocidade de propagação da onda ultrassonora no sentido longitudinal por transmissão semidireta (Fonte: autor)	37
Figura 5 – Ensaio de flexão estática de postes de madeira conforme a norma NBR 6231 (ABNT, 1980) (Fonte: autor).	38
Figura 6 – Discos retirados de cada poste; (A) corpo de prova utilizado para determinar o teor de umidade; (B) corpo de prova utilizado para determinar a massa específica básica (Fonte: autor).	40
Figura 7 – Corpo de prova utilizado no teste de flexão estática. Fonte: Autor.	42
Figura 8 – Método de transmissão das ondas ultrassonora nos corpos de prova (Stangerlin, 2010).	42
Figura 9 – Processo de tratamento utilizado na autoclave pelo processo de célula cheia (Fonte: autor).	43
Figura 10 – Autoclave de tratamento de madeira na Unidade de Preservação da Madeira localizada no município de Charqueadas.	44
Figura 11 – Autoclave de tratamento de madeira na Unidade de Preservação da Madeira localizada no município de Capivari do Sul.	45
Figura 12 – Baguetas retiradas para análise de penetração e retenção de CCA-C	46
Figura 13 – Regressão linear entre o módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de elasticidade dinâmico (E_L).	57
Figura 14 – Classificação da penetração do CCA-C em postes de <i>Eucalyptus saligna</i>	58
Figura 15 – Gráfico de retenção de CCA-C em postes de madeira de <i>Eucalyptus saligna</i> . ..	59
Figura 16 – Retenção de cada ingrediente ativo presente no CCA-C nos tratamentos preservativos em postes de <i>Eucalyptus saligna</i>	60
Figura 17 – Classificação da penetração do CCA-C em postes de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	62
Figura 18 – Gráfico de retenção de CCA-C em postes de madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	63
Figura 19 – Retenção de cada ingrediente ativo presente no CCA-C nos tratamentos preservativos em postes de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	64
Figura 20 – Gráficos de qualidade do processo de tratamento dos postes de madeira; (A) <i>Eucalyptus saligna</i> ; (B) <i>Eucalyptus cloeziana</i>	68
Figura 21 – Espectros ATR-IR da madeira de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Eucalyptus cloeziana</i> não tratada e tratada com CCA-C.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus</i> (Fonte: ABNT, 1984).....	21
Tabela 2 - Características gerais para postes de madeira (Fonte: ABNT, 1984).....	22
Tabela 3 - Formulações do preservante hidrossolúvel CCA (Fonte: ABNT, 1984).....	26
Tabela 4 - Tratamentos dos postes de madeira.	44
Tabela 5 - Bandas típicas da madeira.	50
Tabela 6 - Valores das propriedades físicas, mecânicas e ensaios não destrutivos.	52
Tabela 7 - Correlações de Pearson para os valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira de postes.	54
Tabela 8 - Correlações de Pearson para os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais e radiais e módulos de elasticidade na flexão engastada.	55
Tabela 9 - Valores das propriedades físicas, mecânicas e ensaios não destrutivos.	56
Tabela 10 - Valores médios de retenção para madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	61
Tabela 11 - Valores médios de retenção para madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	65
Tabela 12 - Valores dos teores de extrativos, lignina Klason e holocelulose das madeiras não tratadas de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Eucalyptus cloeziana</i>	71

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1 - Dados obtidos nos testes de flexão engastado livre nos postes de madeira seguindo a norma NBR 6231 (ABNT, 1980).	83
Apêndice 2 - Dados obtidos nos ensaios não destrutivos e destrutivos seguindo a norma ASTM D-143.	84
Apêndice 3 - Dados obtidos nos tratamento preservativos realizados na autoclave em postes de madeira.	85
Apêndice 4 - Análise multifatorial para os dados de retenção total de CCA-C na madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	86
Apêndice 5 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CrO ₃ na madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	86
Apêndice 6 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CuO na madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	86
Apêndice 7 - Análise multifatorial para os dados de retenção de As ₂ O ₅ na madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	86
Apêndice 8 - Análise multifatorial para os dados de retenção total de CCA-C na madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	87
Apêndice 9 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CrO ₃ na madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	87
Apêndice 10 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CuO na madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	87
Apêndice 11 - Análise multifatorial para os dados de retenção de As ₂ O ₅ na madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Postes de madeira no Brasil	16
3.2	Avaliação das propriedades mecânicas de postes de madeira	17
3.2.1	Avaliação destrutiva	17
3.2.2	Avaliação não destrutiva	22
3.3	Tratamentos químicos preservantes	24
3.3.1	Soluções preservantes.....	25
3.3.2	CCA (arseniato de cobre cromatado)	26
3.3.3	Processos de tratamento de preservação da madeira.....	28
3.3.4	Fatores influentes nos tratamentos preservante.....	30
3.3.5	Avaliação do tratamento preservativo	32
4	MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1	Seleção do material	34
4.2	Avaliação das propriedades mecânica dos postes de madeira	34
4.2.1	Ensaio não destrutivos.....	35
4.2.2	Ensaio destrutivos	38
4.2.3	Massa específica básica e teor de umidade	40
4.2.4	Ensaio de flexão estática	41
4.3	Tratamentos químicos preservantes	43
4.4	Análises químicas	47
4.4.1	Teor de extrativos	47
4.4.2	Teor de lignina insolúvel em ácido (Klason)	48
4.4.3	Teor de holocelulose	48
4.4.4	Teor de umidade.....	49
4.4.5	Espectroscopia no infravermelho (ATR-IR)	49
4.5	Análise Estatística	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Propriedades físicas e mecânicas dos postes de madeira	52
5.2	Tratamentos preservativos com CCA-C	58
5.2.1	Postes de madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	58
5.2.2	Postes de madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	62
5.2.3	Análise dos resultados obtidos nos tratamento preservativos	65
5.3	Análise química das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Eucalyptus cloeziana</i>	70
5.3.1	Teores de extrativos, lignina Klason e holocelulose	70
5.3.2	Espectroscopia no infravermelho (ATR-IR)	72
6	CONCLUSÕES	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	76
	APÊNDICES	83

1 INTRODUÇÃO

Os postes de madeira utilizados na estruturação das redes de distribuição elétrica e de telefonia no Brasil são produzidos na sua grande maioria a partir de madeira do gênero *Eucalyptus*. A preferência pela utilização das espécies desse gênero está associada a algumas vantagens, tais como rápido crescimento e incremento anual, propriedades mecânicas adequadas e alburno com boa permeabilidade, esta última que permite o tratamento da madeira com produtos preservantes. A norma NBR 8456 (ABNT, 1984) prevê a utilização de algumas espécies de *Eucalyptus*, como *Eucalyptus Alba* e *Eucalyptus botrypides*, *Eucalyptus rostrata*, que atualmente não possuem grande oferta de mercado. Portanto, deve-se atentar para à produção de postes de madeira com outras espécies do gênero, procurando madeiras com características recomendadas pela norma.

Apesar do Brasil possuir um grande potencial de produção de madeira para atender a demanda de postes, o mercado interno desse produto é muito inferior se comparado a países como Estado Unidos, Austrália, Finlândia e Alemanha. Esse cenário está relacionado com a crescente substituição de postes de madeira pelos de concreto, muitas vezes associada à melhor estética que os postes de concreto apresentam, principalmente em cidades, e não pela baixa durabilidade natural ou qualidade dos postes de madeira.

Uma das vantagens dos postes de madeira em relação aos de concreto, está relacionada com as propriedades mecânicas. Segundo Geraldo (2001), os postes de madeira possuem melhor desempenho estrutural, pois suportam esforços mecânicos iguais em qualquer direção, ao contrário dos postes de concreto, os quais possuem resistência adequada somente em um sentido.

Dessa maneira, durante a produção dos postes de madeira, a resistência mecânica deve ser avaliada. A norma NBR 6231 (ABNT, 1980) descreve como devem ser realizados os testes mecânicos e os parâmetros mínimos que as peças devem apresentar. No entanto, trata-se de um método destrutivo de avaliação, ocorrendo a perda e a impossibilidade de utilização dos postes testados. Como alternativa a esses métodos destrutivos, encontram-se as avaliações não destrutivas.

Dentre as diversas técnicas não destrutivas aplicadas à madeira, ressalta-se a utilização da propagação de ondas de ultrassom. Essa técnica possibilita a determinação das constantes de rigidez da madeira, sendo possível aplicar em escala industrial.

Após serem instalados nas redes de distribuição elétrica, os postes sofrem degradação por agentes físicos, químicos, mecânicos e biológicos, em que os agentes biológicos, representados por organismos xilófagos são a principal fonte de degradação da madeira.

Uma vez que a madeira sofre degradação biológica, faz-se necessário que as peças sejam tratadas, a fim de aumentar sua vida útil de serviço. Atualmente, entre os métodos de preservação utilizados por indústrias do setor, os mais eficientes são aqueles aplicados sob condições de vácuo e pressão, conhecidos como célula-cheia ou Bethell. Esse método visa preencher ao máximo as células da madeira com o preservativo. Nesse método de tratamento, o preservante mais difundido é o Arseniato de cobre cromatado (CCA).

No entanto, o tratamento dos postes deve ser adequado e eficiente contra os agentes degradadores, garantido durabilidade à madeira. Para que isso ocorra, o preservante deve apresentar uma boa penetração e retenção na madeira, em que esses parâmetros são afetados diretamente por fatores relacionados ao processo, ou seja, parâmetros como pressão e tempo de tratamento devem ser adequados. A avaliação da penetração do preservante, no caso do CCA, é realizada por meio de testes baseados em reações colorimétricas, as quais apresentam a distribuição da solução hidrossolúvel na madeira. Já o teste de retenção, mensura a quantidade de ingrediente ativo da solução em certo volume de madeira, expresso em kg/m^3 .

Nesse contexto, se os postes de madeira não apresentarem boa penetração e retenção de solução preservativa, a madeira fica suscetível à degradação causando a redução na vida útil das peças. Consequentemente, as concessionárias responsáveis pelas redes de distribuição elétrica sofrem prejuízos financeiros, pois a manutenção será mais onerosa. Portanto a avaliação das propriedades mecânicas e dos tratamentos preservativos deve ser realizada, com intuito de verificar se os postes a serem instalados apresentam os requisitos mínimos exigidos pelas normas vigentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades mecânicas e qualificar o tratamento preservativo utilizado em postes de madeira.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar as propriedades mecânicas dos postes de madeira por meio de ensaios não destrutivos utilizando propagação de ondas de ultrassom;

Avaliar as propriedades mecânicas dos postes de madeira por meio de ensaio destrutivos utilizando ensaios de flexão engastada conforme a norma NBR 6231;

Correlacionar os métodos de avaliação das propriedades mecânicas, a fim de estabelecer uma metodologia de ensaio não destrutivo;

Realizar tratamentos preservativos em postes de madeira, utilizando diferentes parâmetros (tempo e pressão aplicada) de processo em autoclave industrial;

Caracterizar e qualificar o tratamento preservativo em postes de madeira por meio de ensaios de penetração e retenção da solução hidrossolúvel CCA-C;

Caracterizar quimicamente as madeiras utilizadas nos postes por meio de análises de teor de extrativos e lignina, e ensaios de espectroscopia no infravermelho (ATR-IR).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Postes de madeira no Brasil

A utilização de postes de madeira no Brasil teve início nos primeiros anos do século XIX. Segundo Geraldo (2001) os primeiros registros de utilização de postes de madeira foram no estado de São Paulo no ano de 1916, onde postes de *Eucalyptus longifolia* sem tratamento foram empregados em redes de telefonia. Porém esses postes demonstraram pouca durabilidade, evidenciando a necessidade de algum tratamento preservativo para aumentar a vida útil dos postes.

Segundo Lepage (1986), a primeira usina de tratamento de madeira surgiu no ano de 1945, em que esta utilizava pressão para tratar a madeira a fim de aumentar a vida útil do material. Já na década de 1970, o setor de tratamento de madeira teve um grande crescimento, devido principalmente ao avanço tecnológico e a expansão do cultivo de espécies exóticas, tais como as pertencentes ao gênero *Eucalyptus*.

No Brasil, a produção de postes de madeira tem grande importância na estruturação das redes de distribuição de energia elétrica e telefonia, e a grande maioria das concessionárias continua utilizando grandes quantidades de postes de madeira, principalmente na área rural (SALES, 2002). Porém, comparando-se a quantidade de postes de madeira utilizado no Brasil com os Estados Unidos, por exemplo, ainda é muito inferior.

Conforme Geraldo (2001), nos Estados Unidos em suas redes de distribuição de energia elétrica e telefonia, 99% dos postes são de madeira. Ainda assim, a demanda anual nos EUA é em torno de 6 milhões de unidades, enquanto que no Brasil esse número é de aproximadamente 250 mil unidades. Além disso, países desenvolvidos e de grande vocação florestal, tais como Alemanha, Finlândia e Austrália, além da Inglaterra, importam grandes quantidades de postes de madeira para utilização principalmente em redes rurais (REMADE, 2003).

De acordo com a REMADE (2003), os postes de madeira de eucalipto tratados apresentam as seguintes vantagens: são reguladores de preço no mercado interno de postes em geral; ecologicamente corretos, uma vez que são advindos de madeira de reflorestamento; bom desempenho em relação ao isolamento elétrico; facilidade no transporte, pois além de

seu baixo peso em relação ao concreto, não requer maiores cuidados; possuem boas propriedades mecânicas. Porém, como todo material apresentam desvantagens como: baixa durabilidade natural, requerendo um tratamento preservativo na madeira e maiores cuidados na sua manutenção em serviço.

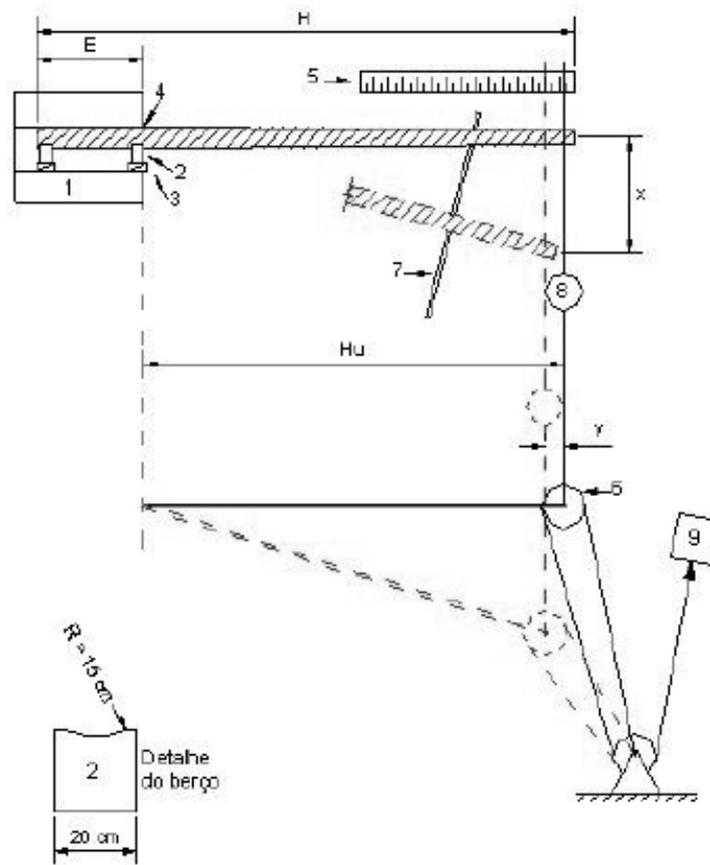
Entretanto, os postes de madeira em sua grande maioria têm sido substituídos por postes de concreto, mesmo que os postes de madeira apresentem muitas vantagens aos de concreto. Segundo Foelkel (2009), isso acontece mais por uma questão de estética, pois os postes de madeira apresentam rachaduras, tortuosidade e coloração indesejável, e não por sua baixa durabilidade natural. O autor ainda ressalta que postes tratados adequadamente tem sua vida útil estimada entre 15 e 25 anos.

3.2 Avaliação das propriedades mecânicas de postes de madeira

3.2.1 Avaliação destrutiva

Os postes de madeira devem apresentar características mecânicas mínimas para serem utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica. No Brasil, a norma NBR 6231 (ABNT, 1980) descreve o ensaio para avaliar as propriedades mecânicas dos postes.

O ensaio denominado de flexão engastada livre ou em balanço consiste em aplicar uma força com velocidade constante até o rompimento do poste. A base do poste deve ficar engastada em um dispositivo de concreto e no topo deve ser fixado um cabo de aço para tracionar o poste, e o registro da força é efetuado por meio de um dinamômetro. A Figura 1 demonstra como o ensaio deve proceder.



- 1 – Dispositivo para engastamento do poste a ensaiar;
 - 2 – Berço de madeira para acomodação do postes;
 - 3 – Cunhas de madeira;
 - 4 – Seção de engastamento;
 - 5 – Trena;
 - 6 – Moitão;
 - 7 – Suporte;
 - 8 – Dinamômetro;
 - 9 – Dispositivo para tração;
- H – Comprimento total do poste;
 E – Comprimento de engastamento;
 Hu – Comprimento útil;
 A – Escala graduada em cm;

Figura 1 – Esquema do ensaio de flexão engastada livre conforme norma NBR 6231 (Fonte: ABNT, 1980).

A velocidade de deformação durante o ensaio e o comprimento da base que deve ser engastada, são definidas pelas Fórmulas 1 e 2, respectivamente.

1

$$V = k \cdot \frac{hu}{C}$$

2

$$E = 0,1 \cdot H + 0,6$$

Em que:

V=velocidade de deformação (cm/min);

hu=braço de alavanca (cm);

C=circunferência na seção de engastamento (cm);

k=0,00146

E=comprimento de engastamento (m);

H=comprimento nominal do poste (m).

De posse dos dados obtidos no teste de flexão, devem ser calculados o limite de resistência e o módulo de elasticidade, por meio das Fórmulas 3 e 4, respectivamente.

3

$$\sigma_F = \frac{32\pi^2 \cdot p \cdot l}{C^3}$$

4

$$MOE = \frac{64\pi^3 \cdot l^2}{3 \cdot C^3 \cdot c} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta y}$$

Em que:

σ_F =limite de resistência da madeira na seção de engastamento (kgf/cm²);

p=carga de ruptura (kgf);

l=distancia da seção de engastamento ao ponto de aplicação da carga menos o valor de y (cm);

C=circunferência na seção de engastamento (cm);

MOE=módulo de elasticidade (kgf/cm²);

c=circunferência no ponto de aplicação de carga (cm).

Miná (2006) realizou um trabalho de comparação entre as normas NBR 6231 (ABNT, 1980) e ASTM 1036, e constatou erros nas fórmulas utilizadas para determinar a velocidade de deformação e o módulo de elasticidade. Portanto, para calcular esse dois parâmetros, devem-se utilizar as Fórmulas 5 e 6.

5

$$V = k \cdot \frac{Hu^2}{C}$$

6

$$MOE = \frac{64 \cdot \pi^3 \cdot L^3}{3 \cdot C^3 \cdot c} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

A partir do ensaio de flexão engastado livre, a norma NBR 8456 (ABNT, 1984) estabelece um padrão de qualidade para as propriedades físicas e mecânicas dos postes de madeira, conforme a Tabela 1. São apresentados valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de seis espécies do gênero *Eucalyptus* que são normalmente utilizadas para a confecção dos postes de madeira.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus* (Fonte: ABNT, 1984).

