

stricto
SENSU
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

JOCARLI ITAMIRÃ DUARTE ALENCASTRO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE POSTES DE
EUCALIPTO UTILIZADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

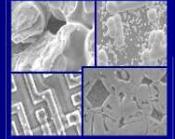
**Porto Alegre
2010**



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



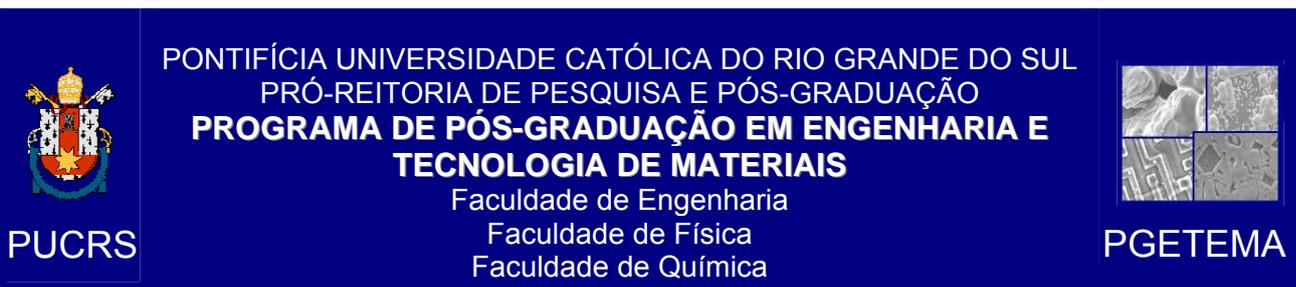
PGETEMA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE POSTES DE EUCALIPTO
UTILIZADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

JOCARLI ITAMIRÃ DUARTE ALENCASTRO
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

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

Porto Alegre
Março, 2010



**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE POSTES DE EUCALIPTO
UTILIZADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

JOCARLI ITAMIRÃ DUARTE ALENCASTRO
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ORIENTADOR: PROF(a). DR(a). BERENICE A. DEDAVID

CO-ORIENTADOR: Prof(a). Dr. MARÇAL R. PIRES

Dissertação 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 Madeira, AES- Sul Fase III

**Porto Alegre
Março, 2010**

“O único lugar onde o Sucesso vem antes
do Trabalho é no dicionário”

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para a todas aquelas pessoas que de forma direta e indiretamente ajudaram na minha formação pessoal e profissional, dedico em especial a minha mãe a quem tenho profunda admiração pela pessoa que é e por sempre estar muito presente na minha caminhada. “Agradeço a Deus por ter você não só como mãe mas como amiga, conselheira e companheira nas horas felizes e difíceis”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos meus professores e familiares, a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e em especial a Empresa AES Sul pelo financiamento desse projeto, aos professores Marçal R. Pires, Berenice A. Dedavid, Carlos Alexandre dos Santos, Vicente Cannali.

Aos colegas Flávio Vidor, Rafael Abruzzi, Willian Spagnollo ao funcionário Eduardo R. da Cruz do Laboratório de Mecânica dos Solos da PUCRS ao amigo Rafael Pruença e a empresa Postes Mariani.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE QUADROS	16
LISTA DE SÍMBOLOS	17
RESUMO	20
ABSTRACT	20
1. INTRODUÇÃO	22
2. OBJETIVOS	25
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1. Propriedades e Composição da Madeira	26
3.1.1. Umidade.....	29
3.1.1.1. Norma para cálculo da umidade	33
3.1.1.2. Umidade ao longo da madeira de eucalipto.....	34
3.1.2. Retrabilidade da madeira	35
3.1.3. Densidade	36
3.1.3.1. Variações da densidade na madeira de eucalipto	41
3.1.4. Velocidade de carga	43
3.1.5. Defeitos	45
3.2. O Eucalipto	46
3.2.1. Eucalipto e sua utilização como postes de madeira.....	48
3.2.2. Vantagens da utilização do eucalipto como postes para rede elétrica.....	49
3.2.3. Desvantagens da utilização do eucalipto como postes para rede elétrica	50
3.2.4. Clonagem do Eucalipto	51
3.2.4.1. Clonagem para postes de madeira	52
3.2.5. Deteriorização da madeira	53
3.3. Inspeção e re-tratamento de postes de eucalipto	54
3.3.1. Características de postes de madeira utilizados pela AES Sul.....	56
3.4. Ensaios mecânicos	58

3.4.1. Ensaio não destrutivos	59
3.4.1.1. Raios x	60
3.4.1.2. Ultra som	61
3.5. Ensaio destrutivos	64
3.5.1. Ensaio de compressão.....	64
3.5.1.1. Norma para ensaio de compressão paralelo as fibras	66
3.5.1.2. Ensaio de compressão paralelo as fibras NBR 7190	68
3.5.2. Ensaio de flexão.....	70
3.5.2.1. Ensaio de flexão em postes de madeira	71
3.5.2.2. Método de fixação em três pontos	71
3.5.2.3. Método engastado.....	72
3.5.2.4. Normas para flexão em postes de madeira NBR8456	73
3.5.3. Apresentação da norma NBR 6231 (ABNT, 1980).....	76
3.5.4. Apresentação da norma ASTM D 1036 (1990)	78
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	80
4.1. Fluxograma dos procedimentos	80
4.2. Inspeções.....	81
4.3. Ensaio de Flexão	82
4.4. Coleta das amostras	84
4.5. Preparação dos CPs	87
4.5.1. Classificação e Numeração dos CPs.....	88
4.6. Ensaio de compressão	88
4.7. Ensaio para avaliação da umidade	91
4.8. Medidas de Densidade.....	92
4.8.1. Relação de Cerne e Alburno.....	93
4.8.2. Método para análise dos resultados	94
4.9. Campo de testes para ensaio de flexão no sistema engastado.....	95
4.9.1. Motor.....	96
4.9.2. Célula de carga e indicador	96
4.9.3. Dispositivos mecânicos.....	98
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
5.1. Inspeções.....	101
5.2. Ensaio de flexão	103

