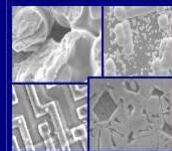




PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

**AVALIAÇÃO DE POSTES DE *Eucalyptus* RETIRADOS DA REDE
ELÉTRICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E
ENSAIOS DE FLEXÃO**

RAFAEL COLOMBO ABRUZZI
QUÍMICO INDUSTRIAL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

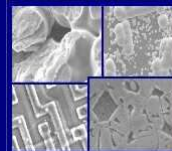
Porto Alegre
Março, 2012



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

**AVALIAÇÃO DE POSTES DE *Eucalyptus* RETIRADOS DA REDE
ELÉTRICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E
ENSAIOS DE FLEXÃO**

RAFAEL COLOMBO ABRUZZI
QUÍMICO INDUSTRIAL

ORIENTADORA: Profa. Dra. BERENICE ANINA DEDAVID

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MARÇAL J. R. PIRES

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao Projeto Otimização de Processos de Retratamento e Controle de Postes de Madeira Utilizados em Redes de Energia Elétrica - Fase III

**Porto Alegre
Março, 2012**

*“A felicidade às vezes é uma
benção, mas geralmente é uma
conquista”*

Paulo Coelho

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho, primeiramente, a Deus por ter me dado a oportunidade de poder realizá-lo e de poder contar com pessoas tão especiais nesta jornada. Dedico, também, a todas as pessoas que de certa forma fizeram parte da minha formação pessoal e profissional, em especial a toda minha família, aos meus pais Ivo e Maria, que estiveram presentes em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, em especial aos meus pais Ivo e Maria pelo apoio e compreensão.

Aos professores Dr. Marçal J. R. Pires e Dra. Berenice Anina Dedavid pelo incentivo e orientação no decorrer da pesquisa.

A todos os colegas do Laboratório de Química Analítica Ambiental da PUCRS principalmente aos colegas de projeto, William Oliveira, Flávio Vidor, Luciana Miranda, Fernanda Santos, Estrella Thomaz e João Trindade pelo companheirismo e ajuda.

Aos colaboradores do Centro de Microscopia e Microanálise da PUCRS por todas as informações, auxílios e orientações nas realizações das análises.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul pela oportunidade da realização da pesquisa e a AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S/A pelo financiamento do projeto.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE QUADROS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Registro Histórico	20
3.2. Estrutura da Madeira	21
3.2.1. Estrutura Macroscópica do Tronco	22
3.2.2. Planos Anatômicos de Corte.....	24
3.2.3. Estrutura Anatômica da Madeira.....	25
3.2.3.1. Parede Celular	25
3.2.3.2. Coníferas e Folhosas	27
3.2.3.3. Inclusões	28
3.3. Composição Química da Madeira	29
3.3.1. Componentes Químicos.....	29
3.3.2. Substâncias Macromoleculares	30
3.4. Preservação de Madeiras de Eucalipto	31
3.4.1. Preservantes Preventivos	34
3.4.1.1. Preservantes Hidrossolúveis.....	34
3.4.1.2. Preservantes Oleosos.....	36
3.4.1.3. Preservativos Oleossolúveis	36
3.4.2. Preservantes Curativos.....	37

3.5. Características Físicas e Mecânicas da Madeira	38
3.5.1. Densidade.....	38
3.5.2. Ensaios Mecânicos da Madeira	41
3.5.2.1. Ensaios em Postes de Madeira.....	45
3.5.2.2. Relação da Densidade com as Propriedades Mecânicas.....	46
3.6. Técnicas Analíticas Utilizadas	49
3.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura	49
3.6.2. EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia.....	50
3.7. Inspeção de Postes de Eucalipto	50
4. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1. Amostragem dos Postes de Madeira.....	52
4.2. Coleta dos Postes e Preparo das Amostras	54
4.3. Testes de Resistência Mecânica.....	57
4.4. Determinação da Densidade da Madeira.....	61
4.5. Análise MEV/EDS.....	62
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1. Testes de Resistência Mecânica.....	63
5.2. Análises MEV/EDS.....	72
5.2.1. Correlação da densidade com a morfologia da madeira em postes novos através de corte transversal	72
5.2.2. Correlação da densidade com a morfologia da madeira em postes retirados de serviço através de corte transversal.....	75
5.2.3. Identificação do preservante por meio de corte tangencial em postes novos	78
5.2.4. Identificação do preservante por meio do corte tangencial em postes retirados de serviço	86
5.3. Considerações Finais	93
6. CONCLUSÕES	94
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	96
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS	105

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1. Seção transversal típica de um tronco (Adaptado de, GONZAGA, 2006).22
- Figura 3.2. Direções e planos anatômicos de corte, numa seção de madeira (Adaptado de IWPA).....25
- Figura 3.3. Esquema de formação da estrutura da parede celular (Adaptado de, KLOCK et al., 2005).26
- Figura 3.4. Imagem da estrutura de uma folhosa (Adaptado de, BALLARIN [ca. 2008]).28
- Figura 3.5. Aplicação dos Preservantes: Em a) Externo na forma de bandagem (*Bioguard*) e b) Interno na forma de bastonetes (*Polesaver*).....38
- Figura 3.6. Variação da densidade básica da madeira na direção medula-casca de sete tipos de Eucaliptos (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005). ...40
- Figura 3.7. Variação da densidade básica da madeira ao longo do tronco de sete tipos de Eucaliptos (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005).41
- Figura 3.8. Esquema de um dispositivo para testes de flexão dinâmica em postes de madeira segundo NBR 6231 (ABNT, 1980).46
- Figura 4.1. Fluxograma da quantidade de postes e dos ensaios realizados. Em a) Postes retirados da rede elétrica e b) Postes Novos.....53
- Figura 4.2. (a) e (b) - Postes identificados para coleta e realização de testes.54
- Figura 4.3. Etapas da preparação dos CPs para testes de densidade. Em a) representação do poste e onde foram retiradas as seções, b) Seção inteira para corte em duas partes, c) Corte em duas partes e d) CPs para densidade.....55
- Figura 4.4. Etapas da preparação dos CPs para MEV/EDS. Em a) Seção inteira para corte em duas partes, b) Corte em duas partes, c) Corte em discos, d) Discos cortados das duas metades e) Retirada dos filetes centrais, f) Filetes cortados.....56
- Figura 4.5. Método de amostragem não destrutivo utilizado para obtenção de baguetas de madeira de Eucalipto. Em a) Broca adaptada a um perfurador; e b) Bagueta obtida pelo método não destrutivo.....57
- Figura 4.6. Layout da área de testes de flexão (Adaptado de, Alencastro, 2010).....57

Figura 4.7. Esquema do sistema de flexão dos postes (Alencastro, 2010).....	58
Figura 4.8. a) e b) – Teste de flexão de poste retirado da rede.....	61
Figura 5.1. Variação média do Limite de Resistência à Flexão (MORf) e módulo de elasticidade à flexão (MOEf) onde, a) e b) Postes retirados de serviço conforme seu estado de deterioração, c) e d) Postes retirados de serviço conforme seu tratamento e estado de deterioração.....	64
Figura 5.2. Variação individual do Limite de Resistência à Flexão (MORf) em relação a densidade para postes retirados de serviço onde, a) Postes da classe 1, b) Postes da classe 2, c) Postes da classe 3, d) Postes da classe 4 e e) Postes novos.....	67
Figura 5.3. Variação individual do Módulo de Elasticidade à Flexão (MOEf) em relação a densidade para postes retirados de serviço onde, a) Postes da classe 1, b) Postes da classe 2, c) Postes da classe 3, d) Postes da classe 4 e e) Postes novos.....	69
Figura 5.4. Imagens de MEV em amostra da espécie <i>Eucalyptus grandis</i> sem tratamento químico. Em a) e b) Alburno, c) e d) Cerne, e) e f) Medula..	73
Figura 5.5. Correlações entre o diâmetro do lúmen das fibras e as densidades básica e aparente medidas em laboratório, densidade aparente NBR 7190/97, para diferentes espécies.	75
Figura 5.6. Imagens de MEV em amostra de alburno com corte transversal. Em a) Poste 7, b) Poste 6, c) Poste 15, d) Poste 27 e e) Poste 4.	76
Figura 5.7. Variação da densidade com a largura do lúmen das fibras. a) Densidade básica e b) Densidade aparente.....	77
Figura 5.8. Imagens de MEV/EDS poste novo (2). Em a) e b) Imagem de MEV amostra de alburno, c) e d) Imagens de MEV amostra de cerne, e) e f) Imagens de MEV amostra de medula e g), h) e i) EDS realizado na área total das imagens de alburno, cerne e medula respectivamente.....	81
Figura 5.9. Imagens de MEV/EDS em amostra de alburno do poste novo (1). Em a) Imagem de MEV, b) EDS realizado no precipitado (região 1) c) EDS realizado na pontuação (região 2).....	82
Figura 5.10. Imagens de MEV/EDS em amostra de alburno do poste novo (2). Em a) e b) Imagem de MEV, c) EDS realizado no precipitado (região 1) f) EDS realizado na pontuação (região 2) e e) EDS realizado no precipitado (região 3).....	84

Figura 5.11. Imagens de MEV/EDS em amostra de alburno do poste novo (3). Em a) Imagem de MEV, b) EDS realizado na região clara (1) e c) EDS realizado no precipitado (região 2).	85
Figura 5.12. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (12). Em a) Imagem de MEV 4000x, b) Imagem de MEV 8000x c) EDS realizado no precipitado (região 1).....	86
Figura 5.13. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (15). Em a) Imagem de MEV 4000x, b) Imagem de MEV 8000x c) EDS realizado na pontuação (região 1).	87
Figura 5.14. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (16). Em a) Imagem de MEV 1000x, b) Imagem de MEV 4000x c) Imagem de MEV 8000x d) EDS na área total da imagem.....	88
Figura 5.15. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (27). Em a) Imagem de MEV 4000x b) Imagem de MEV 8000x e c) EDS na região clara (região 1).	89
Figura 5.16. Imagens de MEV/EDS do alburno. Em a) Imagem de MEV 8000x amostra 4, b) EDS na área total da imagem, amostra 4, c) Imagem de MEV 4000x amostra 18, d) EDS na pontuação (região 1), amostra 18, e) Imagem de MEV 8000x, amostra 29 e f) EDS no precipitado (região 1) amostra 29.	91
Figura 5.17. Imagens de MEV/EDS da região do cerne. Em a) Imagem de MEV 2000x amostra 31, b) EDS na área total da imagem da amostra 31, c) Imagem de MEV 2000x amostra 32, d) EDS na área total da imagem da amostra 32.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química elementar média da madeira de coníferas e folhosas.....	29
Tabela 3.2. Média dos componentes de madeiras de coníferas e folhosas.....	30
Tabela 3.3. Composição dos três tipos de Arseniato de Cobre Cromatado.....	35
Tabela 3.4. Dimensões e dados de resistência mínima para postes de eucalipto. ..	42
Tabela 3.5. Propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de eucaliptos utilizados na fabricação de postes.	44
Tabela 3.6. Parâmetros para especificação do poste novo de eucalipto.	45
Tabela 3.7. Variação da resistência e o módulo de elasticidade à flexão estática parametrizados, considerando-se as classes de densidade básica.....	48
Tabela 4.1. Quantidade de postes submetidos aos testes de flexão.	52
Tabela 5.1. Correlações de Pearson entre as propriedades mecânicas e o estado de deterioração de 298 postes de madeira.	65
Tabela 5.2. Correlações de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade da madeira de 69 postes.....	71
Tabela 5.3. Média do diâmetro do lúmen das fibras de madeira e das densidades básica e aparente medidas para diferentes espécies e valores da densidade aparente indicada na NBR 7190/97.....	74
Tabela 5.4. Média do diâmetro do lúmen e densidades da madeira de postes retirados de serviço.....	77
Tabela 5.5. Retenção dos óxidos obtidos por FAAS para Cu e Cr e HG-AAS para As para amostras de postes novos e retirados de serviço preservados com CCA além da concentração de Flúor obtida por EIS.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Classificação para postes inspecionados.....	51
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
CCA	Arseniato de Cobre Cromatado	
CCB	Borato de Cobre Cromatado	
CPs	Corpos de Prova	
D	Diâmetro do lúmen da fibra	μm
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia	
EIS	Eletrodo Íon Seletivo	
FAAS	Espectrometria Absorção Atômica em Chama	
HG-AAS	Espectroscopia absorção Atômica com Geração de Vapor Hidreto	
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura	
MOEf ou E_f	Módulo de Elasticidade à Flexão	MPa
MORf ou σ_F	Limite de Resistência à Flexão	MPa
U%	Percentual de umidade	
ρ_{ap}	Densidade aparente	kg/m^3
ρ_b	Densidade básica	kg/m^3
ρ_o	Densidade a 0% de umidade	kg/m^3

RESUMO

ABRUZZI, Rafael C. **AVALIAÇÃO DE POSTES DE *Eucalyptus* RETIRADOS DA REDE ELÉTRICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ENSAIOS DE FLEXÃO**. Porto Alegre. 2012. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O presente trabalho apresenta resultados de testes realizados em postes de madeira, de diferentes espécies de eucalipto, novos e retirados da rede de distribuição de energia elétrica no Sul do Brasil. São apresentadas correlações obtidas entre propriedades mecânicas, densidade, estado de deterioração e diâmetro do lúmen das fibras de postes de eucalipto. O estado de deterioração foi determinado por inspeções em campo. Postes em diferentes estados de deterioração foram retirados da rede para ensaios de flexão estática, medidas de densidade. Análises do diâmetro do lúmen foram realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura para correlacionar a densidade com a estrutura anatômica da madeira e para identificação do tratamento empregado como preservante. Os testes mecânicos indicaram que os valores médios da resistência a flexão e da rigidez decrescem com o estado de deterioração do eucalipto. Entretanto, verificou-se uma grande variação nessas medidas influenciada pela densidade da madeira. Madeiras menos densas apresentaram baixa resistência mecânica residual mesmo sem apresentar sinais de deterioração. Esse estudo indicou que o estado de deterioração avaliado pela inspeção em campo, por si só não é um bom indicativo para prever a durabilidade das estruturas de eucalipto, fazendo-se necessária uma análise preliminar da densidade da mesma. Os dados obtidos com MEV/EDS, sobre o tratamento químico e a caracterização morfológica das estruturas de madeira vêm a complementar os dados obtidos com a inspeção que possibilitaram uma avaliação real da deterioração desses postes na rede.

Palavras-Chaves: CCA, densidade, deterioração, propriedades mecânicas e lúmen.

ABSTRACT

ABRUZZI, Rafael C. **EVALUATION OF POLES OF *Eucalyptus* REMOVED FROM NETWORK ELECTRIC BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AND BENDING TESTS**. Porto Alegre. 2012. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

This paper presents results of tests on poles of wood of different species of Eucalyptus, new and removed from the network of distribution of electric energy in southern Brazil. Are presented correlations between mechanical properties, density, state of deterioration and lumen diameter of Eucalyptus poles. The state of deterioration was determined by field inspections. Poles in various states of deterioration were removed from the network for static bending tests and density measurements. Analysis of the lumen diameter were performed by scanning electron microscopy to correlate the density with the wood anatomy and identification of the treatment used as a preservative. The mechanical tests indicated that the average values of bending strength and stiffness decline with the deteriorating state of Eucalyptus. But, there was a large variation in these measures influenced by the density of the wood. Less dense woods presented low residual mechanical strength even though not presenting signs of deterioration. This study indicated that the state of deterioration measured by field inspection alone is not a good indicator for predicting the durability of eucalyptus structures, making necessary a preliminary analysis of the density. The data obtained from SEM/EDX about chemical treatment and morphological characterization of wood structures come to complement the data obtained through inspection that allowed a real evaluation of the deterioration of these poles on the network.

Key-words: CCA, density, deterioration, mechanical properties and lumen.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, as características únicas e a abundância de madeira fizeram dela uma material para construção de residências, móveis, ferramentas, veículos, objetos decorativos e outras estruturas. Segundo o USDA (2010) hoje pelas mesmas razões, a madeira é valorizada para uma infinidade de usos.

A madeira de eucalipto é um importante material de engenharia com propriedades mecânicas adequadas para a construção civil, como o baixo peso específico e a alta resistência mecânica, sendo usada há décadas para confecção de postes e mourões. Por se tratar de um recurso renovável, desempenha um importante papel ambiental. Por meio de planos de reflorestamento adequados torna-se um material sustentável e contribui com a minimização do efeito estufa pelo consumo de CO₂ nas florestas (ROMAGNAMO; BRAZOLIN, 2002, apud BARILLARI; BRAZOLIN; JANKOWSKY, 2003, p. 2).

Dados revelam que em 2009 no Rio Grande do Sul utilizavam-se 2.888.288 postes nas redes das suas três concessionárias de distribuição de energia elétrica, sendo 2.278.499 (79%) de madeira e 609.789 (21%) de concreto (ANEEL, 2009).

O projeto de pesquisa ao qual este estudo está vinculado foi desenvolvido em três fases entre 2001 e 2011, sendo resultado de uma parceria entre a empresa AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S/A e a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS. Neste, foram inspecionados cerca de 10.000 postes dos quais 800 foram retirados das redes de distribuição para ensaios mecânicos.

Um dos parâmetros mais importantes entre as diversas propriedades físicas da madeira é a densidade, que está relacionada a muitas propriedades e

características fundamentais para a sua produção e utilização, pois afeta grande parte das demais propriedades dessa. É uma propriedade muito complexa que envolve a combinação de seus elementos anatômicos e compostos químicos. Variações significativas são observadas para a densidade entre espécies, onde quase todas as características da madeira diferem significativamente, dentro de uma mesma espécie não se verificam variações significativas (SHIMOYAMA, 1990).

No Brasil a maioria das estruturas de madeira são fabricadas a partir de florestas plantadas de diversas espécies de eucalipto. Entretanto, devido à baixa resistência à biodeterioração a madeira de eucalipto deve ser preservada para garantir um tempo mínimo de vida útil de 15 anos estabelecido pela norma NBR 8456 (1984) (LEPAGE, 1986 e MORRELL, 1996). Hoje o preservante mais utilizado é o Arseniato de Cobre Cromatado – CCA, mas um desenvolvimento importante na história de preservação da madeira foi com uso do creosoto, onde se deu o primeiro grande uso de impregnação por pressão para tratamento de madeira, esse foi amplamente utilizado como preservante em estruturas de madeira para diversas utilidades (SHUPE; HSE; ROLIADI, 2006).

No caso de postes de eucalipto, a maior atenção deve ser direcionada para a linha de afloramento (interseção da superfície lateral do poste com o plano do solo), é o limite superior do comprimento do engastamento. Sendo o CCA um preservante hidrossolúvel, a madeira enterrada em contato com a umidade do solo, poderá ter o teor de CCA reduzido na região engastada do poste (PAINEL FLORESTAL, 2009).

Parte desse estudo baseou-se na importância da identificação rápida da presença dos preservantes CCA e Creosoto na madeira, de eucalipto por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), para melhor disposição dos resíduos desse material, uma vez que após sujeita a intempéries muitas vezes não é possível identificar se a madeira possui ou não o tratamento, ou qual é este tratamento. Além disso, foi investigada a correlação entre a densidade e o diâmetro do lúmen das fibras de diferentes espécies de eucaliptos, para uma melhor avaliação do estado de deterioração da madeira. Postes novos e também retirados de serviço com e sem tratamento químico, com diferentes idades e estados de deterioração foram analisados.

No Brasil a verificação da qualidade de postes de madeira, que irão ser colocados em serviço, é estabelecida pela norma NBR 6231 (ABNT, 1980). Essa norma preconiza testes destrutivos de flexão, por amostragem, por meio do método denominado de viga engastada em balanço. Esse ensaio consiste na aplicação progressiva de uma força, com velocidade constante, até que ocorra a ruptura do poste. Como resultados obtêm-se o Limite de Resistência à Flexão (MOR_f) e o Módulo de Elasticidade à Flexão (MOE_f).

Uma diminuição acelerada no estado de deterioração de postes em serviço em algumas redes de distribuição de energia no RS tem sido reportados (VIDOR et al., 2009; VIDOR, 2011; CRUZ, 2011). Segundo esses autores a deterioração está associada tanto a baixa eficiência do processo de preservação como também ao uso de madeira com propriedades mecânicas inadequadas. Tratamentos curativos bem como inspeção e manutenção periódicas dos postes em serviço tem sido propostos para minimizar a aceleração da deterioração em postes de eucalipto.

Porém discrepâncias significativas foram observadas entre o estado de deterioração estimado nas inspeções e a resistência residual obtida em testes destrutivos de flexão de postes retirados da rede. Alencastro (2010) encontrou variações significativas nas densidades (de 442 a 1036 kg/m³), e conseqüentemente nas propriedades mecânicas. Isso poderia justificar as discrepâncias na resistência mecânica, porém nenhum estudo sistemático foi feito para comprovar essa hipótese.

Como parte desse estudo, foram avaliados postes de madeira novos e postes de madeira retirados das redes, quanto a sua resistência mecânica, por meio de testes de flexão estática, verificando como a mesma varia com a densidade e se reduz com a deterioração do material.

A relação entre o processo de inspeção dos postes em serviço e a densidade estimada pelo diâmetro do lúmen da fibra, obtido pelas análises anatômicas da madeira por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura, visam prever o comportamento mecânico da madeira utilizando a morfologia de uma pequena amostra, com a finalidade de diminuir o impacto econômico dos testes destrutivos indicados pela norma e qualificar ainda mais o produto.

2. OBJETIVOS

Avaliar postes de madeira de eucalipto novos e retirados da rede elétrica com e sem tratamento químico com diferentes densidades e estados de deterioração.

2.1. Objetivos Específicos

Validar a técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) para identificar a presença do tratamento preservante em estruturas de madeira.

Relacionar o diâmetro do lúmen da fibra da madeira de eucalipto de diferentes espécies, estudadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com a densidade básica e aparente medidas em laboratório.

Verificar as possíveis correlações das propriedades mecânicas (MOEf e MORf) da madeira de eucalipto com a deterioração levando em consideração a densidade do eucalipto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Registro Histórico

A madeira de eucalipto é um material renovável e de enorme potencial para os mais variados fins, sendo abundante devido à grande área florestal brasileira, onde o seu suprimento pode ser planejado por meio de reflorestamento, tornando-se um material ambientalmente sustentável (BRAZOLIN; ROMAGNANO; SILVA, 2003).

Segundo registros históricos, a primeira utilização de postes de madeira data da década de 1830, quando o telégrafo começou a ser utilizado. No Brasil, mesmo com relativa abundância de madeiras nativas, há registros que relatam as primeiras tentativas de emprego de eucalipto como poste em 1909, quando surgiram as primeiras tentativas de preservação da madeira, que culminaram, em 1935, com a utilização do eucalipto para poste pela Companhia Telefônica Brasileira (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

Existem diversas alternativas para a produção de postes para a rede elétrica e telefonia como madeira, concreto, aço, ferro e alumínio, sendo a madeira a mais correta ambientalmente. Isso se deve a suas vantagens, tais como: ser renovável, apresenta baixo consumo de energia na conversão a postes, resiste muito bem a impactos, choques mecânicos e ao arraste dos postes, apresenta fácil manuseio, transporte e colocação dos postes. Além disso, os postes de madeira apresentam menor peso em relação aos demais tipos de postes, permite retratamento com preservantes em regiões afetadas dos postes em uso, permite recuperação das partes ainda sadias dos postes retirados de serviço para utilização como mourões de cerca e construção de galpões (PAINEL FLORESTAL, 2009).

É importante que o poste de madeira preservado de eucalipto seja visto como material de engenharia, em razão das inúmeras vantagens apresentadas. As suas limitações poderão ser compensadas por meio da aplicação dos rigores das normas técnicas, solucionando-se os problemas relacionados à qualidade da matéria-prima, bem como aos produtos e processos preservantes (REVISTA DA MADEIRA, 2005).

Assim, dentre as desvantagens na utilização do eucalipto para postes na rede elétrica cita-se; a baixa durabilidade devido a deterioração por organismos xilófagos, a necessidade de manutenção periódica como o retratamento em regiões afetadas, indisponibilidade de madeira devido a não existência de estoques suficientes em quantidade e qualidade necessária e satisfatória. Entretanto, nas últimas décadas não foram realizados plantios com espécies adequadas e práticas de manejos específicos para a produção de postes, até o presente momento (REVISTA DA MADEIRA, 2005).

3.2. Estrutura da Madeira

Toda a madeira é composta de celulose, lignina, poliose (hemicelulose) contidos em sua estrutura celular e de pequenas quantidades (5% a 10%) de componentes acidentais ou inclusões. Variações nas características e no volume desses componentes e as diferenças na estrutura fazem as madeiras serem leves ou pesadas e rígidas ou flexíveis. Para se obter uma melhor eficiência no uso da madeira em aplicações de engenharia suas características ou propriedades físicas devem ser consideradas (USDA, 2010).

A madeira por ser um material heterogêneo, apresenta uma variabilidade estrutural e química refletida numa ampla variedade de propriedades físicas, tais como densidade, condutividade térmica, difusão da água de impregnação, entre outras. O arranjo de seus componentes físicos e químicos define a estrutura lenhosa da madeira como uma engenhosa organização arquitetônica (WASTOWSKI, 2009).

3.2.1. Estrutura Macroscópica do Tronco

A madeira é um material composto de células produzidas por uma árvore viva para suportar a copa, conduzir água e nutrientes dissolvidos no solo e armazenar materiais de reserva (principalmente carboidratos). A estrutura macroscópica da madeira é complexa devido a sua formação por diferentes tipos de células, as quais desempenham diferentes funções (WASTOWSKI, 2009).

Conforme a Figura 3.1, no corte transversal de um tronco na árvore distingue-se:

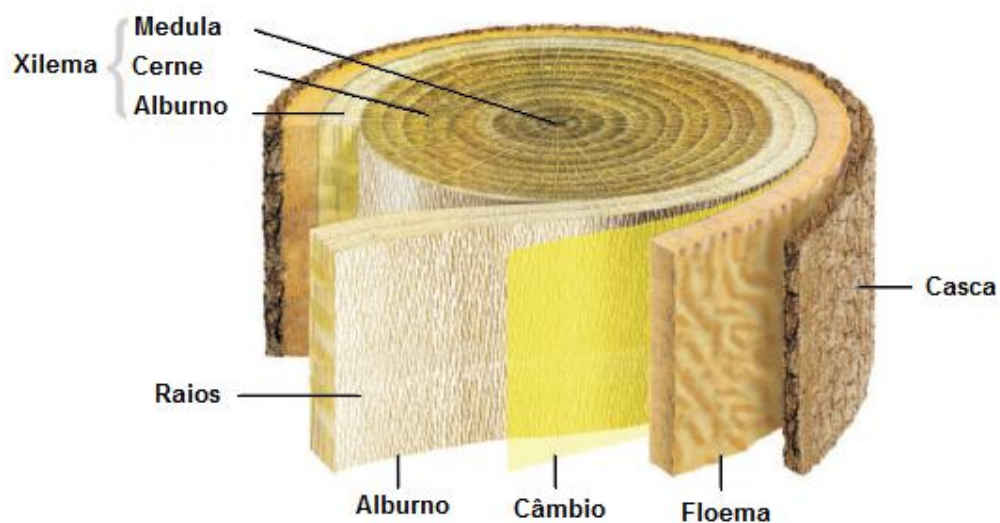


Figura 3.1. Seção transversal típica de um tronco (Adaptado de, GONZAGA, 2006).

- **CASCA:** Porção mais externa do caule ou da raiz, cuja função é a de proteger mecanicamente e evitar uma dessecação demasiada do caule (WASTOWSKI, 2009).

- **FLOEMA:** Ou também casca interior, localizado entre a zona cambial e a casca, tem a função de armazenar e transportar a seiva elaborada. Após um determinado tempo, as células mais externas do floema morrem e passam a fazer parte da casca (GONZAGA, 2006).

- **XILEMA:** Ou também lenho é a camada central da árvore, interna ao câmbio, e sua função é a de distribuir a seiva bruta ou inorgânica (água e sais

minerais) até as folhas. Possui as funções de condução, sustentação e armazenamento. Divide-se em duas regiões distintas: o alborno e o cerne (GONZAGA, 2006).

- CÂMBIO: Constituído por uma camada de células entre o xilema e o floema, cuja função é a de regular o crescimento do vegetal em espessura (WASTOWSKI, 2009).

- MEDULA: É a parte central do caule, região onde o crescimento de uma árvore se inicia. É uma região mais propensa ao ataque de microorganismos xilófagos. Sua função é a de armazenar substâncias nutritivas para a planta, principalmente durante a fase inicial de crescimento (COSTA, 2001).

- CERNE: Parte do lenho que é constituída por camadas internas que, na árvore em crescimento, deixarem de conter células vivas e cujas substâncias de reserva (como, por exemplo, o amido) foram consumidas ou transformadas em outras peculiares ao cerne (NBR 8456, 1984).

- ALBURNO: Parte externa do tronco de uma árvore com células ativas, que geralmente se diferencia da parte interna por uma coloração mais clara. Normalmente o alborno ainda contém substâncias de reserva, e é permeável à passagem de líquidos apresentando assim uma função de transporte de extrativos (NBR 8456, 1984).

-ANÉIS DE CRESCIMENTO: Se apresentam na forma de círculos concêntricos quando o tronco é cortado de forma transversal. O mesmo se apresenta em duas faixas lenho inicial e lenho tardio (GONAZAGA, 2006).

Brasil e Ferreira (1979) afirmam que dentre os índices que caracterizam a qualidade da madeira destacam-se a densidade e outros ligados à estrutura anatômica como o comprimento, o lúmen, o diâmetro e a espessura das paredes das fibras, pois estão associados às propriedades tecnológicas. As dimensões, proporções e arranjos dos vários tipos de células formam um modelo estrutural característico para cada espécie.