	Características Físicas					Características Mecânicas						
	Massa Específica Aparente (15%)	Retratibilidade				Limite de Resistência à Flexão		Índice de Rigidez (L/f)	Módulo de Elasticidade à Flexão		Cisalhamento (Dan/cm ²)	Dureza Janka (daN/cm ²)
		Radial (15%)	Tangencial (15%)	Volumétrica (%)	Coefficiente de Retratibilidade	Madeira Verde (daN/cm ²)	Madeira a 15% de Umidade		Módulo (daN/cm ²)	Limite de Proporcionalidade (daN/cm ²)		
<i>E. Alba</i>	0,83	5,8	12,0	20,4	0,60	968	1247	23	131300	386	126	642
<i>E. botryoides</i>	0,89	6,9	13,1	22,0	0,63	1157	1460	26	154500	472	115	749
<i>C. citriodora</i>	1,09	6,5	9,6	17,8	0,76	1561	1730	32	181900	841	182	1045
	1,04	6,6	9,5	19,4	0,77	1140	1238	36	136000	481	166	341
	0,98	6,9	9,4	18,2	0,78	1500	1673	24	177000	668	149	913
<i>E. paniculata</i>	1,09	7,3	13,6	23,1	0,79	1451	1772	39	201800	716	169	986
	1,06	7,5	14,5	24,6	0,76	1320	1760	24	185000	554	155	890
<i>E. rostrata</i>	0,87	6,8	15,5	25,9	0,48	878	1150	24	101600	389	105	645
<i>E. tereticornis</i>	0,99	7,3	16,7	23,9	0,45	1018	1340	34	120200	509	110	839
	0,95	6,9	13,4	23,0	0,65	1270	1576	17	133200	490	137	689

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de comprimento, diâmetros de base e topo e flecha máxima que os postes de madeira podem apresentar, conforme a norma NBR 8456 (ABNT, 1984).

Tabela 2 – Características gerais para postes de madeira (Fonte: ABNT, 1984).

Item	L (m)	Tipo	Resistência nominal (daN)	Flecha Máx. (mm)	E (mm)	Dimensões (mm)					
						Diâmetro (mm)			Perímetro (mm)		
						A 200 mm do topo		Engasta- mento	A 200 mm do topo		Engasta- mento
						Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1	9,0	L	150	450	1500	115	145	181	355	459	616
2		M	300			146	178	210	452	562	738
3		P	600			179	219	251	556	691	836
4		XP	1000			220	270	297	687	851	980
1	10	L	150	500	1600	115	145	196	355	459	666
2		M	300			146	178	228	452	562	767
3		P	600			179	219	268	556	691	892
4		XP	1000			220	270	309	685	851	1021
1	10,5	L	150	525	1650	115	145	203	355	459	690
2		M	300			146	178	236	452	562	793
3		P	600			179	219	278	556	691	925
4		XP	1000			220	270	314	685	851	1038
1	11	L	150	550	1700	115	145	211	355	459	716
2		M	300			146	178	245	452	562	823
3		P	600			179	219	288	556	691	958
4		XP	1000			220	270	320	685	851	1059

Foelkel (2009) relata que a norma 8456 (ABNT, 1984) deve ser revisada, pois a situação da eucaliptocultura no Brasil mudou bastante desde 1984, surgindo novas espécies de *Eucalyptus* apropriadas para a fabricação de postes, entre elas o *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus pellita*.

3.2.2 Avaliação não destrutiva

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira por meio de técnicas não destrutivas tem sido utilizada para caracterizar desde árvores vivas até produtos em linhas de

produção em indústrias. Ross et. al (1998) definiu a técnica não destrutiva como métodos que possibilitam caracterizar ou avaliar materiais sem prejudicar o uso final dos mesmos.

Bucur (1995) relatou que a avaliação da madeira utilizando técnicas não destrutivas é baseada nas irregularidades naturais da madeira, sendo que estas têm influência direta nas propriedades físicas e mecânicas da madeira. Existem diversas técnicas de avaliação não destrutiva que podem ser aplicadas em madeira, sendo uma delas a propagação de ondas de ultrassom.

A madeira é considerada um sólido e é capaz de propagar ondas de ultrassom, porém distinta nos três sentidos (longitudinal, radial e tangencial). Em materiais sólidos, a propagação dessas ondas dá-se por meio de vibrações moleculares, sendo as responsáveis pela irradiação de energia mecânica nos diferentes sentido de propagação do sólido e pela dissipação do material (NUSSENZVEIG, 2002; KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). Além do sentido da madeira, outros fatores inerentes a madeira influenciam a propagação de ondas ultrassônicas, destacando-se a massa específica e o teor de umidade.

Gonçalez et al. (2001), em estudo de estimava da constante elástica da madeira por meio de ondas de ultrassom, encontraram as maiores velocidades no sentido longitudinal, seguidas pela direção radial e tangencial. Os autores relataram que no sentido longitudinal, os elementos anatômicos como as fibras e os vasos são os principais responsáveis pela propagação do sinal, favorecendo uma maior velocidade. Já no sentido radial, os raios são os responsáveis pela continuidade do sinal, porém como estão em menor proporção do que os vasos ou fibras, a velocidade de propagação das ondas é menor. No sentido tangencial, a onda de ultrassom não encontra nenhum elemento contínuo para a manutenção do sinal, perdendo assim velocidade de propagação.

Em relação à massa específica, o aumento dessa propriedade propicia maior velocidade de propagação da onda de ultrassom. Porém, a relação teórica entre velocidade e massa específica deveria ser inversamente proporcional ($E_d = V^2 \cdot \rho$). Carrasco e Azevedo Junior (2003) sugeriram que o aumento da massa específica é consequência da maior deposição de celulose nas fibras da madeira, e essa quantidade de celulose faz com que ocorra um aumento na rigidez do material. Portanto, mesmo que haja aumento da massa específica, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo aumento da rigidez do material.

Para o teor de umidade e a velocidade de propagação, Bucur (2003) relatara que a velocidade diminui conforme o aumento do teor de umidade, ocorrendo o inverso com a atenuação do sinal. Porém, acima do ponto de saturação das fibras (PSF) a variação da velocidade é quase nula e a atenuação torna-se constante. Calegari (2006) menciona que

acima do PSF, tem-se água livre nos espaços vazios da madeira, portanto a propagação das ondas de ultrassom dá-se tanto nos elementos anatômicos da madeira quanto na água existente, diminuindo assim a velocidade de propagação.

Segundo Gorniak e Mattos (2000) as técnicas que utilizam ultrassom permitem avaliar a presença de nós, organismos xilófagos que degradam a madeira, avaliar a madeira estrutural em uso e estimar as constantes elásticas.

Sendo assim, as avaliações por meio de técnicas não destrutivas tornam-se interessantes, pois apresentam vantagens como: possibilidade de avaliar peças estruturais sem a necessidade da retirada de corpos de prova, avaliar produtos em linhas de produção, possibilita avaliar um maior número de peças com maior rapidez, entre outras (OLIVEIRA; SALES, 2002; ERICKSON et al., 2000).

No Brasil, alguns autores (MINA et al., 2004; HERRERA et al, 2008) realizaram pesquisas visando avaliar o uso da propagação de ondas de ultrassom para estimar as propriedades mecânicas de postes de madeira e relataram que foram encontrados resultados satisfatórios.

3.3 Tratamentos químicos preservantes

No seu ambiente natural, a madeira está sujeita a degradação por agentes biológicos, causando ao material danos relacionados à estética ou comprometendo as propriedades de resistência. Assim, é necessário que a madeira seja protegida contra os agentes biodeterioradores, com a finalidade de manter suas qualidades estéticas ou propriedades de resistência.

Para preservar a madeira contra os agentes biológicos utilizam-se produtos que contenham substâncias tóxicas a estes agentes. Estas substâncias chamadas de preservantes da madeira são utilizadas quando não é possível se modificar o meio em que a madeira está exposta.

Segundo Cavalcante (1982), estes produtos preservantes devem apresentar determinadas características e propriedades como: toxidez a uma grande variedade de organismos xilófagos, baixa toxidez a organismos não xilófagos, ação duradoura, boa penetração e difusão uniforme, boa fixação, não alterar as características da madeira e em outros materiais, não ser inflamável, econômico e de fácil aquisição.

Porém, não basta somente escolher um produto com ações que protejam a madeira de agentes biológicos degradadores. Além disso, devem ser escolhidos os métodos de aplicação desses produtos na madeira. Na literatura são citados desde métodos caseiros ou não industriais, como também os industriais, que por sua vez são mais eficientes.

Tão somente após a escolha do produto preservante e do método de aplicação do mesmo, é necessário que sejam realizados testes para saber se o produto preservante é eficiente na preservação, se o método aplicado foi adequado e realizado de forma eficiente.

3.3.1 Soluções preservantes

Segunda a norma NBR 8456 (ABNT, 1984) os produtos preservantes da madeira são divididos em produtos oleossolúveis e hidrossolúveis. Lepage (1986) cita que os quatro principais preservantes utilizados em larga escala no mundo, sendo responsável por 80% da madeira tratada do mundo são o creosoto, pentaclorofenol, CCA e CCB.

Os dois principais produtos oleossolúveis estão banidos nos principais países do mundo, sendo o creosoto utilizado apenas em alguns países subdesenvolvidos e em algumas situações especiais. Já o pentaclorofenol foi um dos primeiros pesticidas sintéticos, com larga escala de utilização na década de 1930, porém esse produto contém dioxinas, restringindo seu uso (ESTEVES, 2009). Segundo Galvão et al. (2004), o pentaclorofenol é rapidamente absorvido pelas vias áreas, digestivas e cutâneas, contendo substâncias altamente tóxicas e cancerígenas. Em 1985 o CONAMA incluiu como atividades potencialmente poluidoras o transporte, a estocagem e o uso do pentaclorofenol e pentaclorofenato de sódio.

Já entre os preservativos hidrossolúveis que se destacam no cenário mundial, o CCA é o preservante de maior utilização atualmente, sendo empregado na preservação de madeira a partir da década de 30. Porém, segundo Galvão et al (2004), a madeira tratada com CCA, a partir de 2004, vem sendo proibida na Europa e sofrendo fortes restrições nos Estados Unidos. Na Europa, o uso de madeira tratada com CCA não pode ser utilizado em casos que tenham contato com pessoas e animais, ficando restringidos a usos em peças estruturais, tais como postes e mourões. Entretanto, no Brasil e Estado Unidos não há restrições quando a isso, porém devem ser tomados cuidados com a serragem oriunda de madeira tratada e entulhos restantes após a utilização.

3.3.2 CCA (arseniato de cobre cromatado)

O arseniato de cobre cromatado (CCA) é um preservativo hidrossolúvel, no qual é composto por cobre, cromo e arsênio. Segundo a norma NBR 8456 (ABNT, 1984), o CCA apresenta três formulações distintas, variando a porcentagem dos seus componentes químicos, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Formulações do preservante hidrossolúvel CCA (Fonte: ABNT, 1984).

Ingrediente ativo	Tipos de CCA		
	A	B	C
CrO ₃	65,5 %	35,3 %	47,5 %
CuO	18,1 %	19,6 %	18,5 %
As ₂ O ₅	16,4 %	45,1 %	34,0 %

Nas diferentes composições químicas do CCA, as proporções são definidas em termos de sistema de óxidos ativos (RICHARSDSON, 1978). Na madeira, os componentes da solução hidrossolúvel reagem com os principais componentes, ou seja, reagem com os carboidratos, lignina e extrativos, tornando-se insolúveis (GALVÃO et al. 2004). Além disso, esse preservante não tem odor, não são corrosivos a metais e quimicamente estáveis a temperatura ambiente.

Na madeira, o cromo tem como função fixar o cobre e o arsênio, evitando assim a lixiviação. Já o cobre tem ação fungicida, que por meio da precipitação de proteínas causa interferência no metabolismo dos fungos, provocando reações enzimáticas. Por sua vez, o arsênio tem ação inseticida, apresentando alta toxidez a fungos e insetos (WILLIANS et al., 1991). Dessa forma, as relações de fixação dos sais que compõem o CCA são: Cr/As>1,9 e Cr/Cu=1,7 (SMITH e WILLIANS, 1979).

Durante a impregnação do preservativo hidrossolúvel CCA, ocorrem reações químicas que provocam a fixação da substância na madeira. No estágio inicial, as reações do CCA com a madeira provocam um rápido decréscimo do pH, o qual depende da magnitude da concentração da solução. Essa redução do pH é atribuída à fixação do cobre por troca iônica com a liberação de prótons. Após isso, o pH tem um acréscimo gradativo atribuído a

formação dos complexos lignina-ácido crômico e lignina-cromato de cobre, juntamente com a redução do cromo (LEPAGE, 1986).

Segundo Pizzi et al.(1984) e Plackett (1983), os principais produtos são: de 10 a 15% complexos estáveis de lignina (CuCrO_4), complexos lignina (CrAsO_4) e precipitados inorgânico de CrAsO_4 na celulose.

De acordo com Lepage (1986), a maior parte do cobre que se fixa à madeira, localiza-se na sub-camada S1, onde se encontra principalmente a lignina, sugerindo que o cobre esteja associado a esse componente da madeira em porcentagens entre 80 e 90%. O cobre também está associado a celulose, provavelmente ligados aos grupos OH. Já o cromo, produz complexos com a madeira na forma trivalente e hexavalentes, sendo que esta última formando complexos com a lignina, provavelmente com as unidades guaiacil. Na forma trivalente, é sugerida a formação de complexo polimérico que confere repelência a água.

Conforme Dobbs e Grant (1978) e Hartcher (1982), na madeira tratada cerca de 85% do arsênio reage com o cromo e o restante forma complexos relativamente solúveis com a lignina e a celulose.

O tratamento da madeira com CCA normalmente é realizado em processos industriais que utilizam pressão dentro de autoclave, sendo esses locais denominados de usinas de tratamento da madeira. O processo industrial utilizado para impregnar a madeira é denominado de célula cheia e tem como etapas: introdução da madeira seca (PSF<30%) dentro da autoclave; aplicação de vácuo, retirando o ar existente dentro dos elementos anatômicos da madeira; preenchimento da autoclave com a solução preservante (CCA); aplicação de pressão entre 10 e 12 kgf/cm², forçando a penetração da solução nos elementos anatômicos da madeira; e vácuo final para retirar o excesso de solução na madeira tratada.

Segundo Wilkinson (1979), a madeira após ser tratada permanece limpa, não oleosa, não tóxica e apropriada para o uso. Recomenda-se que nas primeiras 72 horas, a madeira tratada deve ficar protegida da ação de intempéries, principalmente a água, evitando assim que os elementos químicos presentes na solução sejam lixiviados. Também com a incidência de sol, durante o período de fixação do CCA na madeira, está assume uma coloração esverdeada.

Rak e Clarke (1975) enfatizaram que o problema recorrente em usinas de tratamento de madeira que utilizam CCA como solução preservante é o fato do desbalanceamento e formação de depósitos no tanque de trabalho, decorrente da adição da solução recuperada no final do processo. Um procedimento adequado para a atenuação do desbalanceamento da solução é a complementação de solução de CCA nova. Os autores ainda relataram que na

saída da solução após o vácuo final, aumenta-se a proporção relativa de sais de cobre, com um pronunciado decréscimo dos sais de cromo, enquanto que a variação do arsênio é menos pronunciada.

Como o desbalanceamento da solução são decorrentes da recuperação da solução após o vácuo final, Pizzi et al. (1983) propuseram medidas para evitar o desbalanceamento da solução do CCA que são: evitar a extração da solução da madeira por vácuo após o período de pressão e dissolver as lamas com ácido ou hidróxido de amônio e usar esta solução em conjunto com o CCA para o tratamento.

3.3.3 Processos de tratamento de preservação da madeira

A madeira pode ser tratada por meio de processos que utilizam apenas métodos simples, sem a necessidade de instalações industriais, ou processos de tratamentos realizados em unidades industriais, necessitando de maior infraestrutura (ROCHA, 2001)

Os processos de tratamento simples têm como característica principal a ausência de pressão para impregnar a solução preservativa na madeira. Normalmente, utilizam-se princípios básicos como: difusão, capilaridade e absorção térmica. Tais processos são recomendados quando as madeiras tratadas não ficam expostas a um alto grau de deterioração biológica, pois esses tratamentos normalmente proporcionam apenas um tratamento superficial. Entre os processos mais difundidos estão: pincelamento ou pulverização, imersão simples, imersão em longo prazo, banho quente e frio, difusão, difusão dupla, substituição de seiva e método Bolcherie (ROCHA, 2001).

Em situações que a madeira tratada exigir um melhor tratamento ou controle do tratamento preservativo empregado, utilizam-se processos industriais, nos quais se caracterizam-se por utilizar pressão para impregnar a solução preservante na madeira. Tais tratamentos são empregados em madeira que são utilizadas em estruturas, postes ou até mourões (ROCHA, 2001).

No caso dos postes de madeira, os tratamentos utilizam pressão superior à atmosférica, forçando assim a penetração do preservante na madeira de forma mais uniforme e com maior profundidade. Utilizam-se madeiras que tenham boa permeabilidade, e para uma maior eficiência, a peça de madeira deve-se encontrar com o teor de umidade abaixo do PSF (ponto de saturação das fibras).

As madeiras são tratadas em instalações denominadas de usinas de preservação de madeiras, compostas por tanques de armazenamento, tanque misturador de soluções preservante, bomba de vácuo, bomba de pressão, bomba de transferência, tubulações, válvulas, e a autoclave, componente mais importante. A autoclave é um cilindro horizontal onde as peças de madeira a serem tratadas são colocadas (SGAI, 2000).

Segundo Rocha (2001), os dois principais processos com pressão são:

Processos de célula cheia – são conhecidos por terem em sua fase inicial, a aplicação de um vácuo e posteriormente o enchimento da autoclave. Ao ser liberado o vácuo, o preservante é sugado em grande quantidade para os espaços vazios no interior da madeira. É conhecido como célula cheia, pois o preservativo fica retido nas paredes e lúmen das células de madeira.

O processo de célula cheia mais utilizado é o Bethell. Este processo inicia-se com um vácuo inicial na autoclave, de aproximadamente 600 mmHg durante um tempo que varia de 30 a 60 minutos. Após é feito o enchimento da autoclave com o preservante, e então aplica-se a pressão, que varia de 10 a 12 kgf/cm². O tempo de pressão varia de 1 a 5 horas, dependendo da permeabilidade da madeira a ser tratada. Decorrido o tempo necessário de pressão, esta é aliviada e inicia-se a transferência do preservante restante para o tanque de armazenamento do preservante. Por fim, é realizado um vácuo final de curta duração, com a finalidade de eliminar o excesso de preservante sobre a superfície da madeira, evitando-se o desperdício. O tempo decorrido para este tratamento dependerá da espécie de madeira a tratar, dimensões da peça e quantidade de alburno presente na peça de madeira.

Processos de célula vazia – esses processos diferem-se dos processos de célula cheia, pois não utilizam o vácuo inicial, ou seja, o preservante é aplicado na madeira sem a retirada do ar. Os dois principais processos são Lowry e Ruëping.

O processo Lowry inicia-se com o carregamento da madeira na autoclave e o enchimento da mesma com o preservante. Após aplica-se pressão entre 1 e 2 horas, e retorna-se a pressão atmosférica, onde o ar no interior da madeira expande-se, expulsando boa parte do preservante. Na sua fase final, aplica-se um vácuo, que com ação combinada com a pressão do ar nas cavidades celulares, expulsa uma parte do produto preservante absorvido.

O outro processo, o Ruëping, difere-se do anterior apenas pela a aplicação de uma pressão inicial de 4,5 kgf/cm².

3.3.4 Fatores influentes nos tratamentos preservante

Em tratamentos preservativos da madeira existem uma série de fatores que influenciam a qualidade dos mesmos, ou seja, fatores inerentes a madeira, solução preservante e ao processo utilizado.

Segundo Sgai (2000) os fatores inerentes a madeira que possuem maior influência nos tratamentos são: espécie, volume de vazios na estrutura anatômica da madeira, porcentagem de alburno e cerne, permeabilidade e teor de umidade.