5.2.1. Ensaio de flexão e inspeções para faixa de densidade de 800 kg/m ³	106
5.2.2. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a classe no ensaio de flexão para faixa de densidade de 800 kg/m ³	106
5.3. Relação entre densidade e espécie	107
5.4. Ensaio de compressão e estudo das variáveis ao longo do poste	108
5.4.1. Correlações entre as propriedades para CPs de postes novos ao longo do comprimento do poste.....	109
5.4.1.1. Densidade ao longo do poste.....	111
5.4.1.2. Umidade ao longo do poste	112
5.4.1.3. Tensão de ruptura ao longo do poste “ σ_{rc} ”	112
5.4.1.4. Módulo de elasticidade a compressão ao longo do poste “ E_c ”	113
5.4.1.5. Regressões encontradas para as caracterizações ao longo do poste .	114
5.4.1.6. Comentários das variações de “ σ_{rc} ” e “ E_c ” ao longo do poste.....	115
5.5. Correlações com Alburno.....	116
5.6. Correlações entre as propriedades para CPs da mesma região de postes novos e retirados da rede que foram flexionados.....	118
5.6.1. Correlações envolvendo a Durabilidade	119
5.7. Correlações para CPs da mesma região de postes retirados da rede que não foram flexionados	121
5.8. Correlações entre “σ_{rc}”, “σ_{rf}”, “E_c” e “E_f”	122
5.8.1. Correlação entre compressão e flexão em postes flexionados e não flexionados.....	128
5.9. Comentários do ensaio de flexão realizado.....	128
5.9.1. Estudo do ângulo de aplicação da carga no ensaio de flexão	129
5.9.2. Relações da carga nominal com densidade do poste.....	135
5.9.3. Obtenção do Módulo de Elasticidade a flexão “ E_f ”.....	136
6. CONCLUSÕES	137
7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	139
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
ANEXOS	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Anatomia do tronco (GONZAGA, 2006)	26
Figura 3.2. Eixos ortogonais da madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987)	28
Figura 3.3. Demarcação de madeira juvenil, adulta e transição da madeira (LARA PALMA; BALLARIN, 2002)	28
Figura 3.4. Variação da resistência da madeira com a umidade (PFEIL, 2003).....	30
Figura 3.5. Relação entre a massa específica (ρ_0) e o teor de umidade máxima da madeira (U_{max}) (MORESCHI, 2002).....	31
Figura 3.6. Mapa de umidade relativa anual do ar (PFEIL, 2003).....	32
Figura 3.7. Variação da umidade da madeira segundo o local. Onde [1-2] - Em locais de aquecimento contínuo, [2-3] - Em locais fechados e aquecidos, [2-4] - Em locais fechados e cobertos, [3-5] - Em locais abertos e cobertos, [3-6] - Em locais abertos e descobertos, [5-7] - Em contato com focos de umidade (LNEC, 1997).....	32
Figura 3.8. Variação do teor de umidade da madeira, ao longo do tronco, de sete espécies de eucalipto (OLIVEIRA et al., 2005).....	35
Figura 3.9. a) Vista isométrica da madeira mostrando três direções principais; b) Diagrama de retração ou inchamento linear, em função do teor de umidade da madeira 1) Carvalho brasileiro 2) Eucalipto 3) Pinho brasileiro (PFEIL, 2003)	36
Figura 3.10. Ábaco de Kolmann (Relação entre umidade da madeira e seu peso específico) (KOLMANN; COTE, 1975).....	40
Figura 3.11. Variação da densidade em relação a medula casca (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005)	41
Figura 3.12. Secção transversal num tronco com gráfico comparativo: Comprimento das fibras, Largura do anel e Densidade (CARVALHO, 2007)	41
Figura 3.13. Variação da densidade em relação à altura (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005)	42
Figura 3.14. Variação da resistência a compressão F_c e do módulo de elasticidade E , em função do peso específico γ (propriedades a 15% de umidade) para diversas madeiras nacionais (IPT, 1985)	43

Figura 3.15. Variação da resistência referida a resistência obtida de ensaios com o tempo de duração da carga (FOSCHI, 2000).....	44
Figura 3.16. Defeitos da madeira: A - Fotografia de um nó morto, B - Fotografia de um nó vivo, C - Fotografia de um tronco com rachadura em forma de anel, D - Rachadura interna (QUOIRIN, 2004).....	46
Figura 3.17. Linha do tempo do eucalipto (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).....	47
Figura 3.18. Mercado do Eucalipto no Brasil (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).....	48
Figura 3.19. Melhoramento do Eucalipto (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).....	52
Figura 3.20. Peça de madeira que sofreu ataque de moluscos marinhos (PFEIL, 2003).....	54
Figura 3.21. Etapas: A: Análise da parte interna através de batidas com martelo; B: Verificação do apodrecimento externo, C: Verificação do apodrecimento interno; D: Re-tratamento (ARRUDA, 2006).....	55
Figura 3.22. Poste de madeira utilizado pela AES Sul (VIDOR, 2003).....	57
Figura 3.23. Esquema representativo do bulbo de vidro com alto vácuo para a produção de feixe de raios X (GARCIA, 2000).....	61
Figura 3.24. Técnica de transmissão do ultra som (ROSS; PELLE, 1994).....	62
Figura 3.25. Equipamento de ultra - som (SYLVATEST).....	62
Figura 3.26. Esquema de propagação de uma onda ultrasônica em a) tronco são; b) tronco deteriorado (SANDOZ, 2003).....	63
Figura 3.27. Ensaio de compressão longitudinal (GARCIA, 1999).....	64
Figura 3.28. CP para ensaio de compressão, NBR 7190 (ABNT, 1997).....	67
Figura 3.29. Diagrama tensão de formação específica para a determinação da rigidez à compressão paralela as fibras, NBR 7190, (ABNT, 1997).....	68
Figura 3.30. Diagrama de carregamento para determinação de rigidez da madeira em ensaios de compressão NBR 7190, (ABNT, 1997).....	70
Figura 3.31. Ensaio de flexão estática de quatro pontos ASTM D4761 (1996).....	72
Figura 3.32. Ensaio de flexão estática segundo a norma ASTM D4761(1996).....	72
Figura 3.33. Ensaio de flexão pelo método engastado (TORRÁN, 2008).....	73

Figura 3.34. Esquema para ensaio de flexão segundo a norma NBR 6231 (ABNT, 1980).....	76
Figura 3.35. Esquemático para ensaio de flexão em poste de madeira segundo a norma ASTM 1036 (1990) Standard Test Methods of Statics Testes of Wood Poles.....	78
Figura 4.1. Fluxograma dos procedimentos metodológicos	80
Figura 4.2. Poste marcado para coleta	81
Figura 4.3. Ensaio em campo de testes com aproximação a ASTM D 1036 (1990), mostrando flecha vertical “x”	83
Figura 4.4. Tração realizada com trator	83
Figura 4.5. Dinamômetro utilizado.....	84
Figura 4.6. Regiões de coleta das amostras. Em a) Poste novo utilizado a flexão e compressão, b) Poste retirado da rede utilizado a flexão e compressão, c) Postes novos utilizados somente a compressão, d) Poste retirado da rede utilizado a flexão, e) Poste retirado da rede utilizados a compressão.....	85
Figura 4.7. Amostras depois de preparadas retiradas de cada secção.....	86
Figura 4.8. Etapas da preparação dos CPs para compressão. Em a) e b) Corte em duas partes, c) Corte em 4 partes, d), e) Corte das regiões centrais para obtenção dos CPs, f) CPs sem acabamento, g) Aplainamento, h) Retificação, i) CPs finais com acabamento	87
Figura 4.9. Amostras na caixa de acondicionamento com sílica-Gel	89
Figura 4.10. Amostras na caixa de acondicionamento com sílica-Gel	89
Figura 4.11: A - Máquina para realização de testes de compressão. B - Extenssômetros utilizados para medir deformação no cálculo do módulo de elasticidade “ E_c ” (ARRUDA, 2006)	90
Figura 4.12. Estufa utilizada para secagem de CPs depois de ensaiados.....	91
Figura 4.13. Balança analítica utilizada para pesagem de CPs	92
Figura 4.14. CPs marcados com o-anisidina para diferenciar região de cerne e alburno (limitada pela linha laranja).....	94
Figura 4.15. Campo de testes para ensaio de flexão - AES Sul / PUCRS (Viamão).....	95