Poubel et al. (2011) determinaram a variação das propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita* com a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira, onde a densidade mostrou estar bem correlacionada às dimensões das fibras (comprimento, largura e espessura de parede). Este estudo mostra que propriedades físicas da madeira, como a densidade, podem ser explicadas pela estrutura anatômica peculiar a cada espécie. Suas análises estatísticas não mostram diferenças significativas entre as três posições estudadas (cerne, zona de transição e alburno).

Dutt e Tyagi (2011) caracterizaram morfológicamente diferentes espécies de eucalipto. Estes autores verificaram que, as fibras de *E. grandis* possuem paredes de fibras estreitas e grandes diâmetros de lúmen, que deverá ter um efeito na resistência e na flexibilidade. Por outro lado, as fibras de *E. tereticornis*, que apresentam paredes de fibras mais largas e menores diâmetros de lúmen serão mais duras e menos flexíveis.

Análises das diferenças no crescimento, estrutura morfológica e densidade da madeira entre diferentes genótipos de eucaliptos foram realizadas por Zbonak; Bush e Grzeskowiak (2007). Esses autores verificaram que as propriedades das fibras tiveram uma grande influência sobre a densidade da madeira, tornando as madeiras de árvores com maior diâmetro de lúmen significativamente mais leves.

3.2.2. Planos Anatômicos de Corte

As propriedades físicas e mecânicas e a aparência da madeira se alteram conforme o sentido em que é aplicada uma carga ou a mesma é observada. Isso ocorre, devido aos elementos anatômicos do lenho se encontrarem diferentemente orientados e organizados segundo as direções dos planos de corte que podem ser de três formas conforme apresentado abaixo e também na Figura 3.2.

- Plano Transversal (RT): perpendicular ao eixo do caule evidencia os anéis de crescimento, as fibras e os raios da madeira.

- Plano Longitudinal Radial (LR): em um plano passando pela medula, paralelo ao eixo do caule, os anéis de crescimento aparecem como linhas paralelas, onde os vasos e as fibras são cortados ao longo do seu eixo.

- Plano Longitudinal Tangencial (LT): tangencia os anéis de crescimento, paralelo ao eixo do caule (BALLARIN, [ca. 2008]).

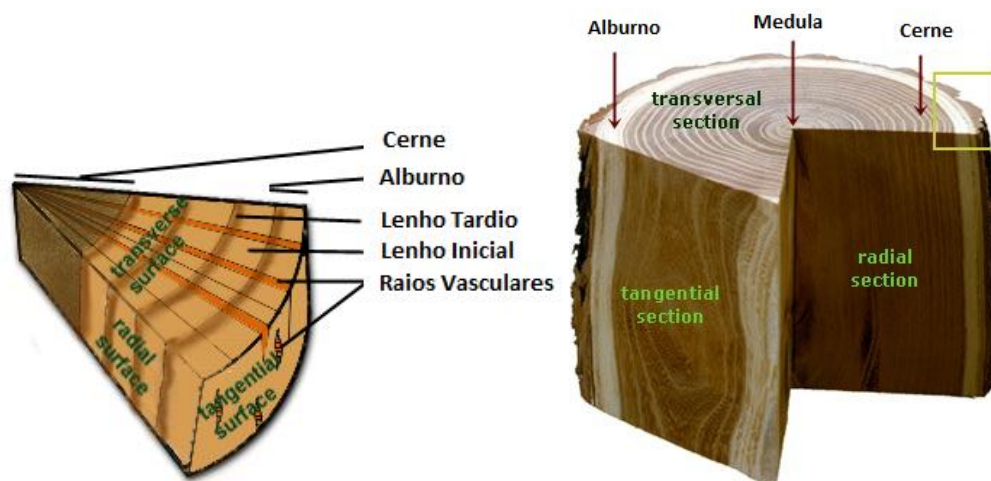


Figura 3.2. Direções e planos anatômicos de corte, numa seção de madeira (Adaptado de IWPA).

3.2.3. Estrutura Anatômica da Madeira

3.2.3.1. Parede Celular

Na divisão celular, a primeira membrana de separação a aparecer entre o par de novas células é a lamela média, que possui a função de unir as células umas às outras. Sobre essa membrana acumulam-se posteriormente no interior da célula microfibrilas de celulose, formando uma trama irregular, que juntamente com a hemicelulose e pectina constituem a parede primária, dotada de grande elasticidade. Essa parede acompanha o crescimento da célula durante a sua diferenciação. Concluído esse processo, depositam-se junto à membrana primária microfibrilas de celulose obedecendo uma orientação, que destaca três camadas distintas, constituintes da parede secundária da célula: S1(externa), S2 (média) e S3 (interna) também constituídas de hemicelulose e lignina (COSTA, 2001).

A espessura da parede secundária varia consideravelmente entre as espécies e entre as diferentes células. Estruturalmente, a parede é formada por agregados de polímeros de açúcares, basicamente celulose e substâncias assemelhadas que se organizam em microfibrilas e fibrilas, que constituem o esqueleto extracelular (COSTA, 2001).

As paredes primárias são atravessadas por delgados filamentos protoplasmáticos, os *plasmodesmos*, que permitem a troca de substâncias entre as células vizinhas, enquanto nas paredes secundárias formam-se interrupções ou descontinuidade no processo de deposição da parede, chamadas *pontuações*, nas áreas em que a parede secundária não é depositada as pontuações são semelhantes a orifícios (COSTA, 2001).

Na Figura 3.3 está esquematizada a formação da fibra e da parede celular.

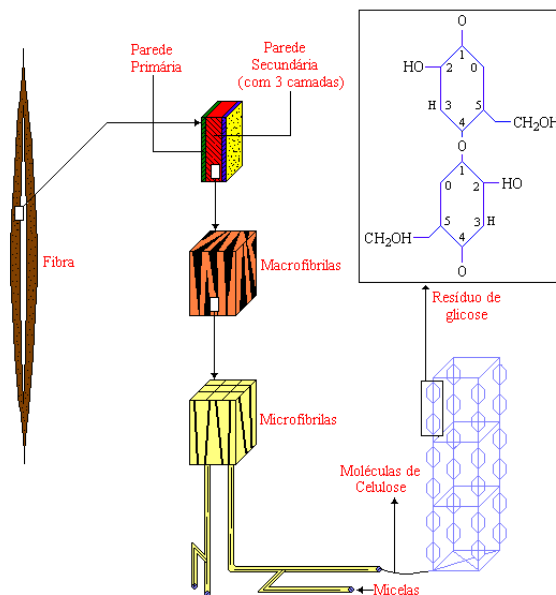


Figura 3.3. Esquema de formação da estrutura da parede celular (Adaptado de, KLOCK et al., 2005).

3.2.3.2. Coníferas e Folhosas

Duas grandes divisões são de interesse na anatomia da madeira, apresentando diferenças estruturais que são as Angiospermas e as Gimnospermas, normalmente referidas como coníferas e folhosas respectivamente.

Botanicamente, as folhosas também conhecidas como “Hardwoods” são Angiospermas. Anatomicamente, as madeiras folhosas possuem vasos/poros ou elementos vasculares. Um elemento de vaso é uma célula de madeira com extremidades abertas, quando os elementos de vasos são definidos um acima do outro, formando um tubo contínuo chamado de vaso, que serve como um canal para o transporte de água ou seiva da árvore. Pertence a este grupo o gênero *Eucalyptus*, com suas centenas de espécies principalmente aclimatadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, com predominância do *E. grandis*, *E. saligna*, *E. paniculata*, *E. tereticornis*, *E. dunnii*, *E. microcorys*, *E. urophylla* e *E. deglupta* e também a espécie *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* (USDA, 2010). Algumas dessas espécies serão abordadas nesse trabalho.

A estrutura anatômica das folhosas é bem mais especializada e complexa, oferecendo uma grande variedade de aspectos que facilitam sua identificação. Os principais elementos anatômicos são os que seguem:

- Fibras longitudinais: São os elementos mais resistentes da madeira, formadas por células ocas, alongadas. As partes ocas das fibras apresentam-se como um vazio interior chamado de lúmen.

- Poros ou vasos: Estão presentes apenas nas madeiras porosas (folhosas), são células de grande diâmetro, com extremidades abertas, tem a função de circulação da seiva bruta.

- Raios: Esses são formados por grupos de células dirigidos do centro do tronco para a periferia, sua função é de transporte e condução da seiva na direção transversal ao eixo da árvore e exercem uma espécie de amarração nesse sentido (COSTA, 2001).

A Figura 3.4 ilustra a estrutura da madeira de uma folhosa, mostrando as fibras, os vasos e os raios.

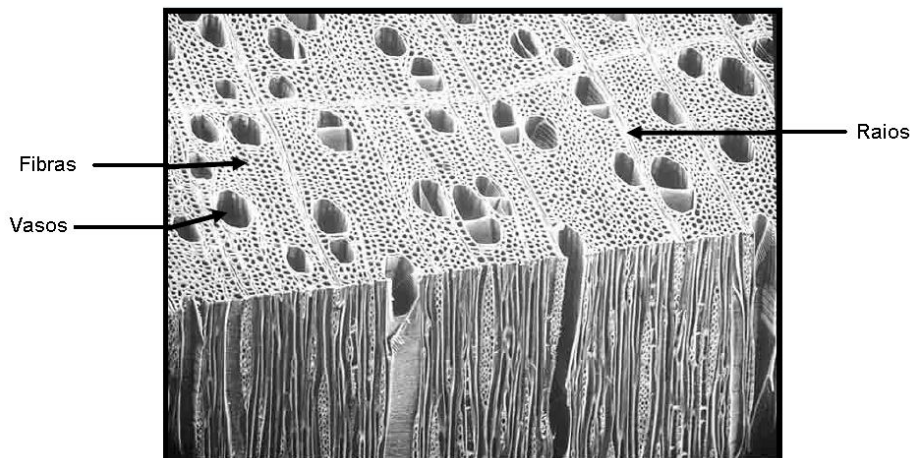


Figura 3.4. Imagem da estrutura de uma folhosa (Adaptado de, BALLARIN [ca. 2008]).

Botanicamente, as coníferas são Gimnospermas, também conhecidas como “Softwoods”. Anatomicamente, macias, não porosas e não contêm vasos (USDA, 1999). São árvores típicas dos climas temperados e frios. Na América do Sul, o Pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*) é uma conífera típica. Situa-se no Brasil uma parte expressiva da zona de crescimento dessa espécie, englobando os estados do Paraná, de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul. Também pertence às coníferas o gênero *Pinus*, com algumas dezenas de espécies (COSTA, 2001).

3.2.3.3. *Inclusões*

As inclusões são elementos acidentais como minerais e extrativos, não são elementos anatômicos, mas sua presença é importante para a anatomia, identificação e utilização da madeira (VASCONCELLOS; FREITAS; SILVA, 1995).

A presença em dosagens elevadas de alguns desses componentes, são prejudiciais e até mesmo limitantes, para determinadas finalidades industriais, podem formar incrustações nos equipamentos e nas tubulações (BARCELLOS et al., 2005).

Em geral o teor de minerais da madeira, corresponde, a menos de 1% da base de madeira absolutamente seca. Muitos desses minerais encontram-se presentes em combinação com compostos orgânicos, onde os complexos formados desempenham funções fisiológicas. O potássio, cálcio, cloro, sódio e magnésio são elementos constituintes dos minerais predominantes. Os principais sais que existem na madeira são carbonatos de metais alcalinos e alcalino-terrosos. Os metais estão presentes na forma de vários sais, incluindo oxalatos, fosfatos, silicatos etc. Alguns deles estão ligados a grupos de ácidos carboxílicos. A maioria do cálcio ocorre como cristais de oxalato de cálcio, os fosfatos estão presentes na forma de éster e tem papel ativo no metabolismo, a sílica ou ocorre combinada aos carboidratos, formando ésteres, ou se deposita como cristais (ANDRADE, 1989 apud BARCELLOS et al., 2005, p. 146-147).

3.3. Composição Química da Madeira

3.3.1. Componentes Químicos

Os principais elementos presentes na madeira são o Carbono (C), o Hidrogênio (H), o Oxigênio (O) e o Nitrogênio (N), esse último em menor quantidade. A Tabela 3.1 apresenta a análise da composição química elementar média da madeira de diversas espécies, coníferas e folhosas em composição percentual, em relação ao peso seco da madeira (KLOCK, 2005).

Tabela 3.1. Composição química elementar média da madeira de coníferas e folhosas.

Elemento	Porcentagem
C	49 – 50
H	6
O	44 – 45
N	0,1 – 1

FONTE: Adaptado de KLOCK, 2005.

3.3.2. Substâncias Macromoleculares

Na análise dos componentes da madeira, precisa ser feita uma distinção entre os principais componentes macromoleculares que constituem a parede celular (Celulose, Poliose (Hemicelulose), e Lignina), já que esses estão presentes em todas as madeiras, e os extrativos e substâncias minerais que são componentes minoritários e de baixo peso molecular, onde o tipo e a quantidade são geralmente mais relacionados à madeira de certas espécies. As proporções e composição química da lignina e polioses diferem em coníferas e folhosas, enquanto que a celulose é um componente uniforme da madeira conforme apresentado na Tabela 3.2 (KLOCK, 2005).

Tabela 3.2. Média dos componentes de madeiras de coníferas e folhosas

Constituinte	Coníferas	Folhosas
Celulose	42 ± 2%	45 ± 2%
Poliose	27 ± 2%	30 ± 5%
Lignina	28 ± 2%	20 ± 4%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

FONTE: Adaptado de KLOCK, 2005.

A celulose é o componente presente em maior quantidade, pode ser brevemente caracterizada como um polissacarídeo que se apresenta como um polímero linear de alto peso molecular cuja fórmula geral é $(C_6H_{10}O_5)_n$. As moléculas de celulose são completamente lineares e tem forte tendência para formar ligações de hidrogênio. Feixes de moléculas de celulose se agregam na forma de microfibrilas na qual as regiões cristalinas, altamente ordenadas se alternam com as regiões amorfas, menos ordenadas. A celulose possui alta resistência a tração e é insolúvel na maioria dos solventes (KLOCK, 2005).

O termo poliose (hemicelulose) refere-se a uma mistura de polímeros polissacarídeos de baixa massa molecular. Estão em estreita associação com a celulose na parede celular. As cadeias moleculares são muito mais curtas que a de celulose, podendo existir grupos laterais e ramificações em alguns casos. São polímeros ramificados (amorfos) e de cadeias mais curtas. Como as polioses

absorvem facilmente a água, esta contribui para o intumescimento, a mobilidade interna e o aumento de flexibilidade das fibras (KLOCK, 2005).

A lignina é a terceira substância macromolecular componente da madeira. As moléculas de lignina formadas são completamente diferentes dos polissacarídeos, pois são constituídas por um sistema aromático composto de um sistema heterogêneo ramificado e sem nenhuma unidade repetidora definida. A lignina morfologicamente é uma substância amorfa localizada na lamela média composta e na parede secundária. A lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e assim fortalecendo, enrijecendo as paredes celulares. Tem um importante papel no transporte de água, nutrientes e metabólitos, sendo responsável pela resistência mecânica de vegetais, além de proteger os tecidos contra o ataque de microorganismos (KLOCK, 2005).

3.4. Preservação de Madeiras de Eucalipto

Sendo uma matéria-prima de origem biológica, a madeira está sujeita a deterioração por microorganismos, fungos e principalmente xilófagos diversos, mas também por outros fatores não biológicos como combustão e o intemperismo. Para viabilizar sua utilização com relação a uma maior durabilidade, o uso de preservativos para a madeira deve ser considerado. Hoje são utilizados, diversos agentes preservantes para aumentar o tempo de vida da madeira, existem alguns compostos com elevado grau de toxicidade, que gradualmente vão sendo abandonados (GONZAGA, 2006).

Em condições de alta agressividade biológica, a madeira, deve ser permeável ao tratamento para garantir uma retenção e penetração adequada dos produtos preservativos (BRAZOLIN; ROMAGNAMO; SILVA, 2003).

Estender a vida útil de estruturas como mourões, dormentes e postes em serviço torna-se fundamental para reduzir os custos e evitar a interrupção do fornecimento de energia e transporte. Os postes de madeira, quando adequadamente tratados, têm duração prevista de 15 anos segundo norma NBR 8456 (1984), necessitando de troca quando o grau de deterioração atinge certos

limites de especificação de resistência e de grau de apodrecimento. Quando existe um bom sistema de monitoramento da qualidade dos postes em uso, a duração pode ser prolongada e a qualidade garantida por mais um tempo.

Os preservantes são produtos químicos introduzidos na estrutura da madeira, visando torná-la tóxica aos agentes de decomposição. Um desenvolvimento importante na história de preservação de madeira foi com uso do creosoto, onde se deu o primeiro grande uso de impregnação por pressão para tratamento de madeira, este foi amplamente utilizado como conservante em estruturas de madeira para diversas utilidades (SHUPE; HSE; ROLIADI, 2006).

A madeira de eucalipto vem sendo tratada com CCA desde a década de 1930 no Brasil. O desenvolvimento do setor de preservação de madeiras no Brasil iniciou com a necessidade de tratamento de dormentes, postes e mourões de cerca, desde então a indústria não se diversificou tanto (BARILLARI; BRAZOLIN; JANKOWSKY, 2003).

Os processos de preservação podem, de forma geral, ser classificados em duas categorias: Processos Preventivos (industriais) e Processos Curativos (práticos) que podem ser realizados com os postes já em serviço.

Os processos preventivos (industriais) utilizam grandes autoclaves, onde com o uso adequado de vácuo e pressão, produtos químicos preservantes são impregnados no interior da madeira. Existem por outro lado processos mais práticos e simples (curativos), possíveis de serem efetuados pelos próprios interessados que são capazes de economicamente proteger e aumentar a durabilidade da madeira, quando se observa o início de um processo de deterioração.

Os métodos curativos visam deter o agente deteriorador após esse já estabelecido na madeira. O tratamento preventivo consiste no tratamento dos postes de madeira antes de colocá-los em uso, para prevenir a sua deterioração. Os métodos preventivos atuam através de vários produtos químicos ou biológicos que são incorporados à madeira. O principal método preventivo é o uso de biocidas, através da impregnação da madeira com substâncias químicas tóxicas.

A eficiência do preservante está relacionada com alguns fatores como o tratamento empregado, a penetração na madeira, a resistência à lixiviação, a alteração das propriedades da madeira, a segurança em relação ao homem e ao meio ambiente. A toxidez do preservante deve ser restrita ao seu principal foco que são os organismos xilófagos, evitando-se a intoxicação de homens e animais, bem como alterações no equilíbrio ecológico (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

Nos Estados Unidos, a “Environmental Protection Agency” (EPA) anunciou em 2003 a suspensão da produção de peças de CCA destinadas para uso residencial. Não houveram restrições quanto ao uso próximo a residências como em “playgrounds”, decks e cercas, também não surgiram limitações para as utilidades rurais e industriais, como postes, mourões e dormentes (BARILLARI; BRAZOLIN; JANKOWSKY, 2003).

Na União Européia, alguns países, como Suécia e Dinamarca, já proibiram o uso do arsênio e restringiram, a partir de 2004, o uso de madeira tratada com preservantes baseados em cromo e cobre, em algumas aplicações especiais, como uso doméstico. O cromo e o cobre não sofreram restrições para uso industrial e comercial. No Brasil, ainda não se conhecem restrições para o uso da madeira tratada com os sais de CCA, semelhantes às encontrados nos Estados Unidos e na União Européia (REVISTA DA MADEIRA, 2006).

Segundo dados estimativos por Geraldo (2002 apud BRAZOLIN; ROMAGNAMO; SILVA, 2003) a produção anual de madeira tratada no Brasil é de cerca de 450 mil metros cúbicos. Já nos EUA, segundo Preston (2000, apud BRAZOLIN; ROMAGNAMO, SILVA, 2003) a produção de madeira tratada foi estimada em 15 milhões de metros cúbicos.

Verificaram-se algumas tendências sobre o setor de preservação de madeira em um levantamento realizado recentemente no Brasil:

- A produção de madeira tratada está concentrada principalmente nas regiões Sul e Sudeste (90,4%). O gênero mais utilizado no tratamento de madeiras foi o Eucalipto (67,5%). O volume de madeira tratada mostrou que

os mourões representavam 56% (29.480 ton.) das estruturas produzidas, seguidos dos postes com 27% (14.390 ton.), tábuas com 12% (6.352 ton.) e os dormentes vêm em seguida com 1,5% (768 ton.).

- Nas usinas de preservação, o CCA representou 64% do volume utilizado, o Lindame 21% e o Creosoto 11%, o CCB (Borato de Cobre Cromatado), e o Tribromofenato de Sódio, representaram apenas 3% e 1% respectivamente. Cerca de 80% do tratamento é feito sob pressão em autoclave (BRAZOLIN; ROMAGNANO; SILVA, 2003).

3.4.1. Preservantes Preventivos

Os métodos preventivos englobam processos de preservação temporária e de longo prazo, através dos quais a madeira é incorporada por vários produtos químicos ou biológicos sem modificá-la em sua natureza intrínseca ou reagindo com os componentes poliméricos da parede celular (REVISTA DA MADEIRA, 2007).

Para introduzir o produto preservante na madeira é necessária a utilização de um solvente (água ou óleo) que serve de veículo para o mesmo. Dependendo deste os preservantes de madeira podem ser classificados como hidrossolúveis, oleosos e oleossolúveis.

3.4.1.1. *Preservantes Hidrossolúveis*

Os preservantes hidrossolúveis são aqueles que utilizam a água como veículo. Esses preservantes são constituídos de sais metálicos e incluem várias substâncias químicas na sua formulação, como arsênio, cromo, cobre, zinco e flúor. E em geral os preservantes hidrossolúveis, contêm mais de uma substância química na sua formulação. O sistema preservante hidrossolúvel tem ação fungicida e inseticida e é fixado na madeira com a formação de complexos com os componentes poliméricos das paredes celulares. Tal formação de complexos reduz a lixiviação, permanecendo no interior da madeira (MORESCHI, s.d).

Essa classe de preservante envolve um grande número de substâncias, porém, no Brasil, merecem destaque: CCA – (a base de cromo, cobre e arsênio) e o CCB (a base de cromo, cobre e boro) (REVISTA DA MADEIRA, 2007).

Existem três formulações para o CCA, A, B e C conforme apresentado na Tabela 3.3. O CCA tipo C é o mais utilizado devido a apresentar maior resistência a lixiviação e melhor desempenho no campo. O sal seco ou a solução preservante deve ser preparada com pureza acima de 95% em base anidra. Em contato com a madeira os principais componentes do preservante reagem com os carboidratos, lignina e extrativos, tornando-se insolúvel (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

Tabela 3.3. Composição dos três tipos de Arseniato de Cobre Cromatado.

Ingredientes	Arseniato de Cobre Cromatado (porcentagem em peso)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Cromo hexavalente, calculado como CrO_3	66,5	35,3	47,5
Cobre, calculado como CuO	18,1	19,6	18,5
Arsênio, calculado como As_2O_5	16,4	45,1	34,0

FONTE: Adaptado de MORESCHI [s.d.].

Quando o CCA é aplicado na madeira, o cromo provoca a precipitação de grande quantidade de Cu e As e reage com a madeira, tornando os produtos praticamente insolúveis. O Cr é responsável pela fixação e deixa o As, como agente inseticida, e o Cu, como agente fungicida. O As e o Cu permanecem totalmente aderidos às estruturas celulares da madeira. O CCA é largamente utilizado no tratamento de madeiras para uso em campo (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

A introdução do preservante na madeira normalmente é realizada através de processo de vácuo-pressão e, basicamente, consiste de seis etapas: 1. Colocação da madeira na autoclave; 2. Vácuo para a extração da seiva; 3. Enchimento da autoclave com o conservante CCA diluído em água; 4. Pressão para adequada

penetração do produto na madeira; 5. Retirada do líquido remanescente da autoclave; 6. Novo vácuo para retirada do excesso de produto.

3.4.1.2. *Preservantes Oleosos*

Os preservantes oleosos são aqueles produtos que são utilizados diretamente na forma oleosa, não necessitando de um veículo. Os produtos oleosos se caracterizam por uma coloração escura, um odor pronunciado e uma viscosidade elevada à temperatura ambiente. São, em geral, resistentes à lixiviação e muito eficientes como inseticida e fungicida. Em geral, alteram a coloração natural da madeira (REVISTA DA MADEIRA, 2007).

O preservante mais típico desse grupo é o creosoto, que é um composto definido como um produto destilado do alcatrão, proveniente da carbonização da hulha betuminosa. A composição desse preservante é muito complexa, com elevado número de compostos orgânicos (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

Considerado o mais antigo preservante de madeiras, apresentando ótimas propriedades de toxidez a fungos, cupins e a maioria dos perfuradores marinhos. O Creosoto é insolúvel em água e não se fixa na madeira por reações químicas, apenas adere às paredes celulares. Até alguns anos atrás, quando foi proibido no Brasil, pelo Decreto – Lei nº 264 (Ministério da Economia, 1998), esse era o tratamento preferencial, o que deixava a madeira com a cor preta, mas era de muita efetividade (COSTA, 2010).

3.4.1.3. *Preservativos Oleossolúveis*

São produtos que necessitam de um veículo oleoso para penetrar na madeira. Existem diferentes formulações prontas para uso a base de pentaclorofenol, tribromofenol, deltametrina, cipermetrina, quinolanato de cobre entre outras. Essas formulações são preparadas com solventes e aditivos, que variam em função da utilização prevista para o produto comercial preservante. Entre os solventes usados encontram-se o óleo diesel, o querosene ou a água raz. Assim, há produtos que conferem acabamento natural, outros que permitem pintura ou envernizamento e os

que escurecem a madeira. Dentre eles podem-se citar os produtos comerciais Polisten, Penetrol Cupim, Osmocolor entre outros (PIRES (Org.), 2009).

O Pentaclorofenol é um preservante de madeira altamente tóxico aos agentes xilófagos e por ser praticamente insolúvel em água à temperatura ambiente possui grande resistência à lixiviação. A grande desvantagem é que é altamente tóxico ao meio ambiente e prejudicial à saúde humana, por esses motivos, não é mais usado como preservante de madeiras no Brasil e em alguns outros países (MORESCHI, s.d)

3.4.2. Preservantes Curativos

Quando a madeira é submetida ao tratamento com CCA por meio de autoclave, os complexos insolúveis formados com os constituintes da madeira, não penetram totalmente na mesma. Pelo contrário, eles atingem apenas o alburno (PIRES (Org.), 2009).

Os preservantes curativos a base de Boro e Flúor também são hidrossolúveis, mas atuam pelo processo de difusão, se apresentam na forma de bastonetes e de bandagens são bastante utilizados por apresentarem boa solubilidade e penetração na madeira, atingindo também o cerne.

O tratamento curativo ou retratamento é realizado em estruturas que ainda possuem condições de serviço, mas que apresentam um início de deterioração causada pelos agentes nocivos. Quando o ataque é externo o retratamento com a Bandagem é indicado (Figura 3.5.a), esse atinge o alburno da madeira, quando o ataque é interno o retratamento com Bastonetes é indicado (Figura 3.5.b), esse atinge o cerne da madeira, ambos são sólidos.



Figura 3.5. Aplicação dos Preservantes: Em a) Externo na forma de bandagem (*Bioguard*) e b) Interno na forma de bastonetes (*Polesaver*).

Ao entrar em contato com a umidade do poste tanto a Bandagem quanto o Bastonete se dissolvem lentamente liberando os seus ingredientes ativos que impregnam na madeira por difusão interrompendo o processo de apodrecimento e protegendo a madeira sadia de novos ataques.

3.5. Características Físicas e Mecânicas da Madeira

3.5.1. Densidade

Conforme Arganbright (1971 apud SANTOS, 2010, p. 22) a densidade é uma das propriedades físicas mais importantes na caracterização da madeira, devido a sua variação afetar a resistência mecânica e a estabilidade dimensional da madeira. Já em termos químicos, é reflexo da porcentagem dos diferentes constituintes da madeira como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos.

A densidade é influenciada por diversos fatores, tais como: espessura da parede celular, quantidade de vasos, dimensões da fibra, componentes acidentais, sistema de implantação e condução da floresta, Ela varia em função da taxa de crescimento, local de origem, espaçamento, idade, procedência, entre gêneros,

espécies, entre árvores da mesma espécie, e dentro da mesma árvore e ainda no sentido base-topo e medula-casca (FILHO, 1985).

Segundo Ferreira e Kageyama (1978) as indústrias que utilizam a madeira de eucalipto como matéria-prima sempre necessitam de informações básicas quanto as suas qualidades. Por isso, o estudo da variabilidade da densidade é altamente importante para a determinação da adequação da madeira à finalidade desejada.

Foelkel et al. (1992 apud FLORES, 1999, p.13-14) fizeram uma interessante consideração a respeito de que a densidade básica funciona como um bom índice de qualidade da madeira, desde que aplicado para uma mesma espécie. Para muitas das propriedades, não recomendam trabalhar apenas com a densidade, independentemente da espécie. Madeiras de espécies diferentes com a mesma densidade não são tecnologicamente ou anatomicamente semelhantes.

Foelkel et al. (1971) relatam a importância da densidade na determinação das propriedades físicas e mecânicas que caracterizam diferentes madeiras, diferentes árvores de uma dada espécie e diferentes regiões de uma mesma árvore.

Conforme Rezende; Escobedo e Ferraz (1988) podemos utilizar três maneiras para se expressar a densidade da madeira de maneira prática:

- Densidade aparente (ρ_{ap}), é definida como relação entre o peso e o volume, determinada nas mesmas condições de umidade (U), sendo variável conforme o percentual de U.