O volume de vazios na madeira tem relação com a quantidade de solução preservante a madeira é capaz de receber, não sendo um fator limitante no processo de tratamento comercial da madeira. Segundo Siau (1984), pode ser calculado pela Fórmula 7.

7

$$V_a = 1 - G(0,685 + 0,01 \cdot \frac{M}{G_s})$$

Em que:

V_a = volume de vazios (%);

G = densidade básica da madeira (g/cm^3);

M = teor de umidade (%);

G_s = densidade aparente da madeira (g/cm^3);

0,685 = volume específico da madeira (cm^3/g).

Já a proporção de alburno e cerne na madeira tem grande influencia no tratamento preservativo da madeira. O alburno normalmente pode ser impregnado com solução preservantes de forma relativamente fácil, ao contrario do cerne, que apresenta resistência a penetração de líquidos e gases. Essa dificuldade está relacionada com a presença de extrativos e substancia que podem se solidificar dentro dos elementos anatômicos (HUNT; GARRANT, 1962; NICHOLAS; SIAU, 1973).

Outro fator que exerce grande influencia no tratamento da madeira é permeabilidade, podendo ser definida como a facilidade em que os fluidos são transportados através de um

material poroso, influenciada por um gradiente de pressão. Essa propriedade poder ser definida por meio da equação de Darcy (SIAU, 1984) descrita na Fórmula 8.

8

$$k = \frac{\textit{fluxo}}{\textit{gradiente}} = \frac{QL}{A \cdot \Delta P}$$

Em que:

k = permeabilidade de fluídos (cm³/cm . atm . s);

Q = fluxo volumétrico (cm³/s);

L = comprimento da madeira na direção do fluxo (cm);

A = seção transversal da madeira perpendicular à direção do fluxo (cm²);

ΔP = diferença de pressão (atm).

Segundo Sgai (2000) a permeabilidade na direção longitudinal pode ser 1000 vezes maior comparando-se a permeabilidade na direção radial e tangencial. Porém, em aplicações praticas, esse valor pode ser de aproximadamente 100 vezes entre as relação de penetração. A razão para essa diferença, é que a lei de Darcy é valida para condições ideais, sendo diferente para as condições encontradas no tratamento de madeiras.

Por fim o teor de umidade da madeira afeta diretamente o tratamento, sendo que acima do ponto de saturação das fibras (PSF) ocorre a diminuição dos espaços vazios, dificultando a retenção e penetração do preservante. Já abaixo do PSF, o aumento do teor de umidade resulta no inchamento das membranas das pontoações, diminuindo assim a permeabilidade a gases e água (NICHOLAS; SIAU, 1973).

Quanto ao processo utilizado, Mendes e Alves (1988) descreveram que os parâmetros de pressão, temperatura e tempo de tratamento, exercem influência na qualidade do tratamento da madeira. A pressão é a responsável pela penetração da solução preservante na madeira, empurrando o líquido para o interior dos elementos anatômicos da madeira. A equação de Jurin (Fórmula 9) foi utilizada por Siau (1984) para calcular a pressão necessária para superar a interface ar-líquido para diversos tamanhos de poros e diferentes líquidos.

$$P = \frac{2\gamma}{R} \cdot \cos\theta$$

Em que:

P = pressão

γ = tensão superficial do líquido;

R = raio capilar;

θ = ângulo de umedecimento.

Assim, os traqueídeos devem possuir poros com no mínimo 10 μm de raio para permitir o preenchimento do lúmen com água utilizando pressões usuais, ou seja, 200 psig (14 kgf/cm²).

Porém, as pressões utilizadas nos tratamentos de madeira variam de valores um pouco acima de uma atmosfera (método de Boucherie) até 70 kgf/cm² (métodos de tratamentos utilizados na Austrália), porém os valores mais usuais ficam em torno de 14 kgf/cm². Outro fator que influencia no processo é a temperatura, porém é recomendável que se aumente a temperatura somente quando a solução é oleosa, caso contrário para soluções hidrossolúveis, as temperaturas acima de 60°C podem decompor os sais utilizados nas soluções (MENDES; ALVES, 1988). Esses mesmos autores relataram que o tempo de tratamento é o responsável pela retenção e penetração. Porém, esse parâmetro pode acarretar em aumento de custos de produção, ou seja, antes de aumentar o tempo de tratamento para melhorar a retenção ou a penetração, deve-se modificar a pressão exercida ou a temperatura durante o tratamento.

3.3.5 Avaliação do tratamento preservativo

Os principais parâmetros de avaliação da qualidade dos tratamentos da madeira são a penetração e a retenção do preservante utilizado. A penetração pode ser definida como a profundidade e a distribuição do preservante na madeira tratada, sendo expressa em porcentagem de madeira tratada e determinada por meio de reações colorimétricas. Já a retenção é a quantidade de solução retida em um determinado volume de madeira. Esses dois

parâmetros de qualidade são influenciados pela madeira a ser tratada e pelos parâmetros de tratamento utilizado (GALVÃO et al., 1967; LEPAGE, 1986; SANTINI, 1988).

A pouca penetração e a retenção da solução preservante são resultados de um tratamento ineficiente, ocasionando assim uma limitação da resistência biológica da madeira. A penetração é influenciada principalmente pela umidade da madeira, presença de pontoações aspiraladas e resina, quantidade de alburno e pureza da solução preservante. Uma vez que haja uma boa penetração, a retenção é influenciada principalmente pela concentração da solução preservativa (CAVALCANTE, 1982).

Segundo Ibach (1999), a penetração e a distribuição do preservativo dependerão da espécie que deseja tratar-se. Para algumas espécies, o cerne tem baixo índice de permeabilidade, dificultando assim o tratamento. Já o alburno, na maioria das espécies não apresenta dificuldades quanto ao tratamento sob pressão. Isso é relevante, pois em peças roliças como postes, a penetração do preservativo no alburno é importante para conseguir uma proteção na zona externa da peça.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Seleção do material

Os postes de madeira utilizados para os testes mecânicos e tratamentos químicos preservantes foram oriundos de uma Unidade de Preservação de Madeira, localizada no município de Charqueadas (RS) nas coordenadas 30°00'14"S e 51°31'55"O, e de uma Unidade de Preservação de Madeira, localizada no município de Capivari do Sul (RS) nas coordenadas 30°11'40"S e 50°21'48"O.

As espécies utilizadas no estudo foram *Eucalyptus saligna* obtidas na Unidade de Preservação localizada no município de Charqueadas e *Eucalyptus cloeziana* obtidas na Unidade de Preservação localizada no município de Capivari do Sul.

Os ensaios mecânicos realizados por meio de testes não destrutivos e destrutivos foram realizados somente com postes de madeira da espécie *Eucalyptus cloeziana*.

Nas avaliações dos tratamentos preservativos por meio de ensaios de penetração e retenção do CCA-C, e as análises de caracterização química, foram utilizados postes de madeira das duas espécies, ou seja, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*.

4.2 Avaliação das propriedades mecânica dos postes de madeira

Os testes de caracterização mecânica foram realizados com dez postes de madeira não tratados da espécie *Eucalyptus cloeziana* com comprimento de 12 metros e selecionados por delineamento totalmente ao acaso. Para tal, evitaram-se postes que não apresentavam as características mínimas exigidas pela norma NBR 6231 (ABNT, 1980).

Nesses testes foi escolhida somente uma espécie (*Eucalyptus cloeziana*) com intuito de caracterizar e estabelecer uma metodologia de ensaios não destrutivos, e não a caracterização mecânica propriamente dita da madeira utilizada na fabricação de postes de madeira. Dessa maneira, foram realizados ensaios não destrutivos por meio de propagação de

ondas de ultrassom e ensaios destrutivos por meio de testes de flexão engastada conforme a norma NBR 6231 (ABNT, 1984).

4.2.1 Ensaio não destrutivos

Os ensaios não destrutivos nos postes de madeira foram realizados por meio da técnica de propagação de ondas ultrassônicas. Para isso, utilizou-se um aparelho de emissão de ondas ultrassônicas do fabricante PROCEQ, e um par de transdutores exponenciais de ponto seco com frequência de emissão de ondas igual a 45 kHz (Figura 2). Antecedendo os ensaios, o aparelho de emissão das ondas de ultrassom foi calibrado com um cilindro metálico conforme recomendação do fabricante.



Figura 2 – Aparelho de emissão de ondas de ultrassom, cabos e transdutores de pontos secos (Fonte: autor).

Na avaliação não destrutiva dos postes, adotaram-se duas metodologias distintas quanto ao sentido de propagação da onda ultrassônica e tipo de transmissão. Inicialmente, realizou-se a transmissão direta no sentido radial e posteriormente no sentido longitudinal por transmissão semidireta.

A transmissão no sentido radial por transmissão direta foi realizada em quatro pontos distintos ao longo do comprimento do poste, especificamente na linha de engastamento, 50 cm, 100 cm e 150 cm distantes dessa linha, conforme a Figura 3. O total de leituras de

propagação de ondas ultrassônicas foram oito, pois se realizou duas em cada ponto sendo ortogonalmente uma em relação a outra.

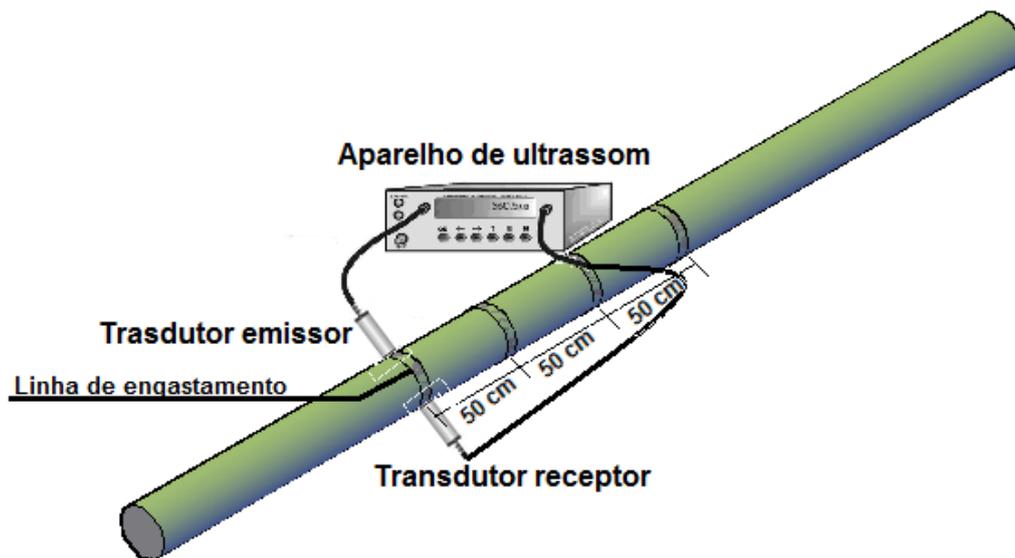


Figura 3 – Esquema de um poste de madeira com os respectivos locais de leitura da velocidade de propagação da onda ultrassônica no sentido radial por transmissão direta (Fonte: autor).

A transmissão no sentido longitudinal por transmissão semidireta foi realizada em 3 posições distintas, especificamente na linha de engastamento até 50 cm; de 50 cm até 100 cm e 100 cm até 150 cm, conforme a Figura 4. Ao total, realizaram-se seis leituras de propagação das ondas ultrassônicas.

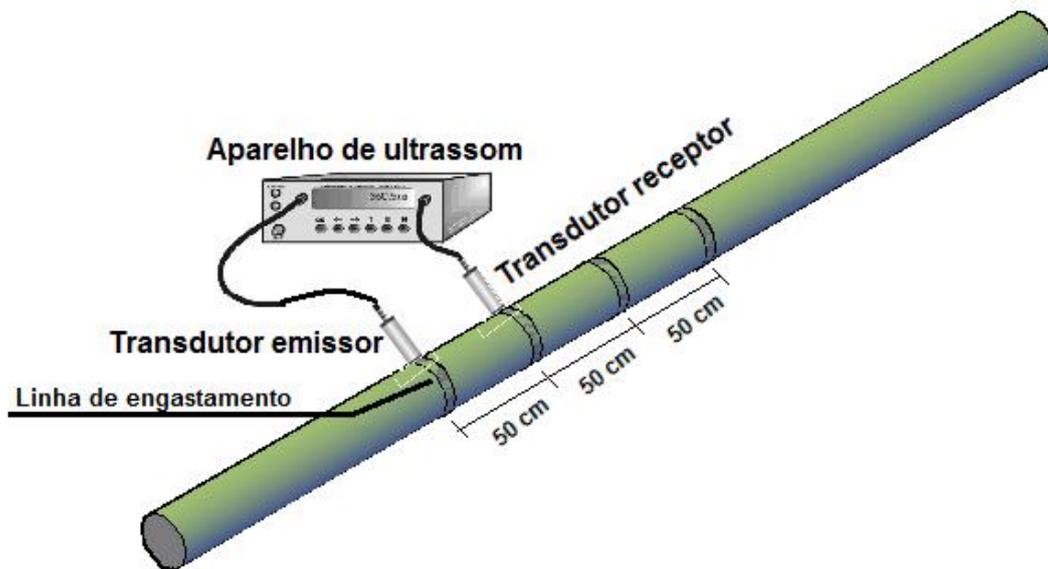


Figura 4 – Esquema de um poste de madeira com respectivos locais de leituras da velocidade de propagação da onda ultrassônica no sentido longitudinal por transmissão semidireta (Fonte: autor)

Após o registro do tempo de propagação da onda ultrassônica em cada metodologia, calcularam-se as velocidades de propagação. De posse da velocidade e da massa específica básica (ver item 4.2.3), calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico (EL) conforme Fórmula 10.

10

$$E_L = \frac{V^2 \cdot \rho}{9,8 \times 10^4}$$

Em que:

E_L = módulo de elasticidade dinâmico (kgf/cm²);

V = velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s);

ρ = massa específica (kg/m³).

4.2.2 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos foram realizados após os ensaios não destrutivos. Para realizar os ensaios destrutivos, seguiu-se a norma NBR 6231 (ABNT, 1980). No teste de flexão, o poste é engastado em uma base fixa de concreto e na outra extremidade o poste é tracionado por meio de um cabo de aço utilizando-se uma talha. Durante a realização do teste, é medido o deslocamento horizontal por uma trena e a força registrada por um dinamômetro, conforme a Figura 5.



Figura 5 – Ensaio de flexão estática de postes de madeira conforme a norma NBR 6231 (ABNT, 1980) (Fonte: autor).

A velocidade do ensaio é contínua e determinada pela Fórmula 11. Porém, onde foram realizados os ensaios, a tração do poste foi realizada por meio de uma talha acionada manualmente, fazendo com que a velocidade do ensaio não fosse contínua.

$$V = k \cdot \frac{Hu^2}{C}$$

Em que:

V=velocidade de carregamento (cm./min.);

k=0,00146;

Hu=braço de alavanca (cm.);

C=circunferência do poste na linha de engastamento (cm).

A partir dos dados obtidos no teste de flexão engastada, o módulo de elasticidade ($MOE_{eng.}$) e o limite de resistência (σ_F) foram calculados seguindo as Fórmulas 12 e 13, respectivamente.

$$MOE_{eng.} = \frac{64 \cdot \pi^3 \cdot L^3}{3 \cdot C^3 \cdot c} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

$$\sigma_F = \frac{32 \cdot \pi^2 \cdot P \cdot L}{C^3}$$

Em que:

MOE=módulo de elasticidade (kgf/cm²);

L=Distância da seção de engastamento ao ponto de aplicação da carga (cm);

C=circunferência do poste na linha de engastamento (cm);

c=circunferência do poste no ponto de aplicação da carga (cm);

ΔP = variação da carga no momento elástico (kgf);

Δx = variação da flecha no momento elástico (cm);

P=carga máxima no momento da ruptura (kgf).

4.2.3 Massa específica básica e teor de umidade

Após o término dos testes de flexão engastada, retiraram-se discos dos locais onde foram realizadas as leituras de propagação das ondas ultrassônicas. Esses discos foram retirados com intuito de determinar a massa específica básica e o teor de umidade no momento dos testes não destrutivos e destrutivos. As amostras que serviram para a determinação da massa específica básica e teor de umidade foram retiradas conforme Figura 6.

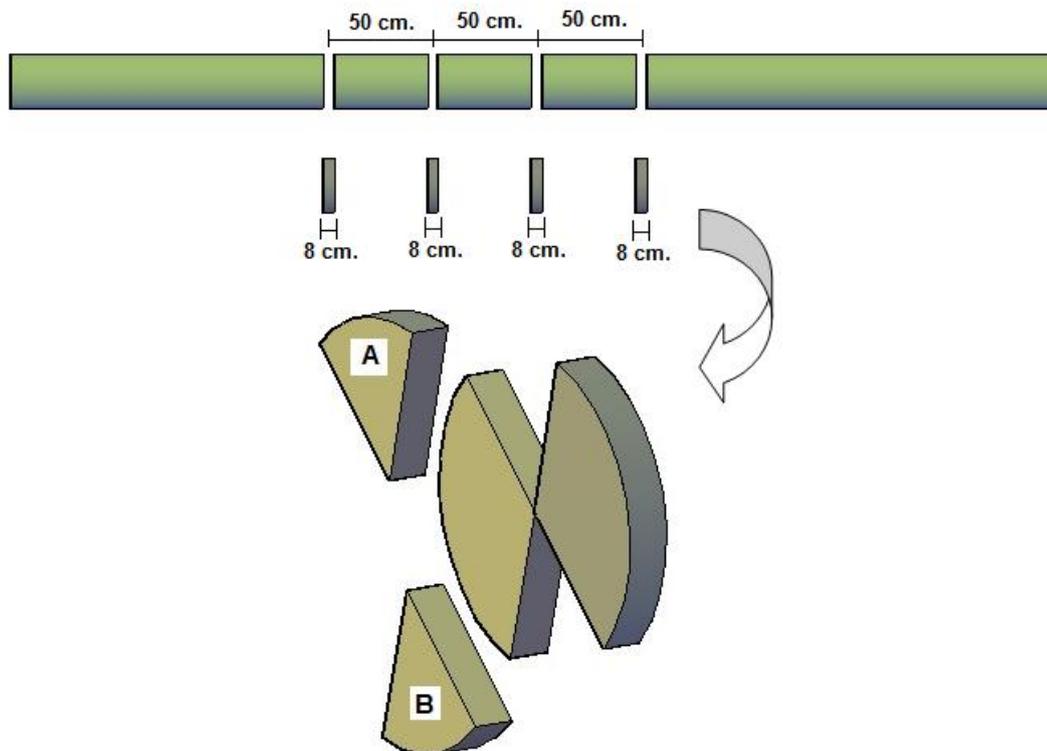


Figura 6 – Discos retirados de cada poste; (A) corpo de prova utilizado para determinar o teor de umidade; (B) corpo de prova utilizado para determinar a massa específica básica (Fonte: autor).

Para a determinação do teor de umidade, mensurou-se a massa úmida da amostra com balança semi analítica com precisão de 0,01 g. Após colocou-se o corpo de prova em estufa a

103±2 °C até atingir massa constante. Assim, de posse da massa úmida e seca de cada amostra, utilizou-se a Fórmula 14.

14

$$TU = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} \cdot 100$$

Em que:

TU=teor de umidade (%);

Mu=massa úmida (g);

Ms=massa seca (g).

A massa específica foi determinada por meio do método de imersão em água e determinação do volume pelo empuxo do líquido, registrado em balança analítica com precisão de 0,1 g. De posse do volume úmido e massa seca, utilizou-se a Fórmula 15.

15

$$\rho_{bás.} = \frac{Ms}{Vu}$$

Em que:

$\rho_{bás.}$ =massa específica básica (g/cm³);

Ms=massa seca (g);

Vu=volume úmido (cm³).