Figura 4.16. Guincho para tração do poste	96
Figura 4.17. Célula de carga com olhais, capacidade de 5T	97
Figura 4.18. Indicador para aquisição e transferência de dados	97
Figura 4.19. Indicador, certificado pelo Immetro	97
Figura 4.20. Trilho para deslocamento do guincho para tração para quatro tamanhos de poste	98
Figura 4.21. Estrutura “Girafa “ para deslocamento de poste do estaleiro até o engastamento	99
Figura 4.22. Engastamento com dispositivo de aprisionamento do poste	99
Figura 4.23. Em a) Carrinho para suporte do poste a ser ensaiado e b) carrinho para célula de carga	99
Figura 4.24. Arranjo final dos dispositivos no campo de testes	100
Figura 5.1. Mostra a relação entre o número de postes inspecionados e a classe	102
Figura 5.2. Variação da densidade com a altura do poste de 9 metros da espécie <i>E.citriodora</i>	111
Figura 5.3. Variação da umidade com a altura do poste de 9 metros da espécie <i>E.citriodora</i>	112
Figura 5.4. Variação de “ σ_{rc} ” com a altura do poste de 9 metros da espécie <i>E.grandis</i>	113
Figura 5.5. Variação de “ E_c ” com a altura do poste de 9 metros da espécie <i>E.citriodora</i>	114
Figura 5.6. a) Face 5 x 5 cm do CP com cerne e alburno, b) Variação da Densidade no CP	117
Figura 5.7. Densidade variando na secção tangencial no Eucalipto	118
Figura 5.8. Configuração de ensaio a flexão segundo ASTM D1036 (1990)	129
Figura 5.9. Força resultante (Fr), força normal (Fn) e ângulo (θ) para cálculo do fator de correção	132
Figura 5.10. Aproximação geométrica para estudo do ângulo de tração	132
Figura 5.11. Triângulos deduzidos	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Classe de umidade segundo NBR 7190 / 1997 (ABNT,1997).....	33
Tabela 3.2. Dimensões para postes de eucalipto segundo NBR 8456	74
Tabela 3.3. Elementos característicos dos eucaliptos segundo NBR 8456	75
Tabela 3.4. Distância “M” e “N” para ensaio segundo a norma ASTM D 1036.....	79
Tabela 4.1. Quantidade de postes e locais de realização a inspeção e coleta de postes para ensaio	82
Tabela 4.2. Indicativo dos testes de compressão e flexão em postes novos e retirados da rede	86
Tabela 5.1. Resultados do ensaio de flexão	104
Tabela 5.2. Postes dentro das condições de uso segundo NBR 8456 (ABNT, 1984) com a classe	105
Tabela 5.3. Ensaio de flexão e inspeções.....	106
Tabela 5.4. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.....	107
Tabela 5.5. Densidade aparente de algumas espécies de Eucalipto (Calil JR e Dias, 1997).....	107
Tabela 5.6. Média das variáveis ao longo do poste de <i>E.citriodora</i>	108
Tabela 5.7. Média das variáveis ao longo do poste de <i>E.saligna</i>	108
Tabela 5.8. Média das variáveis ao longo do poste para eucalipto <i>E.grandis</i>	109
Tabela 5.9. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes para <i>E.citriodora</i>	110
Tabela 5.10. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes para <i>E.saligna</i>	110
Tabela 5.11. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes para <i>E. grandis</i>	110

Tabela 5.12. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para umidade.....	114
Tabela 5.13. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para densidade.....	115
Tabela 5.14. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para tensão de ruptura a compressão.....	115
Tabela 5.15. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para módulo de elasticidade a compressão.....	115
Tabela 5.16. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.....	117
Tabela 5.17. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.....	118
Tabela 5.18. Correlação entre as variáveis em postes usados.....	119
Tabela 5.19. Postes com placa de identificação e classes.....	120
Tabela 5.20. Correlação entre as variáveis em postes usados com placa considerando durabilidade.....	120
Tabela 5.21. Correlações entre propriedades mecânicas em postes usados com amostras retiradas para compressão.....	121
Tabela 5.22. Faixa de densidade 400 kg/m ³ e média das variáveis na compressão e flexão.....	122
Tabela 5.23. Faixa de densidade de 500kg/m ³ e média das variáveis na compressão e flexão.....	123
Tabela 5.24. Faixa de densidade de 800 kg/m ³ e média das variáveis na compressão e flexão.....	123
Tabela 5.25. Faixa de densidade de 900 kg/m ³ e media das variáveis na compressão e flexão.....	123
Tabela 5.26. “ σ_{rc} ” e “ E_C ” médios para faixa de densidade de 400kg/m ³	124
Tabela 5.27. “ σ_{rc} ” e “ E_C ” médios para faixa de densidade de 500kg/m ³	125
Tabela 5.28. “ σ_{rc} ” e “ E_C ” médios para faixa de densidade de 600kg/m ³	125

Tabela 5.29. “ σ_{rc} ” e “ E_c ” médios para faixa de ensidade de 700kg/m ³	125
Tabela 5.30. “ σ_{rc} ” e “ E_c ” médios para faixa de densidade de 800kg/m ³	126
Tabela 5.31. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.....	126
Tabela 5.32. Média de “ σ_{rc} ” e “ E_c ” por faixas de densidade para postes usados flexionados	127
Tabela 5.33. Média de “ σ_{rc} ” e “ E_c ” por faixas de densidade para postes usados não flexionados	127
Tabela 5.34. Média de “ σ_{rc} ” e “ E_c ” por faixas de densidade para postes novos flexionados.....	127
Tabela 5.35. Correlações entre propriedades “ σ_{rc} ”, “ σ_{rf} ”, “ E_c ” e “ E_f ”	128
Tabela 5.36. ASTM 1036 D (1990) e distância “Y” e ângulo calculados para quatro tamanhos de postes	130
Tabela 5.37. ASTM 1036 D e distância “Y” e ângulo calculados adaptados a NBR 6231(1980) e espaço disponível para ensaio	131
Tabela 5.38. Carga nominal e peso de acordo com a classificação da NBR 8456 (ABNT,1984) para os tamanhos de postes estudados.....	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Parâmetro para classificação dos postes inspecionados e procedimentos (VIDOR, 2003).....	55
Quadro 5.1. Classificação segundo a metodologia proposta (GABIATT et al., 2010).....	102