- Densidade a 0% (ρ_0), é definida como a relação entre peso e volume obtidos para $U = 0$, onde a massa e o volume são obtidos após secagem em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

- Densidade básica (ρ_b), é definida como a relação entre o peso seco para $U = 0$ e volume saturado em água. Conforme a NBR 7190/1997 esta é definida como uma massa específica convencional.

A Equação 3.1 relaciona a densidade a 0% com a densidade básica. Deve-se considerar que esta foi obtida a partir de uma relação experimental, e a precisão dos resultados obtidos depende exclusivamente dessa relação empírica.

$$\rho_b = (\rho_0 - 0,28\rho_0^2) \quad (3.1)$$

Onde:

ρ_0 : densidade a 0% (g/cm^3);

ρ_b : densidade básica (g/cm^3);

Conforme Oliveira; Hellmeister e Filho (2005), na variação radial da densidade básica da madeira, verificam-se diferenças no comportamento entre as espécies de eucalipto (Figura 3.6). Entretanto, a mesma tende a aumentar da medula para o cerne periférico, com redução na região do albúrnio.

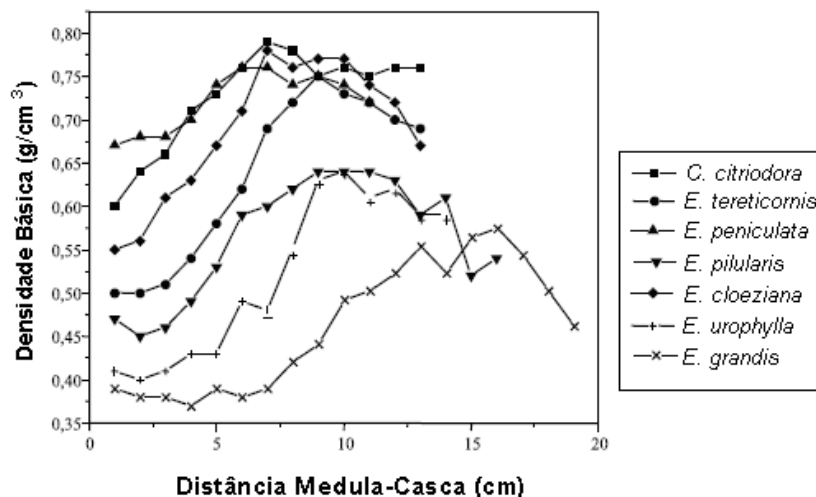


Figura 3.6. Variação da densidade básica da madeira na direção medula-casca de sete tipos de Eucaliptos (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005).

Conforme Oliveira; Hellmeister e Filho (2005), a variação longitudinal da densidade básica da madeira de eucalipto, não é significativa com alguma exceção (Figura 3.7). Ao longo do poste a tendência é de que a densidade aumente no

sentido base topo, mas também são bem variadas e dependem da espécie, também com algumas exceções como para o *Eucalyptus grandis*.

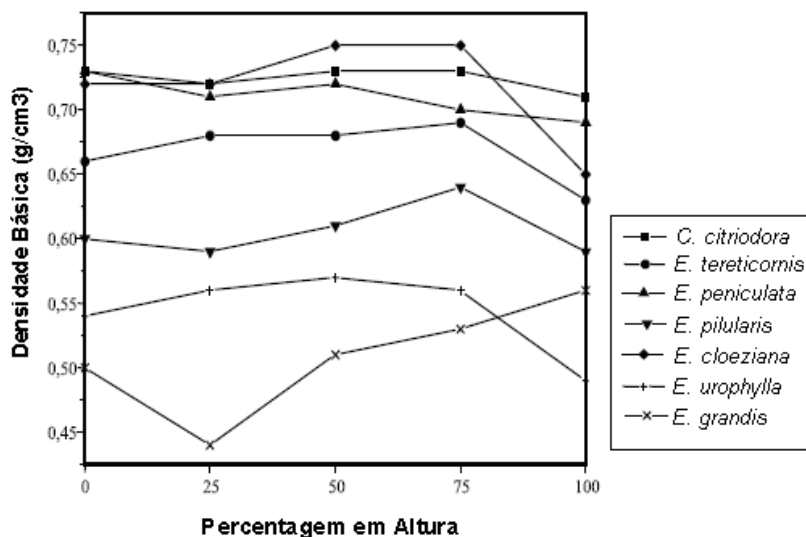


Figura 3.7. Variação da densidade básica da madeira ao longo do tronco de sete tipos de Eucaliptos (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005).

A densidade é uma característica importante da madeira que deveria ser corrigida para unidade de referência, entretanto a norma brasileira NBR 7190/97 é omissa quanto a esta correção.

3.5.2. Ensaio Mecânicos da Madeira

Os postes de eucalipto no Brasil são elaborados conforme a NBR 8456 (ABNT, 1984) e variam em comprimento e diâmetros de base. A norma especifica as características dos postes de eucalipto, classificados em quatro classes de acordo com as características mecânicas e geométricas. Cada letra adotada recebeu um significado para expressar o tipo de poste: L = leve, M = médio, P = pesado e XP = extra pesado. A NBR 8457 (ABNT, 1984), dispõe as dimensões do poste de eucalipto na rede de distribuição.

A Tabela 3.4 apresenta a classificação dos postes de madeira segundo a NBR 8457 (ABNT, 1984), quanto a suas dimensões, onde: "L" (comprimento total do

poste em metros); “Flecha max.” (deslocamento vertical do poste em relação a posição inicial em milímetros) e “e” (comprimento do engastamento em mm).

Tabela 3.4. Dimensões e dados de resistência mínima para postes de eucalipto.

Item	L (m)	Tipo	Resistência Nominal Rn (*daN)	Flecha max. (mm)	Dimensões (mm)						
					e (mm)	Diâmetro (mm)		Perímetro (mm)			
						A 200 mm do topo Dc	Engastamento De	Topo A		Base B	
Mín.	Máx.	Mín.	Mín.	Máx.	Mín.						
1	9	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
5	10	L	150	500	1600	115	145	196	355	459	666
6		M	300			146	178	228	452	562	767
7		P	600			179	219	268	556	691	892
8		XP	1000			220	270	309	685	851	1021
9	10,5	L	150	525	1650	115	145	203	355	459	690
10		M	300			146	178	236	452	562	793
11		P	600			179	219	278	556	691	925
12		XP	1000			220	270	314	685	851	1038
13	11	L	150	550	1700	115	145	211	355	459	716
14		M	300			146	178	245	452	562	823
15		P	600			179	219	288	556	691	958
16		XP	1000			220	270	320	685	851	1059

* (1 daN = 10 N = 1,02 kgf);

Fonte: NBR 8457 (ABNT, 1984).

A Tabela 3.5 apresenta uma comparação entre algumas características físicas e mecânicas relacionadas a seis espécies de eucaliptos utilizadas na fabricação de postes. São apresentados, valores mínimos para o poste ser considerado aceitável nos testes de resistência à flexão. Quanto ao limite de resistência à flexão, propriedade relevante no uso de postes de madeira, verifica-se as espécies *E. rostrata* e *E. alba* com valores entre 1.150 e 1.247 daN/cm² e *E.*

paniculata e *C. citriodora* com valores acima de 1.700 daN/cm² para a madeira a 15% de umidade, conforme NBR 8456 (ABNT, 1984).

O módulo de elasticidade à flexão é outra propriedade que varia significativamente entre essas espécies. Para as duas primeiras, os valores ficam entre 101.600 e 131.300 daN/cm², e, para as outras duas, entre 181.900 e 201.800 daN/cm².

Cabe salientar que valores elevados de resistência mecânica são importantes em postes de madeira, estruturas que estão constantemente sujeitas a esforços ao longo de sua vida útil.

Tabela 3.5. Propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de eucaliptos utilizados na fabricação de postes.

Espécie de Eucalipto	Características Físicas					Características Mecânicas						
	Massa Específica Aparente (15% Umidade) g/cm ³	Retratibilidade				Limite de Resistência à Flexão		Índice de Rigidez (L/f)	Módulo de Elasticidade à Flexão		Cisalhamento (da N/cm ²)	Dureza Janka (da N/cm ²)
		Radial (%)	Tangencial (%)	Volumétrica (%)	Coefficiente de Retratibilidade	Madeira Verde (daN/cm ²)	Madeira a 15% de Umidade		Módulo (daN/cm ²)	Limite de Proporcionalidade (da N/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

Fonte: NBR 8456 (ABNT, 1984).

A Tabela 3.6 apresenta os parâmetros característicos, que são considerados para o dimensionamento dos postes de eucalipto conforme NBR 8456 (ABNT, 1984).

Tabela 3.6. Parâmetros para especificação do poste novo de eucalipto.

	NBR 8456/1984	Conversão
Limite de Resistência a Flexão	$\sigma_f = 850 \text{ daN/cm}^2$	$\sigma_f \approx 85 \text{ N/mm}^2$ ou 85 MPa
Módulo de Elasticidade a Flexão	$E = 130000 \text{ daN/cm}^2$	$E \approx 13000 \text{ N/mm}^2$ ou 13000 MPa
Massa Específica Aparente	$\rho = 0,9 \text{ kg/m}^3$	
Coefficiente de Segurança Mínimo	$K = 3$	
Coefficiente de Árvore	$5 \text{ mm/m} < \alpha < 10 \text{ mm/m}$	

Fonte: NBR 8456 (ABNT, 1984).

3.5.2.1. *Ensaio em Postes de Madeira*

Os ensaios destrutivos são técnicas utilizadas nos ensaios mecânicos que se caracterizam pela inutilização total ou parcial da peça, ou seja, o material não pode mais ser utilizado na mesma função que ocupava anteriormente ao ensaio.

A NBR 8456 (ABNT, 1984) também estabelece um padrão de qualidade para ensaio de flexão segundo dois requisitos básicos. O primeiro requisito indica que o poste deve apresentar carga de ruptura não inferior a duas vezes a carga nominal. O segundo requisito diz respeito à elasticidade, estabelece que o poste não deve apresentar flechas superiores a 5% do comprimento nominal do poste.

No Brasil o modo pelo qual devem ser realizados os testes de flexão é descrito pela NBR 6231 (ABNT, 1980), onde o material é submetido ao método denominado viga engastada em balanço.

O ensaio de flexão consiste na aplicação progressiva de uma força com velocidade constante no poste, até que ocorra a ruptura. É um ensaio destrutivo, onde o resultado é o valor da força aplicada pela deformação máxima. A carga parte de um valor inicial igual a zero e aumenta lentamente até a ruptura do corpo de prova (NBR 6231, 1980).

Nos postes, o ensaio de flexão é realizado na estrutura como um todo (Figura 3.8), conforme determina a NBR 6231 (ABNT, 1980).

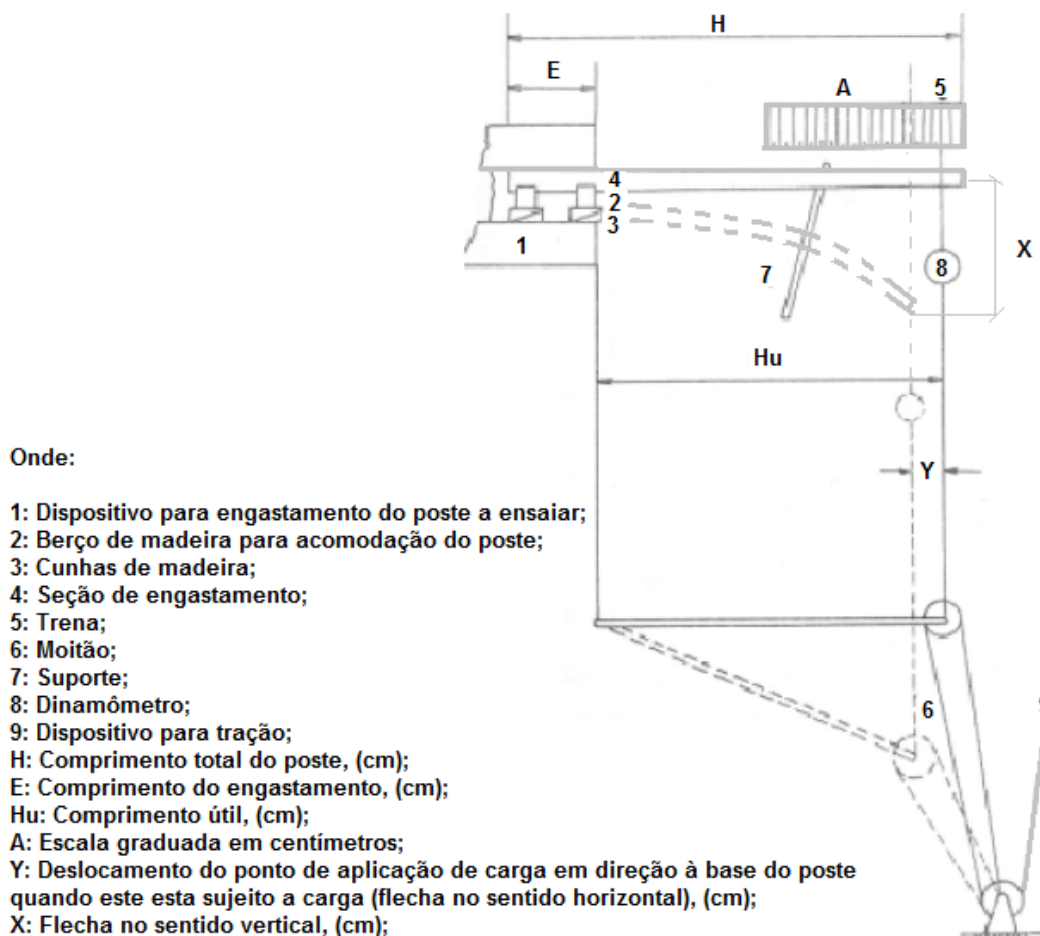


Figura 3.8. Esquema de um dispositivo para testes de flexão dinâmica em postes de madeira segundo NBR 6231 (ABNT, 1980).

3.5.2.2. Relação da Densidade com as Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas são as que mais despertam interesse na madeira, entre elas estão as propriedades de elasticidade e resistência como, módulo de elasticidade a flexão (MOEf) e limite de resistência a flexão (MORf) (KRETSCHMANN, 2010).

A utilização eficiente de estruturas de qualquer material depende principalmente da compreensão do seu comportamento mecânico. Em um material

tão caracteristicamente heterogêneo como a madeira, os valores locais das tensões e deformações podem diferir sensivelmente (EVANS et al., 2000). Assim a determinação das propriedades mecânicas na madeira, como elasticidade e resistência, deve ser feita de forma criteriosa (KRETSCHMANN, 2010).

Melo et al. (2010) avaliaram a madeira de *Araucaria angustifolia* onde verificaram que a massa específica é reconhecidamente uma das propriedades que mais fornece informações a respeito das características da madeira, por estar relacionada com sua resistência e rigidez.

Autores como Kretschmann (2010) e Evans et al. (2000) relacionam a resistência mecânica com as características naturais da madeira. Variações no tamanho dos poros e na espessura das paredes da célula fazem com que algumas madeiras tenham mais substâncias por unidade de volume do que outras e, portanto, maior densidade. A presença de extrativos e o teor de umidade, também podem influenciar nas propriedades mecânicas da madeira.

A densidade é estatisticamente relacionada com a resistência mecânica da madeira e é um bom índice de dureza, resistência e outras propriedades mecânicas (PANSHIN et al., 1980 apud EVANS et al., 2000, p. 77). Conforme Zhang (1997) o MOR é a propriedade mecânica que mais relaciona-se, quase que de forma linear, com a densidade. Já o MOE é pouco relacionado, pelo menos linearmente. Em média, a densidade é capaz de explicar 45% da variação do MOR, e em média, apenas 30% da variação do MOE.

Propriedades mecânicas de diferentes espécies de madeira foram avaliadas por Zhang (1994), que propôs para uma relação linear prever propriedades mecânicas como MOR e MOE por meio da densidade. Análises do gênero *Eucalyptus* mostram uma relação linear entre as propriedades mecânicas e a densidade. Seus resultados indicam que as propriedades mecânicas em relação a densidade, varia notavelmente com a classificação (categoria) da madeira.

Armstrong (1984) avaliou o efeito da densidade sobre o MOR e o MOE em flexão estática em madeiras comercialmente importantes para um grande número de

espécies. A regressão logarítmica de densidade contra a propriedade mecânica foi calculada por mínimos quadrados para cada conjunto de dados. Onde a função logarítmica foi vista como válida para descrever a densidade com relação às propriedades mecânicas para madeiras de várias espécies de “hardwoods” e “softwoods”, em uma base mundial. A relação da densidade com as propriedades mecânicas como MOR e MOE, avaliados mostraram um alto nível de confiança.

A NBR 8456 (1984) aborda informações das propriedades físicas e mecânicas da madeira, parametrizando a resistência e o módulo de elasticidade à flexão dentro das espécies de eucalipto individualmente, considerando suas densidades aparentes. Mas, conforme NBR 8456 (Proposta de Revisão - Atualização da mesma norma) a resistência e o módulo de elasticidade à flexão estática devem ser parametrizados, considerando-se nove classes de densidade básica como apresentado na Tabela 3.7, para cada série de densidade.

Tabela 3.7. Variação da resistência e o módulo de elasticidade à flexão estática parametrizados, considerando-se as classes de densidade básica.

Classe de densidade de massa básica	Densidade básica kg/m ³	Resistência à flexão estática MPa	Módulo de elasticidade à flexão estática MPa
1D	400 a 449	44	8.610
2D	450 a 499	50	9.770
3D	500 a 549	57	10.940
4D	550 a 599	63	12.120
5D	600 a 649	69	13.310
6D	650 a 699	75	14.510
7D	700 a 749	81	15.720
8D	750 a 799	88	16.930
9D	800 ou mais	94	18.150

Fonte: NBR 8456 (Proposta de Revisão).

3.6. Técnicas Analíticas Utilizadas

3.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura é uma técnica que utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional. Os aparelhos mais modernos permitem aumentos de cerca de até 300.000 vezes ou mais, para a maior parte de materiais sólidos. É um aparelho que pode fornecer de forma rápida informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos presentes em uma amostra sólida (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Conforme Segantini e Dantas (2006) o MEV é amplamente utilizado para polímeros e fibras. Utiliza-se para avaliação de fraturas e desgaste de fibras, detecção de defeitos de fabricação, avaliação de tratamentos superficiais e estudo da morfologia estrutural. No caso dos materiais celulósicos pode ser utilizado para avaliação do tipo de fibra.

De acordo com Reme; Johnsen e Helle (2002) as dimensões transversais em amostras de madeira têm sido medidos por microscopia óptica, mas o procedimento é muito demorado. Então, os autores propõem que a Microscopia Eletrônica de Varredura seja utilizada para obter as dimensões das células para grandes populações em madeira com cortes transversais, mapeando parâmetros como espessura de parede e perímetro de fibras dentro e entre os anéis de crescimento.

Carrasco; Johnsen e Oyaas (2010) apresentaram uma abordagem onde o microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo e uma análise de imagem computadorizada foram aplicados para quantificar as características da parede da fibra de celulose modificadas mecanicamente, quimicamente ou enzimaticamente.

Nesse estudo as imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura foram utilizadas para correlacionar a morfologia da madeira de eucalipto, nesse caso o diâmetro do lúmen das fibras, com as densidades básica e aparente obtidas em laboratório, utilizadas para complementar os dados de avaliações de resistência mecânica de estruturas de madeira.

3.6.2. EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia

A Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) consiste na medida de raios-X característicos emitidos de uma região da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As linhas de raios-X característicos são específicas do número atômico de cada elemento presente na amostra. O seu comprimento de onda ou sua energia podem ser utilizados para identificar o elemento que está emitindo a radiação (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

É possível realizar uma análise semi-quantitativa da amostra e obter-se a concentração elementar a partir de relações de intensidade de raios-X da amostra. Esta técnica já é bastante difundida na área biológica (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Helsen e Hacala (2006) analisaram a formação de aglomerados de CCA, em resíduos de madeira tratada provenientes de postes telefônicos e de eletricidade, após a carbonização. Os aglomerados presentes nas amostras foram investigados pelo MEV e a distribuição dos elementos por EDS.

Pedersen e Ottosen (2006) avaliaram também por MEV/EDS mudanças na composição química de cinzas provenientes da combustão de madeira tratada com CCA, antes de após o processo de extração.

Nesse estudo o EDS foi utilizado para análise semiquantitativa dos metais que compõe o preservante preventivo CCA e o Flúor presente no preservante curativo, assim como análises em madeiras tratadas com Creosoto.

3.7. Inspeção de Postes de Eucalipto

As estruturas de madeira são amplamente utilizadas como postes nas concessionárias de distribuição de energia elétrica do estado do Rio Grande do Sul. A AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A., detentora da concessão de distribuição de energia elétrica na região Centro-Oeste do Rio Grande do Sul, possui em torno de 80% de postes de madeira na sua rede (CRUZ, 2011). Numa empresa

como a AES Sul, que possui cerca de 750 mil postes em serviço, uma avaliação dessas estruturas em serviço torna-se de extrema importância.

A metodologia para a inspeção apresentada nesse trabalho foi validada por Vidor (2011) baseada em normas de inspeção nacionais e internacionais como, OSHA (2003) e ASTM D390 (1996). Primeiramente é feita uma inspeção visual da estrutura, à procura de rachaduras ou falhas que comprometem a sua estrutura. Após, com um martelo é realizada a inspeção por percussão, a resposta sonora identifica regiões com apodrecimento interno. Em seguida, é realizada uma escavação no solo, ao redor do poste até uma profundidade de aproximadamente trinta centímetros, para a verificação externa da estrutura em sua região de engastamento, na linha do solo. Logo após, é realizada uma raspagem da superfície, na região externa, a fim de determinar o volume de madeira apodrecida. Uma motofuradeira com uma broca de 12 x 400 mm é utilizada para realizar um furo na linha do solo, perpendicular ao eixo do poste de modo a prosseguir com a inspeção interna. Com uma escala graduada é quantificado o volume de madeira interna ainda em boas condições. A partir dos dados obtidos os postes são classificados em quatro classes conforme indicado no Quadro 3.1, que define seu estado de deterioração e os procedimentos a serem adotados.

Quadro 3.1. Classificação para postes inspecionados.

Classe	Estado do Poste	Procedimento
1	Poste sadio	Nenhum
2	Início de apodrecimento	Retratar interno/ externo
3	Apodrecimento avançado	Retratar interno/ substituir
4	Poste comprometido	Substituir

Fonte: Adaptado de VIDOR, 2011.

Nesse estudo os dados obtidos com o MEV/EDS, comportamento do tratamento químico e a caracterização morfológica das estruturas de madeira podem vir a complementar os dados obtidos com a inspeção, e esses possibilitar uma avaliação real da deterioração desses postes na rede.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Amostragem dos Postes de Madeira

Aproximadamente 800 postes foram retirados da rede elétrica para execução de testes de flexão estática dos mais de 10.000 postes inspecionados em campo. Os testes visam à verificação da resistência mecânica residual por meio de testes de flexão estática aliados a medição da densidade. Porém somente 338 postes foram realmente ensaiados devido à quebra e má conservação dos restantes. A seleção dos postes coletados para os testes de resistência mecânica foi baseada na sua classificação (estados de deterioração), distribuídos conforme apresentado na Tabela 4.1 onde a classe 1 corresponde ao poste sadio e a classe 4 ao poste com deterioração mais elevada. Foram escolhidos postes tratados com CCA e Creosoto. Além destes, mais três postes novos sem tratamento químico e cinco postes novos com tratamento químico foram ensaiados.

Tabela 4.1. Quantidade de postes submetidos aos testes de flexão.

Postes Retirados de Serviço				Postes Novos			Total
Classe				Sem Classe	Com Tratamento	Sem Tratamento	
1	2	3	4				
CCA							
61	52	30	33	24	5		205
Creosoto							
32	26	21	37	14			130
Subtotal							
93	78	51	70	38	5	3	338

Ensaio padrão para obtenção da densidade da madeira e análises de Microscopia Eletrônica de Varredura foram realizados após a análise dos resultados

dos testes de flexão, contemplando postes de idade, espécie e classe de deterioração diferentes. Na Figura 4.1 é apresentado o processo da realização dos testes e a quantidade de postes envolvida em cada etapa, tanto para postes novos como para postes retirados da rede elétrica.

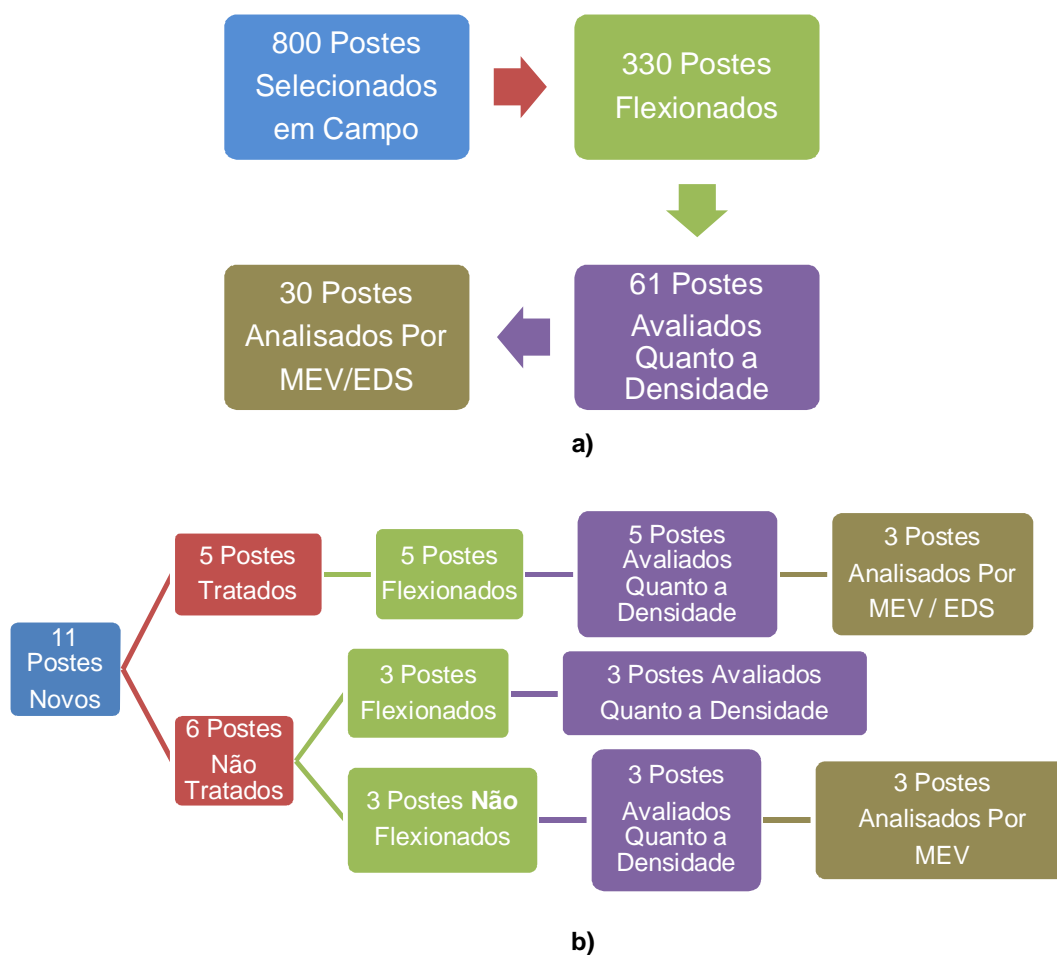


Figura 4.1. Fluxograma da quantidade de postes e dos ensaios realizados. Em a) Postes retirados da rede elétrica e b) Postes Novos.

Os 69 postes flexionados, em que também foram medidas as densidades foram selecionados conforme a sua classificação:

- 19 postes (28%) classificados como classe 1;
- 18 postes (26%) classificados como classe 2;
- 12 postes (17%) classificados como classe 3;
- 12 postes (17%) classificados como classe 4;

-8 postes novos (12%), três sem tratamento químico e cinco com tratamento químico, todos flexionados.

Os três postes novos sem tratamento químico são das espécies *E. grandis*, *E. saligna* e *C. citriodora*. Outros três postes novos não flexionados referentes às mesmas espécies foram utilizados para a determinação do diâmetro do lúmen das fibras por Microscopia Eletrônica de Varredura.

4.2. Coleta dos Postes e Preparo das Amostras

Os postes selecionados para coleta receberam uma identificação feita com tinta vermelha com a indicação “PROJ AES PUC” além do número de controle da base de dados (Figura 4.2). O objetivo dessa identificação foi facilitar a sua localização pelas equipes de manutenção da AES Sul no momento da retirada desses postes. A identificação numérica também possibilitou relacionar os dados de classificação com os dos ensaios mecânicos. Os 338 postes foram encaminhados para o Campus da PUCRS em Viamão, local onde foi instalado o campo de testes utilizado nos ensaios de flexão.



Figura 4.2. (a) e (b) - Postes identificados para coleta e realização de testes.

Após os ensaios de flexão estática, foram retiradas seções de aproximadamente 50 cm da região do engastamento de alguns postes para posteriormente serem realizados os testes de densidade. A partir de cada seção foram confeccionados na marcenaria CPs de 15x5x5 cm sendo retirados quatro CPs de cada seção do poste, conforme representado na Figura 4.3.