4.2.4 Ensaio de flexão estática

Após os testes de flexão engastada, a base do poste que permaneceu fixada na base de concreto foi cortada com o auxílio de uma motosserra. A partir da base de cada poste foram confeccionados corpos de prova para ensaios de flexão estático de acordo com a norma

ASTM D143-94. Os ensaios de flexão estática foram realizados em uma máquina de ensaios EMIC DL 30000 em corpos de prova confeccionados com dimensões de 2,5 x 2,5 x 41 cm. (Figura 7) A partir desses ensaios, foram determinados o módulo de elasticidade (MOEest.) e módulo de ruptura (MOR) dos corpos de prova.

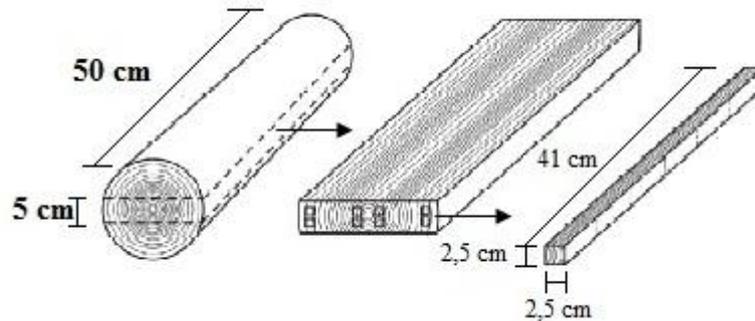


Figura 7 – Corpo de prova utilizado no teste de flexão estática. Fonte: Autor.

Antecedendo os ensaios de flexão estática, foram realizados ensaios não destrutivos por meio de ondas ultrassônicas. Esses ensaios foram realizados pelo mesmo aparelho utilizado anteriormente, juntamente com o par de transdutores de ponto seco. A metodologia utilizada foi a transmissão direta e sentido longitudinal (Figura 8). Nesses ensaios foi determinado o módulo de elasticidade dinâmico (EL) a partir da Fórmula 10.

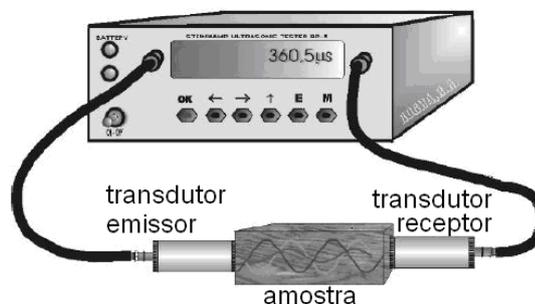


Figura 8 – Método de transmissão das ondas ultrassônicas nos corpos de prova (Stangerlin, 2010).

4.3 Tratamentos químicos preservantes

Antecedendo os tratamentos, o teor de umidade dos postes que foram tratados foi verificado por meio de medidores de umidade do tipo resistência, sendo esses fornecidos pelas respectivas usinas de tratamento.

Os tratamentos químicos para a preservação da madeira foram realizados em autoclave industrial horizontal, utilizando-se a solução química hidrossolúvel Arseniato de Cobre Cromatado tipo C, conhecido como CCA-C. A solução preservante possuía uma concentração de 2% e 72% de ingrediente ativo.

Para a impregnação da solução, foi utilizado o processo célula cheia, conhecido como Bethell, que é comumente utilizado para impregnação de soluções hidrossolúveis, tais como o CCA-C. Esse processo tem como principais etapas um vácuo inicial, pressão e vácuo final (Figura 9).

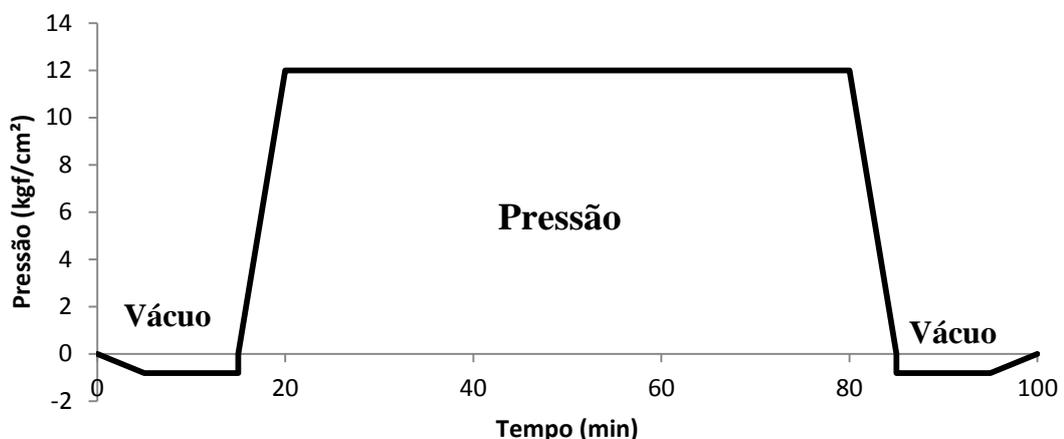


Figura 9 – Processo de tratamento utilizado na autoclave pelo processo de célula cheia (Fonte: autor).

Os parâmetros dos tratamentos para impregnação da solução hidrossolúvel CCA-C na madeira de ambas as espécies utilizadas foram: vácuo inicial de 600 mmHg durante 30 minutos, pressão de 10 kgf/cm² ou 12 kgf/cm² durante 60, 90 e 120 minutos e vácuo final de 600 mmHg durante 15 minutos. O delineamento experimental para os tratamentos preservativos da madeira realizados em autoclave apresenta-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Tratamentos dos postes de madeira.

Tratamento	Espécie	Pressão (kgf/cm ²)	Tempo de pressão (min.)
1	E. saligna	10	60
2	E. saligna	10	90
3	E. saligna	10	120
4	E. saligna	12	60
5	E. saligna	12	90
6	E. saligna	12	120
7	E. cloeziana	10	60
8	E. cloeziana	10	90
9	E. cloeziana	10	120
10	E. cloeziana	12	60
11	E. cloeziana	12	90
12	E. cloeziana	12	120

Na Unidade de Preservação da Madeira localizada no município de Charqueadas, foram tratados os postes de madeira da espécie *Eucalyptus saligna*. Nessa unidade a autoclave horizontal tem dimensões de 1,90 metros de diâmetro e 20,00 metros de comprimento (Figura 10).



Figura 10 – Autoclave de tratamento de madeira na Unidade de Preservação da Madeira localizada no município de Charqueadas.

Já na outra unidade de preservação foram tratados os postes de madeira da espécie *Eucalyptus cloeziana*. A autoclave horizontal tem 2,00 metros de diâmetro e 20,00 metros de comprimento (Figura 11).



Figura 11 – Autoclave de tratamento de madeira na Unidade de Preservação da Madeira localizada no município de Capivari do Sul.

Após cada tratamento de impregnação, os postes de madeira ficaram durante 72 horas protegidos de intempéries naturais (incidência de luz solar e água da chuva). Logo após foram selecionados ao acaso três postes para as análises de penetração e retenção do CCA-C, conforme a norma NBR 8456 (ABNT, 1984), a qual estabelece que para um lote de até 90 postes de madeira, sejam realizados testes de penetração e retenção em três postes tratados. Essas análises foram realizadas a partir de baguetas oriundas do alburno de cada poste selecionado (Figura 12). As baguetas foram retiradas ao longo do comprimento dos postes e diametralmente opostos com auxílio de uma broca extratora e furadeira elétrica. Os locais de coleta das baguetas foram 30 cm distantes da base, na linha de engastamento, na metade do comprimento do poste e 30 cm distantes do topo, totalizando oito baguetas por poste.



Figura 12 – Baguetas retiradas para análise de penetração e retenção de CCA-C

Fonte: autor.

As baguetas foram devidamente colocadas em sacos plásticos herméticos e enviadas para a empresa Montana Química S.A, onde foram analisadas a penetração e a retenção de ingredientes ativos de CCA-C.

Para os testes de penetração foram realizados por meio de reações colorimétricas, utilizando a substância Cromo-azurol-S. Essa substância indica a área que contém o preservante CCA, pois ao detectar a presença de cobre, ocorre uma reação entre o cromo da substância Cromo-azurol-S e o cobre do preservante CCA-C, fazendo com que a madeira adquira uma coloração azul escuro. Os resultados da análise de penetração foram classificados em profunda/regular e profunda/irregular.

Já os testes de retenção, separou-se a parte correspondente do alburno de cada bagueta, descartando a parte do cerne. Determinou-se a massa específica aparente da parte tratável, ou seja, do alburno. Determinada a massa específica aparente, as baguetas foram secas em estufa, para posteriormente serem moídas em moinho tipo Willey, atingindo uma granulometria de 30 mesh e armazenadas em cubetas de plástico. As análises das retenções do preservante hidrossolúvel CCA-C foram realizadas em espectrômetro de raios-X, modelo Shimadzu-EDX-720. O resultado da análise de retenção foi expresso em kg/m^3 e correspondem aos ingredientes ativos por unidade de volume de madeira tratada.

4.4 Análises químicas

A análise química foi realizada com intuito de caracterizar a madeira de alburno das espécies de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*, as quais foram submetidas a tratamento preservativo.

Para os ensaios de caracterização química, foram utilizadas baguetas retiradas de três postes de cada espécie e separado apenas a parte pertencente ao alburno. Após, essas amostras foram moídas em moinho tipo Willey (40 mesh) com o intuito de mensurar o teor de extrativos em etanol-tolueno, teor de lignina insolúvel em ácido (Klason) e teor de holocelulose.

4.4.1 Teor de extrativos

O teor de extrativos foi determinado seguindo a norma TAPPI 204 cm-97. Dessa forma, a extração foi realizada em extrator Soxhlet e utilizando 50 mL de etanol e 100 mL de tolueno. Foram pesadas amostras de $2,00 \pm 0,01$ gramas e inseridos em cartuchos de celulose previamente secos em estufa. Posteriormente, os cartuchos foram posicionados dentro dos extratores e realizadas as extrações durante 6 horas ou 24 refluxos.

Após o processo de extração, os balões foram colocados em estufa com temperatura de 103°C para secagem durante 24 horas. Decorrido esse período, os balões foram pesados.

Assim, o teor de extrativos foi calculado utilizando a Fórmula 16.

16

$$TE = \frac{(Pi - Pf)}{Pi} * 100$$

Em que:

TE=teor de extativos (%);

Pi=peso inicial da amostra (g);

Pb= peso final da amostra (g);

4.4.2 Teor de lignina insolúvel em ácido (Klason)

O teor de lignina foi determinado conforme a norma TAPPI 222 cm-98. Dessa forma, o teor de lignina insolúvel em ácido foi realizado com amostra livres de extrativos, ou seja, utilizado as amostras resultantes das análises da extração.

Para isso, foram pesadas amostra de $1 \pm 0,01$ gramas e colocadas dentro de um balão com 15 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com concentração de 72% durante 2 horas. Decorrido o tempo, adicionou-se 560 mL de água destilada e realizou-se o refluxo da solução durante 4 horas.

Após o refluxo, a solução foi filtrada em filtro nº 3 previamente seco em estufa. O material filtrado foi lavado com água quente até a neutralização do pH e, posteriormente disposto em estufa a temperatura de $103^\circ C$ durante 24 horas para secagem.

Assim, o teor de lignina insolúvel em ácido foi calculado utilizando-se a Fórmula 17.

17

$$TL = \frac{Pf}{Pi} * 100$$

Em que:

TL=teor de lignina insolúvel em ácido (%);

Pf=peso final da amostra (g)

Pi=peso inicial da amostra (g).

4.4.3 Teor de holocelulose

A determinação do teor de holocelulose foi calculada pela diferença de porcentagem, ou seja, foi subtraído o teor de extrativos, teor de lignina insolúvel em ácido conforme Fórmula 18.

$$TH = 100 - (TE + TL)$$

Em que:

TH=teor de holocelulose (%);

TE=teor de extrativos (%);

TL=teor de lignina insolúvel em ácido (%);

4.4.4 Teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade, pesou-se $2 \pm 0,01$ gramas de amostra moída, a qual foi disposta em recipiente previamente seco em estufa. Após, as amostras foram colocadas em estufa a temperatura de 103°C durante 24 horas ou atingir massa constante. Assim, determinou-se o teor de umidade utilizando Fórmula 19.

$$TU = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100$$

Em que:

TU=teor de umidade (%)

Mu=massa úmida (g);

Ms=massa seca (g).

4.4.5 Espectroscopia no infravermelho (ATR-IR)

Os ensaios de espectroscopia no infravermelho foram realizados com intuito de verificar se os tratamentos de impregnação da substância hidrossolúvel CCA-C provocaram modificações nos grupos funcionais presentes nos compostos químicos da madeira, especificamente lignina, hemicelulose e celulose..

Para isso, utilizou-se como matéria-prima os mesmos postes selecionados ao acaso para os testes de penetração e retenção. Assim, selecionou-se um poste tratado de *Eucalyptus saligna* e um poste tratado de *Eucalyptus cloeziana*, nos quais apresentaram maior retenção da solução preservante e 3 postes não tratados, para ambas as espécie. As amostras foram moídas em moinho de facas tipo Willey, e após peneirou-se para obter o material com granulometria inferior a 0,4 mm (40 mesh).

Para a realização dos ensaios, utilizou-se um espectrômetro Nicolet Nexus 470. O equipamento foi configurado para a realização de 32 varreduras em transmitância, resolução de 4 cm⁻¹ e leituras entre 4000 e 700 cm⁻¹. Antecedendo os ensaios, foi realizado o alinhamento da lâmpada e após a coleta do sinal de fundo para evitar interferências. Antecedendo os ensaios, foi realizada a calibração do aparelho para evitar interferências durante os ensaios.

Na Tabela 5 apresentam-se as bandas atribuídas a identidade da madeira.

Tabela 5 – Bandas típicas da madeira.

λ (cm ⁻¹)	Atribuição	Componente químico	Referencia
1592	$\nu(\text{C}=\text{C})$ anel aromático	Lignina	1,2,3
1506	$\nu(\text{C}=\text{C})$ anel aromático	Lignina	1,2,3
1457	$\delta_{\text{as}}(\text{CH}), \delta_{\text{as}}(\text{CH}_3)$	Lignina	1,2,3
1421	$\delta_{\text{as}}(\text{CH}_2)$	Celulose	1,3
1369	$\delta_{\text{s}}(\text{CH})$	Celulose e poliose	1,2,3
1321	$\delta(\text{OH})$	Celulose	1,3
894	$\delta_{\text{as}}(\text{CH})$	Celulose	1,2,3

Em que: λ = comprimento de onda; ν = estiramento simétrico; ν_{as} = estiramento assimétrico; δ = deformação simétrica; δ_{as} = deformação assimétrica. 1= Pastore (2004); 2= Muller et al. (2009); 3= Fackler et al. (2010).

4.5 Análise estatística

A análise dos dados foi realizada por meio de estatística descritiva, correlação de Pearson, modelos matemáticos por meio de análise de regressão e análise multifatorial de variância (MANOVA).

A validação dos modelos de regressão foi realizada por meio dos testes de heterogeneidade de variância (White), normalidade (Shapiro-wilk) e independência dos resíduos (Durbin-Watson).

Nas análises multifatoriais de variância, considerou-se a comparação das médias por meio do teste F em 5% de probabilidade de erro. Em caso de rejeição da hipótese nula, aplicou-se o teste de hipóteses (Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro).

Utilizaram-se gráficos para comparação da retenção de CCA-C dos tratamentos realizados nos poste de madeira e o valor que a norma NBR 8456 (ABNT, 1984) preconiza. Considerou-se apenas o valor LIE (limite inferior de especificação) cujo valor é igual a 9,6 kg/m³.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades físicas e mecânicas dos postes de madeira

Apresentam-se na Tabela 6 os valores das propriedades físicas, mecânicas e ensaios não destrutivos obtidos durante a realização dos testes de flexão engastada em postes de madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Tabela 6 – Valores das propriedades físicas, mecânicas e ensaios não destrutivos.

	Média	C.V. (%)	Mínimo	Máximo
TU (%)	35,34	5,82	31,48	38,09
$\rho_{\text{bás.}}$ (kg/m ³)	581,09	6,67	515,89	640,54
MOE (kgf/cm ²)	103838	22,69	74879	144876
σ_f (kgf/cm ²)	572	17,31	473	794
V_{somL} (m/s)	2462	21,63	1310	3180
V_{somR} (m/s)	1320	6,80	990	1557
E_L (kgf/cm ²)	402870	41,07	96801	716098
E_R (kgf/cm ²)	109967	13,83	63151	161342

Em que: TU=teor de umidade; $\rho_{\text{bás.}}$ =massa específica; MOE=módulo de elasticidade a flexão; σ_f =limite de resistência à flexão; V_{somL} =velocidade de propagação do som no sentido longitudinal; V_{somR} =velocidade de propagação do som no sentido radial; E_L =módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; E_R =módulo de elasticidade dinâmico radial; C.V.=coeficiente de variação;

Observa-se que os valores médios para as propriedades mecânicas dos postes de madeira no teste de flexão engastada foram inferiores ao recomendado pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984), a qual menciona que os valores mínimos exigidos para o dimensionamento de postes são de 130000 daN/cm² (130000 kgf/cm²) para o MOE e 850 daN/cm² (850 kgf/cm²) para resistência a flexão (σ_f).

Arruda et al. (2006) realizou ensaios de flexão em postes de 3 diferentes espécies de *Eucalyptus* e encontrou como resultado para o MOE, valores entre 64570 e 157.260 kgf/cm² e para σ_f valores entre 476 e 1132 kgf/cm², em que os postes de madeira da espécie *Corumbia citriodora* obtiveram os maiores valores, seguido pelos postes de *Eucalyptus saligna* e

Eucalyptus grandis. Alencastro (2009), realizando ensaios de flexão engastada em postes retirados da rede elétrica de espécies de *Eucalyptus* spp., encontrou valores para o MOE entre 125070 e 531040 kgf/cm² e para σ_f entre 26,7 e 76,5 kgf/cm².

Em relação aos ensaios não destrutivos, observa-se que a velocidade de propagação no sentido longitudinal (V_{somL}) é maior que no sentido radial (V_{somR}). Segundo Gonzalez et al. (2001), os elementos anatômicos como as fibras e os vasos são os principais responsáveis pela propagação do sinal, favorecendo uma maior velocidade. Já no sentido radial, os raios são os responsáveis pela continuidade do sinal, porém como estão em menor proporção do que os vasos ou fibras, a velocidade de propagação das ondas é menor.

Nogueira (2003), avaliando a transmissão de onda de ultrassom nos três sentidos (longitudinal, radial e tangencial) na madeira de *Pinus taeda* e utilizando transdutores de face plana, conclui que a velocidade de propagação da onda de ultrassom é aproximadamente 5130, 2200 e 1750 m/s no sentido longitudinal, radial e tangencial, respectivamente.

Apesar dos resultados obtidos no presente estudo seguirem a mesma tendência de diferença de velocidade conforme o sentido de propagação, os valores são inferiores comparando-se ao encontrado por Nogueira (2003).

Stangerlin et al. (2010) realizando um estudo de propagação de ondas de ultrassom na madeira de quatro espécies florestais e utilizando dois tipos de transdutores (face plana e ponto seco), relata que a velocidade de propagação no sentido longitudinal quando utilizado os transdutores de ponto seco é entre 2200 e 2400 m/s, e utilizando os transdutores de face plana a velocidade encontrada é entre 4600 e 5600 m/s. Os autores sugerem que os baixos resultados para a velocidade com transdutores ponto seco obtidos podem ser em razão das ondas não serem efetivamente longitudinais, o que foi ocasionado pelo ângulo formado entre os transdutores e a superfície da madeira, ou seja, uma onda ao incidir em ângulo com as fibras, não gera onda longitudinal pura, ocorrendo componentes longitudinais e transversais, isso pode ser amenizado calculando-se o ângulo para gerar uma onda puramente longitudinal.