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área inicial da secção transversal do trecho central do CP	m ²
A	Escala graduada	cm
ALB.	Porcentagem de alburno	
C	Circunferência na seção de engastamento	cm
c	Circunferência no ponto de aplicação de carga	cm
CN	Comprimento nominal	cm
CP	Corpo de prova	
Db	Densidade básica	
Dap	Densidade aparente	
Dap 12%	Densidade aparente a 12% de umidade	
DRL	Deformação residual longitudinal	
DRT	Deformação residual tangencial	
DUR.	Durabilidade	
E	Comprimento do engastamento	
E	Módulo de elasticidade	MPa
E_c	Módulo de elasticidade a compressão	MPa
E_f	Módulo de elasticidade a flexão	MPa
Eng	Engastamento	
E_{12}	Módulo de elasticidade corrigido a umidade de 12%.	MPa
E_u	Módulo de elasticidade a umidade aparente	MPa
f_{12}	Tensão de ruptura corrigida para umidade de 12%;	MPa
f_u	Tensão de ruptura a umidade aparente	MPa

$F_{c0 \text{ max}}$	Força máxima de compressão aplicada ao CP durante o ensaio	N;
f_{c0}	Força de resistência a compressão paralela as fibras	MPa
F_r	Força Resultante	N
F_n	Força Normal	N
H	Comprimento total do poste;	m
Hu ou L	Altura útil (H – E.– 30cm)	cm
I	Comprimento final	m
I_0	Comprimento inicial	m
m_i	Massa da madeira em gramas;	g
m_s	Massa da madeira seca em gramas.	G ou kg
M	Distância do ponto de aplicação da carga ao dispositivo de tração	
P	Carga de ruptura	N ou kgf
S	Área final	m ²
S_0	Área inicial	m ²
U	Porcentagem de umidade	
U_c	Porcentagem de umidade da madeira no teste de compressão	
U_f	Porcentagem de umidade da madeira no teste de flexão	
V	Volume final	m ³
V_0	Volume inicial	m ³
V_{sat}	Volume da madeira saturada	m ³
V_{seca}	Volume da madeira saturada	m ³
w	Comprimento do poste – (valor de Y)	m
X	Flecha	m

Y	Deslocamento do ponto de aplicação de carga em direção à base do poste	M
y	Deslocamento horizontal	m
Z	Distância do poste ao local de tração	m
σ	Ângulo formado entre poste e cateto x (Flecha)	Graus
σ_c	Tensão convencional	MPa
σ_r	Tensão real	MPa
σ_r	Tensão de ruptura	MPa
σ_{rc}	Tensão de ruptura a compressão	MPa
σ_{rf}	Tensão de ruptura a flexão	MPa
β	Ângulo entre força resultante (F_r) e cateto y (desloc. horizontal)	Graus
Δx	Flecha Máxima com carga nominal	cm
Δy	Flecha no sentido horizontal	cm
θ	Ângulo entre força normal (F_n) e a força resultante (F_r)	Graus
ρ_0	Massa seca da madeira	kg
ρ_{ap}	Volume da madeira saturada	m ³
//	Ausência de placa de identificação	
*	Poste que não alcançou a carga nominal de 300kgf	

RESUMO

ALENCASTRO, Jocarli. **Caracterização mecânica de postes de eucalipto utilizados em redes de distribuição de energia elétrica.** Porto Alegre. 2009. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Este estudo propõe a caracterização estrutural, por meio de ensaios mecânicos, de postes de eucalipto em serviço usados na rede elétrica. Os testes de flexão estática foram realizados em uma área de teste em campo construída de acordo com a NBR 6231 (ABNT, 1980) e ASTM D 1036-americanos (1990), enquanto os testes de compressão paralela as fibras foram feitos de acordo com a NBR 7190 (ABNT1997). As propriedades mecânicas, densidade e umidade ao longo de três postes novos, de diferentes espécies de eucalipto, também foram avaliadas, levando em conta a quantidade de cerne e alburno presentes nas amostras. Correlações entre os ensaios de compressão e flexão foram obtidos considerando-se a as diferentes faixas de densidade da madeira. Os resultados indicaram que a quantidade de cerne e alburno nas amostras afeta as propriedades mecânicas, especialmente se o corpo de prova for composto de apenas um desses componentes. Foi possível encontrar, dentre as espécies, a mais adequada para a fabricação poste. Além disso, ensaios de compressão realizados tanto em postes em serviço como novos, flexionados ou não, indicaram propriedades mecânicas semelhantes quando classificados na mesma faixa de densidades. As correlações estabelecidas são úteis para obter uma estimativa das propriedades mecânicas dos postes com a vantagem de ser um teste semi destrutivo, ao contrário dos testes de flexão.

Palavras-chave: propriedades mecânicas da madeira, ensaio de flexão, ensaio de compressão, postes de madeira.

ABSTRACT

ALENCASTRO, Jocarli. **Mechanical characterization of eucalyptus poles used in distribution networks for electricity.** Porto Alegre. 2009. Work plan. Pos-Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

This study proposes structural characterization, by means of mechanical tests, of the in service eucalyptus poles used in the electric network. The static bending tests were performed in a field test area constructed according to NBR 6231 (ABNT, 1980) and American ASTM D 1036 (1990) while the parallel fiber compression tests were made according to NBR 7190 (ABNT1997). The mechanical properties, density and moisture along the length of three new poles of different species were also evaluated, taking in account the amount of heartwood and sapwood present in the specimens. Correlations between the compression and bending tests were obtained taking into account different density ranges. The results indicated that the amounts of heartwood and sapwood in the specimens affect the mechanical properties especially if specimen is composed of only one of these components. It was possible to find the species which are more suitable to poles manufacture. In addition, compression tests performed either in service or new poles, bent or not, are similar for the specimens in the same density range. The established correlations are useful to obtain an estimation of the mechanical properties of the poles with the advantage of to be a not completely destructive test as bending test.

Key-words: mechanical properties of wood, bending tests, compression tests, wooden poles.

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de madeira para fins estruturais encontra-se por volta de 10^9 toneladas ao ano, o que torna este material muito importante no contexto mundial. O Brasil apresenta uma grande disponibilidade de madeira proveniente de reservas tropicais e de reflorestamentos, que necessitam de exploração adequada, (SALES, 2002).

Por outro lado, a distribuição de energia elétrica depende de estruturas de suporte, tais como postes, os quais podem utilizar a madeira como material básico para a sua produção. É fortemente recomendado que tais produtos possuam durabilidade suficiente, de modo que as qualidades e características originais sejam mantidas em serviço. Neste contexto, a madeira de reflorestamento particularmente o eucalipto, é alternativa competitiva para a distribuição de energia elétrica principalmente nas áreas rurais ALMG (Assembléia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 2009).

O material é durável e oferece vantagens incomparáveis de manejo, instalação e manutenção em serviço. Cada poste instalado é um investimento da distribuidora de energia e por isso deve dar retorno.

Do ponto de vista ecológico, a madeira preservada ajuda a poupar florestas nativas, além de contribuir de maneira expressiva no seqüestro de carbono da atmosfera, responsável pelo aquecimento global. Do ponto de vista energético, a fabricação de um poste de madeira consome 1056 Kcal contra 550.000 Kcal do poste de concreto. Postes de eucalipto preservado têm uma vida útil média que pode superar os 25 anos. Esse limite pode ser facilmente ampliado com o trabalho de manutenção periódica, além de apresentar o menor custo, motivos pelos quais também são aplicados em grande escala em diversos países.