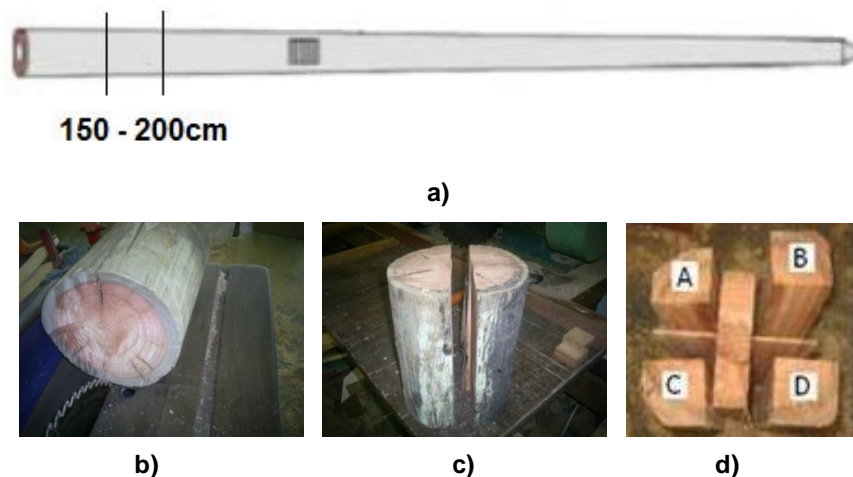


Figura 4.3. Etapas da preparação dos CPs para testes de densidade. Em a) representação do poste e onde foram retiradas as seções, b) Seção inteira para corte em duas partes, c) Corte em duas partes e d) CPs para densidade.

Para as análises com o MEV/EDS de cada seção foram cortados discos de aproximadamente 2 cm de espessura. Posteriormente, foram cortados em filetes para após em laboratório serem retiradas pequenas amostras para as análises. Para os postes novos, as amostras para MEV/EDS foram retirados da medula, alburno e cerne. Já para os postes retirados de serviço as amostras foram retiradas apenas do alburno, onde o preservante está concentrado. Para os postes novos sem tratamento as amostras foram retiradas apenas com o corte transversal, para a determinação do diâmetro do lúmen das fibras. Para os postes novos com tratamento foram retiradas amostras apenas com o corte tangencial, para identificação do preservante e para os postes retirados de serviço os dois cortes foram realizados. As etapas de cortes na marcenaria são apresentadas na Figura 4.4.

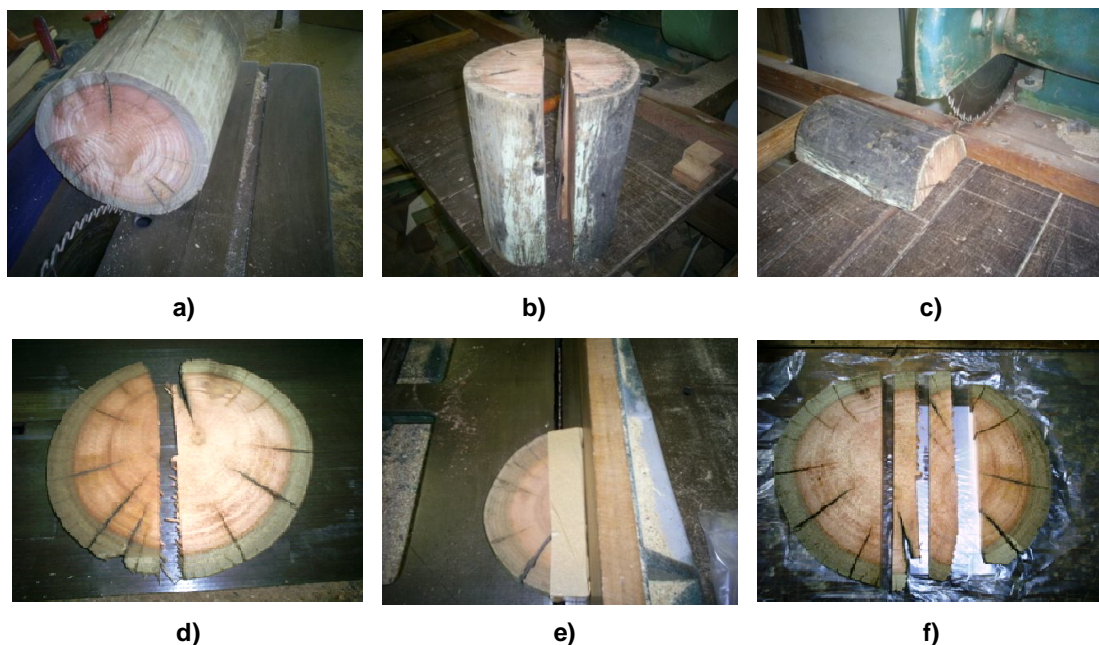


Figura 4.4. Etapas da preparação dos CPs para MEV/EDS. Em a) Seção inteira para corte em duas partes, b) Corte em duas partes, c) Corte em discos, d) Discos cortados das duas metades e) Retirada dos filetes centrais, f) Filetes cortados.

Primeiramente, analisou-se a variação da densidade aparente ao longo de 3 postes novos de *E. grandis*, *E. saligna* e *C. citriodora*, (Anexo A). Verificou-se que a densidade aparente não varia de uma forma uniforme, ocorrendo algumas oscilações para as espécies de eucaliptos estudadas. Em função disso, optou-se por retirar as amostras de uma mesma região para todos os postes.

As amostras para análises com o MEV/EDS foram coletadas desta forma, uma vez que todos os postes analisados foram retirados de serviço para realização de ensaios destrutivos de flexão estática. A coleta não destrutiva das amostras foi realizada em alguns postes em serviço com o auxílio de uma broca oca adaptada a um perfurador de madeira. Este equipamento permitiu a retirada de cilindros (bagnetas) com diâmetro e comprimento variando conforme o tipo e a profundidade da broca. A broca oca consiste em um tubo de metal cilíndrico, oco e estriado em hélice, capaz de produzir uma bagnetas à medida que penetra no tronco conforme apresentado na Figura 4.5.



Figura 4.5. Método de amostragem não destrutivo utilizado para obtenção de baguetas de madeira de Eucalipto. Em a) Broca adaptada a um perfurador; e b) Bagueta obtida pelo método não destrutivo.

4.3. Testes de Resistência Mecânica

A área de testes, do Campus da PUCRS de Viamão, foi utilizada para a realização dos testes mecânicos de flexão nos postes conforme o “layout” representado nas Figuras 4.6 e 4.7.

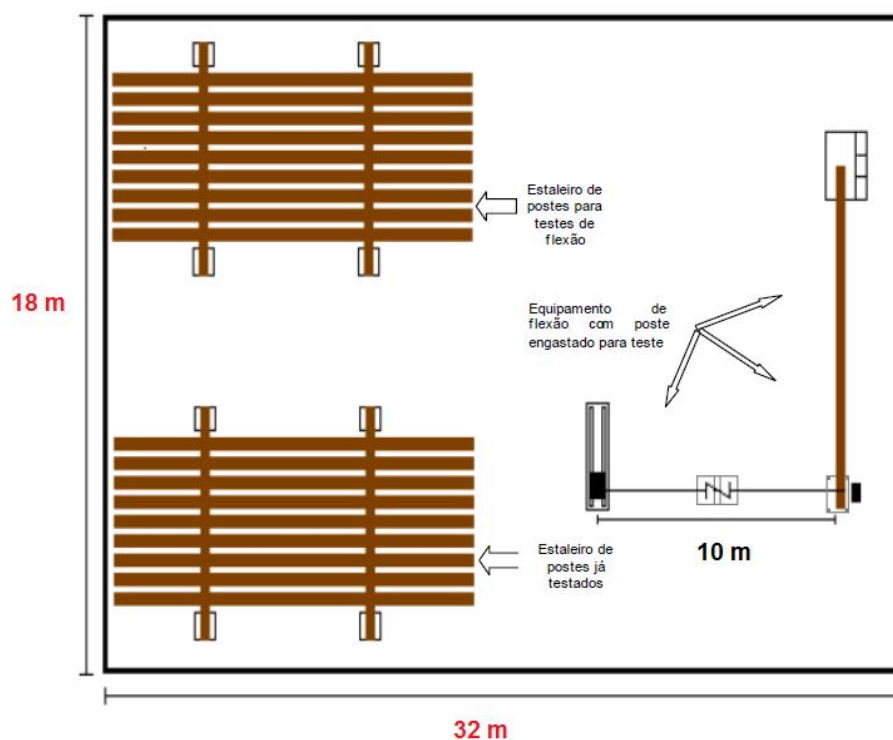


Figura 4.6. Layout da área de testes de flexão (Adaptado de, Alencastro, 2010).

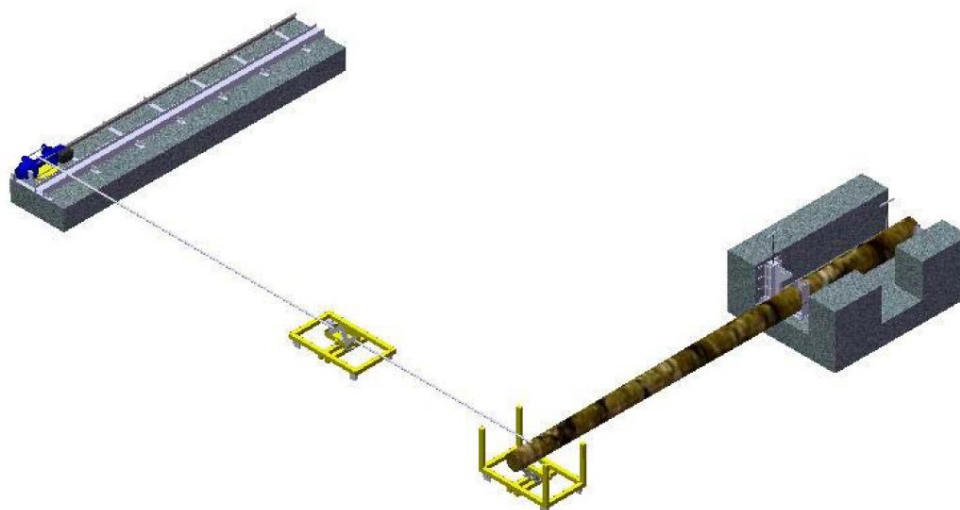


Figura 4.7. Esquema do sistema de flexão dos postes (Alencastro, 2010).

O poste de madeira, com comprimentos entre 8 e 12 m, é devidamente engastado em sua base, e tem o topo apoiado sobre um suporte móvel, onde então é envolto por um cabo de aço a 20 cm do topo, região na qual é flexionado (Figura 4.7). Este cabo é preso na outra extremidade a uma célula de carga, que também é presa na outra extremidade por outro cabo, o mesmo é preso a um motor elétrico localizado sob um suporte deslizante, tracionando o poste em velocidade constante. O sistema de tração (motor e guincho) é apoiado sob uma estrutura deslizante, o que permite o deslocamento horizontal e possibilita o ajuste para cada comprimento de poste em teste.

Os testes de flexão, realizados nos postes de madeira são do tipo engastado e trata-se de um ensaio destrutivo, que consiste no carregamento de um corpo de prova engastado submetido a um momento fletor, sendo medida durante a sua execução a força aplicada e a deflexão da barra (Arruda, 2006).

Na falta de norma específica para postes usados, foi seguida a metodologia e os parâmetros descritos nas NBRs 6231 (Postes de Madeira – Resistência a Flexão) e 8456 (Postes de Eucalipto Preservados para Redes de Distribuição de Energia Elétrica) que se referem a postes novos.

O teste de flexão é iniciado com o poste perfeitamente engastado no equipamento e fixo de forma a não executar qualquer movimento neste ponto no momento da flexão. O comprimento do engastamento varia conforme o comprimento do poste, sendo calculado pela equação 4.1:

$$E = 0,1 \times H + 0,6m \quad (4.1)$$

Onde:

E = comprimento do engastamento em metros;

H = comprimento nominal do poste em metros;

A carga é aplicada continuamente a 20 cm do topo do poste, até que ocorra sua ruptura, de tal forma que a sua velocidade de deformação seja constante e igual ao valor dado pela equação 4.2:

$$V = \frac{K \times h_u^2}{C} \quad (4.2)$$

Onde:

V = velocidade de deformação em cm/min;

h_u = altura útil do poste em cm;

C = circunferência na seção de engastamento em cm;

K = constante 0,00146;

São medidas as flechas “X” e “Y”, sendo “X” representada pelo deslocamento do ponto de aplicação da carga em direção ao esforço (ponto de tração) e “Y” do ponto de aplicação da carga em direção a base do poste (área engastada) em consequência da deformação do mesmo.

O limite de resistência da madeira ou MORf na seção de engastamento é calculado pela equação 4.3:

$$\sigma_F = \frac{32\pi^2 \times p \times l}{C^3} \quad (4.3)$$

Onde:

σ_F = limite de resistência da madeira à flexão na seção de engastamento (MORf) em MPa;

p = carga de ruptura em N;

l = distância da seção de engastamento ao ponto de aplicação da carga menos o valor de “ Y ” em cm;

C = circunferência na seção de engastamento em cm;

O módulo de elasticidade da madeira é calculado pela equação 4.4:

$$E_f = \frac{64 \times \pi^3 \times l^3}{3 \times C^3 \times c} \times \frac{\Delta_p}{\Delta_x} \quad (4.4)$$

Onde:

E_f = módulo de elasticidade da madeira (MOEf) em (MPa);

l = distância da seção de engastamento ao ponto de aplicação da carga menos o valor de “ Y ” em cm;

p = carga de ruptura em N;

C = circunferência na seção de engastamento em cm;

c = circunferência no ponto de aplicação de carga em cm;

X = flecha no sentido vertical em cm;

Na Figura 4.8 é possível verificar a região onde o poste é engastado para a realização do ensaio de flexão e também a deformação sofrida por um dos postes submetidos ao ensaio.



a)

b)

Figura 4.8. a) e b) – Teste de flexão de poste retirado da rede.

4.4. Determinação da Densidade da Madeira

Para a avaliação da densidade os CPs foram mantidos isolados com monitoramento de umidade relativa do ar e temperatura com auxílio de um termohigrômetro (Incoterm), onde a umidade relativa do ar para esses testes é mantida igual ou inferior a 65% e a temperatura em torno de 20°C, conforme orientações da NBR 7190/97, para garantir um limite de 12% de umidade nos CPs.

Os CPs sofreram secagem em uma estufa com circulação e renovação de ar, a uma temperatura de 103°C ± 2°C. Os CPs foram pesados com o auxílio de uma balança analítica a cada intervalo de 1h, até atingirem o equilíbrio, que se dá com uma variação inferior a 0,5% em relação à última medida, o que ocorreu após nove horas em estufa.

A densidade a 0% de umidade dos CPs foi determinada pelo método estereométrico, onde o volume foi obtido por meio das dimensões dos CPs, e pesados após 9h em estufa. Dividindo o peso do CP seco pelo volume calculado com as dimensões medidas com o paquímetro, se obteve os valores de densidade a 0% (ρ_0) de cada corpo de prova.

Utilizando-se a Equação 3.1, obteve-se o valor da densidade básica para cada corpo de prova analisado.

A densidade aparente foi determinada pelo método estereométrico, onde o volume foi obtido por meio das dimensões dos CP's, que após foram pesados, dividindo a massa do corpo de prova pelo volume, (ambos úmidos) calculado com as dimensões medidas com o paquímetro, se obteve os valores de densidade aparente de cada corpo de prova.

4.5. Análise MEV/EDS

A análise microestrutural foi realizada utilizando microscópio eletrônico de varredura, modelo XL 30 Philips. A combinação do MEV com EDS pode oferecer informações importantes sobre o mapeamento e a detecção de produtos no interior da madeira como a distribuição dos metais (Cr, Cu e As) que compõe o preservante CCA e o Flúor, assim como a morfologia de cada madeira estudada.

Para realização do corte transversal as amostras foram submersas em nitrogênio líquido, que possibilitou posteriormente uma quebra mais homogênea da amostra. Então, as amostras foram acondicionadas sob vácuo, fixadas sobre suporte metálico e, em seguida, submetidas ao processo de metalização com Au e Pd, realizado para aumentar a condução elétrica da amostra.

Imagens no modo BSE em aumentos próximos à 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 vezes foram utilizadas para comparar a morfologia com a densidade. Análises por EDS serviram para observar o comportamento dos componentes do preservante em função da posição na madeira.

Posteriormente, todas as amostras com corte transversal foram trabalhadas no programa *imageJ*, que possibilita com aumentos na imagem efetuar medições dos componentes da estrutura da madeira, nesse caso do diâmetro do lúmen das fibras. Após as medidas, o programa reporta os dados a um programa estatístico que determina parâmetros de média, desvio padrão e outras informações necessárias. Posteriormente, os resultados das medições foram analisados quanto a suas correlações com outros dados por meio de um pacote estatístico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Testes de Resistência Mecânica

Nas Figuras 5.1.a e b observa-se o comportamento entre as propriedades mecânicas residuais (MOR_f e MOE_f), obtidas nos ensaios de flexão estática em função das classes, que correspondem a diferentes estados de deterioração da madeira de 338 postes, inspecionados em campo. Considerando somente a média dos valores, verifica-se uma redução do MOR_f (Figura 5.1.a), com o aumento da classe, ou seja, com o decréscimo da qualidade dos postes testados. O mesmo ocorre para o MOE_f em função da classe dos postes testados, conforme mostra a Figura 5.1.b.

Durante as inspeções foram encontrados postes antigos e bem conservados, a maioria tratado com creosoto. A Figura 5.1.c apresenta o comportamento do valor médio do MOR_f para postes nas quatro diferentes classes de deterioração e para os dois tipos de tratamento utilizados, onde 115 postes foram tratados com Creosoto e 176 com CCA. Fica evidente uma maior resistência nos postes tratados com Creosoto quando comparando com os tratados com CCA. Verifica-se também, um decréscimo do MOR_f conforme ocorre o aumento da classe de deterioração, principalmente para o Creosoto. O mesmo ocorre para o MOE_f nos 116 postes de Creosoto e 169 postes de CCA ensaiados, conforme mostra a Figura 5.1.d. Porém uma análise mais criteriosa, nesse caso deve-se levar em consideração que quando o Creosoto estava sendo utilizado como preservante para postes, a madeira utilizada na época era obtida de espécies de alta densidade, conforme foi observado nas medidas de densidade apresentadas no Anexo C. Esse fator pode estar contribuindo para que postes tratados com Creosoto ainda estejam na rede e apresentem uma boa resistência residual média.

Resultados incoerentes foram verificados para alguns postes testados com valores de MORf, e principalmente de MOEf (Figura 5.1.a e b), elevados para postes com avançada deterioração (classe 4). Tais postes apresentaram maior resistência residual (MORf > 35 MPa) que alguns postes classificados como saudáveis (classe 1, MORf < 18 MPa). Dentro de uma mesma classe, também foram verificadas variações significativas com elevados desvios padrão para MORf e MOEf, indicando uma elevada variação de resistência residual dos postes em serviço. Esse comportamento sugere uma grande variabilidade de resistências mecânicas dos postes na rede estudada, que pode estar relacionada ao uso de diferentes espécies de eucaliptos de densidades muito distintas. Outros autores como, Lobão et al. (2004), reportaram uma influência significativa da densidade aparente na resistência mecânica da madeira.

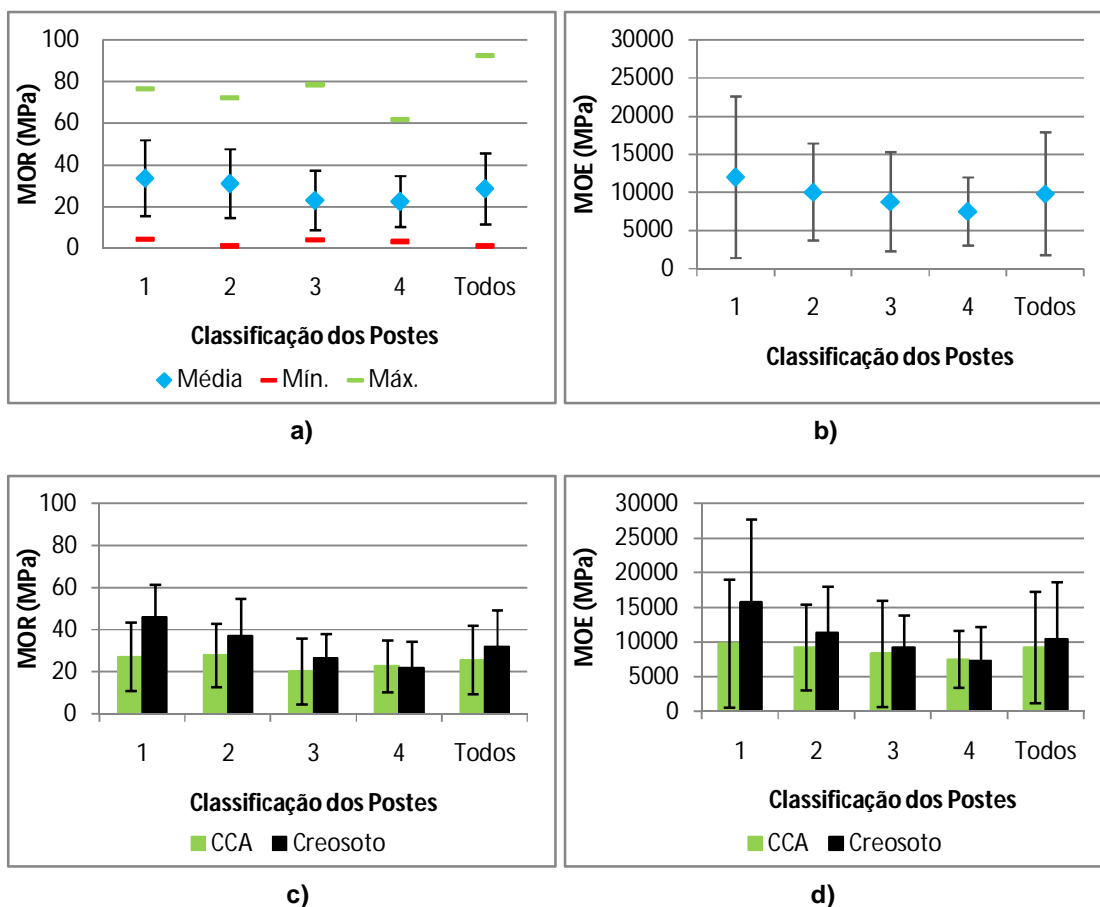


Figura 5.1. Variação média do Limite de Resistência à Flexão (MORf) e módulo de elasticidade à flexão (MOEf) onde, a) e b) Postes retirados de serviço conforme seu estado de deterioração, c) e d) Postes retirados de serviço conforme seu tratamento e estado de deterioração.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados das correlações de Pearson entre as propriedades mecânicas e os diferentes estados de deterioração de 298 postes de madeira. Verifica-se uma forte correlação entre as duas propriedades mecânicas estudadas (0,72) e uma fraca correlação entre as propriedades mecânicas e as diferentes classes de deterioração (-0,28 para MORf e -0,22 para MOEf), resultado que corrobora com os dados apresentados anteriormente.

Tabela 5.1. Correlações de Pearson entre as propriedades mecânicas e o estado de deterioração de 298 postes de madeira.

Matriz de Correlação: Pearson			
	MOR	MOE	Classe
MOR	1		
MOE	0,72	1	
Classe	-0,28	-0,22	1
Matriz de <i>p</i>-valores			
	MOR	MOE	Classe
MOR	1		
MOE	0	1	
Classe	1,01E-06	0,00016	1

Como os dados de inspeção não apresentaram uma correlação satisfatória com as propriedades mecânicas, 69 postes foram selecionados para investigar a densidade afim de verificar a influência dessa nas propriedades mecânicas da madeira. No Anexo B são apresentadas as correlações de Pearson de todos os postes ensaiados e no Anexo C são apresentados todos os dados de densidade e demais informações sobre esses postes.

A Figura 5.2, apresenta o módulo de ruptura em função da densidade para 61 postes retirados de serviço para cada uma das quatro classes, ou seja, postes com semelhantes estados de deterioração. Verifica-se correlações lineares positivas entre o MORf e a densidade da madeira, indicando um risco maior para os postes de menor densidade, uma vez que possuem menor resistência residual. Essas relações

ficam evidenciadas com a correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade apresentada na Tabela 5.2. Observa-se, valores em torno de 0,70 para os postes retirados de serviço, comprovados pelo *p-valor*, sendo todos inferiores a 0,05, ou seja, menores que o nível de significância de 5%.

Analisando a Figura 5.2.e, que apresenta o comportamento dos 8 postes novos frente ao teste de flexão, verifica-se a mesma tendência de correlação linear positiva entre MOR_f e a densidade da madeira. Essa correlação fica evidenciada com a correlação de Pearson apresentada na Tabela 5.2 com valor de 0,94. A forte correlação é comprovada pelo *p-valor*, inferior a 0,05, ou seja, menor que o nível de significância de 5%. Cabe destacar que mesmo sendo novos a maioria desses postes já apresenta um limite de resistência a flexão menor do que 85 MPa, o mínimo exigido pela NBR 8456 (1984).

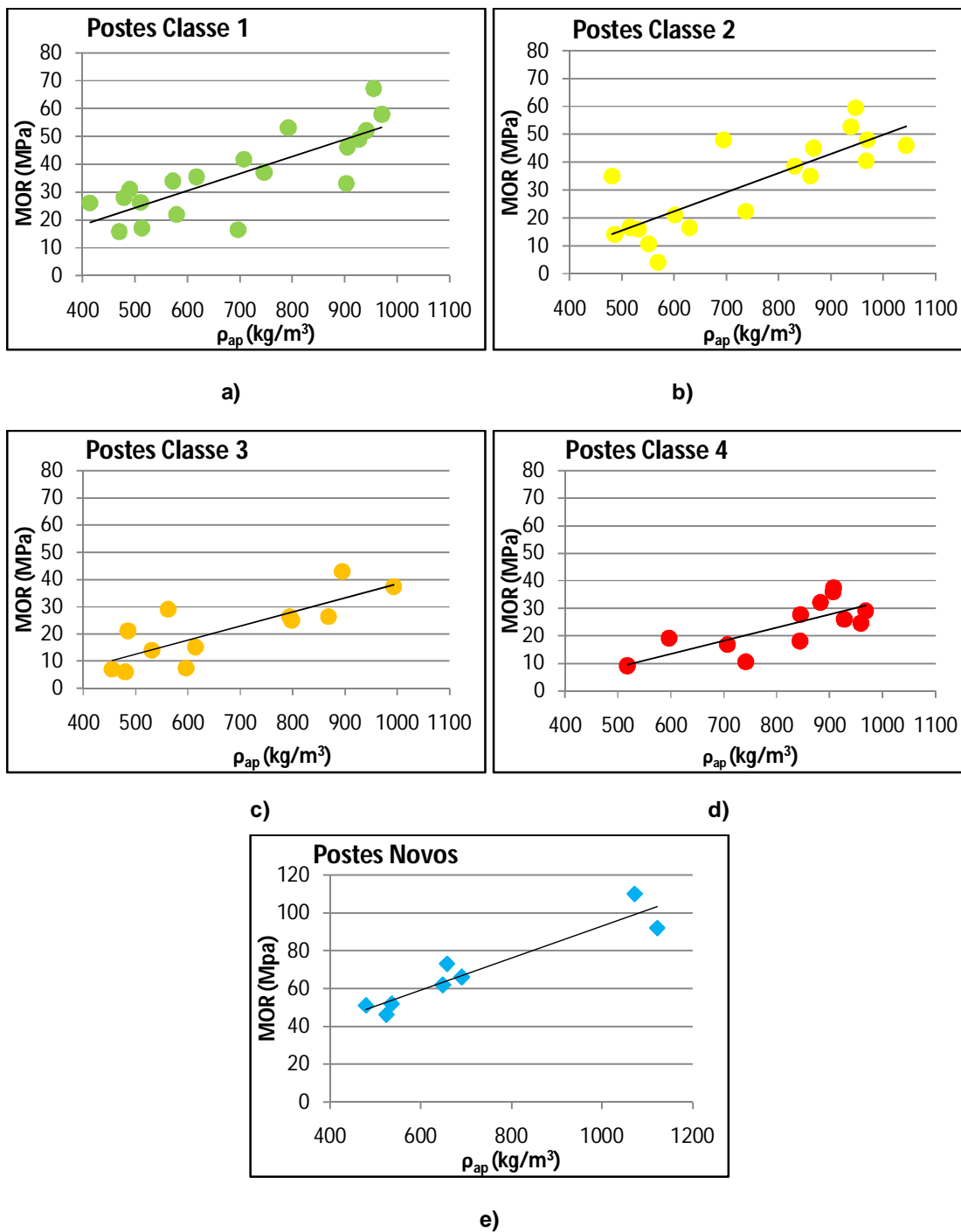


Figura 5.2. Variação individual do Limite de Resistência à Flexão (MOR_f) em relação a densidade para postes retirados de serviço onde, a) Postes da classe 1, b) Postes da classe 2, c) Postes da classe 3, d) Postes da classe 4 e e) Postes novos.

Analisando a Figura 5.3 (de a à d), verifica-se um comportamento semelhante das propriedades mecânicas para o MOE_f com relação a densidade da madeira nos postes retirados de serviço. Esse resultados são confirmados com a correlação de

Pearson para MOEf (Tabela 5.2) com valores em torno de 0,60 dentro de cada classe de deterioração. Os *p-valor*, todos inferiores a 0,05, menores que o nível de significância de 5% comprovam as fortes correlações. Apesar da correlação do MOEf ser menos significativa que a correlação do MORf, fica evidenciado que ambos são influenciados pela densidade. Esse comportamento foi também observado por Zhang (1997).