Dessa forma, os resultados encontrado no presente estudo para a velocidade no sentido longitudinal estão próximos ao encontrado por Stangerlin et al. (2010), sugerindo que ocorreu o mesmo problema de tipo de onda gerada, uma vez que o tipo de transdutor foi o mesmo.

Na Tabela 7, apresentam-se os resultados obtidos para os coeficientes de correlação de Pearson entre as propriedades físicas e mecânicas dos postes de madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Tabela 7 – Correlações de Pearson para os valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira de postes.

	TU	$\rho_{bás.}$	MOE	σ_f
TU	1	-0,63*	-0,63*	-0,76*
$\rho_{bás.}$	-	1	0,40 ^{NS}	0,88**
MOE	-	-	1	0,60*
σ_f	-	-	-	1

Em que: TU=teor de umidade; ME=massa específica; MOE=módulo de elasticidade na flexão; σ_f =limite de resistência na flexão; ^{NS}=valores não significativos em nível de 95% de confiança; *=valores significativos em nível de 95% de confiança; **=valores significativos em nível de 99% de confiança.

De acordo com a Tabela 7, obteve-se coeficiente de correlação significativo e positivo entre a massa específica básica e resistência máxima à flexão (σ_f), enquanto que os coeficientes de correlações entre teor de umidade e as propriedades mecânicas foram significativos e negativos.

Observa-se que a massa específica básica teve maior influência na resistência a flexão, quando comparado ao MOE. Zhang (1997) afirmou que o MOR é a propriedade que apresenta melhor relação com a massa específica, capaz de explicar 45% da variação do MOR, enquanto que para o MOE, esse valor decresce para 30%. Abruzzi (2011) realizou teste de flexão engastada em postes de madeira novos de *Eucalyptus* spp. e encontrou correlações significativas e positivas entre a $\rho_{bás.}$ e as propriedades mecânicas. Os coeficientes de correlação encontrados pelo autor foram de 0,94 e 0,74, entre ME e MOR, e ME e MOE respectivamente.

Em relação ao conteúdo de umidade presente na madeira no momento do teste de flexão, foi constatado que há uma relação inversa entre o TU e as propriedades mecânicas (MOE e σ_f). O coeficiente de correlação entre TU e MOE foi significativo e negativo ($r=-0,63$), assim como entre o TU e σ_f , porém o coeficiente encontrado foi maior ($r=-0,76$). Diversos autores relatam que o teor de umidade afeta a resistência mecânica da madeira, sendo essa propriedade física inversamente proporcional ao MOE e MOR, porém de forma mais significativa abaixo do ponto de saturação das fibras (PANSWIN e ZEEUW, 1970; HASELEIN et al., 2002; LOBÃO et al, 2004; FRANÇA e CUNHA, 2012).

Na Tabela 8 apresentam-se os coeficientes de correlação entre os valores obtidos nos testes não destrutivos e destrutivos.

Tabela 8 – Correlações de Pearson para os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais e radiais e módulos de elasticidade na flexão engastada.

	E _L máx.	E _L méd.	E _L mín.	E _R máx.	E _R méd.	E _R mín.	MOE _{eng.}
E _L máx.	1	0,74*	0,27 ^{NS}	0,08 ^{NS}	-0,19 ^{NS}	-0,36 ^{NS}	0,19 ^{NS}
E _L méd.		1	0,68*	0,10 ^{NS}	-0,19 ^{NS}	-0,18 ^{NS}	0,25 ^{NS}
E _L mín.			1	0,19 ^{NS}	-0,05 ^{NS}	0,31 ^{NS}	0,56 ^{NS}
E _R máx.				1	0,82**	0,28 ^{NS}	0,21 ^{NS}
E _R méd.					1	0,33 ^{NS}	-0,24 ^{NS}
E _R mín.						1	0,38 ^{NS}
MOE _{eng.}							1

Em que: E_L máx.=módulo de elasticidade dinâmico longitudinal máximo; E_L méd.=módulo de elasticidade dinâmico longitudinal médio; E_L mín.=módulo de elasticidade dinâmico longitudinal mínimo; E_R máx.=módulo de elasticidade dinâmico radial máximo; E_R méd.=módulo de elasticidade dinâmico radial médio; E_R mín.=módulo de elasticidade dinâmico radial mínimo; MOE=módulo de elasticidade na flexão engastada; E_L=módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; ^{NS}=valores não significativos em nível de 95% de confiança; *=valores significativos em nível de 95% de confiança; **=valores significativos em nível de 99% de confiança.

A escolha de realizar a comparação entre os valores médios, máximos e mínimos dos módulos de elasticidade dinâmicos e MOE_{eng.} é que cada poste possuía mais de um ponto de leitura de propagação da onda ultrassônica. Observou-se que não foram encontrados nenhum coeficiente de correlação significativos entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático.

Diante dos resultados apresentados nesse estudo (Tabela 6 e 8), sugere que a metodologia aplicada nos postes de madeira requer aprimoramento, mudando o tipo de transdutor ou técnica de propagação da onda de ultrassom (sentido de propagação ou tipo de transmissão).

No que diz respeito aos transdutores utilizados (ponto seco), Nesvijski (2003) relata que os transdutores de pontos secos geram ondas esféricas, sem direção definida de propagação. Assim, sua aplicação, para determinadas finalidades, requer a otimização do ângulo de inclinação, podendo alterar o resultado consideravelmente. As características das ondas geradas também podem se alterar dependendo do contato com a superfície do material. Ainda Stangerlin et al. (2010), conclui que apesar dos transdutores de ponto seco serem mais práticos, as ondas geradas não são puramente longitudinais, gerando ondas de superfície, diminuindo a velocidade de propagação e conseqüentemente as constantes elásticas.

Na Tabela 9 apresentam-se os valores das propriedades físicas, mecânicas e ensaios não destrutivos. Esses dados referem-se aos ensaios mecânicos de flexão estática realizada na

máquina universal de ensaios conforme a norma ASTM D 143-94 e aos ensaios não destrutivos.

Tabela 9 – Valores das propriedades físicas, mecânicas e ensaios não destrutivos.

	$\rho_{12\%}$ (kg/cm ³)	Vsom(m/s)	E _L (kgf/cm ²)	MOE (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)
Média	785,54	5655	256995	175354	1258
C. V. (%)	8,25	3,39	12,24	13,52	11,80
Mínimo	642,77	5217	189725	136736	897
Máximo	913,03	6058	335782	234812	1591

Em que: ME=massa específica; V_{som}=velocidade de propagação das ondas ultrassônica; E_L=módulo de elasticidade dinâmico longitudinal; MOE=módulo de elasticidade na flexão estática; MOR=módulo de ruptura na flexão estática; C.V.=coeficiente de variação.

Observa-se que os valores encontrados para a velocidade de propagação da onda de ultrassom (V_{som}) na madeira foram semelhantes aos encontrados na literatura, situando-se em 4000 e 6000 m/s. Ainda assim, o módulo de elasticidade dinâmico (EL) foi superior ao módulo de elasticidade estático, apresentando uma relação entre EL e MOE igual a 1,47. Simpson e Wang (2001) explicam que os valores do módulo de elasticidade encontrados em ensaios não destrutivos são superiores aos obtidos em ensaio de flexão estática devido a madeira ser considerada um material visco-elástico e o comportamento desse material nos dois tipos de ensaios podem ser considerados diferentes. Pois, em ensaios de flexão estática, a força aplicada é considerada de longa duração e nesses casos a madeira tem comportamento semelhante a um líquido viscoso. Enquanto que em ensaios não destrutivos (ultrassom), a força aplicada é de curta duração, implicando em um comportamento da madeira semelhante a um material elástico.

Na Figura 13 apresenta-se a regressão linear entre os ensaios não destrutivos e destrutivos.

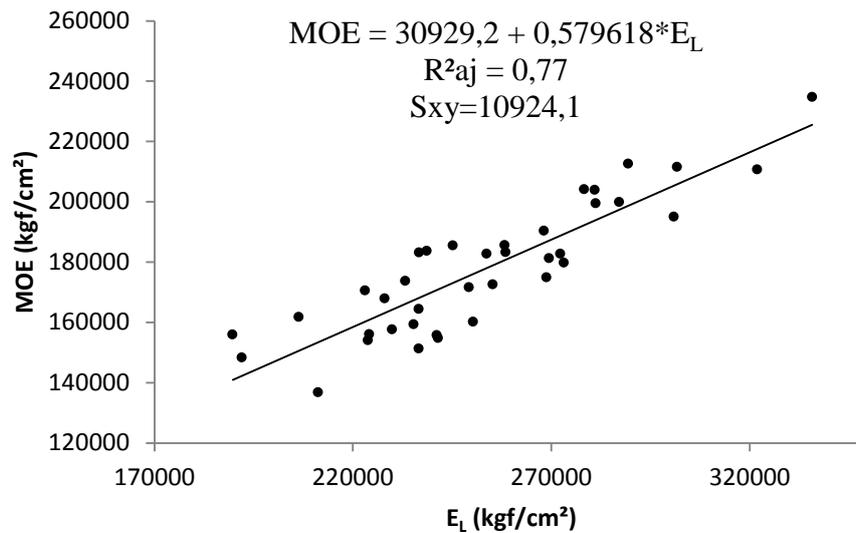


Figura 13 – Regressão linear entre o módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de elasticidade dinâmico (E_L).

Observa-se que a regressão entre os valores encontrados para o módulo de elasticidade dinâmico e estático, apresentou um coeficiente de determinação igual 0,77, sendo estatisticamente significativo em 1% de probabilidade de erro em termos de regressão e um erro padrão da estimativa igual a 10924,1.

Diversos autores já comprovaram a eficácia da técnica não destrutiva utilizando a propagação de ondas de ultrassom na madeira para estimar as propriedades mecânicas, encontrando coeficientes de determinação significativos (CARRASCO e AZEVEDO JUNIOR, 2003; NOGUEIRA 2003; STANGERLIN et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2002; MINÁ et al., 2004; BALLARIN e NOGUEIRA, 2005).

Comparando-se as metodologias abordadas nesse trabalho, ou seja, aplicação da técnica não destrutiva em postes de madeira para estimar as propriedades mecânicas e em corpos de prova seguindo a norma ASTM D 143-94, verificou-se que a técnica de propagação de ondas de ultrassom mostrou-se eficiente apenas para estimar as propriedades mecânicas da madeira utilizando corpos de prova em ensaios de flexão estática.

Miná et al. (2004) avaliando as propriedades mecânicas em postes de madeira de *Corymbia citriodora* com comprimentos de 7,5 e 9 metros, obtiveram coeficientes de determinação significativos e igual a 58% por meio de regressão entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático. Porém, no trabalho não foi exposto a metodologia para o sentido de propagação e tipo de transmissão da onda de ultrassom.

Herrera et al. (2008) relatam que foram encontradas boas correlações entre a resistência de postes de madeira e a velocidade de propagação mínima, sendo esta transmitida no sentido radial do postes. Entretanto, os autores realizaram essas pesquisas em postes retirados da rede elétrica, tendo como objetivo de estabelecer faixas de velocidade para estimar a resistência residual dos postes de madeira.

5.2 Tratamentos preservativos com CCA-C

5.2.1 Postes de madeira de *Eucalyptus saligna*

Apresenta-se na Figura 14 a classificação da penetração do preservante CCA-C no alburno da madeira dos postes, a qual foi classificada em profunda/regular e profunda/irregular.

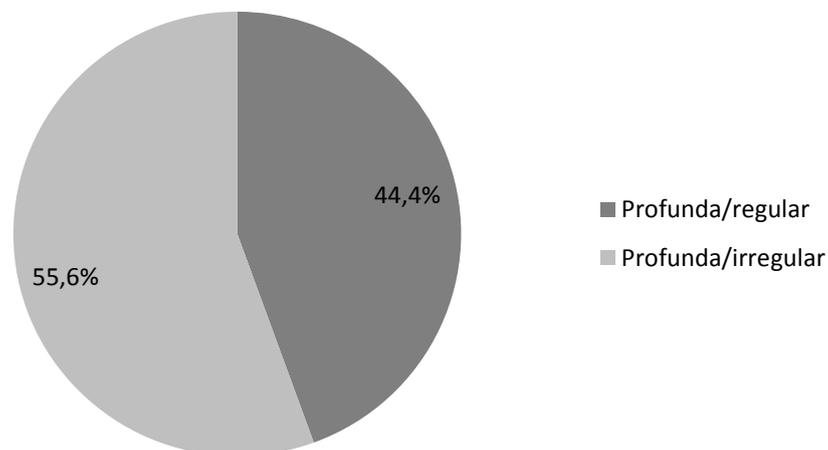


Figura 14 – Classificação da penetração do CCA-C em postes de *Eucalyptus saligna*.

Observa-se que 55,6% dos postes apresentaram penetração profunda/irregular, ou seja, o alburno da madeira sofreu penetração satisfatória em relação à profundidade, porém a distribuição do preservante não foi uniforme.

Na Figura 15, apresentam-se os dados obtidos para a retenção média de ingredientes ativos do preservante CCA-C por metro cúbico de madeira (kg/m^3) em postes de madeira de *Eucalyptus saligna* para cada tratamento realizado em autoclave industrial.

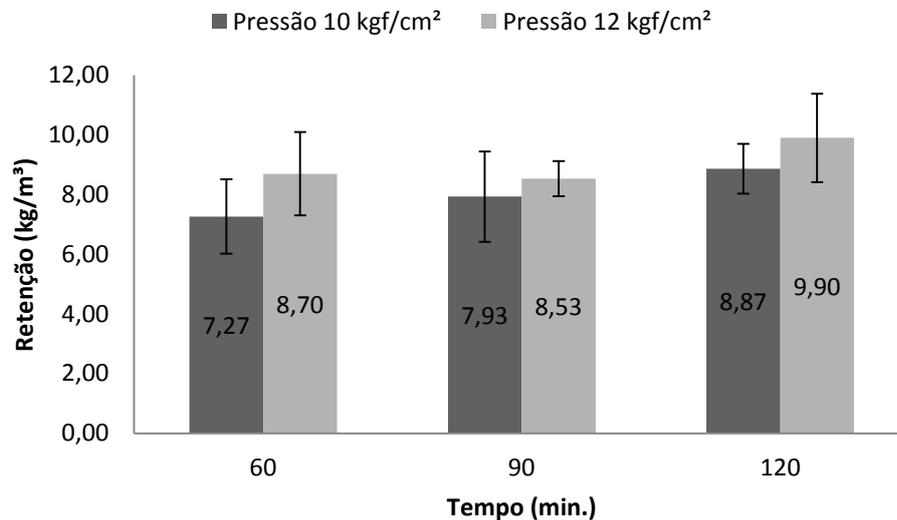


Figura 15 – Gráfico de retenção de CCA-C em postes de madeira de *Eucalyptus saligna*.
*Barras de erro indicam o desvio padrão.

A média de retenção de preservante na madeira de *Eucalyptus saligna* foi igual a 8,53 kg/m^3 com um coeficiente de variação de 15,56%. Observa-se que os níveis de retenção de ingredientes ativos do produto preservante aumentaram conforme o tempo e a pressão aplicada e os maiores valores de retenção média encontram-se quando aplicada maior pressão de trabalho na autoclave, ou seja, 12 kgf/cm^2 . De acordo com a norma NBR 8456 (ABNT, 1984), a retenção mínima para postes é de 9,6 kg/m^3 na madeira. Dessa forma, o único tratamento que obteve retenção média acima do recomendado foi o tratamento aplicado com 12 kgf/cm^2 de pressão e 120 minutos de pressão.

Os postes de madeira da espécie *Eucalyptus saligna* apresentaram teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Dessa forma, o controle estabelecido pela empresa foi satisfatório, visto que atenderam as exigências da norma NBR 8456 (ABNT, 1984), a qual estipula que a madeira dos postes a serem tratados deve estar com o teor de umidade abaixo do PSF.

A massa específica da madeira da espécie de *Eucalyptus saligna* foi em média 697 kg/m³. Ainda, a correlação não foi significativa entre a retenção de CCA-C e a massa específica, apresentando um coeficiente de correlação igual a 0,11.

Na Figura 16 apresentam-se os dados obtidos de proporções de retenção de CuO, CrO₃ e As₂O₅ em postes de madeira de *Eucalyptus saligna* para cada tratamento realizado em autoclave industrial.

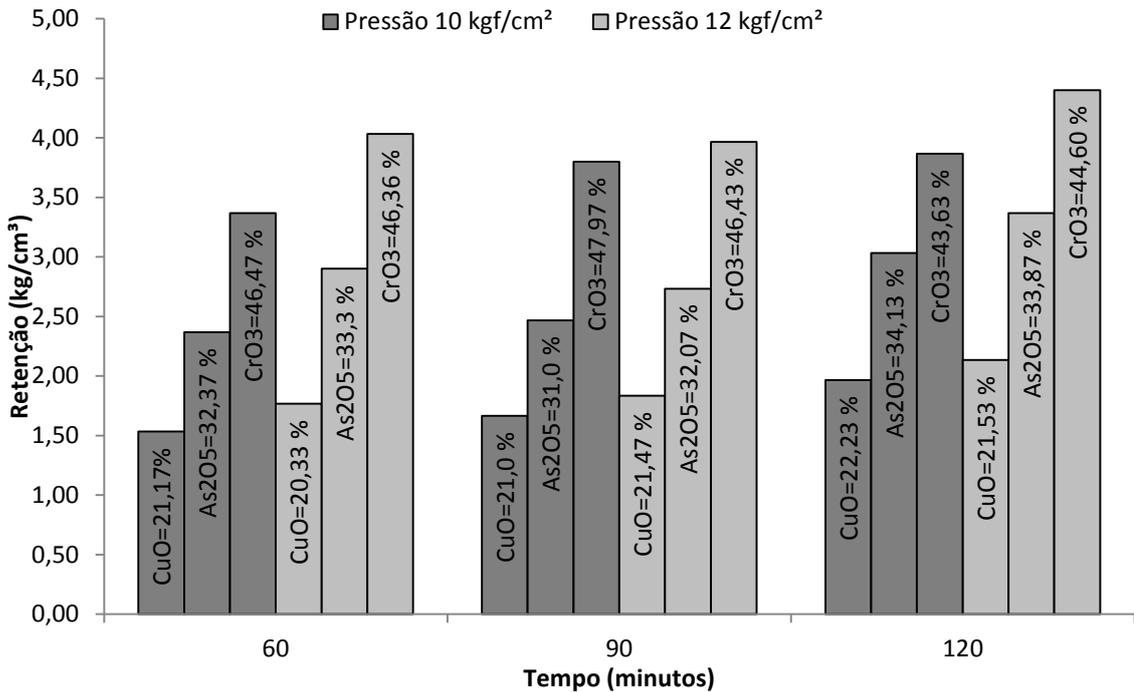


Figura 16 – Retenção de cada ingrediente ativo presente no CCA-C nos tratamentos preservativos em postes de *Eucalyptus saligna*.

De acordo com a Tabela 3 (ver item 3.2.2) a composição química da solução CCA-C apresenta 18,5 % de CuO, 47,5% de CrO₃ e 34,0% de As₂O₅. Dessa forma, observa-se que em todos os tratamento a porcentagem de CuO na madeira tratada é superior ao recomendado, colaborando para que a porcentagem dos demais óxidos (As₂O₅ e CrO₃) seja inferior ao recomendado.