Pesquisas indicam que 99% dos postes instalados anualmente nos EUA apresentam como material constituinte a madeira, sendo que 94% dos postes em serviço existentes neste país são constituídos de madeira (KLIEJUNAS, 2001).

As primeiras mudas de eucalipto que chegaram ao Brasil foram plantadas no Rio Grande do Sul em 1868. Porém, o plantio do eucalipto em escala comercial data da primeira década do século XX (1904). Inicialmente, foi introduzido como monocultura destinada a suprir a demanda de lenha para combustíveis das locomotivas e dormentes para trilhos da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Era utilizado para a produção de mourões de cercas e postes margeando a ferrovia, fornecendo ainda o madeiramento para a construção das estações e vilas. Do Estado de São Paulo, o plantio de eucalipto se estendeu para todo o centro e sul do País (www.almg.gov.br).

Postes de madeira também apresentam alta resistência mecânica e são leves. Postes de madeira roliça suportam esforços em qualquer direção, enquanto postes de concreto "duplo T" só suportam esforços em uma única direção, a madeira possui também resistência e elasticidade mecânica superiores, que podem representar menores danos em relação a ocorrências naturais e acidentais, exceto as provocadas pelo fogo. Finalmente, a madeira é quase seis vezes melhor isolante elétrico que o concreto, conferindo a elas um melhor desempenho em relação às descargas atmosféricas. Economicamente falando, o poste de madeira preservado é duplamente vantajoso em relação aos materiais concorrentes. Para as equipes de manutenção, as estruturas de madeira significam menor número de acessórios, peso inferior e maior facilidade para o manuseio e deslocamento dos postes e cruzetas (www.revistareferencia.com.br).

Dessa forma, o estudo do eucalipto seja ela baseada no melhoramento genético, controle de qualidade estrutural-mecânico e tratamento químico, torna-se necessário. Um dos fatores a considerar, é a vasta gama de espécies de eucalipto e suas respectivas características. Além disso, o aprimoramento genético dos últimos anos, desenvolvido grande parte pelas indústrias de celulose, exige uma seleção mais criteriosa da floresta utilizada para a confecção de postes para a rede elétrica.

Assim, os experimentos com testes mecânicos para caracterização de postes novos e em serviço quanto ao seu desempenho estrutural podem garantir a qualidade do produto e diminuir custo com futuras substituições. Pretende-se relacionar os resultados obtidos com testes de compressão e flexão em postes novos e postes com tempo de serviço variado. Será projetado um campo de testes para ensaios de flexão para postes de eucalipto em concordância com a Norma Brasileira NBR 6231 (1980) e Americana ASTM D 1036 (1990) para futuros testes. A relação entre o comportamento mecânico da madeira na compressão e na flexão, para faixas de densidade do eucalipto utilizada na rede elétrica tem a finalidade de diminuir o impacto econômico dos testes destrutivos indicados pela norma e qualificar ainda mais o produto.

2. OBJETIVOS

- Caracterização estrutural de postes de eucalipto novos e retirados da rede elétrica por meio de ensaios mecânicos;
- Propor uma relação entre os testes de flexão e de compressão por densidade da madeira;
- Projetar um campo de testes para ensaio de flexão de postes de madeira seguindo a norma brasileira NBR 6231 (ABNT, 1980) e a norma Americana ASTM D 1036 (1990);
- Utilizar o teste de compressão como indicador de resistência do poste;
- Verificar a correlação entre as classes atribuídas no processo de inspeção e as propriedades mecânicas resultantes do ensaio de flexão;
- Verificar se as amostras retiradas a compressão após o ensaio de flexão estariam com as propriedades mecânicas comprometidas;
- Estabelecer uma correlação entre as propriedades mecânicas, porcentagem de umidade, porcentagem de alburno e densidade para amostras retiradas ao longo do comprimento de três postes novos e para amostras retiradas na mesma secção em postes novos e retirados da rede;
- Estabelecer entre as espécies *E.grandis*, *E.citriodora* e *E.saligna* qual é mais indicada para confecção de postes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Propriedades e Composição da Madeira

A madeira é um polímero natural composto por celulose que é um carboidrato complexo e a lignina que é uma resina natural que protege as células. A composição química da madeira em termos médios apresenta 60 % de celulose e 25% de lignina e 15% e óleos resinas e amidos, taninos e açúcares e possui uma densidade em torno de 1,45 ton/m³. A Figura 3.1 mostra seus elementos fundamentais (GONZAGA, 2006).

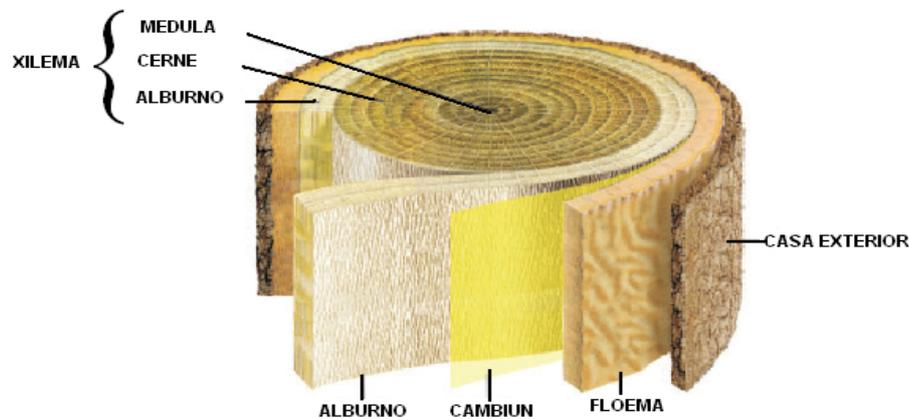


Figura 3.1. Anatomia do tronco (GONZAGA, 2006).

Segundo Gonzaga (2006) os elementos fundamentais do tronco são:

- **Casca Exterior:** Função de proteger o tronco que cresce diametralmente;
- **Floema:** Ou casca interior, localizado entre a zona cambial e a casca, é responsável pelo armazenamento e transporte da seiva elaborada. Após um

certo tempo, as células mais externas do floema morrem e passam a fazer parte da casca. Material utilizado para fazer cortiça;

- **Cambium:** Tecido de pequena espessura que produz o crescimento diametral do tronco gerando um anel exterior para o floema, e um interior para o xilema;
- **Xilema:** Ou lenho é a camada central da árvore, interna ao câmbio, e possui a função 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 alburno e cerne. Essa camada é anexada anualmente ao cerne;
- **Alburno:** Composto por células vivas e ativas, é mais claro, menos denso, contém mais água e é menos resistente mecanicamente a insetos e micro-organismos. É a parte do lenho que nas células vivas, contém materiais de reserva e conduz seiva bruta;
- **Cerne:** Por outro lado, é composto apenas por células mortas e inativas e apresenta maior resistência mecânica ao ataque de insetos e micro-organismos. O cerne possui baixa atividade fisiológica, menor umidade e é menos permeável;
- **Medula:** Ocupa a região central do tronco, cuja função é a de armazenar substâncias nutritivas. O seu tamanho, coloração e forma são muito variáveis, é uma região suscetível a apodrecimentos causados por fungos (toras ocas);

Devido a orientação das fibras a madeira constitui um material anisotrópico apresentando propriedades distintas nas três direções: paralela (longitudinal), perpendicular (radial) e tangencial às fibras, Figura 3.2.