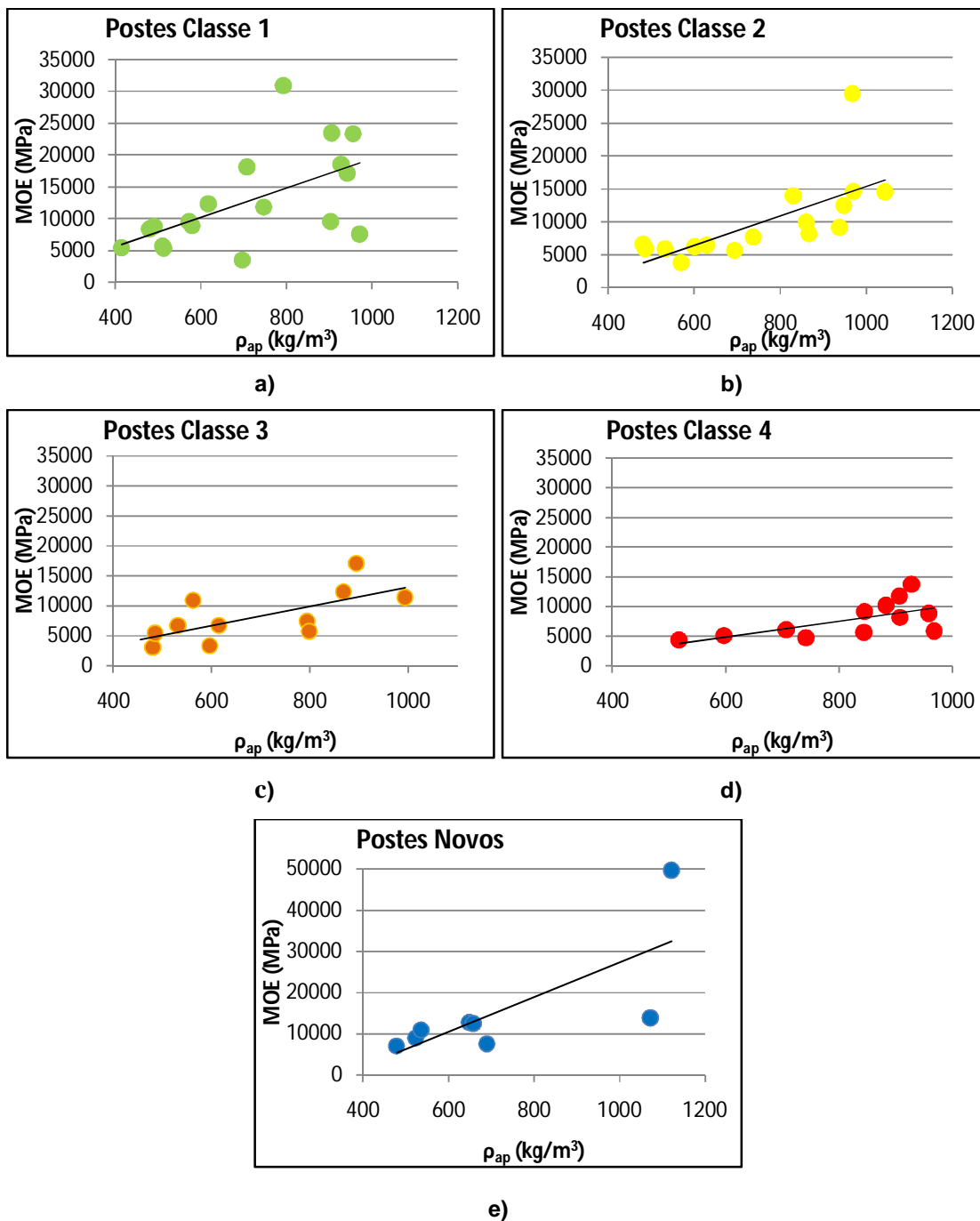


Figura 5.3. Variação individual do Módulo de Elasticidade à Flexão (MOEf) em relação a densidade para postes retirados de serviço onde, a) Postes da classe 1, b) Postes da classe 2, c) Postes da classe 3, d) Postes da classe 4 e e) Postes novos.

A mesma tendência se observa para os postes novos conforme apresentado na Figura 5.3.e. A correlação de Pearson (Tabela 5.2) com valor de 0,74, e p -valor <

0,05, sugerem a significância dessa correlação. Cabe, entretanto salientar a maior variação de MOEf para os postes de maior densidade.

Verifica-se também com a correlação de Pearson (Tabela 5.2) que mesmo sem estar separados por classes de deterioração, fica evidenciada a correlação linear positiva do MORf e do MOEf com a densidade da madeira (0,67 e 0,52, respectivamente) e *p-valor* extremamente baixos. Pesquisas realizadas por Armstrong (1984) também apontaram um alto nível de confiança entre a densidade e as propriedades mecânicas.

Observa-se uma fraca correlação entre as propriedades mecânicas em três das classes de deterioração. Novamente uma correlação fraca (-0,36 para MORf e -0,32 para MOEf) é verificada entre as classes de deterioração e as propriedades mecânicas analisadas, o que vem a contribuir para a importância da análise da densidade das estruturas de madeira.

Tabela 5.2. Correlações de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade da madeira de 69 postes.

Matriz de Correlação: Pearson				Matriz de <i>p</i> -valores		
	MOR	MOE	ρ_{ap}	MOR	MOE	ρ_{ap}
Postes Classe 1						
MOR	1			1		
MOE	0,75	1		0,00029	1	
ρ_{ap}	0,79	0,58	1	0,00011	0,01	1
Postes Classe 2						
MOR	1			1		
MOE	0,46	1		*0,07	1	
ρ_{ap}	0,77	0,69	1	0,00042	0,0033	1
Postes Classe 3						
MOR	1			1		
MOE	0,89	1		0,00027	1	
ρ_{ap}	0,77	0,68	1	0,0053	0,021	1
Postes Classe 4						
MOR	1			1		
MOE	0,69	1		0,014	1	
ρ_{ap}	0,75	0,64	1	0,0047	0,025	1
Postes Novos						
MOR	1			1		
MOE	0,52	1		*0,19	1	
ρ_{ap}	0,94	0,74	1	0,00045	0,037	1
Todos os Postes						
MOR	1			1		
MOE	0,70	1		2,84E-06	1	
ρ_{ap}	0,67	0,52	1	2,92E-09	3,04E-05	1
Classe	-0,36	-0,32	0,16	0,004	0,02	*0,23

*Valores não significativos.

Observa-se a importância da densidade da madeira para complementar o método de inspeção, uma vez que somente com a inspeção não é possível avaliar de forma efetiva a resistência residual desse poste.

Diante dos resultados apresentados, pode-se propor que o processo de inspeção pode ser complementado com a coleta não destrutiva de amostras do poste de madeira em serviço para realização dos testes de densidade em laboratório. A coleta pode ser realizada com o auxílio de uma broca oca adaptada a um perfurador de madeira a bateria, conforme apresentado na Figura 4.5. Esse equipamento permite a retirada de cilindros (baguetas) com diâmetro e comprimentos variando conforme o tipo e a penetração da broca, a coleta pode ser realizada no mesmo orifício da inspeção seguido de um retratamento no local perfurado, apresentado por Vidor (2010).

5.2. Análises MEV/EDS

5.2.1. Correlação da densidade com a morfologia da madeira em postes novos através de corte transversal

Amostras de três postes novos, sem tratamento químico foram analisadas por meio de corte transversal, visando relacionar o diâmetro do lúmen da fibra do eucalipto com a sua densidade.

Análises realizadas em locais aleatórios da medula do cerne e do alburno revelaram as características do lenho das madeiras de folhosas das espécies *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. Na Figura 5.4 (de a à f) são apresentadas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura da espécie *Eucalyptus grandis*. Observa-se com o corte transversal as partes ocas das fibras apresentando-se como um vazio interior denominado de lúmen. Também se observam os vasos, células de grande diâmetro, com extremidades abertas, e alguns raios medulares. Foram medidos diâmetros médios do lúmen das fibras (D) de 7,51 μm ($D_p=1,87$), 8,07 μm ($D_p=2,29$) e 8,28 μm ($D_p=2,88$), para medula, cerne e alburno respectivamente, observou-se que há uma uniformidade nos diâmetros

nas três regiões estudadas. Resultados semelhantes foram observados para as demais espécies estudadas, conforme apresentado nas imagens do Anexo E.

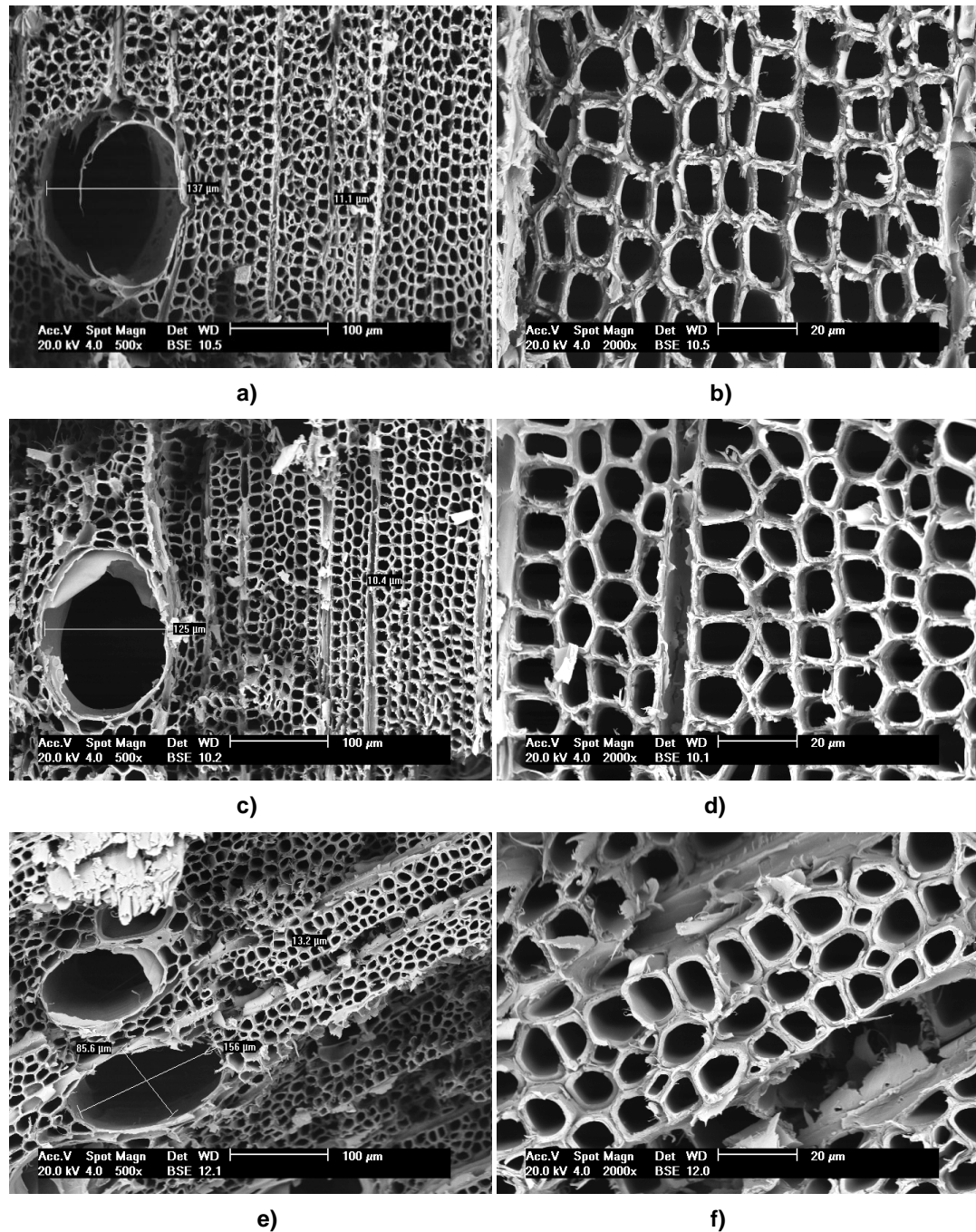


Figura 5.4. Imagens de MEV em amostra da espécie *Eucalyptus grandis* sem tratamento químico. Em a) e b) Alburno, c) e d) Cerne, e) e f) Medula.

Oliveira; Hellmeister e Filho (2005) verificaram uma tendência geral da madeira de eucalipto atingir valores mais baixos de densidade básica na região da

medula, aumentando até próximo da região do alburno e seguindo, então, uma redução do seu valor. Esses autores citam que apesar dessa tendência geral, cada espécie mostra um perfil diferenciado de variação que também varia nas diversas alturas do tronco, sendo a madeira da espécie *C. citriodora* a mais uniforme. Foi observado também que para amostras de madeiras com tronco de diâmetro maior de 20 cm ocorrem maior homogeneidade nos valores da densidade.

No presente estudo não foi possível verificar uma variação radial significativa da densidade por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura. Esse comportamento pode ser explicado, devido a todas as amostras de madeira provenirem de troncos com diâmetros maiores que 20 cm.

A média geral do diâmetro do lúmen das três regiões analisadas para a madeira das três espécies está apresentada na Tabela 5.3. Observa-se que há uma diferença no diâmetro do lúmen entre as espécies de madeira estudadas (Figura 5.5), sendo o *C. citriodora* a que possui o menor diâmetro médio, seguida pelo *E. saligna* e por último o *E. grandis*. Observa-se que o valor da densidade aparente para estas espécies indicado pela NBR 7190/97, correlaciona-se negativamente com os dados de diâmetro de lúmen das fibras analisado. Essa correlação negativa também é verificada com os valores de densidade básica e aparente medidas em laboratório.

Tabela 5.3. Média do diâmetro do lúmen das fibras de madeira e das densidades básica e aparente medidas para diferentes espécies e valores da densidade aparente indicada na NBR 7190/97.

Espécie	Nº Medidas	Média d. Lúmen (D) (μm)	ρ_b Média (Laboratório) (kg/m^3)	ρ_{ap} Média (Laboratório) (kg/m^3)	ρ_{ap} NBR 7190/97 (kg/m^3)
<i>C. citriodora</i>	95	2,51 \pm 1,38	697 \pm 15,3	979 \pm 29,1	999
<i>E. saligna</i>	175	5,00 \pm 1,68	589 \pm 15,5	781 \pm 23,3	731
<i>E. grandis</i>	150	7,94 \pm 2,33	440 \pm 26,4	563 \pm 41,1	640

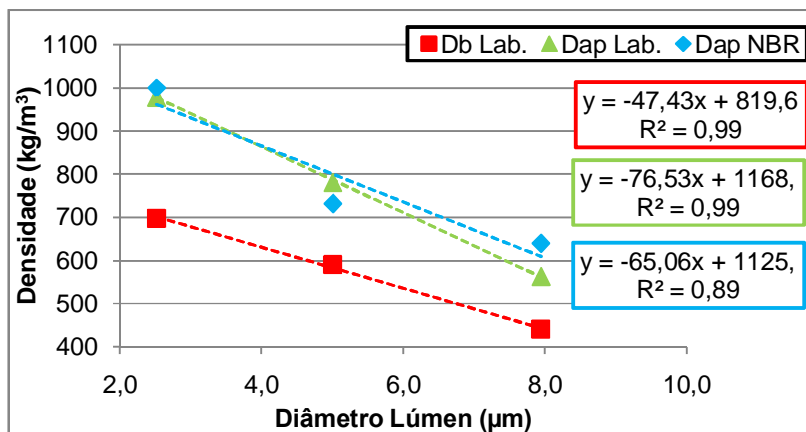


Figura 5.5. Correlações entre o diâmetro do lúmen das fibras e as densidades básica e aparente medidas em laboratório, densidade aparente NBR 7190/97, para diferentes espécies.

Encontrou-se resultados semelhantes aos de Poubel et al. (2001) que verificaram uma boa correlação entre a densidade e as dimensões das fibras. As análises estatísticas também não indicaram diferenças significativas entre as posições estudadas (cerne, albarno e medula), para a variável anatômica considerada.

5.2.2. Correlação da densidade com a morfologia da madeira em postes retirados de serviço através de corte transversal

Como o diâmetro do lúmen das fibras apresentou uma relação com a densidade nos três postes novos, estendeu-se esta análise para um número maior de postes (30) retirados de serviço. Este estudo foi feito visando validar a correlação observada entre as duas variáveis. Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura com corte transversal de 5 desses postes (7, 6, 15 e 27 tratados com CCA e o poste 4 com Creosoto) são apresentados na Figura 5.6 a à e. As amostras foram coletadas do albarno, região mais externa uma vez que esta apresenta características semelhantes as do cerne e da medula para esta análise. Todas as análises foram feitas de porções sadias dos postes para não ocorrer interferências, uma vez que o interesse do presente trabalho é avaliar a morfologia e não a deterioração.

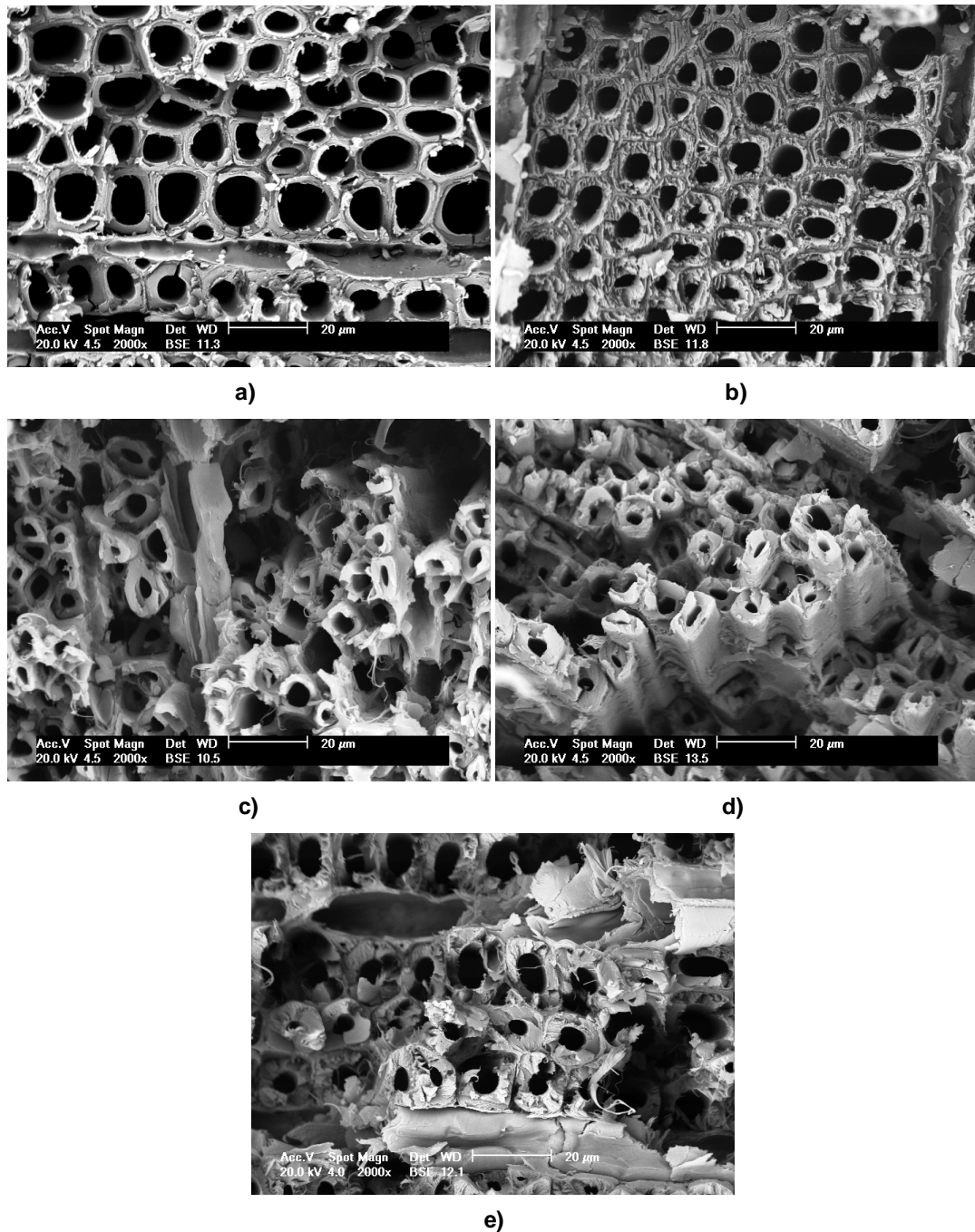


Figura 5.6. Imagens de MEV em amostra de alburo com corte transversal. Em a) Poste 7, b) Poste 6, c) Poste 15, d) Poste 27 e e) Poste 4.

Nas imagens, não se observa diferenças no diâmetro do lúmen das fibras devido ao tratamento empregado na madeira. O ano de fabricação também não influenciou nos dados, devido provavelmente, as amostras terem sido retiradas de regiões sadias da madeira. Esses dados vêm a corroborar com as amostras dos

postes não tratados. Postes de madeiras mais densas apresentaram menor diâmetro de lúmen conforme apresentado na Tabela 5.4. Os dados de todos os postes analisados são apresentados no Anexo D.

Tabela 5.4. Média do diâmetro do lúmen e densidades da madeira de postes retirados de serviço.

Amostras	Preservante	Fabricação	$D_{\text{Lúmen}}$ (μm)	ρ_{ap} (kgm^{-3})	ρ_{b} (kgm^{-3})	*Classe Densidade
7	CCA	2003	$8,03 \pm 2,48$	$516 \pm 19,9$	$445 \pm 11,5$	1D
6	CCA	2004	$6,43 \pm 2,39$	$580 \pm 33,5$	$407 \pm 32,0$	1D
15	CCA	1991	$4,69 \pm 1,82$	$697 \pm 20,9$	$530 \pm 12,1$	3D
27	CCA	1995	$2,92 \pm 1,20$	$867 \pm 18,1$	$625 \pm 7,6$	6D
4	Creosoto	-	$2,38 \pm 0,60$	$959 \pm 23,4$	$678 \pm 4,2$	5D

*Classe de densidade conforme classificação adotada pela NBR 8456 (Proposta de Revisão).

A Figura 5.7 apresenta o comportamento da densidade básica e aparente medidas em laboratório com o valor do diâmetro do lúmen das fibras para os 30 postes retirados de serviço, verifica-se uma correlação negativa entre essas duas variáveis. Essa relação fica evidenciada com a forte correlação de Pearson de 0,84, comprovados pelo p -valor $<0,0001$ para densidade básica. A correlação de Pearson para densidade aparente de 0,81 e p -valor de $<0,0001$ também indicam que esses parâmetros são significativamente correlacionados.

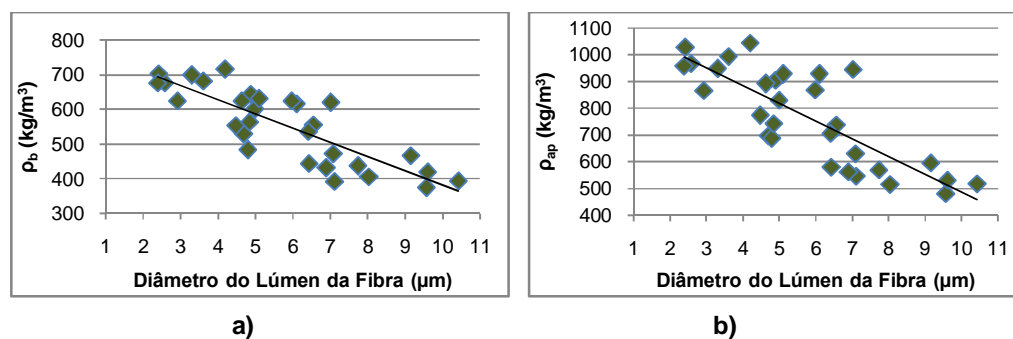


Figura 5.7. Variação da densidade com a largura do lúmen das fibras. a) Densidade básica e b) Densidade aparente.

Diferenças consideráveis, para dimensão do lúmen das fibras entre as espécies de eucalipto também foram observadas por Shimoyama (1990). O maior diâmetro do lúmen foi encontrado em madeiras menos densas como o *E. grandis*.

Zbonak; Bush e Grzeskowiak (2007) também analisaram diferenças na estrutura morfológica e densidade da madeira entre diferentes espécies de eucalipto. Esses autores verificaram, assim como nesse trabalho que as propriedades das fibras tiveram uma grande influência sobre a densidade da madeira, tornando as madeiras de árvores com maior diâmetro de lúmen significativamente mais leves.

Verifica-se a importância da contribuição desse método de análise para uma possível identificação rápida da densidade da madeira, ou mesmo da classe de densidade, relacionando essa com o diâmetro do lúmen da fibra, podendo esse ser um dado complementar do processo de inspeção de postes em campo.

5.2.3. Identificação do preservante por meio de corte tangencial em postes novos

Análises foram realizadas na madeira de 3 postes novos e 30 postes retirados de serviço com tratamento químico (CCA e Creosoto). Essas amostras sofreram corte tangencial visando a identificação do tratamento da madeira. Os postes novos e três dos postes retirados de serviço foram analisados por Santos (2010), que determinou As, Cr e Cu (FAAS e HG-AAS) oriundos do preservante CCA, presentes na madeira preservada. Além desses outros dois postes foram analisados quanto à presença de Flúor pelo método de EIS. Na Tabela 5.5 são apresentadas as concentrações de óxidos presentes nos três postes novos e também em três postes retirados de serviço, além da concentração de Flúor em outros dois postes analisados.

Tabela 5.5. Retenção dos óxidos obtidos por FAAS para Cu e Cr e HG-AAS para As para amostras de postes novos e retirados de serviço preservados com CCA além da concentração de Flúor obtida por EIS.

Poste	Retenção (kg/m ³)				Concentração
	CuO	CrO ₃	As ₂ O ₅	Total Óxidos	(mg/kg)
					F
Novo (1)	1,03	2,38	1,45	4,85	-
Novo (2)	1,06	2,48	1,40	4,94	-
Novo (3)	2,31	4,74	3,15	10,20	-
25	0,65	2,09	2,07	4,81	-
27	0,47	0,67	2,40	3,54	-
28	1,58	5,54	1,97	9,09	-
31	-	-	-	-	82,0
32	-	-	-	-	362,4

Fonte: Adaptado de Santos, 2010.

Análises realizadas em locais aleatórios da medula, do cerne e do alburno da madeira com tratamento químico revelaram a presença de inclusões em forma de partículas de espécie e proporções variáveis. Entretanto, presença dos metais Cr, Cu e As oriundos do tratamento químico, foram observados somente no alburno da madeira e em proporções variáveis. Esses resultados confirmam a sensibilidade da técnica para a detecção dos metais de interesse, uma vez que a impregnação do preservante ocorre apenas no alburno, conforme apresentado no item 3.4.

Para essas amostras foram realizadas análises de MEV/EDS pontuais, no modo BSE (Elétrons Retroespalhados), onde os níveis de cinza correspondem à variação do número atômico dos elementos que compõe a amostra. Sendo que as partes mais claras correspondem a números atômicos mais elevados, e as escuras aos elementos mais leves. O Au e o Pd são oriundos do recobrimento, realizado para aumentar a condução elétrica da amostra.

Na Figura 5.8 (de a à f) são apresentadas imagens de MEV referente ao cerne, alborno e medula do poste novo (2). As análises de EDS (Figura 5.8 g à i) foram realizadas na área total da imagem (aumento de 2000x). Observa-se a presença dos preservantes impregnados em quantidades possíveis de serem identificadas apenas no alborno, apresentando a formação de precipitados do preservante de tamanhos diferentes, não se verifica nas regiões do cerne e da medula a formação dos precipitados dos metais do preservante. O mesmo comportamento foi verificado em outros dois postes novos, conforme apresentado nas imagens de MEV/EDS no Anexo F. A grande quantidade de carbono observada corresponde a matriz (madeira).

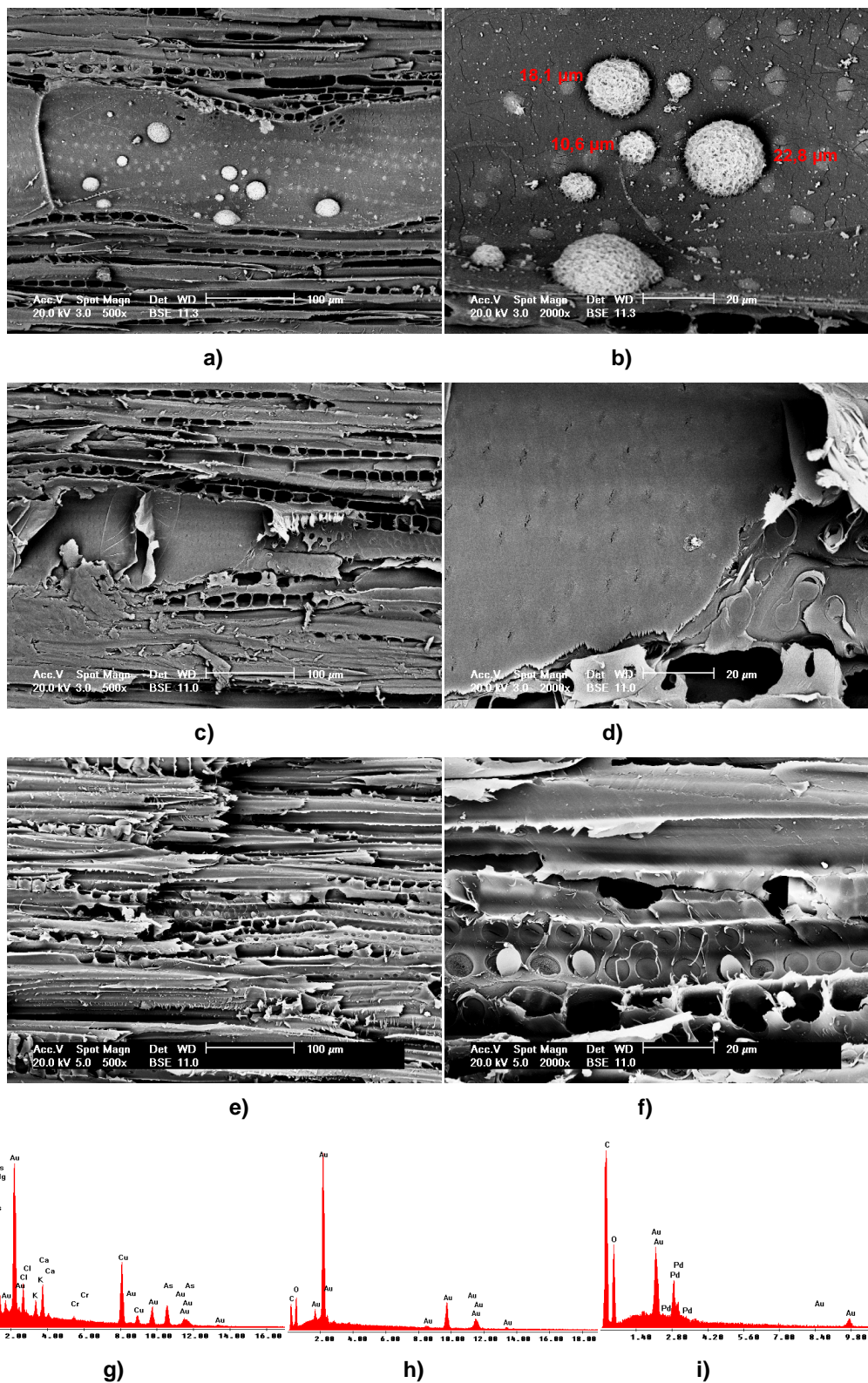


Figura 5.8. Imagens de MEV/EDS poste novo (2). Em a) e b) Imagem de MEV amostra de alburno, c) e d) Imagens de MEV amostra de cerne, e) e f) Imagens de MEV amostra de medula e g), h) e i) EDS realizado na área total das imagens de alburno, cerne e medula respectivamente.