Rak e Clarke (1975) enfatizam que o problema recorrente em usinas de tratamento de madeira que utilizam CCA como solução preservante, é o fato do desbalanceamento e formação de depósitos no tanque de trabalho decorrente da adição da solução recuperada no final do processo. Um procedimento adequado para a atenuação do desbalanceamento da

solução é a complementação de solução de CCA nova. Os autores ainda relatam que na saída da solução após o vácuo final, aumenta a proporção relativa de sais de cobre, com um pronunciado decréscimo dos sais de cromo, enquanto que a variação do arsênio é menos pronunciada. Dessa forma, no final de vários tratamentos a formulação do CCA pode ser bem diferente da inicial.

No presente estudo, os resultados encontrados corroboram com o apresentado pelos autores citados, pois o óxido de cobre (CuO) apresenta em maior concentração na madeira. Portanto, isso deve-se ao fato de que na usina de tratamento onde foram tratados os postes de *Eucalyptus saligna* a solução de CCA-C é aproveitada inúmeras vezes, sem a complementação de solução nova para que ocorra o balanceamento.

Pizzi et al. (1983) propõe medidas para evitar o desbalanceamento da solução do CCA, que são: evitar a extração da solução da madeira por vácuo após o período de pressão e dissolver as lamas com ácido ou hidróxido de amônio e usar esta solução em conjunto com o CCA para o tratamento.

Diante do resultado obtido na análise multifatorial de variância (Apêndices 4, 5, 6 e 7), apresentam-se na Tabela 10 as médias dos valores obtidos para a retenção de CCA-C para as diferentes pressões aplicadas e tempo de tratamento dos postes de madeira.

Tabela 10 – Valores médios de retenção para madeira de *Eucalyptus saligna*.

Fator		Retenção (kg/m ³)			
		CrO ₃	CuO	As ₂ O ₅	Total
Pressão (kgf/cm ²)	10	3,68 a	1,72 a	2,62 a	8,02 a
	12	4,13 a	1,91 a	3,00 a	9,04 a
Tempo (min.)	60	3,70 a	1,65 a	2,60 a	7,98 a
	90	3,88 a	1,75 ab	2,63 a	8,23 a
	120	4,13 a	2,05 b	3,20 a	9,38 a

Letras iguais na mesma coluna e para uma mesma espécie não diferem significativamente em nível de 95% de confiança ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Os valores médios para o óxido de cromo (CrO₃) apresentam-se em maior quantidade de retenção na madeira, seguidos do óxido de arsênio (As₂O₅) e óxido de cobre (CuO) respectivamente. De acordo com observado, nos tratamentos realizados nos postes de madeira de *Eucalyptus saligna*, a retenção do óxido de cobre (CuO) apresentou diferença significativa

em nível de 95% de confiança para os tempos de 60 e 120 minutos de pressão, sendo a única média que obteve diferença estatística.

5.2.2 Postes de madeira de *Eucalyptus cloeziana*

Na Figura 17 apresenta-se a classificação da penetração dos preservante CCA-C no alburno da madeira dos postes, na qual foi classificada em profunda/regular e profunda/irregular.

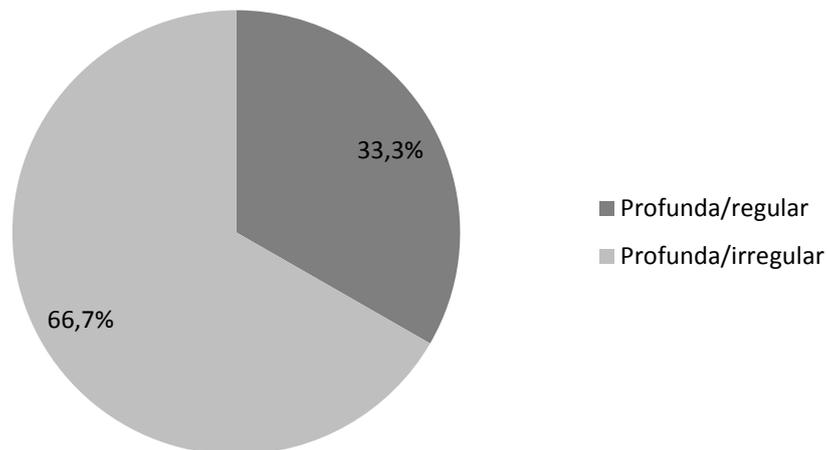


Figura 17 – Classificação da penetração do CCA-C em postes de *Eucalyptus cloeziana*.

A partir da Figura 17, observa-se que 66,7% dos postes apresentaram penetração profunda/irregular, ou seja, o alburno da madeira sofreu total penetração, porém a distribuição do preservante não foi uniforme.

A média de retenção de preservante na madeira de *Eucalyptus cloeziana* foi igual a 8,20 kg/m³ com um coeficiente de variação de 15,08%. Na Figura 18, apresentam-se os dados obtidos em cada tratamento a retenção média de ingredientes ativos do preservante CCA-C por metro cúbico de madeira (kg/m³) em postes de madeira de *Eucalyptus cloeziana* após serem tratados em autoclave industrial.

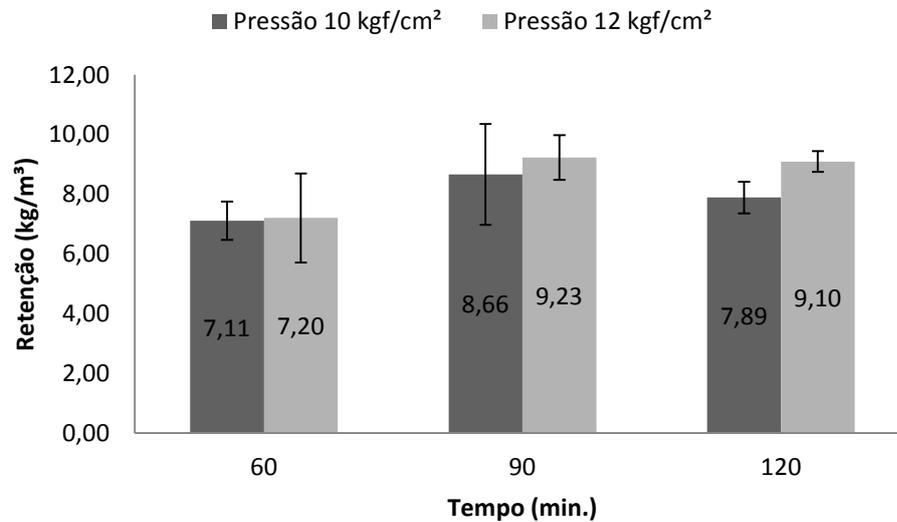


Figura 18 – Gráfico de retenção de CCA-C em postes de madeira de *Eucalyptus cloeziana*.
*Barras de erro indicam o desvio padrão.

A retenção média mínima exigida pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984) não foi atingida em nenhum dos tratamentos conforme a Figura 18. Porém observa-se que as retenções tendem a aumentar conforme o tempo de pressão aplicada, sendo que os maiores níveis de retenção encontram-se utilizando pressões iguais a 12 kgf/cm².

Os postes de madeira da espécie *Eucalyptus cloeziana* encontravam-se com o teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Dessa forma, o controle estabelecido pela empresa foi satisfatório, visto que atenderam as exigências da norma NBR 8456 (ABNT, 1984), a qual estipula que a madeira dos postes a serem tratados deve estar com o teor de umidade abaixo do PSF.

A massa específica da madeira da espécie de *Eucalyptus cloeziana* foi em média 869 kg/m³ e não foi encontrada correlação significativa com a retenção de ingredientes ativos de CCA-C ($r=-0,11$).

Na Figura 19 apresentam-se os dados obtidos de proporções de retenção de CuO, CrO₃ e As₂O₅ em postes de madeira de *Eucalyptus cloeziana* para cada tratamento realizado em autoclave industrial.

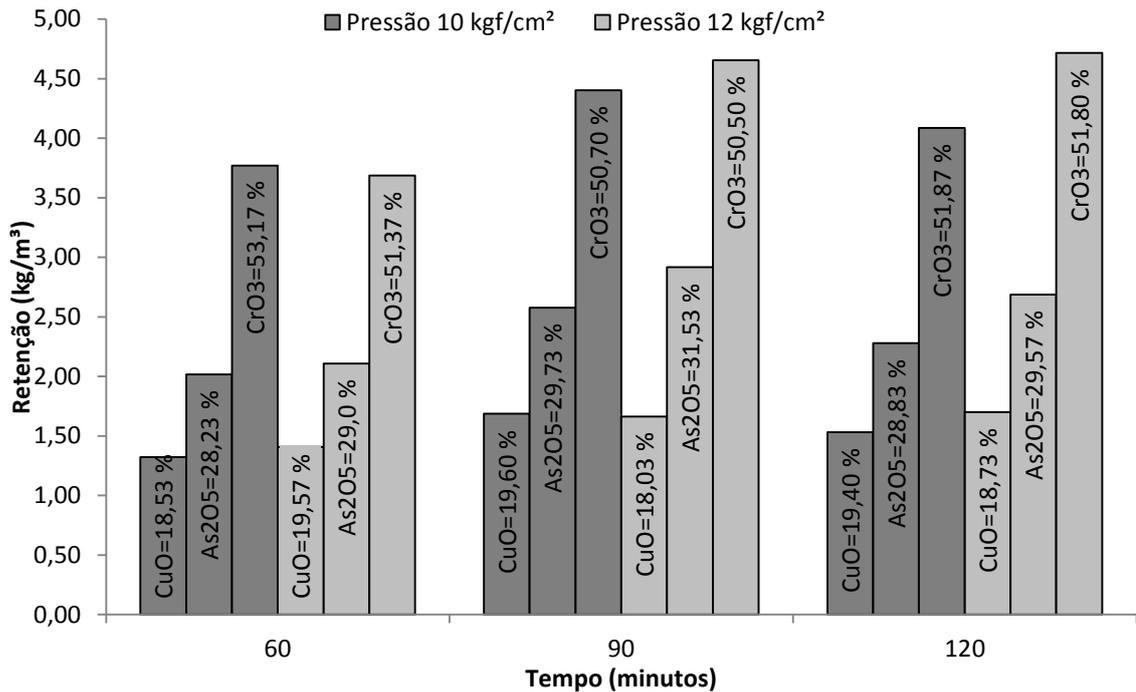


Figura 19 – Retenção de cada ingrediente ativo presente no CCA-C nos tratamentos preservativos em postes de *Eucalyptus cloeziana*.

De acordo com a Tabela 3 (ver item 3.2.2) a composição química da solução CCA-C apresenta 18,5 % de CuO, 47,5% de Cr₃O e 34,0% de As₂O₅. Observa-se que em todos os tratamentos a porcentagem de As₂O₅ na madeira tratada é inferior ao recomendado, ocorrendo o oposto para o Cr₃O que apresenta porcentagem superior. Já os valores para o CuO mostraram-se próximos ao recomendado, com pequenas elevações em alguns tratamentos (tempo de 60 min. e pressão de 12 kgf/cm²; tempo de 90 minutos e pressão de 10 kgf/cm²; tempo de 120 minutos e pressão de 10 kgf/cm²).

De acordo com Rak e Clarke (1975) quando ocorre desbalanceamento da solução na usina de tratamento decorrente da solução recuperada após o vácuo final, aumenta a proporção de cobre (CuO), com um pronunciado decréscimo dos sais de cromo, enquanto que a variação do arsênio é menor. Entretanto, no tratamento dos postes de *Eucalyptus cloeziana*, observa-se que o decréscimo ocorreu no arsênio (As₂O₅) e um aumento no cromo (Cr₃O). Dessa forma, nota-se um desbalanceamento na solução CCA-C, porém o resultado encontrado no presente estudo foi diferente do relatado por Rak e Clarke (1975).

Diante do resultado obtido na análise da MANOVA (Apêndices 8, 9, 10 e 11), apresentam-se na Tabela 11 as médias dos valores obtidos para a retenção de CCA-C para as diferentes pressões aplicadas e tempo de tratamento dos postes de madeira.

Tabela 11 – Valores médios de retenção para madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Fator		Retenção (kg/m ³)			
		CrO ₃	CuO	As ₂ O ₅	Total
Pressão (kgf/cm ²)	10	4,09 a	1,51 a	2,29 a	7,89 a
	12	4,35 a	1,59 a	2,57 a	8,51 a
Tempo (min.)	60	3,73 a	1,37 a	2,06 a	7,16 a
	90	4,40 ab	1,62 ab	2,48 ab	8,49 ab
	120	4,53 b	1,68 b	2,75 b	8,95 b

Letras iguais na mesma coluna e para uma mesma espécie não diferem significativamente em nível de 95% de confiança ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Os valores médios para o óxido de cromo (CrO₃) apresenta-se em maior quantidade de retenção na madeira, seguidos dos óxidos de arsênio (As₂O₅) e óxido de cobre (CuO), respectivamente. Diante disso, os valores encontrados estão de acordo com a formulação do preservante CCA-C, pois de acordo com a Tabela 3, o componente cromo apresenta maior porcentagem na formulação, seguidas do arsênio e cobre.

De acordo com observado, nos tratamentos realizados nos postes de madeira de *Eucalyptus cloeziana*, o tempo de tratamento foi o parâmetro do processo de tratamento que obteve maior influência nos valores da retenção de CCA-C na madeira. Os tempos de 60 e 120 minutos diferenciaram-se estatisticamente em nível de 95% de confiança para todas as retenções, tanto dos óxidos quanto a retenção total.

5.2.3 Análise dos resultados obtidos nos tratamento preservativos

A partir dos resultados encontrados nos tratamento dos postes de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*, observa-se que o teor de umidade antes de cada tratamento apresentou-se abaixo do ponto de saturação das fibras. Dessa forma, evidencia-se que o teor de umidade não contribuiu para a penetração irregular na maioria dos postes e para a retenção média abaixo do recomendado pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984).

O teor de umidade modifica a tratabilidade da madeira. O teor umidade acima do ponto de saturação das fibras diminui a fração de vazios da madeira, impedindo que se atinja a retenção desejada do preservativo na madeira. Porém, abaixo do ponto de saturação das fibras

diminui a permeabilidade da madeira a gases, sendo explicada pela redução do tamanho dos poros causada pelo inchamento das pontoações (LEPAGE, 1986).

Os resultados obtidos para a correlação entre massa específica e retenção do preservante CCA-C em ambas espécies mostraram-se que não houve significância, apresentando coeficiente de correlação de $r=0,11$ e $r=-0,11$, para *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*, respectivamente. Segundo Santini (1988), a massa específica e a penetração do preservante na madeira não apresenta nenhuma correlação, principalmente devido as diferença anatômicas que as espécies apresentam entre si.

De modo geral, os tratamentos que utilizaram pressão de 12 kgf/cm² apresentaram valores de retenção média de CCA-C superiores aos tratamentos com pressão de 10 kgf/cm². De acordo com Hunt e Garratt (1962) o aumento da pressão durante o tratamento provoca alterações nos níveis de retenção e penetração da madeira.

Evangelista (2011) comenta que até a primeira década de 2000, as empresas do setor de preservação da madeira que utilizam processos de vácuo-pressão, realizam os processos de tratamento utilizando pressões entre 12 kgf/cm² e 14 kgf/cm². Já na Austrália as indústrias do setor utilizam pressões na ordem de 70 kgf/cm², sendo muito superior a utilizada no Brasil.

Lebow et al. (2010) aplicando três diferentes pressões (12,3; 14,0 e 15,8 kgf/cm²) para impregnação de um preservante a base de etalonamina e cobre em madeira de *Pinus resinosa*, relatam que o acréscimo de pressão provocou aumento na penetração e retenção do preservante na madeira.

O aumento do tempo de aplicação de pressão durante os tratamentos provocou uma tendência de acréscimo da retenção média de CCA-C na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*. Observa-se que as maiores diferenças foram entre os tempos de 60 e 120 minutos. Entretanto, somente o tratamento nos postes de *Eucalyptus saligna* que utilizou pressão de 12 kgf/cm² e 120 minutos de pressão apresentou retenção média superior ao recomendado pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984). Já para os postes de *Eucalyptus cloeziana*, nenhum tratamento apresentou retenção média acima de 9,6 kg/m³.

Segundo Santini (1988), conforme o aumento do tempo de aplicação de pressão, penetrações mais profundas e maiores retenções são obtidos. Porém, mesmo que esse parâmetro não afete as propriedades da madeira durante o tratamento, os tratamentos que utilizam maiores tempos não são desejáveis sob o ponto de vista econômico, pois aumento o custo operacional.

Lima (2012), avaliando o tratamento industrial de preservação de mourões de 9 espécies de *Eucalyptus* utilizando a solução CCA-C com concentração de 2% e aplicando 3

diferentes tempos de tratamento (30, 60 e 120 minutos), observou que o aumento do tempo de tratamento provocou acréscimo na retenção do CCA-C. Desse modo, o autor relata que os níveis de retenção mais baixos foram encontrados para o tempo de 30 minutos, e contra indica o tratamentos de mourões de *Eucalyptus* realizado com esse tempo.

Evangelista (2011), tratando mourões de 4 espécies de *Eucalyptus* utilizando a solução CCA-C com 3 concentrações diferentes (1,5; 2,0 e 2,5%) e aplicando 3 diferentes tempos de tratamento (60, 90 e 120 minutos) evidencia que a retenção da solução preservante aumenta com o tempo de tratamento. O mesmo autor relata que com concentração de 2,5%, o acréscimo da retenção foi mais expressivo conforme o aumento do tempo, apresentando retenções de 8,55, 8,94 e 9,26 kg/m³ respectivamente para os tempos de 60, 90 e 120 minutos. Ainda, as madeira de *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus urophylla*, quando tratadas com tempo de 120 minutos e concentração de 2,5% apresentaram retenções médias de 9,70 e 9,93 kg/m³ respectivamente.

Analisando-se as retenções de cada ingrediente ativo do CCA-C nos tratamentos realizados nos postes de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*, observa-se que há desbalanceamento da solução preservante, ocorrendo retenções dos ingredientes ativos individualmente inadequadas, não atendendo as recomendações da norma NBR 8456 (ABNT, 1984).

A qualidade do tratamento preservativo pode ser afetada pela quantidade de material particulado e extrativos da madeira. Como a madeira apresenta uma estrutura porosa, ela funciona como filtro, e os materiais particulados presentes na solução podem obstruir a passagem através da estrutura anatômica da madeira. Devido a reutilização intensiva da solução preservante, ocorrem problemas como: aumento da concentração de material particulado na solução, diminuindo a penetração; provocar desbalanceamento da solução e precipitação dos elementos químicos devido a presença de material particulado e extrativos (NICHOLAS e SIAU, 1973).

De acordo com Willians et al. (1991) na madeira, o cromo tem como função fixar o cobre e arsênio, evitando assim a lixiviação. Já o cobre tem ação fungicida, que por meio de precipitação de proteínas causa interferência no metabolismo dos fungos, provocando reações enzimáticas. Por sua vez, o arsênio tem ação inseticida, apresentando alta toxidez a fungos e insetos.

Portanto, se a retenção de As₂O₅ for inferior ao recomendado, os postes de madeira ficaram mais suscetíveis ao ataque de fungos e insetos. Da mesma forma ocorre se a retenção de CuO for deficiente, ou seja, a madeira dos postes não apresentaram resistência aos fungos.

A fim de avaliar a qualidade do processo de tratamento dos postes, foram confeccionados gráficos de comparação entre a retenção em cada poste e o mínimo exigido pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984) (Figura 20).