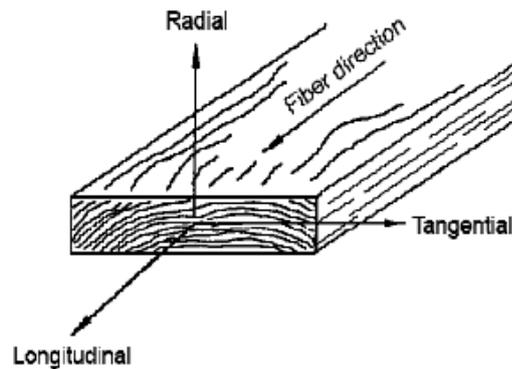


Figura 3.2. Eixos ortogonais da madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987).

As propriedades da madeira também possuem diferença dependendo de sua jovialidade. A madeira formada próxima a medula ou miolo é considerada madeira juvenil enquanto que mais próximo a casca é considerado madeira adulta, não que os anéis mais externos sejam mais antigos pois são os últimos a serem acrescentados na madeira em crescimento. Madeiras com maiores diâmetros são mais antigas do que as que possuem menor diâmetro. Segundo Palma e Ballarin (2002), conclui-se que a região compreendida entre o 14° e o 18° anel de crescimento de uma madeira de pinus de 37 anos é considerado uma região de transição ficando definidas como região de madeira juvenil desde o centro até o 14° anel e a região de madeira adulta desde o 18° até o 37° como ilustra a Figura 3.3.

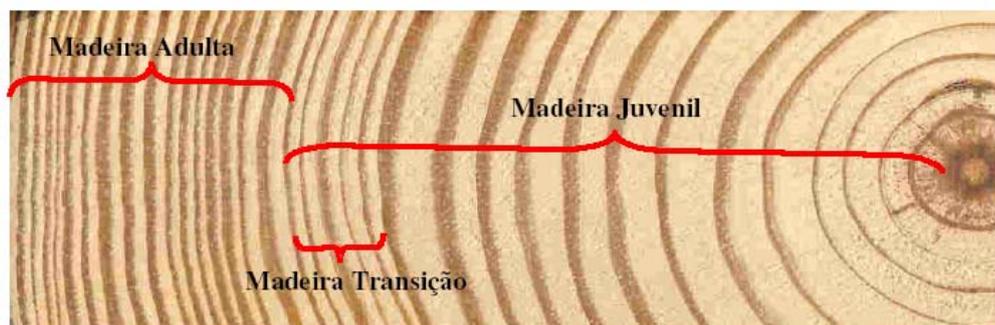


Figura 3.3. Demarcação de madeira juvenil, adulta e transição da madeira (LARA PALMA; BALLARIN, 2002).

A madeira juvenil em comparação com a madeira adulta apresenta entre outras características:

- Menor densidade;
- Paredes celulares mais finas;
- Maior conteúdo de lignina e hemicelulose;
- Menor conteúdo de celulose;
- Menor resistência.

Tanto o módulo de elasticidade como a tensão de ruptura a compressão paralela e normal as fibras, flexão estática e tração paralela as fibras, são seriamente afetados pela presença de madeira juvenil (KRETSCHMANN; BENDTSEN, 1992, KRETSCHMANN, 1997), (MCALISTER et al., 1997), (EVANS et al., 2000).

Peças estruturais que contenham uma determinada quantidade de madeira juvenil apresentam classes de resistências inferiores, sendo esse o motivo pelo qual as diferenças entre as propriedades da madeira juvenil e adulta são importantes para a utilização racional da madeira (MCALISTER; CLARK, 1991 e GEIMER et al., 1997).

3.1.1. Umidade

A umidade tem efeito sobre as propriedades das madeiras. Com o aumento da umidade a resistência mecânica diminui até ser atingido o ponto de saturação das fibras, acima desse ponto a resistência mantêm-se constante (PFEIL, 2003).

Na Figura 3.4 vê-se um diagrama de variação da resistência a compressão com a umidade. Acima do ponto de saturação das fibras (30% de umidade), volume e peso específico da madeira não são influenciados pelo grau de umidade resultando numa resistência praticamente constante. Com a secagem da peça abaixo do ponto de saturação das fibras, observa-se redução do volume e aumento do peso específico e da resistência. Pode-se considerar-se aproximadamente linear a variação das propriedades da madeira com a umidade entre 2% e 25%. De acordo

com a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) os valores de resistência podem ser corrigidos em CPs com a umidade entre 10% e 20% para o teor de umidade padrão de 12% admitindo-se 3% de variação na resistência para 1% de variação da umidade onde U é expresso em percentual. Para o módulo de elasticidade a correção é feita admitindo-se 2% de variação. As Equações (3.1) e (3.2) mostram as equações para correção de tensão de ruptura e módulo de elasticidade.

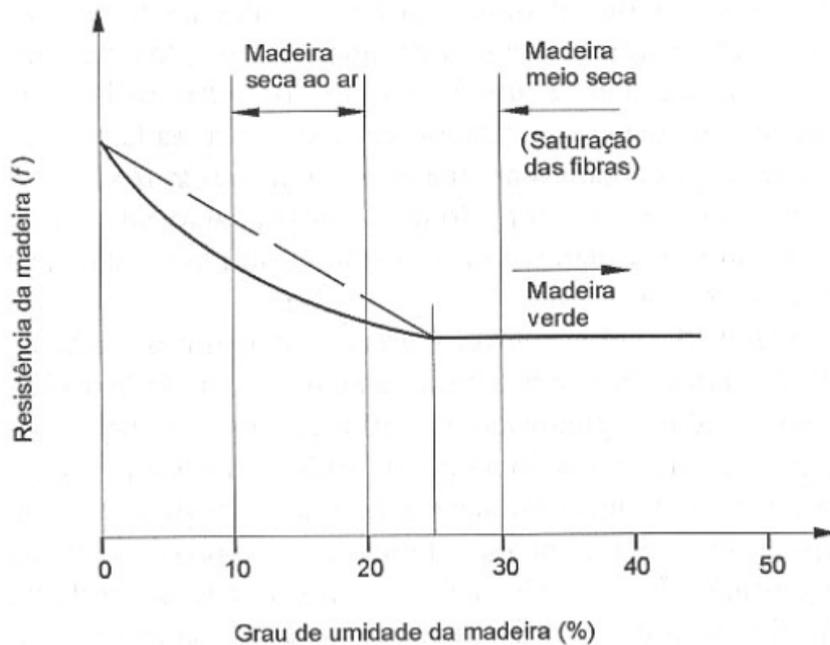


Figura 3.4. Variação da resistência da madeira com a umidade (PFEIL, 2003).