A partir desses dados, investigou-se também as maneiras de como o preservante CCA se comporta no alburno da madeira tratada. Além das análises de EDS conforme apresentado na Figura 5.8, analisou-se também regiões específicas como os precipitados as pontuações (descontinuidade da parede celular) e as regiões claras.

O mapeamento dos elementos nas amostras do poste novo (1) indica a presença de Cu, Cr e As, pelo espectro EDS, (Figura 5.9.b) e no precipitado (região 1 Figura 5.9.a). Na pontuação (região 2), observada na Figura 5.9.a indica a presença de As, o que fica evidenciado no EDS apresentado na Figura 5.9.c.

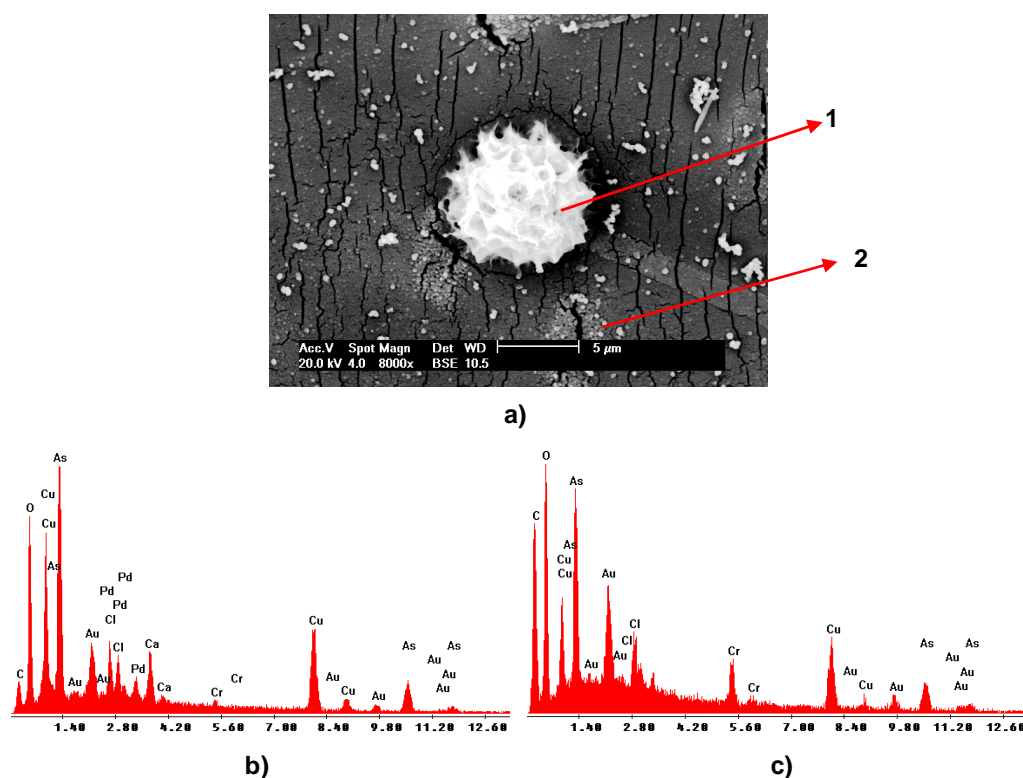


Figura 5.9. Imagens de MEV/EDS em amostra de alburno do poste novo (1). Em a) Imagem de MEV, b) EDS realizado no precipitado (região 1) c) EDS realizado na pontuação (região 2).

Nessa amostra também foram encontradas inclusões difusas na matriz sólida junto aos metais do preservante. Cabe destacar a presença do Cl, registrado no EDS (Figura 5.9.c), elemento típico que compõe a matriz madeira.

No mapeamento dos elementos das amostras do poste novo (2), foram realizadas análises pontuais no precipitado (região 1) e na pontuação (região 2), apresentada na imagem de MEV da Figura 5.10.a. Observa-se picos relativos aos três metais (EDS, Figura 5.10 c e d). Nesta amostra também foram encontradas inclusões de Ca, K, Cl e Mg em proporções variadas (EDS, Figura 5.10 c e d), detectados juntos aos precipitados dos metais do preservante. O precipitado referente ao preservante se apresenta de forma diferente em relação aos precipitados das inclusões. Cabe destacar o caso do precipitado de Ca observado na Figura 5.10.b detectado pelo EDS representado na Figura 5.10.e.

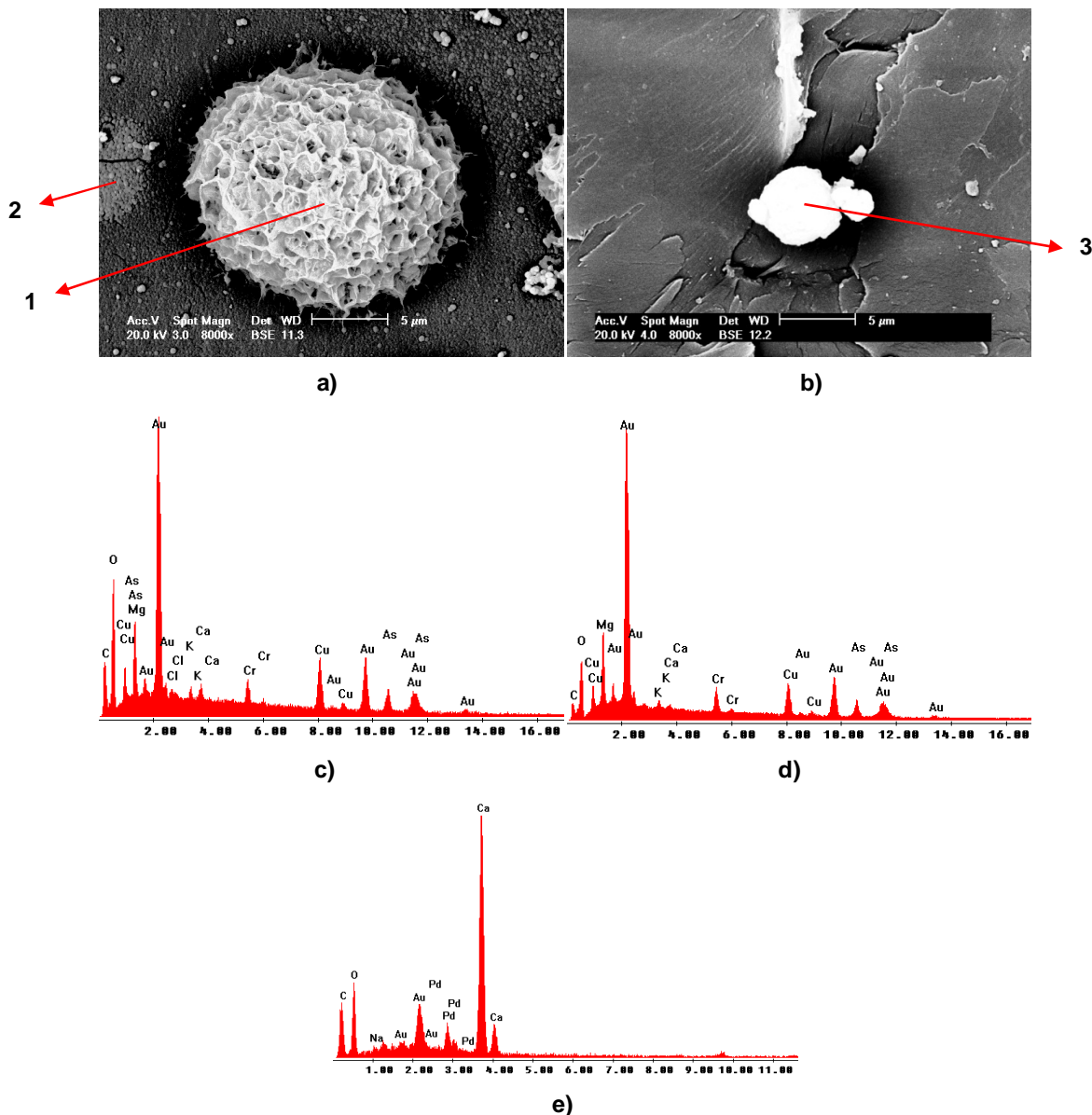


Figura 5.10. Imagens de MEV/EDS em amostra de alburno do poste novo (2). Em a) e b) Imagem de MEV, c) EDS realizado no precipitado (região 1) f) EDS realizado na pontuação (região 2) e e) EDS realizado no precipitado (região 3).

No mapeamento dos elementos das amostras do poste novo (3), análises pontuais também foram realizadas nas regiões ilustradas na imagem de MEV (Figura 5.11.a). Observa-se a presença dos três metais (EDS Figura 5.11.b) na região (1) mais clara, coloração característica da presença mais significativa de As. Também foi realizada uma análise no precipitado (região 2) onde se observa a presença dos três metais que compõe o preservante (EDS Figura 5.11.c).

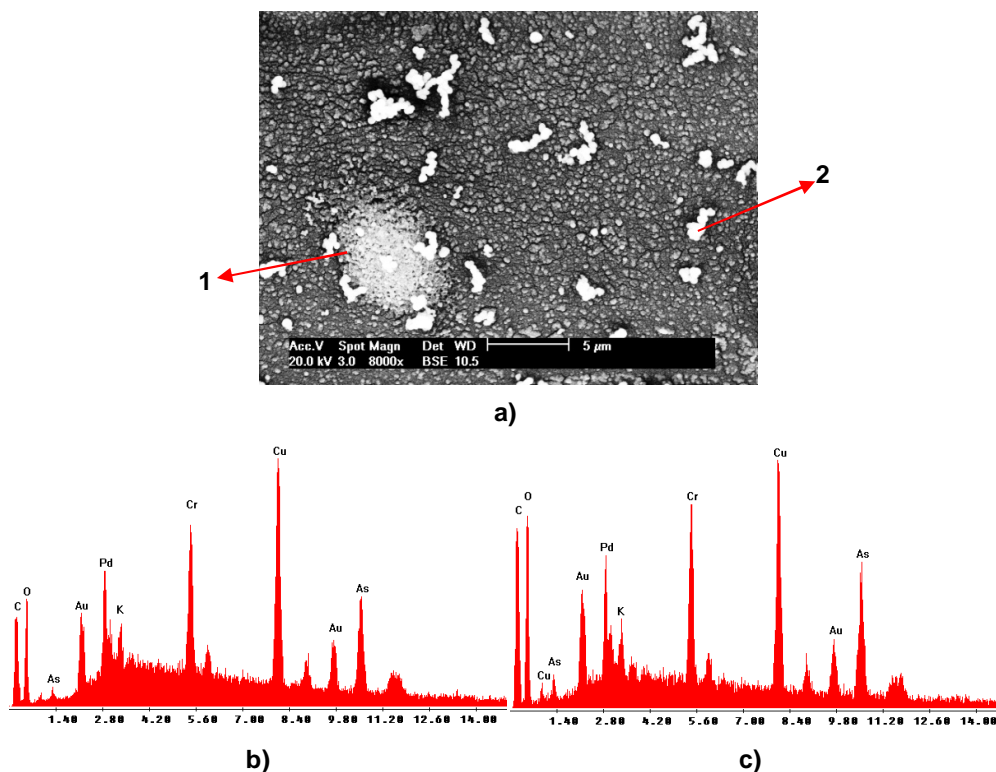


Figura 5.11. Imagens de MEV/EDS em amostra de alburno do poste novo (3). Em a) Imagem de MEV, b) EDS realizado na região clara (1) e c) EDS realizado no precipitado (região 2).

Das três amostras analisadas no alburno, em todas observou-se a presença dos três metais que compõe o preservante, independente do local da análise de EDS, tanto em precipitados, como nas áreas claras, nas pontuações (abertura das fibras) e também quando o EDS foi realizado em uma área mais ampla da imagem, a variação da concentração (Tabela 5.5) dos óxidos também não influenciou a identificação dos metais pelo EDS. Já no cerne e na medula, através desta técnica nenhum dos três metais foi identificado.

Pedersen e Ottosen (2006) também apontaram a presença de partículas de minerais de elementos diversos constituintes da matriz. Esses minerais são associados aos metais do preservante como Ca-arseniato, ou não associados como alumínio silicatos e fosfatos. Para o preservante estes autores citam que grande parte do Cr pode estar ligado como Cr-arseniato (CrAsO_4) fixado a lignina ou precipitado. O Cu foi encontrado de forma pura, precipitado na superfície de inclusões minerais e também como CuCrO_4 . O arsênio também foi encontrado associado com Ca em regiões porosas.

5.2.4. Identificação do preservante por meio do corte tangencial em postes retirados de serviço

Como o MEV/EDS foi efetivo para identificar a presença dos metais do preservante no alburno dos postes novos, esta análise foi estendida para 30 postes retirados de serviço, 23 tratados com CCA e 7 com creosoto.

Análises foram realizadas em postes tratados com CCA onde, no mapeamento dos elementos da amostra do poste (12), uma análise de EDS pontual foi realizada no precipitado (região 1) apresentado na imagem de MEV (Figura 5.12.b), que apresenta picos relativos aos três metais que compõe o preservante (EDS Figura 5.12 c) com uma maior intensidade de Cu. Foi constatada também a presença de Mg e Ca inclusões presentes na madeira, estes estão entre suas inclusões predominantes.

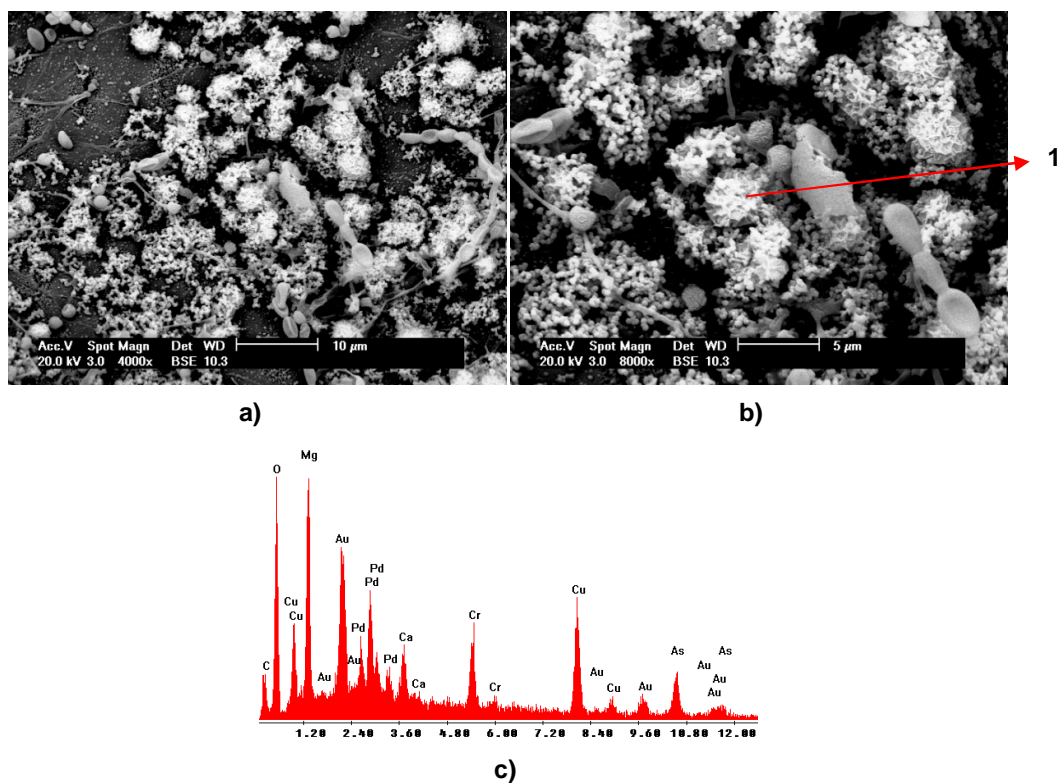


Figura 5.12. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (12). Em a) Imagem de MEV 4000x, b) Imagem de MEV 8000x c) EDS realizado no precipitado (região 1).

No mapeamento dos elementos da amostra do poste (13), uma análise de EDS pontual foi realizada na pontuação (região 1) apresentado na imagem de MEV (Figura 5.13.b). Verifica-se a presença de picos relativos aos três metais que compõe o preservante conforme é observado no espectro EDS (Figura 5.13.c), com uma maior intensidade de Cr.

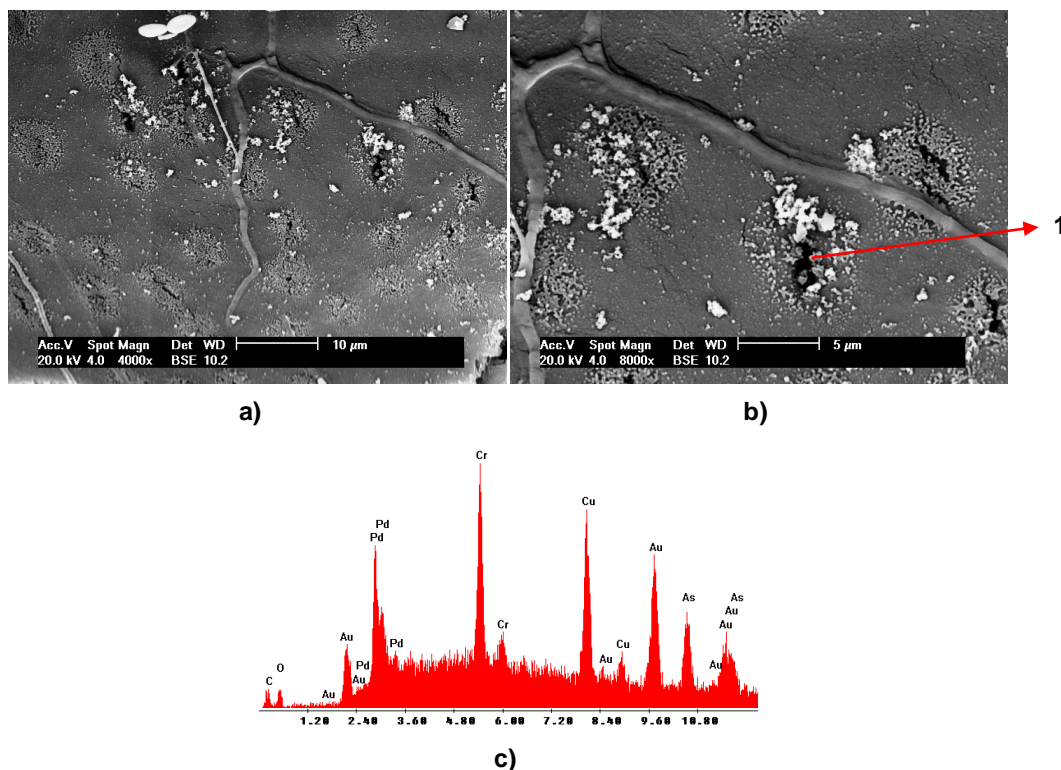


Figura 5.13. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (15). Em a) Imagem de MEV 4000x, b) Imagem de MEV 8000x c) EDS realizado na pontuação (região 1).

No mapeamento dos elementos da amostra do poste (16), uma análise de EDS mais geral foi realizada na área total da imagem de MEV (Figura 5.14.c). Também foram observados picos relativos aos três metais que compõe o preservante (EDS Figura 5.14.d). Esses resultados confirmam a presença do preservante difuso na matriz da madeira, mesmo que os picos estejam em menor intensidade.

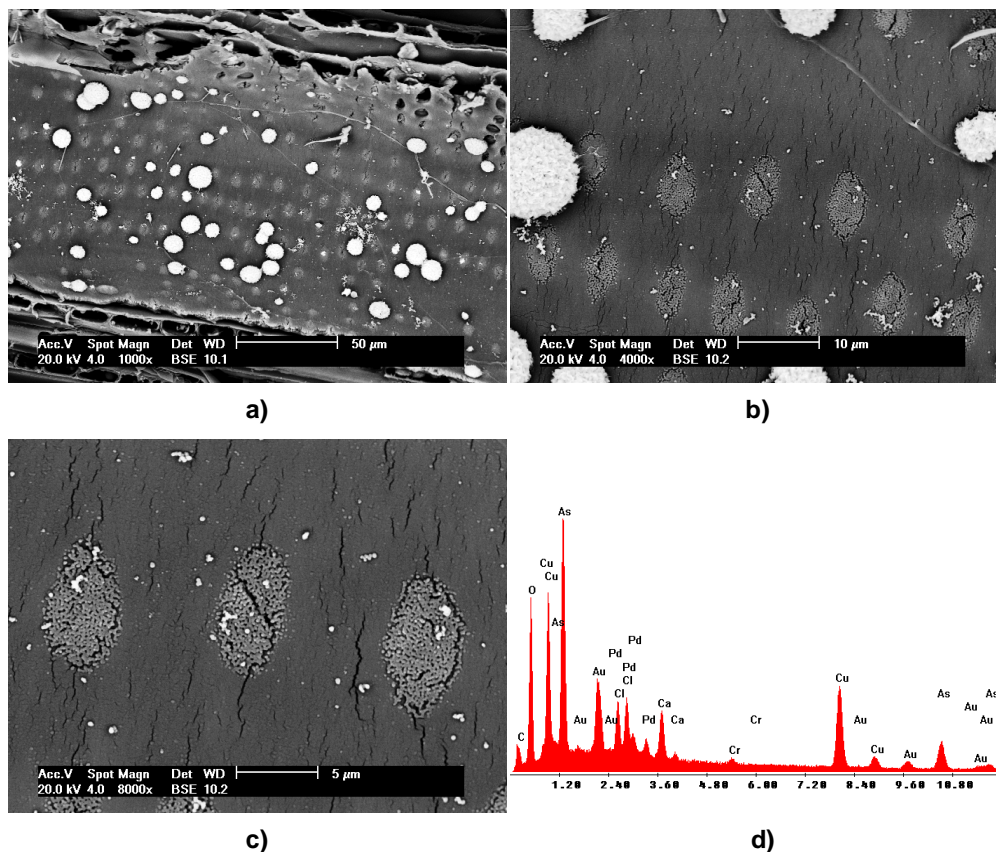


Figura 5.14. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (16). Em a) Imagem de MEV 1000x, b) Imagem de MEV 4000x c) Imagem de MEV 8000x d) EDS na área total da imagem.

No mapeamento dos elementos da amostra do poste (27), uma análise de EDS pontual foi realizada na região 1 mais clara apresentado na imagem de MEV (Figura 5.15.b). Os picos relativos aos três metais que compõe o preservante são observados no espectro EDS (Figura 5.15.c). Verificou-se uma maior intensidade de Cu e também uma pequena quantidade de Ca, inclusão característica presente na madeira.

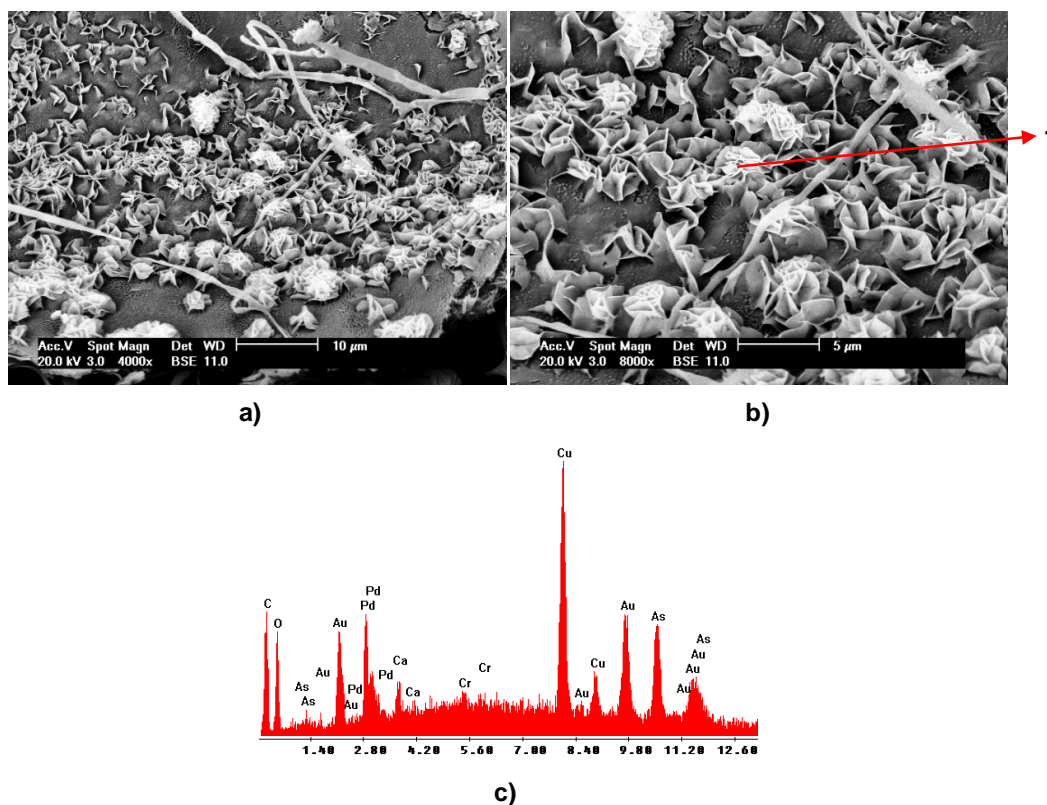


Figura 5.15. Imagens de MEV/EDS do alburno da amostra do poste (27). Em a) Imagem de MEV 4000x b) Imagem de MEV 8000x e c) EDS na região clara (região 1).

Além disso, também foram observadas diferentes formas de apresentação do preservante na madeira como precipitados únicos de tamanhos diferentes, aglomerados de precipitados menores, regiões claras, impregnado na madeira. Não foi possível correlacionar estas formas com o tempo de fabricação e com a densidade da madeira. Amostras de madeiras com densidades próximas apresentaram também comportamentos diferentes. Esse variado comportamento pode estar relacionado com a quantidade de preservante impregnado na madeira.

Precipitados dos metais do preservante também foram observados por Helsen e Hacala (2006), em amostras de madeira após um processo de carbonização. Esses autores também encontraram precipitados de minerais associados aos metais do preservante, cuja composição e tamanho são muito variáveis. Entretanto, esses resultados não podem ser diretamente comparados com o desse trabalho em razão das modificações das amostras carbonizadas.

A partir das análises realizadas neste estudo, verificou-se que o Cu se aglomera com mais facilidade, uma vez que sinais mais intensos de Cu foram observados nas análises de EDS em precipitados.

A presença do preservante foi detectada por MEV/EDS em todas as amostras analisadas, independentemente das condições em que o poste foi utilizado e das concentrações dos óxidos que compõe o preservante conforme apresentado na Tabela 5.5, para três postes retirados e para os três postes novos. Das 23 amostras analisadas dos postes tratados com CCA retiradas do alburno, em apenas uma delas não foi registrada a presença simultânea dos três metais que compõe o preservante. Nessa amostra foram registrados As e Cr, mas não o Cu, independente do tipo de local da análise de EDS. Foram analisados, tanto os precipitados, como as áreas claras, as pontuações e também quando o EDS foi realizado em toda a área da imagem.

Análises de MEV/EDS também foram realizadas em postes tratados com creosoto, onde não se observou a formação de precipitados. O EDS realizado na área total da imagem, correspondente a Figura 5.16 (a), verifica-se a presença do Ca uma inclusão presente na maioria das amostras analisadas.

Análises pontuais também foram realizadas na pontuação ilustrada na imagem de MEV (Figura 5.16.c) onde se observa no EDS (Figura 5.16.d) uma quantidade elevada de oxigênio e carbono. Esses elementos são normalmente associados à matriz (madeira).