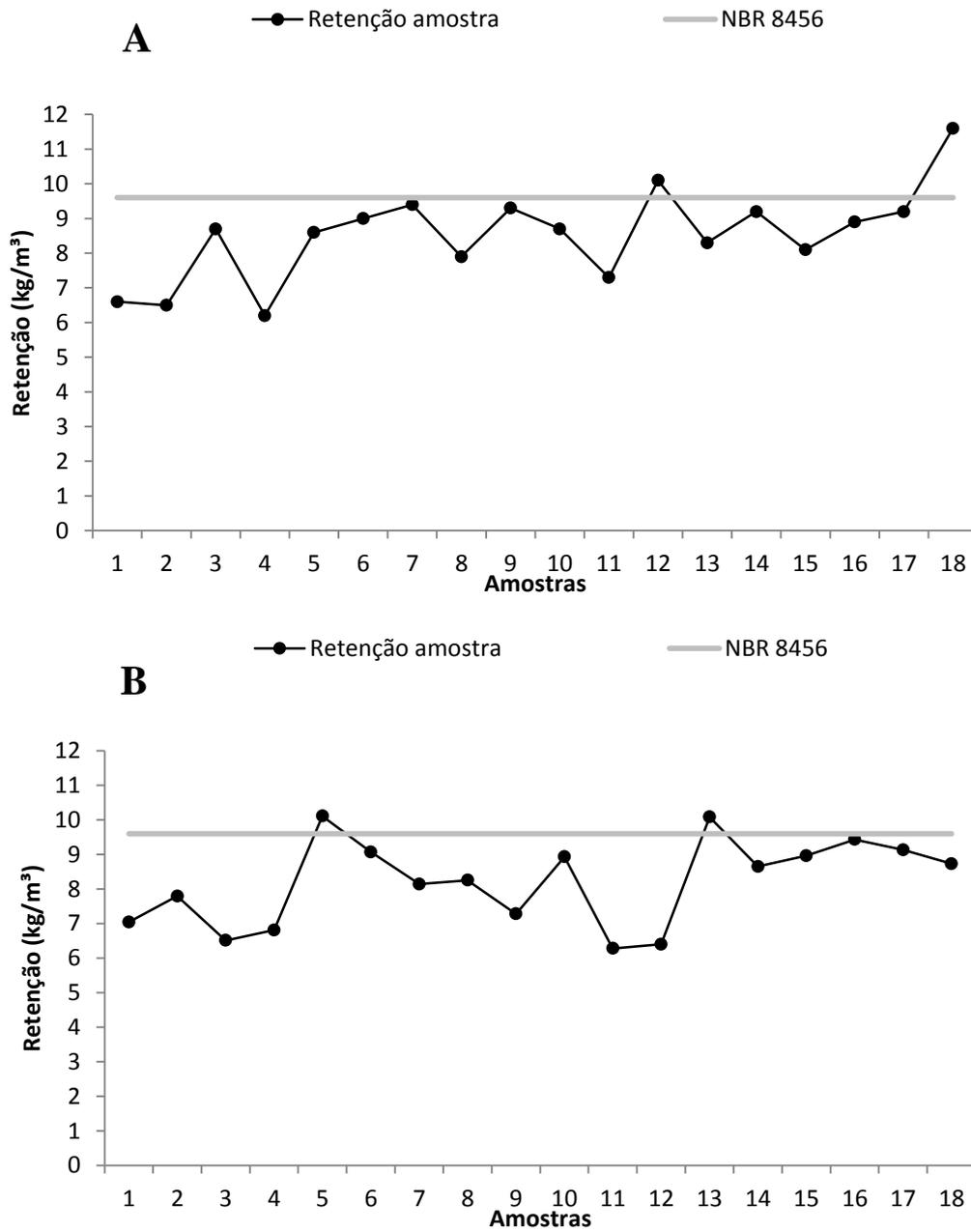


Figura 20 – Gráficos de qualidade do processo de tratamento dos postes de madeira; (A) *Eucalyptus saligna*; (B) *Eucalyptus cloeziana*.

De maneira geral, o tratamento dos postes de madeira não foi satisfatório para os níveis de retenção recomendados pela NBR 8456 (ABNT, 1984), pois a maioria dos postes analisados (88,9%), para ambas as espécies de *Eucalyptus*, não apresentou a retenção mínima de 9,6 kg/m³ de CCA-C na madeira.

Ao observar os gráficos, constatou-se que apenas quatro postes de madeira atingiram a retenção mínima exigida pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984), especificamente dois postes da espécie *Eucalyptus saligna* e dois de *Eucalyptus cloeziana*.

Nos postes de madeira de *Eucalyptus saligna*, os dois que apresentaram retenção acima do mínimo exigido foram tratados com pressão de 12 kgf/cm², porém com tempo de aplicação de pressão diferente, um com 60 minutos e outro com 120 minutos. Já para os níveis de retenção nos postes de *Eucalyptus cloeziana*, os dois que apresentaram retenção acima do mínimo exigido foram tratados com o tempo de 90 minutos de aplicação de pressão, porém com pressão diferente, ou seja, um tratado com pressão igual a 10 kgf/cm² e outro 12 kgf/cm². Dessa forma, evidencia-se que o processo de tratamento de postes de madeira deve receber maior controle, no que diz respeito a retenção do produto preservante.

Outro aspecto observado, é que os parâmetros do tratamento como tempo de pressão e pressão durante o processo de tratamento dos postes devem ser apropriados. Quando aplicada a pressão de 12 kgf/cm², obtiveram-se os melhores resultados para os níveis de retenção média do CCA-C. Para isso a pressão deve ser aplicada por no mínimo 90 minutos, para as ambas as espécies analisadas (Figuras 15 e 18).

Moreno et al. (2008) realizaram a impregnação de CCA utilizando tratamento industrial em peças de *Pinus taeda* e verificaram que quanto maior a pressão e o tempo de pressão aplicada, maiores os níveis de retenção do preservante na madeira. Os autores relataram que utilizando uma pressão de 6 kgf/cm² e tempo de 20 minutos, a retenção média foi de 5,5 kg/m³, enquanto que aplicando uma pressão de 10 kgf/cm² durante 60 minutos, a retenção média foi de 8,5 kg/m³.

Valle (2009) tratou em autoclave madeira de clone híbridos de *Eucalyptus urophylla* com CCA-C, sendo que o processo de tratamento foi realizado com 30 minutos de vácuo inicial, 90 minutos de pressão aplicando 12 kgf/cm² de pressão e 15 minutos de vácuo final. De acordo com o autor a retenção média encontrada variou de 8,22 kg/m³ e 8,98 kg/cm².

Segundo Salles et al. (2004) a retenção dos ingredientes ativos do CCA-C tendem a diminuir conforme a profundidade no alburno. Os autores mencionaram que em postes de eucaliptos novos, com uma profundidade de 1 cm. a madeira apresentou retenção média igual a 8,40 kg/m³ e a profundidade de 3 cm. a retenção foi igual a 1,96. Ainda assim, comparando-

se a retenção de postes novos e instalados, os postes já em serviço apresentaram lixiviação dos sais que constituem o preservante hidrossolúvel.

Uma vez que o nível de retenção de CCA-C não está de acordo com o recomendado, aumenta a suscetibilidade dos postes de madeira à degradação biológica, diminuindo a vida útil das peças tratadas. Com isso, aumentam os custos de manutenção e/ou substituição de postes, e ainda coloca-se em risco a estrutura das redes de distribuição elétrica.

A norma NBR 8456 (ABNT, 1984) exige que a vida útil de postes tratados seja no mínimo 15 anos, contada a partir do tratamento com substância preservativa. Além disso, as unidades do lote tratado devem seguir os seguintes critérios: admite-se, no decorrer dos primeiros cinco anos uma falha de 1% dos postes; do 6º ao 10º ano, admite-se 1% de falhas para cada período de 1 ano, acumulando-se, no máximo, 6% das falhas permitidas no fim do 10º ano; do 11º ao 15º ano, admite-se 2% de falhas para cada período de 1 ano, acumulando-se, no máximo 16% de falhas permitidas no fim do período de 15 anos.

Kumode (2008) analisando as causas da deterioração precoce dos postes de madeira tratada na Ilha do Mel no estado do Paraná, concluiu que um dos fatores que influencia a degradação das peças por agentes xilófagos é a baixa retenção total ou dos elementos constituinte do CCA, sendo que o ataque de fungos e insetos é inversamente proporcional ao nível de retenção de CCA. Também o autor mencionou que os postes de madeira estão sofrendo degradação prematura, uma vez que deveriam permanecer em serviço por no mínimo 25 anos.

5.3 Análise química das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*

5.3.1 Teores de extrativos, lignina Klason e holocelulose

Na Tabela 12 apresentam-se os valores de teores de extrativos, lignina Klason e holocelulose da madeira de alburno das espécies de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*.

Tabela 12 – Valores dos teores de extrativos, lignina Klason e holocelulose das madeiras não tratadas de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*.

Espécie	Extrativos (%)	Lignina Klason (%)	Holocelulose (%)
<i>Eucalyptus saligna</i>	1,16	29,62	69,22
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	1,01	27,29	71,70

Observa-se que os valores médios do teor de extrativos e lignina para a madeira de *Eucalyptus saligna* foram superiores aos da espécie *Eucalyptus cloeziana*, ocorrendo o inverso para os dados de holocelulose.

Para a madeira de *Eucalyptus saligna*, os teores de lignina Klason foram levemente superiores aos encontrados na literatura (GUARIENTI et al., 2000; ARAUJO, 2004; PEREIRA et al., 2000). Já os valores para o teor de extrativos foram inferiores ao encontrado por Guarenti et al. (2000) e Araujo (2004) que obtiveram 1,41% e 1,45% respectivamente, porém os autores não mencionaram se as amostras correspondem ao cerne ou alburno.

O resultado encontrado para o teor de lignina na madeira de *Eucalyptus cloeziana* foram semelhantes ao encontrado por Pereira et al. (2000) que verificou 27,6%. Já o valor para o teor de extrativos foi inferior ao encontrado por Guerra (2010), que avaliando a influencia do teor de extrativos em cinco espécies verificou 2,16% de teor de extrativo no alburno na madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

A qualidade da penetração e retenção das soluções hidrossolúveis na madeira sofre influencia do teor de extrativos. Segundo Lepage (1986), a penetração das soluções preservantes é permitida somente no alburno da maioria das espécies, pois o cerne tem como característica a deposição de extrativos, tornando-o impermeável. Já a retenção de CCA-C apresenta variações na sua fixação, atribuídas principalmente a diferentes quantidades de extrativos nas espécies (GUO et al., 2002).

Os teores de holocelulose foram inversamente proporcionais aos teores de extrativos e lignina para ambas as espécies, pois o teor desse componente foi calculado por diferença, ou seja, quanto maior o teor de extrativo e lignina, menor o teor de holocelulose.

5.3.2 Espectroscopia no infravermelho (ATR-IR)

Na Figura 21 apresentam-se os espectros obtidos na análise de espectroscopia no infravermelho para a madeira oriunda dos postes das espécies de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* não tratados e submetidos ao tratamento em autoclave para a impregnação do produto preservante CCA-C. Foram selecionadas ao acaso amostras de madeira sem nenhum tratamento e uma amostra de cada espécie de *Eucalyptus* tratado com CCA-C que apresentou maior retenção do preservante. Para a espécie *Eucalyptus saligna* foi selecionado o poste que tinha retenção igual a 11,60 kg/m³. Já para a espécie *Eucalyptus cloeziana*, o poste selecionado tinha retenção de 10,11 kg/m³.

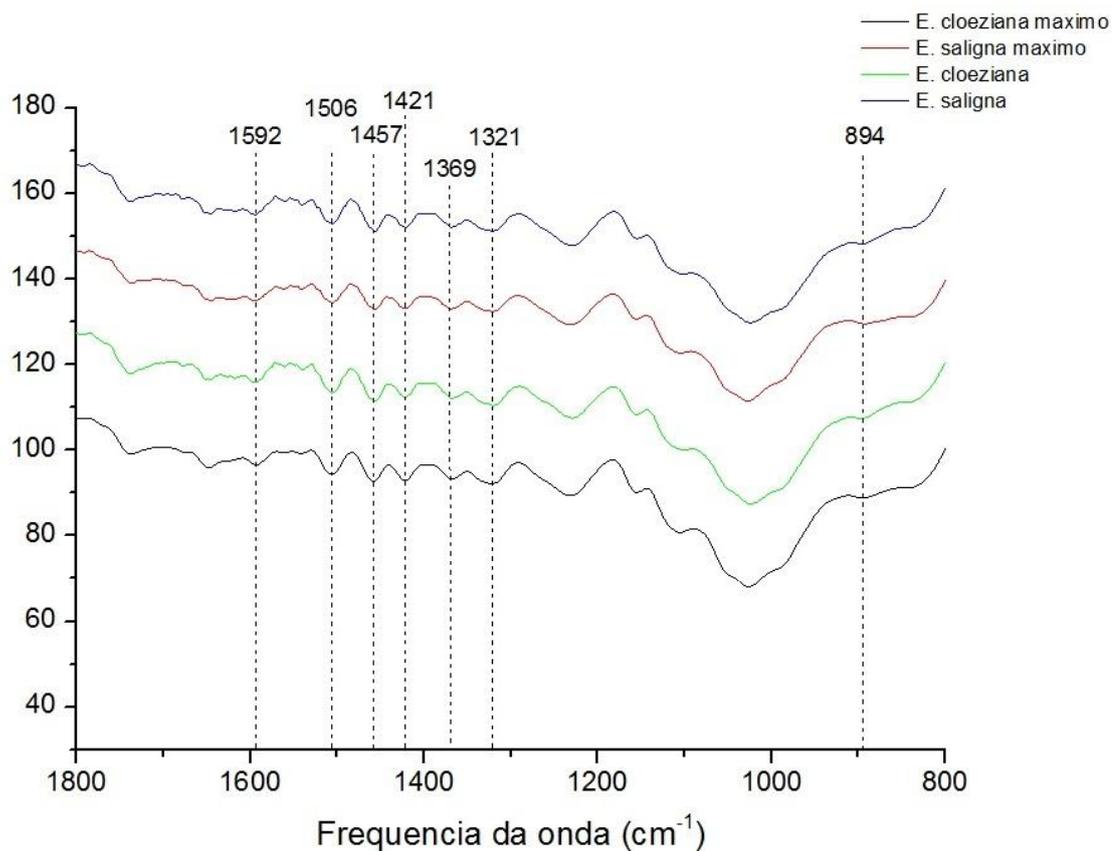


Figura 21 – Espectros ATR-IR da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* não tratada e tratada com CCA-C.

Selecionaram-se bandas atribuídas principalmente a grupos funcionais presentes na lignina e na celulose, pois a solução hidrossolúvel CCA-C estabelece reações químicas com esses componentes da madeira. A maioria do cobre associa-se a lignina (80 a 90%) e também a celulose, provavelmente com ligações aos grupos OH. Já o cromo, na forma hexavalente, forma complexos com a lignina e o arsênio forma complexos solúveis com a lignina e a celulose (LEPAGE, 1986; DOBBS E GRANT, 1978; HATCHER, 1981).

A partir da análise das bandas atribuídas a esses componentes da madeira situadas no espectro entre 1800 e 800 cm^{-1} que correspondem a identidade da madeira (fingerprint), observa-se que a impregnação do produto preservante CCA-C não promoveu alterações significativas nas intensidades das bandas características.

As bandas 1592, 1506 e 1457 são atribuídas a grupos presentes na lignina, que por sua vez não apresentaram variações na intensidade. Já as bandas 1421, 1369, 1321 e 894 são atribuídas a grupos presentes principalmente na celulose, e também não apresentaram variações na intensidade.

Dessa maneira, pode-se afirmar que nesse estudo, a solução hidrossolúvel CCA-C não alterou os grupos funcionais relacionados aos componentes químicos básicos da madeira de maneira qualitativa para ambas as espécies analisadas.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados para os testes de flexão engastada, as médias dos valores do módulo de elasticidade e resistência máxima não foram satisfatórias, ficando abaixo do recomendado pela norma NBR 8456 (ABNT, 1984).

Os resultados para os testes não destrutivos utilizando propagação de ondas de ultrassom mostraram que as metodologias adotadas no presente estudo não foram capazes de estimar os valores para as propriedades mecânicas dos postes, apresentando coeficientes de correlações não significativos entre os testes não destrutivos e destrutivos de flexão engastada de acordo com a norma NBR 6231 (ABNT, 1980);

A técnica de propagação de ondas de ultrassom aplicada aos corpos de prova de acordo com ASTM D143-94 mostrou-se um bom estimador das propriedades mecânicas da madeira, apresentado um coeficiente de determinação significativo entre os testes não destrutivos e destrutivos de acordo com a norma ASTM D143-94;

Para os tratamentos preservativos em autoclave industrial realizado nos postes de madeira demonstraram que:

A penetração do CCA-C nos postes de madeira da espécie *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* foram satisfatórios, atingindo a profundidade desejada em todo alburno da madeira, porém na maioria dos postes a distribuição foi irregular;

Os níveis de retenção do CCA-C nos postes de madeira da espécie *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* foram insatisfatórios, apresentando na maioria dos postes analisados retenção abaixo de 9,6 kg/m³, a qual é recomendada pela norma NBR 8456 (ABNT, 1894);

A pressão de 12 kgf/cm² apresentou os maiores níveis de retenção do preservante hidrossolúvel para as duas espécies. Já o tempo de aplicação de pressão durante o tratamento, nos postes de *Eucalyptus saligna* esse fator não mostrou diferenças significativas nos valores de retenção. Enquanto que no postes de *Eucalyptus cloeziana* observou-se diferenças significativas na retenção de CCA-C para os tempos entre 60 e 120 minutos.

A partir das análises químicas quantitativas e qualitativas realizadas na madeira de alburno dos postes das espécies de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*, concluiu-se que:

Os teores de extrativos, lignina e holocelulose, corroboraram ao encontrado na literatura consultada;

As análises qualitativas de espectroscopia no infravermelho da madeira não tratada e tratada dos postes de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* que os tratamentos realizados com CCA-C não surtiram efeito quanto a modificação da estrutura química do material. Sendo assim, a técnica de espectroscopia no infravermelho não foi eficiente para verificar a impregnação da solução preservativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8456**: Postes de Eucalipto Preservado para Redes de Distribuição: ABNT. Rio de Janeiro, 1984. 28p.

_____. **NBR 6231**: Postes de Madeira – Resistência à Flexão: ABNT. Rio de Janeiro, 1980. 4p.

ABRUZZI, R. C. **Avaliação de postes de *Eucalyptus* retirados da rede elétrica por microscopia eletrônica de varredura e ensaios de flexão**. 2012. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ALENCASTRO, J.; PIRES, M.; DEDAVID, B. Ensaio de Flexão e Compressão Paralelo as Fibras em Postes de Eucaliptos. In.: Mostra de Pesquisa da Pós-Graduação, 4., 2009, Porto Alegre: PUCRS. **Anais...** Porto Alegre, 2009.

ARAÚJO, R. H. **Celulose kraft produzida a partir das madeiras de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e eucalipto (*Eucalyptus saligna*) misturadas em diferentes proporções**. 2004. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

ARRUDA, R. P.; DEDAVID, B. A.; PIRES M.; VIDOR, F. L. R.; Estudo sobre a caracterização de postes de madeira utilizados em linhas de transmissão de energia através de ensaios de flexão e compressão. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143 - 94**: Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, 2000. 31p.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 19-28, jan./abr. 2005.

BUCUR, V. Acoustics of Wood. USA: CRC Press, 1995. 284 p.

BUCUR, V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Nova York: Springer-Verlag, 2003.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira.** 2006. 92f. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2006.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.

CAVALCANTE, M. S. Deterioração biológica e preservação de madeira. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1982.

DOBBS, A. J.; GRANT, C. The volatilization of arsenic on burning copper-chrome-arsenic (CCA) treated wood. **Holzforschung**. v. 32, n. 1, p. 32-35, 1978.

ERIKSON, R. G., GORMAN, T. M.; GREEN, D. W. GRAHAM, D. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 78, p. 59-65, 2000.