$$f_{12} = f_u \left[1 + \frac{3(U - 12)}{100} \right] \quad (3.1)$$

$$E_{12} = E_u \left[1 + \frac{2(U - 12)}{100} \right] \quad (3.2)$$

Onde:

f_{12} : Tensão de Ruptura corrigida para umidade de 12%, (MPa);

f_u : Tensão de ruptura a umidade aparente, (MPa);

E_{12} : Módulo de elasticidade corrigido a umidade de 12%, (MPa);

E_u : Módulo de elasticidade a umidade aparente, (MPa);

U : Porcentagem da umidade aparente;

De acordo com a densidade ou massa específica a madeira pode ter mais ou menos umidade. A Figura 3.5 mostra a relação entre densidade e umidade. Madeiras com alta massa específica apresentam um teor de umidade máxima baixo e madeiras com baixa massa específica apresentam um teor de umidade máxima elevado. Em árvores vivas ou recém abatidas, o teor máximo de água é encontrado normalmente no alburno, já que no cerne, devido a suas transformações fisiológicas, sempre há um decréscimo no teor de umidade, fazem exceção a esta regra, madeiras de cerne úmido, em parte com problemas patológicos. A constituição anatômica da madeira também tem grande influência sobre o teor de umidade: O lenho inicial, por exemplo, com células de paredes finas e lumens grandes, normalmente contém mais água que o lenho tardio constituído de células com paredes espessas e lumens pequenos (MORESCHI, 2002).

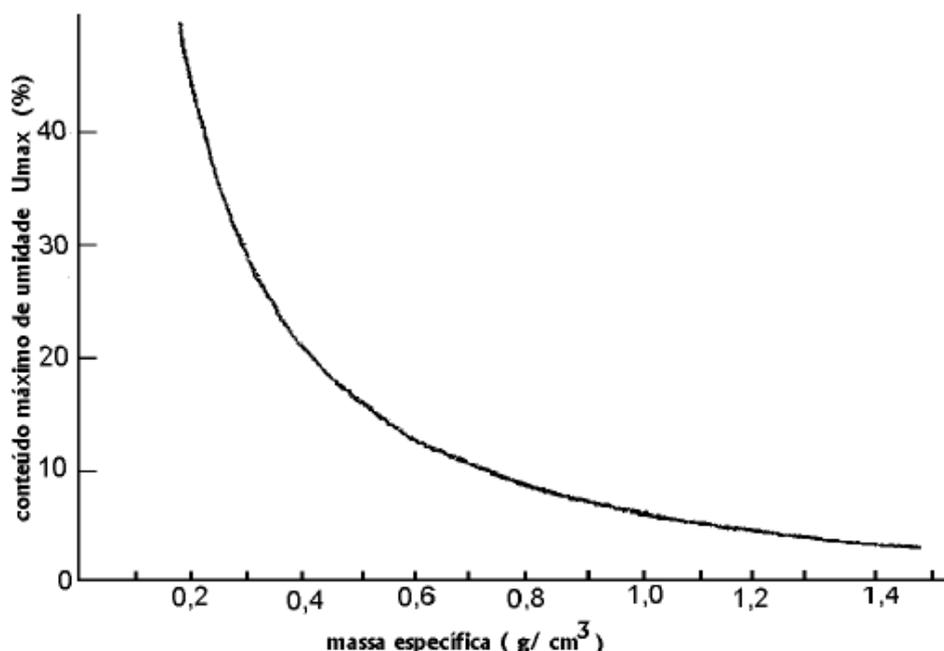


Figura 3.5. Relação entre a massa específica (ρ_0) e o teor de umidade máxima da madeira (U_{\max}) (MORESCHI, 2002).

A umidade relativa pode interferir na umidade da madeira. A umidade relativa no Brasil em diferentes regiões pode ser vista no mapa de umidade relativa anual do ar conforme Figura 3.6. Tal interferência pode ser vista no gráfico da Figura 3.7.

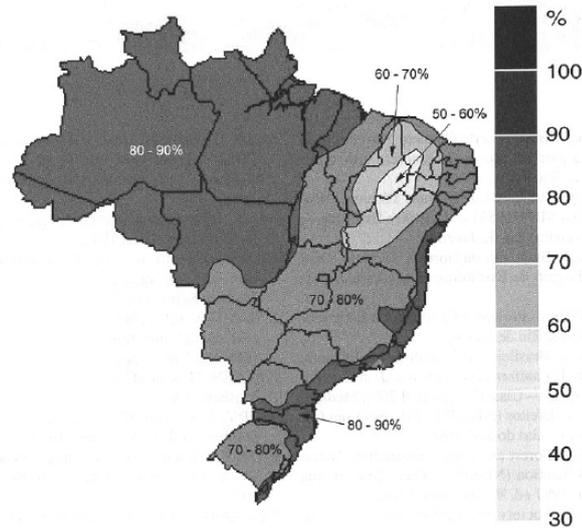


Figura 3.6. Mapa de umidade relativa anual do ar (PFEIL, 2003).

A Figura 3.7 indica graficamente a variação esperada do teor de água de equilíbrio da madeira em relação a umidade local.

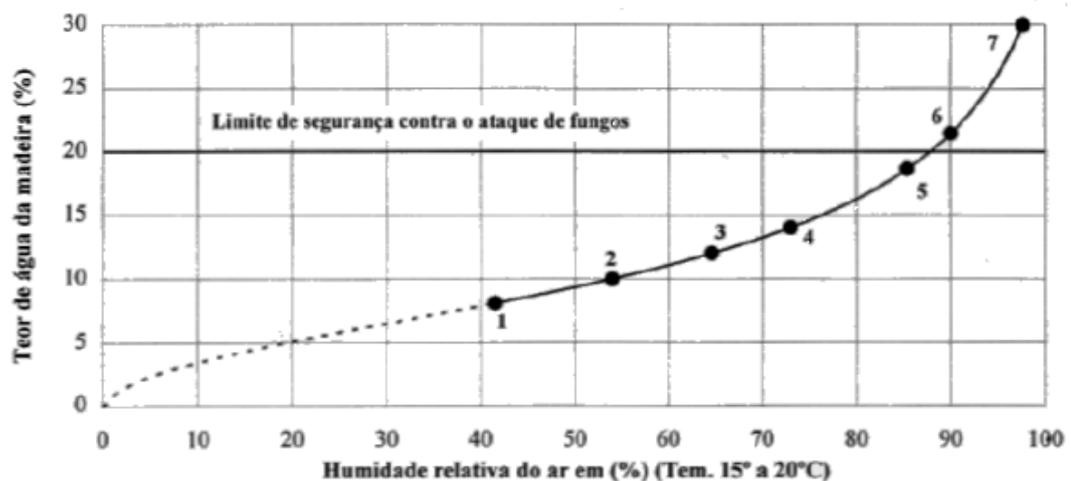


Figura 3.7. Variação da umidade da madeira segundo o local. Onde [1-2] - Em locais de aquecimento contínuo, [2-3] - Em locais fechados e aquecidos, [2-4] - Em locais fechados e cobertos, [3-5] - Em locais abertos e cobertos, [3-6] - Em locais abertos e descobertos, [5-7] - Em contato com focos de umidade (LNEC,1997).