Uma análise de EDS pontual foi realizada no precipitado (região 1) apresentado na imagem de MEV (Figura 5.16.e). Picos relativos a presença de Cl e S foram observado (EDS Figura 5.16.f). O cálcio é uma inclusão característica presente na madeira, mas o cloro assim como o enxofre, também eram utilizados para fortificar as substâncias fenólicas aumentando a toxidez do preservante creosoto (JANKOWSKY; LEPAGE, 1986). O EDS realizado na área total da imagem não apresentou as mesmas características, isso pode estar ligado a uma baixa concentração desses elementos.

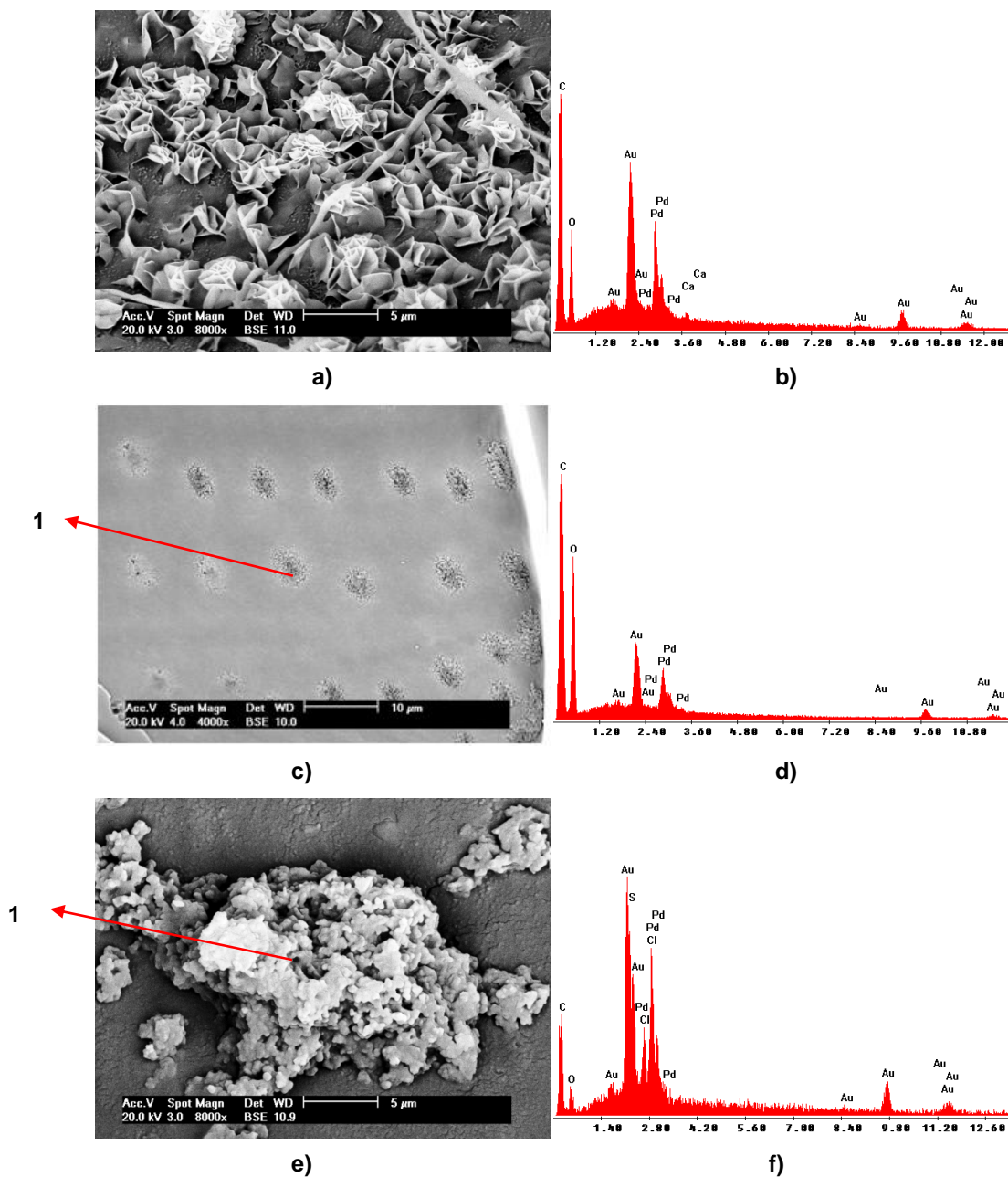


Figura 5.16. Imagens de MEV/EDS do alburno. Em a) Imagem de MEV 8000x amostra 4, b) EDS na área total da imagem, amostra 4, c) Imagem de MEV 4000x amostra 18, d) EDS na pontuação (região 1), amostra 18, e) Imagem de MEV 8000x, amostra 29 e f) EDS no precipitado (região 1) amostra 29.

Observou-se também nas amostras de madeira preservadas com creosoto a presença de precipitados de minerais. Porém esses precipitados são verificados na madeira, como independente do preservante utilizado.

Verifica-se a importância desse método de análise para a identificação rápida da presença de tratamento químico na madeira. Esse procedimento poderia ser utilizado para a disposição correta dos resíduos desse material, uma vez que após sujeita a intempéries muitas vezes não é possível identificar se a madeira possui ou não o tratamento.

Análises de MEV/EDS também foram realizadas em amostras de madeiras tratadas com Flúor. Na Figura 5.17.a é apresentada a imagem de MEV da região onde foi realizada a análise de EDS em uma amostra com $82,0 \text{ mgkg}^{-1}$ de Flúor. Observa-se na Figura 5.17.b, que não foi possível detectar o Flúor com esta técnica. Uma segunda amostra que apresenta uma concentração mais elevada de flúor ($362,4 \text{ mgkg}^{-1}$) também foi analisada (Figura 5.17.c). Para essa amostra foi possível detectar a presença do Flúor por EDS (Figura 5.17.d).

Esses resultados sugerem que o elemento flúor pode ser identificado pela análise EDS somente se estiver presente em concentrações relativamente elevadas na madeira. Apesar dessa limitação, cabe destacar que não foi encontrada na literatura nenhuma indicação do uso dessa técnica para identificação de tratamento preservante curativo a base de Flúor.

Para o flúor não existem métodos colorimétricos para sua rápida identificação na madeira, assim como para o boro, também presente em tratamentos curativos, dificultando sua identificação, uma vez que os métodos instrumentais como o EIS são muito trabalhosos.

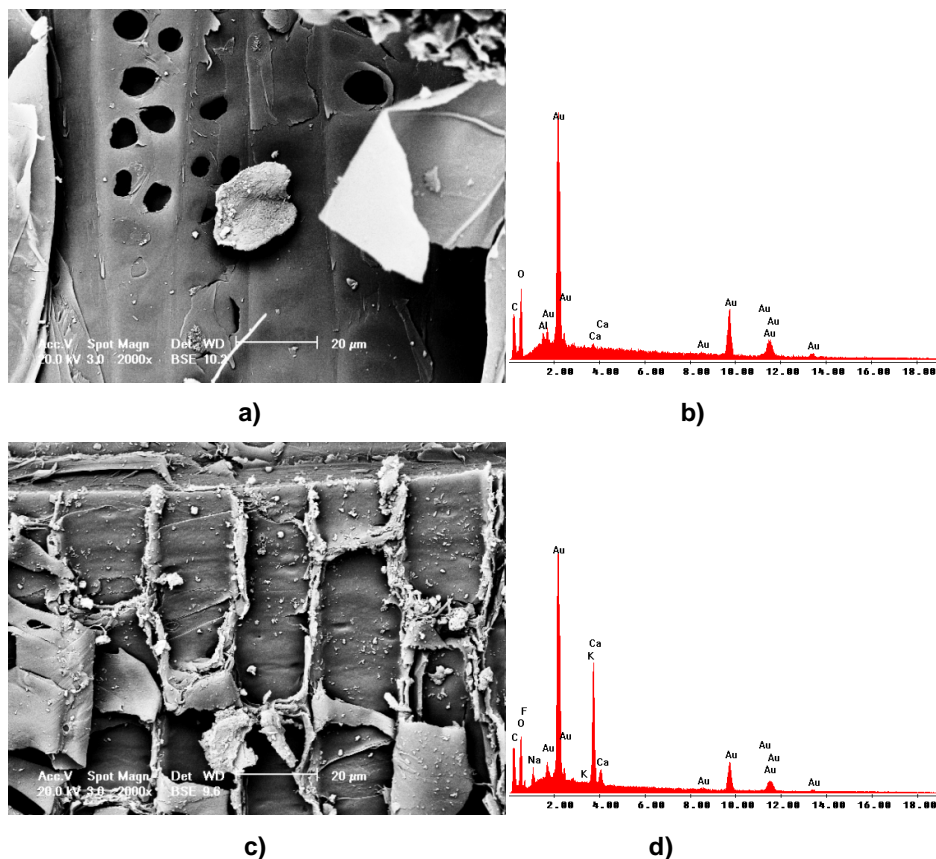


Figura 5.17. Imagens de MEV/EDS da região do cerne. Em a) Imagem de MEV 2000x amostra 31, b) EDS na área total da imagem da amostra 31, c) Imagem de MEV 2000x amostra 32, d) EDS na área total da imagem da amostra 32.

5.3. Considerações Finais

A caracterização de amostras de eucalipto retiradas de postes novos e postes em serviço, foi realizada a partir da constatação de que divergentes faixas de resistência mecânica, apresentaram-se tanto para espécies conhecidas (postes novos) quanto para espécies não conhecidas (postes retirados da rede). Essas faixas de resistência mecânica obtidas a partir de ensaios de flexão estática mostraram-se com uma correlação mais forte com a densidade da madeira do que com a sua classificação oriunda da inspeção. Por isso, a densidade deve ser considerada sempre que se deseja conhecer as reais possibilidades de conservação ou retirada de um poste em serviço na rede elétrica como propõe este trabalho.

6. CONCLUSÕES

O estudo da caracterização da madeira de eucalipto sugere que a classificação por si só não é um bom indicativo para prever a durabilidade das estruturas de madeiras, fazendo-se necessária uma análise preliminar da densidade da mesma.

Os testes mecânicos indicaram que os valores médios da resistência à flexão e da rigidez decrescem com o estado de deterioração do eucalipto, mas em uma análise mais criteriosa verifica-se um alto desvio nas medidas onde o decaimento está fortemente relacionado com a densidade, ou seja, com a espécie de eucalipto empregada, onde os postes mais densos apresentam maior resistência mecânica residual.

Quanto ao uso da madeira, viu-se a necessidade de uma avaliação preliminar dos valores de densidade, a fim de que o uso dessa madeira seja compatível com as resistências necessárias para as utilizações correspondentes. As espécies de maior densidade são mais recomendadas quando se deseja uma maior durabilidade e resistência mecânica da estrutura.

Quanto ao diâmetro do lúmen da madeira obtidos por Microscopia Eletrônica de Varredura, os resultados obtidos não indicaram diferenças significativas entre as três regiões estudadas dentro de uma mesma espécie de eucalipto (cerne, alburno e medula).

Os diâmetros de lúmen das fibras variaram entre e as espécies de eucalipto estudadas, resultando em consideráveis variações na sua densidade. O método de análise proposto mostrou-se válido para a identificação rápida da classe de

densidade que esta madeira corresponde. Associados aos dados de inspeção, essas informações contribuem para uma melhor avaliação do estado de deterioração do poste em serviço.

O método de análise por MEV/EDS mostrou-se eficiente para a identificação da presença dos metais que compõe o preservante CCA, independente das concentrações de óxidos na madeira tratada, possibilitando uma rápida identificação e auxiliando para uma melhor disposição dos resíduos desse material. A técnica também se mostrou eficiente para detectar a presença do Flúor na madeira retratada, desde que esteja em altas concentrações.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolvimento de metodologia para determinar de forma não destrutiva a densidade em amostras de madeira por meio da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIR).

Desenvolvimento de metodologia para identificar a presença do preservante preventivo CCA e quantificar boro e flúor presentes no preservante curativo em amostras de madeira por Espectroscopia UV-vis por Reflectância Difusa (DRS).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas da Madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.107p.

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

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6231: Postes de Madeira – Resistência à Flexão. Rio de Janeiro, Dez. 1980. 4p.

ALENCASTRO, J. I. D. **Caracterização Mecânica de Postes de Eucalipto utilizados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** Porto Alegre. 2010. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Faculdade de Engenharia, Física e Química, PUCRS, Brasil.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica.**Segunda revisão tarifária periódica da concessionária de distribuição de energia elétrica- Nota Técnica nº 107.** Brasília: ANEEL, 2009.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica.**Segunda revisão tarifária periódica da concessionária de distribuição de energia elétrica- Nota Técnica nº 320.** Brasília: ANEEL, 2009.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica.**Segunda revisão tarifária periódica da concessionária de energia elétrica- Nota Técnica nº 108.** Brasília : ANEEL, 2009.

ARMSTRONG, J. P.; SKAAR, C.; DE ZEEUW, C. The effect of specific-gravity on several mechanical-properties of some world woods. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 137-146, 1984.

ARRUDA, R. P. **Melhorias nos Métodos de Identificação e controle de Postes de Madeira Por Meio da Radio Freqüência e do Estudo de Suas Propriedades Mecânicas**. Porto Alegre. 2006. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Faculdade de Engenharia, Física e Química, PUCRS, Brasil.

ASTM. Standard. Designation D 390 – 96, EUA, ASTM, 1996.

BALLARIN, A. Estrutura da Madeira, Botucatu. Faculdade de Ciências Agrônômicas. UNESP. Ago. 2008. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/Aula_3___Tecnologia_da_madeira.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2010.

BARILLARI, C. T.; BRAZOLIN, S.; JANKOWSKY, I. P. O Uso da Madeira Tratada com CCA – Aspectos Tecnológicos e Ambientais, 8º Congresso Florestal Brasileiro, São Paulo, 2003.

BARCELLOS, C. D. *et al.* O Estado-da-Arte da Qualidade da Madeira de Eucalipto para Produção de Energia: Um Enfoque nos Tratamentos Silviculturais. **Renabio - Biomassa & Energia**, Viçosa-MG, v. 2, n. 2, p. 141-158, 2005.

BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Características das fibras de madeira de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden, aos 3 anos de idade. **IPEF**, n.19, p.80-97, Dez 1979.

BRAZOLIN, S.; ROMAGNANO, L.F.T DI.; SILVA, G.A. Madeira preservada no ambiente construído: cenário atual e tendências. In: **Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, 3., 2003, São Carlos. Anais. São Carlos: ANTAC, 2003.

CHINGA-CARRASCO, G.; JOHNSEN, P. O.; OYAAS, K. Structural quantification of wood fibre surfaces-Morphological effects of pulping and enzymatic treatment. **Micron**, v. 41, n. 6, p. 648-659, Aug 2010.

COSTA, A. Coletâneas de Anatomia da Madeira. Florianópolis: Universidade do Estado de Santa Catarina. UDESC, 2001. 42 p. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlando/materiais/APOSTILANATOMIA1.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2010.

COSTA, T. C. **Atividade Mutagênica em Bacia Hidrográfica Influenciada por Sítio de contaminação de Solos**. Porto Alegre. 2010. 98p. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Instituto de Biociências, UFRGS, Brasil.

CRUZ, M. A. O. **Avaliação de Método Instrumental de Inspeção de Postes de Madeira em Serviço na Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. Porto Alegre. 2011. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Faculdade de Engenharia, Física e Química, PUCRS, Brasil.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I. MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicação e Preparação de Amostras: Materiais Poliméricos, Metálicos e Semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.

DUTT, D.; TYAGI, C. H. Comparison of various eucalyptus species for their morphological, chemical, pulp and paper making characteristics. **Indian Journal of Chemical Technology**, v. 18, n. 2, p. 145-151, Mar 2011.

EVANS, J. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: Analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 7-8, p. 75-87, Jul-Aug 2000.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. **Melhoramento Genético da Densidade da Madeira de Eucalipto**. Boletim Informativo - IPEF, Piracicaba, v. 6, n.20, p. A1-A14, nov.1978.

FILHO, M. T. **Variação Radial da Densidade Básica e da Estrutura Anatômica da Madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis***. IPEF, Piracicaba, n. 29, p.37-45, abr. 1985.

FLORES, D. M. M. **Variação das Características Dendrométricas, da Qualidade da Madeira e da Celulose Entre Árvores de um Clone de *Eucalyptus Saligna* SMITH**. Santa Maria –RS. 1999. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade de Santa Maria, Brasil.

FOELKEL, C. E. B. *et al.* Métodos para Determinação da Densidade Básica de Cavacos para Coníferas e Folhosas. **IPEF** São Paulo. v. 3, n. 2, p.65-74, 1971.

FOELKEL, C. Teores de Componentes Inorgânicos e Minerais nas Madeiras dos Eucaliptos. in: Eucalyptus Online Book & Newsletter. p. 89-98. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_minerais.pdf>. Acesso em: 02 Mar 2011.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. Processos Práticos Para Preservar a Madeira. Paraná. **Comunicado Técnico 96. EMBRAPA**, 49 p., ago. 2004.

GOMES, I. M. B.; PEREIRA, A. M.; YODOVAL, P. Mix de Madeiras a Busca do Melhor Desempenho Global. In: 31º Congresso Anual da ABTCP. São Paulo, 1998. Anais p. 403-415.

GONZAGA, A. L. Madeira Uso e conservação. Brasília, DF. Cadernos Técnicos nº 6. IPHAN/MONUMENTA, 246 p., 2006.

HELSEN, L.; HACALA, A. Formation of metal agglomerates during carbonisation of chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste: Comparison between a lab scale and an industrial plant. **Journal of Hazardous Materials** [S.l.], v. 137, n. 3, p. 1438-1452, Oct 2006.

KLOCK, U. et al. **Química da Madeira**. 3. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. 86p. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinas/klock/quimicadamadeira/quimicadamadeira.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2010.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood In: **Wood handbook: Washington: U.S.D.A.** p. 100-145, 2010.

LEPAGE, E. S. et al. **Manual de Preservação de Madeiras: Vol. I e II**. São Paulo: IPT – Divisão de Madeiras, 1986. 701 p.

LOBÃO, M. S. et al. Caracterização das Propriedades Físico-Mecânicas da Madeira de Eucalipto com Diferentes Densidades. SIF – Sociedade de Investigações Florestais. **Revista Madeira**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.889-894, 2004.

LOGSDON, N. B. **Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira**. São Carlos. 1998. 200p. Tese (Doutorado em engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia, USP, Brasil.

LOGSDON, N. B.; JUNIOR, C. C. Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n.18, p.77-107, 2002.

MELO R. R. et al. Caracterização Física e Mecânica da Madeira de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v.5, n.1, p. 67-73, jan.-mar., 2010.

MORESCHI, J. C. **Produtos Preservantes de Madeira**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/Preservantesdemadeira.pdf>>. Acesso em 17 set 10. 31p.

MORESCHI, J. C. Propriedades Tecnológicas da Madeira. 3a ed. Paraná: Departamento de Engenharia e tecnologia Florestal – UFPR. fev. 2010. 177p. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/publicacoes/propriedadesda madeira2010.pdf>> Acesso em: 10 fev. 2011.

MORRELL, J. J. Wood Pole Maintenance Manual, Forest Research Laboratory, Oregon State University: Corvallis, 1996.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMESTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do Teor de Umidade e da Densidade Básica na Madeira de Sete Espécies de Eucalipto. **Revista da Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OSHA Methods of Inspecting and Testing Wood Poles, 1910.269 App D, 2003.

PAINEL FLORESTAL. Postes de Madeira de Eucaliptos. [s.l], ago. 2009. Disponível em: <<http://painelflorestal.com.br/noticias/geral/5269/postes-de-madeira-eeucaliptos>>. Acesso em: 16 set. 10.

PIRES, M. **Otimização de processos de inspeção e retratamento de postes de madeira utilizados em redes de energia elétrica - Fase III** – Porto Alegre: PUCRS, AES Sul, 2009. 137 p.

Portal da Madeira. Espécies de Madeira: Lenho Xilogia. [S.l], out. 2009. Disponível em: <http://portaldamadeira.blogspot.com/2009_10_01_archive.html>. Acesso em: 11 jan. 2011.

POUBEL, D. S. et al. Estrutura anatômica e propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, 18(2), p. 117-126, Jun 2011.

REME, P. A.; HELLE, T. Assessment of transverse dimensions of wood tracheids using SEM and image analysis. **Holz Als Roh-Und Werkstoff**, v. 60, n. 4, p. 277-282, Aug 2002.

REME, P. A.; JOHNSEN, P. O.; HELLE, T. Assessment of fibre transverse dimensions using SEM and image analysis. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 28, n. 4, p. 122-128, Apr 2002.

Revista da Madeira. Influência da Idade nas Características do Eucalipto. Lavras. n. 92, out. 2005.

Revista da Madeira. Madeira Preservada – Os Impactos Ambientais. Minas Gerais. n. 100, nov. 2006.

Revista da Madeira. Madeira Preservada e seus Conceitos. Minas Gerais, n. 103, mar. 2007.

REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. B. Retratabilidade Volumétrica e Densidade Aparente da Madeira em Função da Umidade. *IPEF*, São Paulo, n. 39, p. 33-40, ago. 1988.

SEGANTINI, E.; DANTAS, S. T. Aplicação da Microscopia Eletrônica de Varredura Para a Avaliação de Embalagens, [S.l.]. **Instituto de Tecnologia de Alimentos**, v. 8, n. 2, 9 p., 1996. Disponível em: <http://cetea.ital.org.br/cetea/informativo/v8n2/v8n2_artigo2.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2010.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus spp.*** Piracicaba. 1990. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). ESALQ, USP, Brasil.

SHUPE, T. F.; HSE, C. Y.; ROLIADI, H. Removal of Creosote From Wood Particles at Different Horizontal and Vertical Locations of Decommissioned Poles Using Steam Treatment. **Wood and Fiber Science**, v. 38, n. 2, p. 345-350, Apr 2006.

USDA. Wood as an Engineering Material: Wood Handbook. United States: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

VASCONCELLOS, F. J.; FREITAS, J. A.; SILVA, A. C. Observação Microscópica de Inclusões Minerais no Xilema de Espécies Tropicais da Amazônia, Manaus. **Acta Amazônica**, v. 25, n. (1/2), p. 55-68, 1995.

VIDOR, F. L. R.; PIRES, M., DEDAVID, B. A.; MONTANI, P. D. B.; GABIATTI, A. Inspection of wooden poles in electrical power distribution networks in southern Brazil. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v.25, p.479 - 484, 2009.

VIDOR, F. L. R. **Avaliação da Vida Útil de Postes de Madeira de eucalipto em Serviço em Redes de Distribuição de energia Elétrica**. Porto Alegre. 2011. 130p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Faculdade de Engenharia, Física e Química, PUCRS, Brasil.

WASTOWSKI, A. D. **Química da Madeira**. Santa Maria: Departamento de Engenharia Florestal. UFSM, 2009. 104 p. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/apostila-de-quimica-da-quimica-da-madeira-pdf-a21924.html>>. Acesso em: 14 out. 2010.

Woodward, L. J. *Effective Management of Timber Power Poles*. Cheltenham, Preschem, Relatório Técnico, 1998.

ZBONAK, A.; BUSH, T.; GRZESKOWIAK, V. Comparison of tree growth, wood density and anatomical properties between coppiced trees and parent crop of six eucalyptus genotypes. **IUFRO - Improvement and Culture of Eucalypts**, p. 1-10, Durban, Oct. 2007.

ZHANG, S. Y. Mechanical-properties in relation to specific-gravity in 342 chinese woods. **Wood and Fiber Science**, v. 26, n. 4, p. 512-526, Oct 1994.

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.

ANEXOS

ANEXO A:

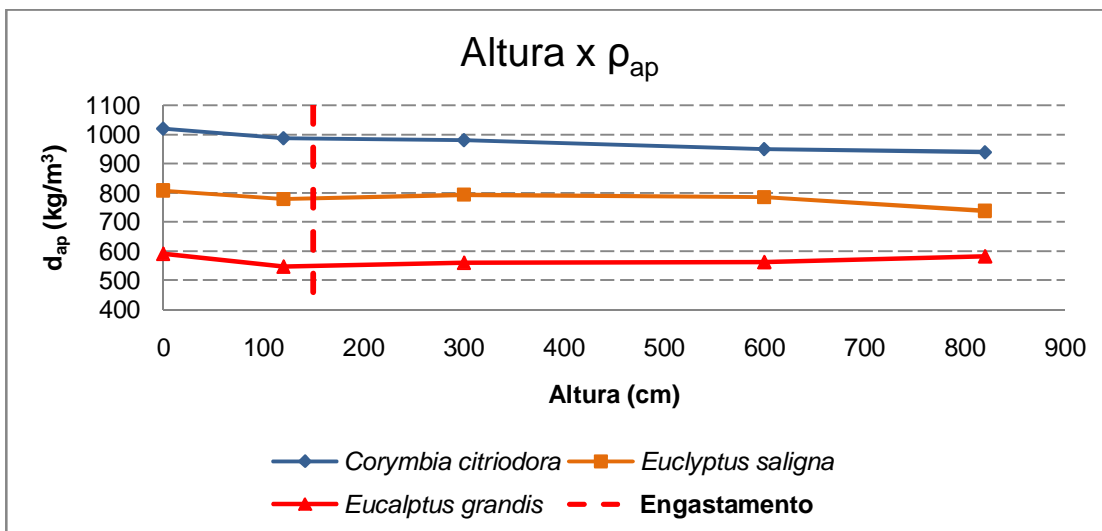


Figura A.1. Variação da densidade aparente com a altura de postes de 9 metros de diferentes espécies de madeira.

ANEXO B:

Tabela B.1. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e o estado de deterioração de 298 postes de madeira retirados da rede elétrica.

Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson	
	MOR		MOE		MOR
MOR	1	MOE	1	MOR	1
Classe	-0,28243503	Classe	-0,22169	MOE	0,721405
Matriz de P-valores		Matriz de P-valores		Matriz de P-valores	
	MOR		MOE		MOR
MOR	1	MOE	1	MOR	1
Classe	1,01444E-06	Classe	0,000161	MOE	0

Tabela B.2. Correlação de Pearson entre propriedades mecânicas, estado de deterioração e densidade de 61 postes de madeira retirados da rede elétrica.

Matriz de Correlação: Pearson				Matriz de Correlação: Pearson				Matriz de Correlação: Pearson	
	MOR	Classe	d_{ap}		MOE	Classe	d_{ap}		MOR
MOR	1	-0,36367	0,672552	MOE	1	-0,31652	0,522614909	MOR	1
Classe	-0,36367	1	0,171505	Classe	0,316518184	1	0,162477045	MOE	0,700185
d _{ap}	0,672552	0,171505	1	d _{ap}	0,522614909	0,162477	1		
Matriz de P-valores				Matriz de P-valores				Matriz de P-valores	
	MOR	Classe	d_{ap}		MOE	Classe	d_{ap}		MOR
MOR	1	0,003964	2,92E-09	MOE	1	0,016451	3,04326E-05	MOR	1
Classe	0,003964	1	0,1863	Classe	0,016451314	1	0,227223649	MOE	2,84E-06
d _{ap}	2,92E-09	0,1863	1	d _{ap}	3,04326E-05	0,227224	1		

Tabela B.3. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade de 8 postes de madeira novos.

Matriz de Correlação: Pearson			Matriz de Correlação: Pearson			Matriz de Correlação: Pearson		
	MOR			MOE			MOR	
MOR	1	MOE	1	MOR	1	MOE	0,518547	
d_{ap}	0,942909	d_{ap}	0,738096					
Matriz de P-valores			Matriz de P-valores			Matriz de P-valores		
	MOR			MOE			MOR	
MOR	1	MOE	1	MOR	1	MOE	0,187956	
d_{ap}	0,000446	d_{ap}	0,036553					

Tabela B.4. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade de postes de madeira classe 1.

Matriz de Correlação: Pearson			Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson		
	MOR			MOE	MOR	MOE	d_{ap}
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,754883	0,785849
d_{ap}	0,804618623	d_{ap}	0,550193	MOE	0,754883	1	0,584684
				d_{ap}	0,785849	0,584684	1
Matriz de P-valores			Matriz de P-valores		Matriz de P-valores		
	MOR			MOE	MOR	MOE	d_{ap}
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,000293	0,000111
d_{ap}	3,27181E-05	d_{ap}	0,022117	MOE	0,000293	1	0,010819
				d_{ap}	0,000111	0,010819	1

Tabela B.5. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade de postes de madeira classe 2.

Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson			
	MOR		MOE		MOR	MOE	d_{ap}
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,464614	0,774633
d _{ap}	0,804198	d _{ap}	0,686387	MOE	0,464614	1	0,686387
Matriz de P-valores		Matriz de P-valores		Matriz de P-valores			
	MOR		MOE		MOR	MOE	d_{ap}
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,069806	0,000426
d _{ap}	5,76E-05	d _{ap}	0,003321	MOE	0,069806	1	0,003321
				d _{ap}	0,000426	0,003321	1

Tabela B.6. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade de postes de madeira classe 3.

Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson			
	MOR		MOE		MOR	MOE	d_a)
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,887575744	0,773087
d _{ap}	0,80493	d _{ap}	0,680457	MOE	0,887575744	1	0,680457
				d _{ap}	0,77308652	0,680457089	1
Matriz de P-valores		Matriz de P-valores		Matriz de P-valores			
	MOR		MOE		MOR	MOE	d_{ap}
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,000265992	0,005265
d _{ap}	0,001587	d _{ap}	0,0212	MOE	0,000265992	1	0,0212
				d _{ap}	0,005264851	0,021200237	1

Tabela B.7. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a densidade de postes de madeira classe 4.

Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson		Matriz de Correlação: Pearson			
	MOR		MOE		MOR	MOE	d_{ap}
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,685731091	0,752518577
d _{ap}	0,752519	d _{ap}	0,639542273	MOE	0,685731	1	0,639542273
Matriz de P-valores		Matriz de P-valores		Matriz de P-valores			
	MOR		MOE		MOR	MOE	d_{ap}
MOR	1	MOE	1	MOR	1	0,013825076	0,004741378
d _{ap}	0,004741	d _{ap}	0,025129471	MOE	0,013825	1	0,025129471
				d _{ap}	0,004741	0,025129471	1

ANEXO C:

Tabela C.1. Resultados dos testes de flexão dos postes coletados, e de medidas de densidade, ordenados por classe de inspeção.

Características				Dimensional				Flexão						Densidade			Classe	
ID	Nº Poste	Preser- vante	Ano	Classe Inspeção	Circ.	Circ.	Comp.	Comp.	X	Y	p	l	MORf	MOEf	Médias			
	Inspeção				Engaste	Topo	Engaste	Total							d _b	d _{ap}		d _o
					[C] (cm)	[c] (cm)	[L _E] (m)	[L _T] (m)	(cm)	(cm)	(N)	(cm)	(MPa)	(MPa)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	
305	4717	CCA	2006	1	76	59	1,40	9,00	90	12	4929	728	26	5397	329	415	366	0
16	2343	CCA	2004	1	70	57	1,50	9,00		30	2450	700	16		369	471	418	0
304	4961	CCA		1	80	69	1,40	9,03	55	7	6125	736	28	8313	376	480	480	0
14	2385	CCA	2004	1	68	54	1,50	9,00	67	30	4410	700	31	8763	388	491	443	0
3	2342	CCA	2004	1	87	75	1,50	9,00	64	30	7840	700	26	5623	397	511	455	0
226	8805	CCA	2005	1	68	51	1,50	9,04	70	5	2264	729	17	5284	393	514	450	0
27	2075	CCA		1	66	50	1,50	9,00	74	30	4410	700	34	9464	423	573	490	1D
236	6799	CCA	2004	1	60	57	1,82	9,00	44	5	2117	693	22	8821	445	580	522	1D
26	2074	CCA		1	72	57	1,50	9,00	52	30	5978	700	35	12255	454	618	534	2D
85	10777	CCA	1991	1	78	58	1,50	9,00	90	6	3405	724	16	3451	530	697	648	3D
225	6775	CCA	2007	1	70	56	1,46	8,97	46	3	6086	728	42	18122	484	708	577	2D
249	4718	CRE		1	61	51	1,45	8,98	67	15	3734	718	37	11787	517	747	628	3D
250	4868	CRE	1997	1	71	60	1,58	9,07	32	1	8252	728	53	30903	552	793	684	4D

223	7239	CCA	1999	1	63	48	1,53	8,98	78	10	3567	715	33	9535	644	904	844	5D
245	4728	CCA	1997	1	74	55	1,42	8,99	41	3	8114	734	46	23441	646	906	848	5D
217	3276	CRE		1	62	49	1,73	8,98	55	6	5272	699	49	18544	617	928	794	5D
59	9635	CCA	1978	1	66	50	1,50	9,00	67	4	6495	726	52	17069	664	942	882	6D
227	2334	CRE		1	61	49	1,70	8,95	60	10	6938	695	67	23326	621	956	821	5D
4	2454	CCA	1998	1	64	49	1,50	9,00	161	30	6860	700	58	7520	678	971	909	6D
238	2944	CCA	1992	2	69	57	1,53	9,11	104	15	5037	723	35	6524	376	482	427	0
243	4730	CCA		2	80	68	1,45	8,97	40	5	3214	727	14	5866	381	487	434	0
20	2978	CCA	2003	2	66	56	1,50	9,00		30	2156	700	17		407	516	468	1D
200	10760	CCA	1998	2	70	62	1,45	9,87	61	2	2058	820	16	5833	400	533	460	1D
19	2984	CCA		2	69	58	1,42	8,20		30	1764	628	11		430	552	500	1D
234	2972	CCA	1999	2	71	63	1,57	9,10	17	1	539	732	4	3726	437	570	510	1D
247	4715	CCA	1994	2	68	65	1,44	8,94	58	10	2940	720	21	6171	466	602	550	2D
220	10735	CCA	1999	2	70	64	1,55	9,11	45	5	2460	731	17	6434	472	630	560	2D
372	8285	CCA	2004	2	76	65	1,50	9,10	140	30	9447	710	48	5599	502	695	606	3D
91	10775	CCA	1991	2	72	55	1,60	10,00	74	5	3230	815	22	7614	556	738	689	4D
24	2268	CCA		2	68	57	1,50	9,00	50	30	5488	700	39	13911	602	831	766	5D
266	4714	CCA		2	76	59	1,50	8,94	65	10	6889	714	35	9853	609	861	779	5D
5	2983	CCA	1995	2	63	50	1,50	9,00	114	30	5096	700	45	8077	625	867	808	5D
6	2323	CCA		2	69	52	1,50	9,00	115	30	7840	700	53	9073	659	938	872	6D

15	2951	CCA	1995	2	69	55	1,60	10,00	114	30	7840	790	60	12392	669	948	892	6D
88	10779	CCA	1991	2	80	68	1,70	11,00	35	2	7235	908	41	29401	678	968	910	6D
144	9686	CRE		2	70	60	1,86	9,00	55	4	7536	690	48	14541	672	970	898	6D
68	9716	CRE		2	72	54	1,50	9,00	65	4	7505	726	46	14500	717	1044	994	7D
2	2921	CCA		3	74	61	1,50	9,00		30	1274	700	7		369	455	418	-
374	8452	CCA	2005	3	74	54	1,50	9,10	41	1	1000	739	6	2974	384	481	438	-
240	4964	CCA		3	81	70	1,40	8,98	62	6	4773	732	21	5368	400	486	459	1D
224	2939	CCA	1994	3	65	53	1,42	8,98	45	1	1617	735	14	6636	420	532	487	1D
232	9876	CCA		3	66	54	1,67	8,97	52	4	3744	706	29	10895	433	563	504	1D
92	10778	CCA	2002	3	83	64	1,70	11,00	61	4	1480	906	7	3261	467	597	553	2D
134	9704	CCA	1998	3	63	51	1,47	9,06	50	5	1617	734	15	6661	468	615	554	2D
222	10730	CRE		3	89	68	1,55	10,98	94	4	6292	919	26	7344	554	795	685	4D
135	9636	CCA		3	66	46	1,46	9,01	103	12	3048	723	25	5698	585	799	738	4D
9	3003	CCA		3	79	70	1,50	9,00	31	30	5880	700	26	12327	625	869	810	5D
155	9532	CCA	1999	3	65	46	1,62	9,15	60	12	5145	721	43	16993	645	895	845	5D
228	2332	CCA	1994	3	59	46	1,40	9,02	80	15	3254	727	37	11348	682	994	918	6D
237	8811	CCA	2000	4	87	76	1,49	8,99	30	1	2470	729	9	4289	394	518	450	-
199	10761	CCA		4	67	54	1,44	8,96	76	10	2450	722	19	5054	450	597	529	2D
87	6816	CCA	1985	4	76	50	1,70	11,00	96	5	2585	905	17	6015	537	707	659	3D
94	7234	CCA		4	81	55	1,70	11,00	70	5	1945	905	10	4661	564	742	702	4D

253	4965	CRE		4	64	49	1,44	8,90	70	10	2068	716	18	5584	621	844	801	5D
18	2365	CCA		4	65	49	1,50	9,00	64	30	3430	700	28	9072	609	845	779	5D
181	8797	CRE		4	67	52	1,86	9,89	75	12	3920	771	32	10131	634	883	825	5D
17	2858	CCA		4	75	57	1,50	9,00	55	30	6860	700	36	11698	643	907	841	5D
10	2410	CCA		4	67	47	1,50	9,00	101	30	5096	700	37	8107	646	908	847	5D
231	7083	CCA		4	72	52	1,46	9,50	47	1	3930	783	26	13679	632	928	821	5D
120	3264	CRE		4	72	68	1,40	9,12	48	5	3881	747	25	8774	678	959	910	6D
169	8789	CCA		4	60	53	1,53	8,96	100	13	2803	710	29	5796	676	968	909	6D
259	Novo	CCA	2010	-	87	59	1,55	12,02	69	5	18865	1022	92	49689	726	1121	1015	7D
287	Novo	CCA	2010	-	93	68	1,80	12,01	150	30	11878	971	46	8910	382	524	434	-
Poste 1	Novo	CCA	2009	-	75	58	1,50	9,00	70		9310	730	62	12734	440	649	514	1D
Poste 2	Novo	CCA	2009	-	79	53	1,60	10,00	95		7840	820	52	10824	398	536	456	-
Poste 3	Novo	CCA	2009	-	79	63	1,70	11,00	70		9800	910	73	12411	425	658	493	1D
<i>E. grandis</i>	Novo	SEM		-									51	7007		479		
<i>E. saligna</i>	Novo	SEM		-									66	7516		690		
<i>C. citriodora</i>	Novo	SEM		-									110	13801		1072		

ANEXO D:

Tabela D.1. Resultados das medidas de densidade e diâmetro de lúmen das fibras dos postes em base corrida.

Características						Densidade										Lúmen			
Base	ID	Ano	Comp. (L _T)	Classe	Preser- vante	ρ _{ap}			ρ _b			ρ ₀			Classe	d _M (médio)	Dp	Dp (%)	Nº
Corrida			(m)	Inspeção		(kg/m ³)	Dp	Dp (%)	(kg/m ³)	Dp	Dp (%)	(kg/m ³)	Dp	Dp (%)	NBR 8456	(μm)			Medidas
<i>C. citriodora</i>		2009	9	-	SEM	979	29,1	3	697	15,3	2	951	32,5	3	6D	2,51	1,38	59	95
<i>E. saligna</i>		2009	9	-	SEM	781	23,3	3	589	15,5	3	744	26,4	4	4D	5,00	1,68	34	175
<i>E. grandis</i>		2009	9	-	SEM	563	41,1	7	440	26,4	6	515	37,4	7	1D	7,94	2,33	29	150
1	88	1991	11	2	CCA	968	30,8	3	678	18,3	3	910	37,1	4	6D	2,58	1,36	53	20
2	228	1994	9	3	CCA	994	15,2	2	682	8,4	1	918	17,5	2	6D	3,6	1,20	33	29
3	233		9	3	CCA	1028	28,2	3	704	7,8	1	965	17	2	7D	2,42	0,99	41	48
4	120		9	4	CRE	959	23,4	2	678	4,2	1	910	8,6	1	6D	2,38	0,60	25	21
5	226	2005	9	1	CCA	548	15,3	3	393	35,6	9	450	18,1	4	-	7,1	2,43	34	47
6	236	2004	11	1	CCA	580	33,5	6	445	32	7	522	45,3	9	1D	6,43	2,39	37	60
7	20	2003	9	2	CCA	516	19,9	4	407	11,5	3	468	15,6	3	1D	8,03	2,48	31	60
8	220	1999	9	2	CCA	630	15	2	472	12,1	3	560	17,6	3	2D	7,08	2,91	41	50
9	234	1998	9	2	CCA	570	10,9	2	437	2,2	0	510	3	1	1D	7,73	2,4	31	35

10	238	1992	9	2	CCA	482	4,1	1	376	6	2	427	7,9	2	-	9,56	3,28	34	36
11	92	2002	11	3	CCA	597	11,4	2	467	77,7	2	553	11,1	2	2D	9,14	3,42	37	49
12	224	1994	9	3	CCA	532	40,6	8	420	28,7	7	487	40	8	1D	9,6	4,51	47	33
13	232		9	3	CCA	563	44,1	8	433	33,7	8	504	47	9	1D	6,89	2,12	31	55
14	237	2000	9	4	CCA	518	8,2	2	394	8,4	2	450	11,3	3	-	10,41	2,23	21	39
15	85	1991	11	1	CCA	697	20,9	3	530	12,1	2	648	18,9	3	3D	4,69	1,82	39	41
16	225	1997	9	1	CCA	689	15,6	2	484	26,3	5	577	39	7	2D	4,79	1,68	35	38
17	91	1991	10	2	CCA	738	20,5	3	556	12	2	689	19,6	3	4D	6,55	2,73	42	60
18	222		9	3	CRE	773	35,9	5	554	29,3	5	685	47,5	7	4D	4,47	2,21	49	41
19	87	1985	11	4	CCA	707	57,9	8	537	37,3	7	659	58,7	9	3D	6,41	2,54	40	34
20	94		11	4	CCA	742	44,6	6	564	26,2	5	702	42,8	6	4D	4,84	1,82	38	46
21	227	1986	9	1	CRE	944	19,5	2	621	10,1	2	821	18,6	2	5D	7,01	2,69	38	33
22	217		9	1	CRE	928	47	5	617	23,2	4	794	41	5	5D	6,09	2,91	48	40
23	223		9	1	CCA	904	12,1	1	644	11,5	2	844	21,9	3	5D	4,88	2,23	46	67
24	215		9	1	CRE	892	23,7	3	625	10,6	2	808	19,4	2	5D	4,63	3,98	86	36
25	24	2004	9	2	CCA	831	14,9	2	602	7,3	1	766	12,8	2	5D	4,98	2,61	52	34
26	15	1995	10	2	CCA	948	19,4	2	699	10,6	2	892	21,2	2	6D	3,3	0,84	26	26
27	5	1995	9	2	CCA	867	18,1	2	625	7,6	1	808	13,8	2	5D	2,92	1,2	41	39
28	9	1992	9	3	CCA	869	85,8	10	625	46,3	7	810	83,7	10	5D	5,97	1,71	29	29
29	231		9	4	CCA	928	50,8	5	632	7,2	1	821	13,3	2	5D	5,1	2,52	49	44

30	68	9	2	CRE	1044	13	1	717	15,5	2	994	35	4	7D	4,19	1,67	40	31
----	----	---	---	-----	------	----	---	-----	------	---	-----	----	---	----	------	------	----	----

L_T : Comprimento total do poste.

d_M : Diâmetro médio do lúmen das fibras.

ANEXO E:

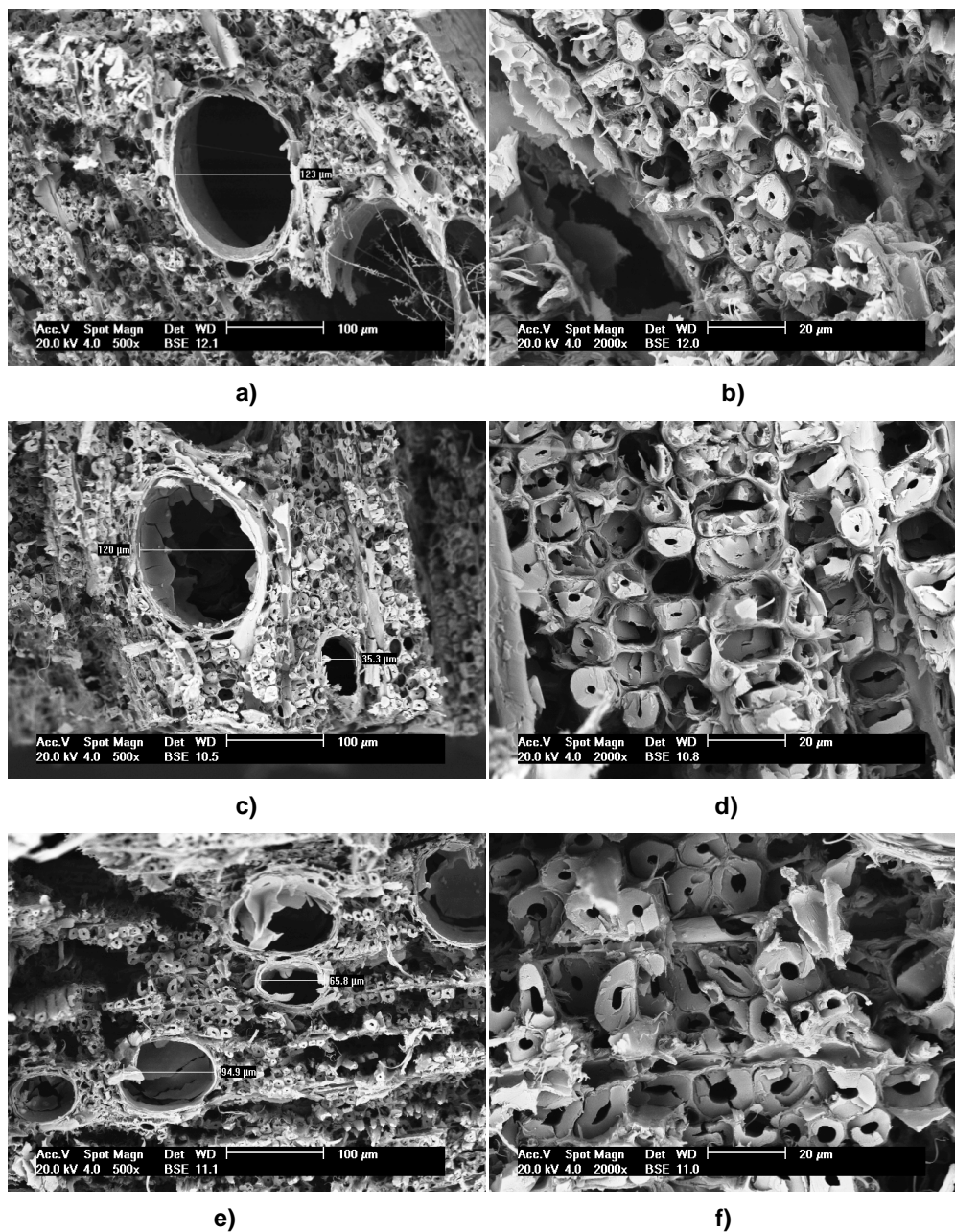


Figura E.1. Imagens de MEV em amostra da espécie *Corymbia citriodora* sem tratamento químico. Em a) e b) Alburno, c) e d) Cerne e e) e f) Medula.

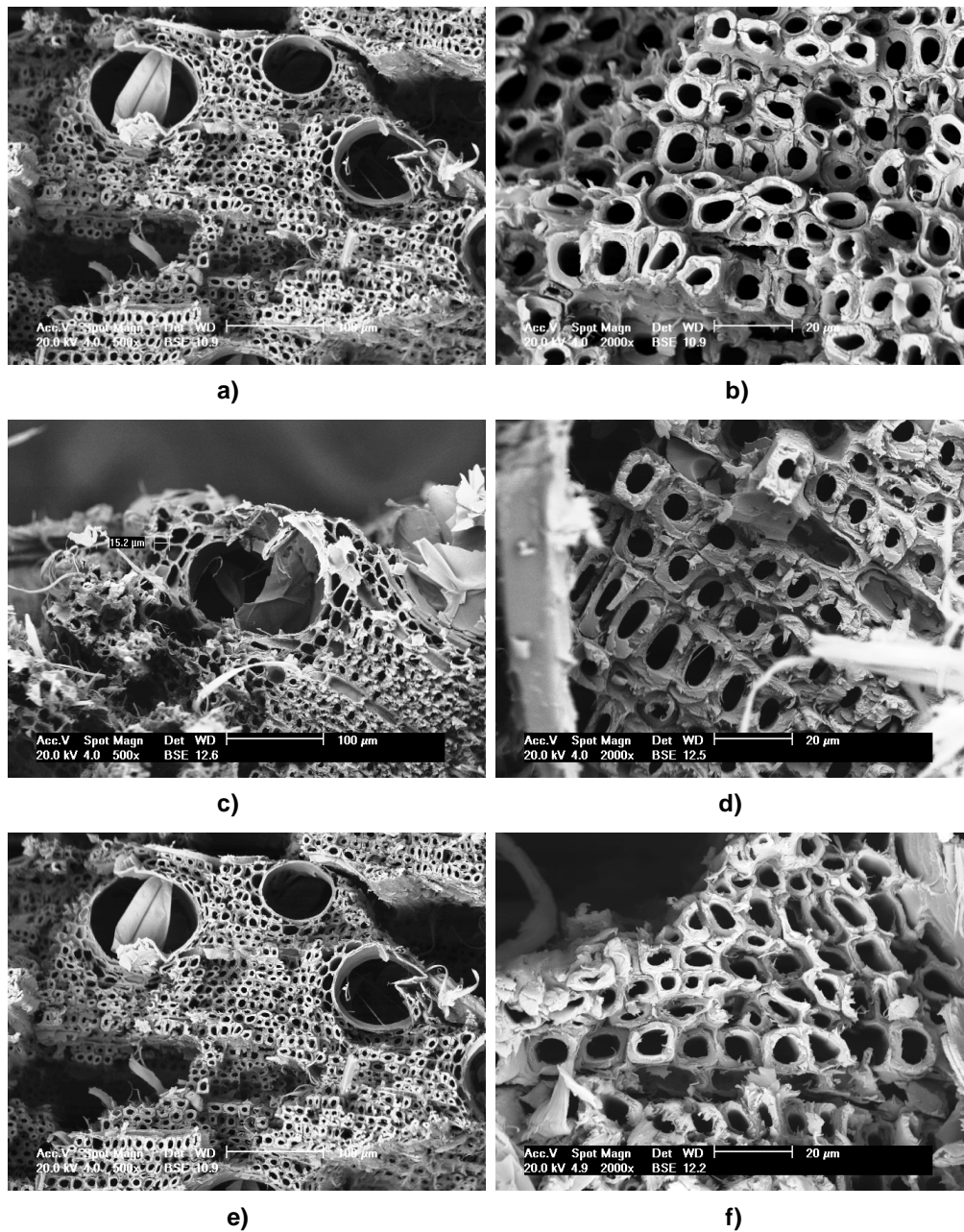


Figura E.2. Imagens de MEV em amostra da espécie *Eucalyptus saligna* sem tratamento químico. Em a) e b) Alburno, c) e d) Cerne e e) e f) Medula.

ANEXO F:

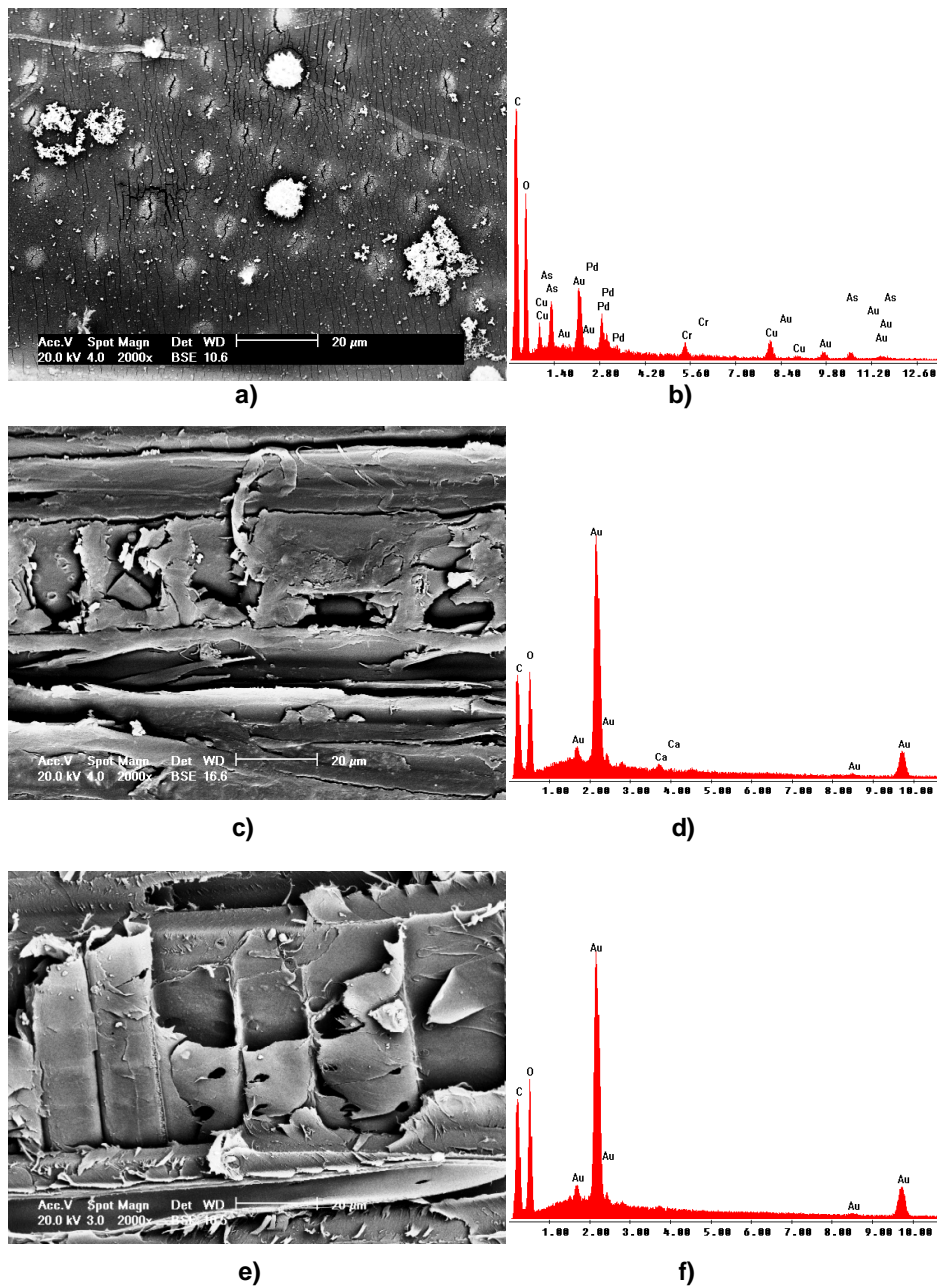


Figura F.1. Imagens de MEV/EDS poste novo (1). Em a), c) e e) Imagens de MEV amostra de alburno, cerne e medula respectivamente e b), d) e f) EDS realizado na área total da imagem do alburno, cerne e medula respectivamente.

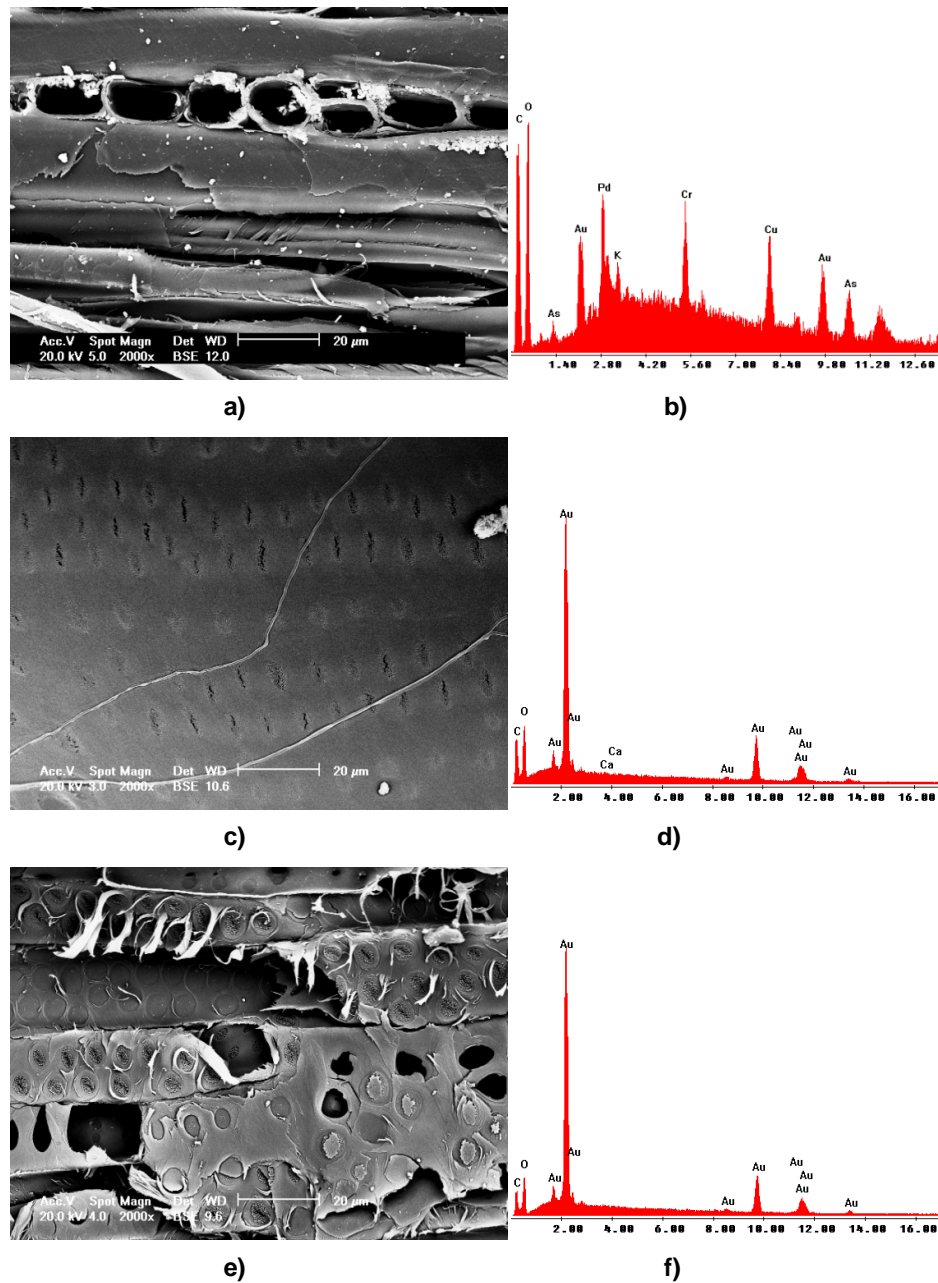


Figura F.2. Imagens de MEV/EDS poste novo (3). Em a), c) e e) Imagens de MEV amostra de alburno, cerne e medula respectivamente e b), d) e f) EDS realizado na área total da imagem do alburno, cerne e medula respectivamente.