ESTEVES, B. M. A Indústria de Preservação em Portugal. **Revista Millenium**, n. 36, 2009

EVANGELISTA, W. V. **Penetração e retenção de arseniato de cobre cromatado em madeira de eucalipto.** 2011. 126f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

FOELKEL, C. Postes de Madeira de Eucaliptos. **Eucalyptus Newsletter**, Ed. 22, 2009.

FRANÇA, M. C.; CUNHA, A. B. Determinação da relação resistência / rigidez e teor de umidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. In.: Congresso Florestal Paranaense, 4., 2012, Curitiba, **Anais...** Curitiba, 2012.

GALVÃO, A. P. M.; BARBIN, D.; CARVALHO, C. M. Contribuição ao estudo da eficiência dos processos de difusão simples e dupla no tratamento de moirões de eucalipto, através de análise química. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 6, n. único, p. 301-324, 1967.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. **Processos práticos para preservar madeira.** Colombo: Embrapa Florestas, CNPF, (Embrapa Florestas. Documentos, 96). 49 pp. 2004.

GERALDO, F. C. **A madeira de eucalipto para postes.** São Paulo: ABPM, 2001.

GONCALEZ, J. C.; VALLE, A. T. DO; COSTA, A. F. da. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001.

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

GUARENTI, A.; et al. Amostragem de madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* para determinação de lignina klason e extrativos totais. In.: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL. 2000. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2000.

GUO, A.; COOPER, P. A.; UNG, Y. T.; RUDDICK, J. N. R. Comparison of fixation rates of earlywood, latewood, sapwood, and heartwood of CCA-treated douglas-fir, southern pine, and eastern larch. **Forest Products Journal**, v. 52, p. 77-80, 2002.

HARTFORD, W. H. et al. **The effect of composition on the effectiveness of CCA preservatives. II.** Update from 1978 and application of both performance index and log-probability statistics to recent data. Repr. Proceedings of American Wood Preservers Association, Bethesda, 1980. 13p.

HASELEIN, C. R.; BERGER, R.; GOULART, M.; STHAL, J.; TREVISAN, R.; SANTINI, E.J.; LOPES, C.L. Propriedades de flexão estática da madeira úmida e a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* smith sob o efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 147-152, 2002.

HATCHER, D. B. **Dura-treet I:** a water dispersible pentachlorophenol. Proceeding of American wood preservers association, Bethesda, 1980. 13p.

HERRERA, S.; GONÇALVES, R.; MANHÃES, L. R.; Nova tecnologia para inspeção de postes. In. CONGRESO LATINOAMERICANO DE DISTRIBUICION ELECTRICA. 2008, Argentina. **Anais...**, 2008.

HUNT, G. M.; GARRATT, G. A. **Preservacion de la Madera.** Tradução por Aderlardo Sanchis Batalla. Barcelona: Salvat Editores, 1962. 486 p.

IBACH, R. E. Wood preservation. In: **Forest Products Laboratory, Wood handbook:** wood as engineering material. Report FPL-GTR-113. Madison, 1999, Cap. 14-1/14-27.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology: solid wood**. Berlin: Spring-Verlag; 1968. 592 p.

KUMODE, M. M. N. **Análise das causas da deterioração precoce dos postes de madeira tratada na Ilha do Mel**. 2008. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LEBOW, P.; LEBOW, S. NELSON, W. Effect of treatment pressure on treatment quality and bedding properties of red pine lumber. **Forest Products Journal**, v. 60, n. 5, p. 447-520, 2010.

LEPAGE, E. S. et al. Manual de Preservação de Madeiras: Vol. I e II. São Paulo, IPT – Divisão de Madeiras, 1986.

LIMA, F. C. C. **Avaliação de nove espécies de *Eucalyptus spp.* em tratamento preservativo industrial**. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu, 2012.

LOBÃO, M. S.; LÚCIA, R. M. D.; MOREIRA, S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

MENDES, A. S.; ALVES, M. S. **A degradação da madeira e sua preservação**. Brasília, IBDF/DPq-LPF, 1988.

MINÁ, A. J. S. et al. Comentários sobre a NBR 6231/1980 – postes de madeira – resistência à flexão. In.: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10. 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro, 2006.

MINÁ, A. J. S.; et al. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 188-196, 2004.

MORENO, G. et al. Impregnación de la madera de orígenes de *Pinus taeda* implantados en la localidad de Famaillá, Provincia de Tucumán. **Revista de Ciencias Forestales**. n. 15, p. 42-46. 2008.

NESVIJSKI, E. G. Dry point contact transducers: design for new applications. **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 9, n. 9, 2003.

NICHOLAS, D. D.; SIAU, J. F. Factors influencing the treatability of wood. In: NICHOLAS, D. D. **Wood deterioration and its prevention by preservative treatments**. Syracuse: Syracuse University Press, 1973. 2v., cap. 4, p. 299-343.

NOGUEIRA, M. **Determinação de módulos de elasticidade à compressão da madeira de *Pinus taeda* l. com o uso de ultra-som**. 2003. 165f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu, 2003.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica - Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. São Paulo, Editora Blucher, vol. 2, 4ª edição revisada, 2002. 314p.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Ultrasonic measurements in Brazilian hardwood. **Materials Research**, v. 5, n. 1, p. 51-55, 2002.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. Textbook of wood technology. 3. ed., New York: Mcgraw-Hill, 1970. v. 1. 705 p.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PIZZI, A. et al. Experimental variations in the distribution of CCA preservative in lignin and holocelulose as a function of treating conditions (temperature, concentration, pH, species and time). Stockholm, The International Research Group on Wood Preservation, Working Group III: **Preservatives and Methods of Treatment**, 1984.

PIZZI, A. Pratical consequences of the clarification of the chemical mechanism of CCA fixation to wood. Stockholm, The International Research Group on Wood Preservation, Working Group III: **Preservatives and Methods of Treatment**, 1983. 16p.

PLACKETT, D. V. A discussion of current theories concerning CCA fixation. Stockholm, The International Research Group on Wood Preservation, Working Group III: **Preservatives and Methods of Treatment**, 1983. 14p.

RAK, J. R.; CLARKE, M. R. Stability and precipitacion of CCA formulations at various temperatures. Part I. Investigation under model conitions using D-Glucose as reducing agent. **Forest Products Journal**, v.25, n.8, p.42-48, 1975.

REMADE. A madeira de eucalipto para postes. **Revista da Madeira**. n. 75. (2003).

RICHARDSON, B. A. Wood preservation. Lancaster: The Construction Press, 1978. 238p.

ROCHA, M. P. **Biodegradação e Preservação da Madeira**. Curitiba: FUPEF, 2001. 92p.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, v. 48, n. 1, p. 14-19, 1998.

SALES, A., PORTELLA, K. F.; GRIGOL, E. J.; RECH, P. Procedimentos para o aumento da durabilidade de postes de madeira utilizados em redes de distribuição. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DA ANEEL, 2., 2003, Brasília. **Anais...** Brasília, 2003. p. 567-9.

SALES, A., PORTELLA, K. F.; GRIGOL, E. J.; RECH, P.; OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A. O. Durabilidade de postes de madeira utilizados em redes distribuição de energia elétrica. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, 2002.

SALES, A.; GRIGOL, E. J.; BENTO, F. R.; PORTELLA, K. F.; MASCARO, L. H. Estudo da durabilidade de postes de eucalipto tratados com CCA utilizados no sul do Brasil. In: CONGRESSO ÍBERO – A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, 1., Guimarães, 2004. **Anais...** Guimarães: Universidade do Minho, 2004. p. 287-92.

SANTINI, E. J. **Biodegração e preservação da madeira**. Santa Maria: UFSM, 1988. 125p.

SGAI, R. D. **Fatores que afetam o tratamento para preservação de madeiras**. 2000. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UNICAMP Faculdade de engenharia civil, Campinas, 2000.

Siau, J. F. **Transport Processes in Wood**. New York: Springer-Verlag, 1984.

SIMPSON, W. T; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during klin-drying. **Forest Products Journal**, v. 51, n. 10, p. 51-54, 2001.

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. **Wood Science and Technology**, v. 7, p. 60-76, 1973.

STANGERLIN, D. M.; GONÇALEZ, J. C.; SANTINI, E. J.; GONÇALEZ, R.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; GATTO, D. A. Avaliação de tipos de ondas geradas por dois modelos de transdutores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico. **Floresta**, v. 40, n. 4, p. 1-5, 2010.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, L. J.; DOMINGUES, J. M. X.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 2, p.145-150, jun. 2008.

TAPPI. **TEST METHOD T204 cm-97**: Solvent extractives of wood and pulp: Tappi Test Methods: Tappi Press. Atlanta, 1997. 4p.

_____. **TEST METHOD T222 om-98**: Acid-insoluble lignin in wood and pulp: Tappi Test Methods: Tappi Press. Atlanta, 1998. 5p.

VALLE, M. L. A. **Propriedades da madeira de eucalipto de primeira e segunda rotação, visando a sua utilização como madeira preservada**. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

WILKINSON, J. G. Industrial timber preservation, London: Rentokil 1979. 532 p.

WILLIAMS, G. R.; CORNFIELD, J. A.; ANDERSON, D. G. Waterbased fixed preservatives. In: THOMPSON, R. (Ed.) **The chemistry of wood preservation**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1991. 323 p.

WILLIAMS, G. R.; CORNFIELD, J. A.; ANDERSON, D. G. Waterbased fixed preservatives. In: THOMPSON, R. (Ed.) **The chemistry of wood preservation**, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1991. p. 323.

ZHANG, S. Y. Wood specific gravity mechanical property relationship at species level. **Wood Science and Technology**, v. 31, n. 3, p. 181-191, Jun 1997.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Dados obtidos nos testes de flexão engastado livre nos postes de madeira seguindo a norma NBR 6231 (ABNT, 1980).

N °	H (cm)	Hu (cm)	C (cm)	c (cm)	P (kgf)	Δx (cm)	ME (kg/m ³)	TU (%)	σF (kgf/cm ²)	MOE (kgf/cm ²)	ER min (kgf/cm ²)	ER Max (kgf/cm ²)	ER med (kgf/cm ²)	EL min (kgf/cm ²)	EL max (kgf/cm ²)	EL min (kgf/cm ²)
1	1200	1020	79,0	53,0	900	240	0,58	33,11	571	114621	92513	115964	101478	126156	641690	303080
2	1200	1020	90,4	63,2	1160	170	0,52	36,80	491	114554	96852	108315	101739	96802	522026	314878
3	1200	1020	87,0	61,4	1160	180	0,60	35,65	551	79370	63152	128858	111221	122126	633988	410867
4	1200	1020	78,6	52,6	860	180	0,59	36,53	554	125641	97651	116729	103670	448223	626200	509969
5	1200	1020	92,8	65,4	1320	180	0,57	35,29	516	114612	104624	123773	108819	233021	322857	284334
6	1200	1020	93,6	66,2	1240	180	0,54	37,63	473	74879	99520	128880	117915	114139	570300	402394
7	1200	1020	99,0	70,4	1700	210	0,58	38,09	548	78299	105352	145392	129768	201211	480389	305057
8	1200	1020	81,4	55,4	1200	210	0,63	34,17	696	107399	96216	120643	108361	320845	716098	497982
9	1200	1020	80,0	54,8	1300	220	0,64	31,48	794	144876	101641	161342	115516	332788	698050	521799
1 0	1200	1020	83,2	57,4	960	190	0,56	34,64	521	84131	85097	98924	92792	221278	604868	478342

Apêndice 2 - Dados obtidos nos ensaios não destrutivos e destrutivos seguindo a norma ASTM D-143.

Nº poste	ME (kg/m ³)	Vsom (m.s-1)	CLL (kgf/cm ²)	MOE (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)
1	679,04	5761,12	229884	157609	1114
1	827,98	5687,86	273223	179757	1348
1	671,25	5554,29	211222	136736	1060
1	834,00	5772,06	283418	162227	1207
1	846,26	5833,33	293722	158640	1177
1	846,09	5374,45	249279	171564	1149
2	642,77	5412,43	192061	148270	1074
2	715,21	5695,28	236628	151238	1076
2	689,42	5645,93	224158	155965	1097
2	710,89	5697,12	235348	159303	1136
3	765,08	5719,34	255271	172492	1354
3	819,67	5677,57	269504	181246	1305
3	749,32	5617,07	241149	155724	1090
3	829,45	5735,98	278361	167336	1208
3	818,98	5666,28	268206	190296	1316
3	769,38	5451,58	233231	173718	1190
3	804,92	5759,04	272304	182643	1209
4	876,79	6000	321958	210613	1271
4	897,03	6057,93	335782	234745	1410
4	788,14	5912,41	281018	203907	1280
4	812,28	6035,13	301773	211457	1293
4	810,58	5820,36	280089	166520	985
4	828,34	5968,14	300943	194978	1356
5	762,37	5516,46	236639	164400	1264
5	838,44	5606,94	268860	174854	1367
5	776,2	5623,53	250377	160175	1345
5	772,1	5381,22	228054	167895	1308
5	727,5	5491,53	223788	154000	1297
7	683,4	5216,92	189725	155881	1143
7	753,4	5681,02	248030	139362	1099
7	739,6	5230,26	206356	161758	1181
7	678,6	5810,5	233698	144388	1085
7	743,6	5642,46	241477	154785	1146
8	913,0	5553,07	287177	199900	1521
8	863,0	5695,75	285584	158989	1332
8	888,6	5369,35	261295	210065	1479
8	836,7	5361,05	245273	185421	1342
9	794,9	5760,48	269048	148047	1166
9	876,46	5775,66	298219	234812	1497
9	843,43	5717,67	281247	199441	1495
9	861,38	5739,64	289443	212604	1591
9	808,01	5811,14	278315	204139	1479
10	748,38	5592,03	238704	183611	1384
10	770,32	5736,53	258566	183251	1368
10	759,45	5478,84	232530	145662	897
10	777,82	5705,53	258268	185549	1327
10	725,24	5491,53	223083	170517	1243
10	768,28	5496,01	236710	183154	1354
10	748,55	5765,12	253768	182721	1209

Apêndice 3 - Dados obtidos nos tratamento preservativos realizados na autoclave em postes de madeira.

Espécie	Tratamento	Parâmetros processo		Retenção (kg/m ³)			
		Pressão (kgf/cm ²)	Tempo (min.)	CrO3	CuO	As2O5	Total
E. saligna	1	10	60	3,30	1,30	2,00	6,60
E. saligna	1	10	60	2,90	1,50	2,10	6,50
E. saligna	1	10	60	3,90	1,80	3,00	8,70
E. saligna	2	10	90	3,00	1,30	1,90	6,20
E. saligna	2	10	90	4,20	1,80	2,60	8,60
E. saligna	2	10	90	4,20	1,90	2,90	9,00
E. saligna	3	10	120	4,10	2,00	3,30	9,40
E. saligna	3	10	120	3,50	1,80	2,60	7,90
E. saligna	3	10	120	4,00	2,10	3,20	9,30
E. saligna	4	12	60	4,00	1,80	2,90	8,70
E. saligna	4	12	60	3,40	1,50	2,40	7,30
E. saligna	4	12	60	4,70	2,00	3,40	10,10
E. saligna	5	12	90	3,70	1,80	2,80	8,30
E. saligna	5	12	90	4,40	2,00	2,80	9,20
E. saligna	5	12	90	3,80	1,70	2,60	8,10
E. saligna	6	12	120	4,10	1,90	2,90	8,90
E. saligna	6	12	120	4,10	2,00	3,10	9,20
E. saligna	6	12	120	5,00	2,50	4,10	11,60
E. cloeziana	7	10	60	3,78	1,34	1,91	7,04
E. cloeziana	7	10	60	3,92	1,49	2,38	7,79
E. cloeziana	7	10	60	3,61	1,14	1,76	6,51
E. cloeziana	8	10	90	3,40	1,41	2,01	6,81
E. cloeziana	8	10	90	5,19	1,90	3,01	10,11
E. cloeziana	8	10	90	4,62	1,75	2,71	9,07
E. cloeziana	9	10	120	4,17	1,59	2,39	8,14
E. cloeziana	9	10	120	4,18	1,58	2,49	8,25
E. cloeziana	9	10	120	3,91	1,42	1,96	7,28
E. cloeziana	10	12	60	4,44	1,71	2,78	8,93
E. cloeziana	10	12	60	3,27	1,26	1,75	6,28
E. cloeziana	10	12	60	3,35	1,25	1,79	6,40
E. cloeziana	11	12	90	4,93	1,82	3,33	10,08
E. cloeziana	11	12	90	4,39	1,60	2,66	8,65
E. cloeziana	11	12	90	4,64	1,57	2,76	8,96
E. cloeziana	12	12	120	5,04	1,76	2,63	9,43
E. cloeziana	12	12	120	4,70	1,65	2,79	9,13
E. cloeziana	12	12	120	4,41	1,69	2,64	8,73

Apêndice 4 - Análise multifatorial para os dados de retenção total de CCA-C na madeira de *Eucalyptus saligna*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	4,70222	1	4,70222	3,12	0,1026
B:Tempo	6,69	2	3,345	2,22	0,1510
Interação					
AB	0,521111	2	0,260556	0,17	0,8431
Resíduo	18,0667	12	1,50556		
Total	29,98	17			

Apêndice 5 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CrO₃ na madeira de *Eucalyptus saligna*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	0,933889	1	0,933889	3,35	0,0922
B:Tempo	0,567778	2	0,283889	1,02	0,3905
Interação					
AB	0,201111	2	0,100556	0,36	0,7046
Resíduo	3,34667	12	0,278889		
Total	5,04944	17			

Apêndice 6 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CuO na madeira de *Eucalyptus saligna*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	0,160556	1	0,160556	2,54	0,1373
B:Tempo	0,52	2	0,26	4,11	0,0438
Interação					
AB	0,00444444	2	0,00222222	0,04	0,9656
Resíduo	0,76	12	0,0633333		
Total	1,445	17			

Apêndice 7 - Análise multifatorial para os dados de retenção de As₂O₅ na madeira de *Eucalyptus saligna*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	0,642222	1	0,642222	2,78	0,1214
B:Tempo	1,36444	2	0,682222	2,95	0,0907
Interação					
AB	0,0577778	2	0,0288889	0,13	0,8836
Resíduo	2,77333	12	0,231111		
Total	4,83778	17			

Apêndice 8 - Análise multifatorial para os dados de retenção total de CCA-C na madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	1,73601	1	1,73601	1,61	0,2286
B:Tempo	10,3717	2	5,18587	4,81	0,0293
Interação					
AB	0,941878	2	0,470939	0,44	0,6561
Resíduo	12,9423	12	1,07852		
Total	25,9919	17			

Apêndice 9 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CrO₃ na madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	0,317339	1	0,317339	1,28	0,2794
B:Tempo	2,21884	2	1,10942	4,49	0,0351
Interação					
AB	0,382178	2	0,191089	0,77	0,4834
Resíduo	2,96693	12	0,247244		
Total	5,88529	17			

Apêndice 10 - Análise multifatorial para os dados de retenção de CuO na madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	0,02645	1	0,02645	0,82	0,3832
B:Tempo	0,3244	2	0,1622	5,02	0,0260
Interação					
AB	0,0281333	2	0,0140667	0,44	0,6567
Resíduo	0,387467	12	0,0322889		
Total	0,76645	17			

Apêndice 11 - Análise multifatorial para os dados de retenção de As₂O₅ na madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Fatores	S. Q.	G. L.	Q. M.	Valor F	p
A:Pressão	0,350006	1	0,350006	2,27	0,1580
B:Tempo	1,43274	2	0,716372	4,64	0,0322
Interação					
AB	0,0836111	2	0,0418056	0,27	0,7673
Resíduo	1,85273	12	0,154394		
Total	3,71909	17			