O grau de umidade da madeira seca ao ar depende da umidade atmosférica variando geralmente entre 10 e 20% para umidade relativa do ar entre 60 e 90% e a 20°C de temperatura (KARLSEN, 1967).

Em face do efeito da umidade nas outras propriedades da madeira, é comum referirem-se estas propriedades a um grau de umidade padrão. No Brasil e nos Estados Unidos, adotam-se 12% como umidade-padrão de referência. Devido a natureza higroscópica da madeira, o grau de umidade de uma peça em serviço varia continuamente, podendo haver variações diárias ou de estação.

A norma NBR 7190 classifica por classes de umidade a madeira de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Classe de umidade segundo NBR 7190 / 1997 (ABNT, 1997)

Classes de Umidade	Umidade do ambiente	Umidade de equilíbrio
1	≤ 65 %	12%
2	65% < Uamb ≤ 75%	15%
3	75% < Uamb ≤ 85%	18%
4	Uamb < 85% durante longos períodos	≥ 25%

3.1.1.1. Norma para cálculo da umidade

A norma para o cálculo da umidade propõe a relação entre massa de água contida na amostra e a massa de madeira seca expresso pela Equação (3.3) segundo NBR 7190, 1997 (ABNT, 1997).

$$U_i(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

U%: Porcentagem de umidade

m_i : massa da madeira, (g);

m_s : massa da madeira seca, (g).

Os procedimentos indicados para cálculo da umidade são os seguintes:

- Determinação da massa m_i do CP (corpo de prova) com exatidão de 0,01g;
- Depois de determinado a massa inicial coloca-se o CP na câmara de secagem, com temperatura máxima de 103 °C;
- No decorrer da secagem a cada 6h deve-se medir a massa do CP até que ocorra uma variação entre duas medidas menor que 0,5% da última massa medida, essa massa será considerada a massa seca (m_s);
- Após então se determina a umidade pela Equação 3.3.

3.1.1.2. Umidade ao longo da madeira de eucalipto

A determinação do teor de umidade e de sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira é de extrema importância no seu desempenho e utilização. Os elevados gradientes de umidade da madeira constituem-se em uma das causas de defeitos de secagem, notadamente caracterizados por empenamentos e fendilhamentos. Segundo Oliveira et al. (2005), Eucaliptos recém abatidos em madeiras com maior densidade como *E.citriodora* e *E.paniculata* os teores de umidade são baixos. Teores intermediários de umidade são encontrados nas espécies *E.tereticornis* e *E.pilularis* e a umidade é maior nas espécies *E.urophila* e *E.grandis*. A Figura 3.8 ilustra a variação do teor de umidade da madeira ao longo da altura do tronco, com tendência de a base apresentar maior teor de umidade, diminuindo até a metade da altura (à exceção de *E. tereticornis* e *E. paniculata*) e com novo acréscimo a partir do terço superior e no topo, com teor de umidade próximo ao da base da árvore. A variação do teor de umidade da madeira nas direções radial e longitudinal no tronco das árvores é negativamente correlacionada com a sua densidade; madeiras com maior densidade possuem menor volume de vazios internos e, portanto, menor espaço para preenchimento com água livre. A umidade tende a aumentar na direção medula casca. A umidade da madeira na árvore pode variar de 31 a 249% no cerne e 40 – 213% no alburno (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987).

Com exceção do *E. grandis* as demais espécies apresentam tendência de queda do teor de umidade da madeira a partir da medula com posterior estabilização e ligeiro acréscimo na região periférica do albarno as coníferas possuem o cerne com teor de umidade muito inferior ao albarno.

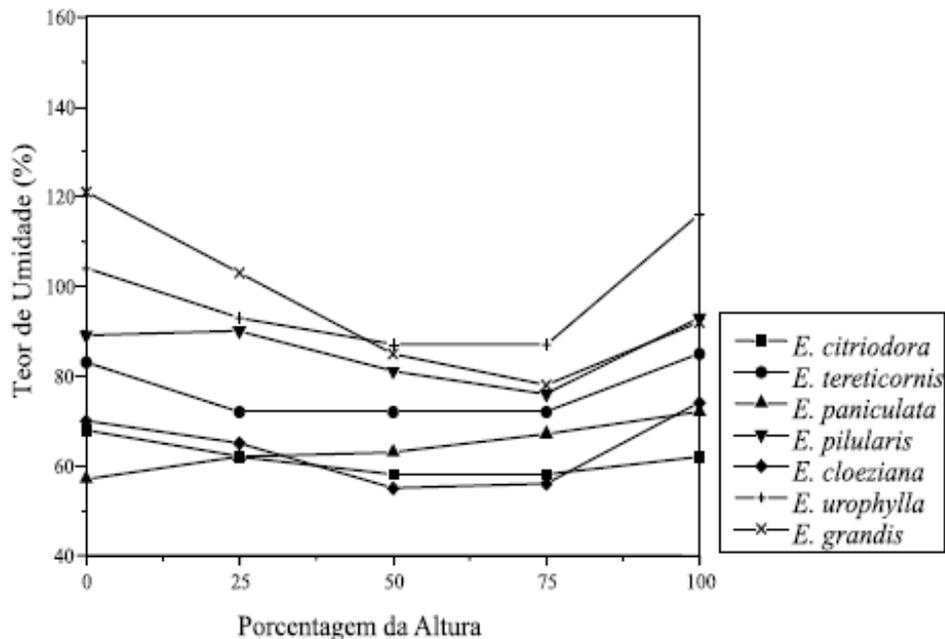


Figura 3.8. Variação do teor de umidade da madeira, ao longo do tronco, de sete espécies de eucalipto (OLIVEIRA et al., 2005).

3.1.2. Retrabilidade da madeira

As madeiras sofrem retração ou inchamento com variação da umidade entre 0% e o ponto de saturação das fibras (30%) sendo a variação dimensional aproximadamente linear. O fenômeno é mais importante na direção tangencial para redução da umidade de 30% até 0%, a retração tangencial varia de 5% a 10% da dimensão verde, conforme as espécies. A retração na direção radial é cerca da metade da direção tangencial. Na direção longitudinal, a retração é menos pronunciada, valendo apenas 0,1% a 0,35 da dimensão verde para secagem de 30% a 0%. A retração volumétrica é aproximadamente igual a soma das três retrações lineares ortogonais. Na Figura 3.9 pode-se ver diagramas de retração ou inchamento

de três espécies vegetais em função do grau de umidade. A variação entre 0% a 30% é praticamente linear.

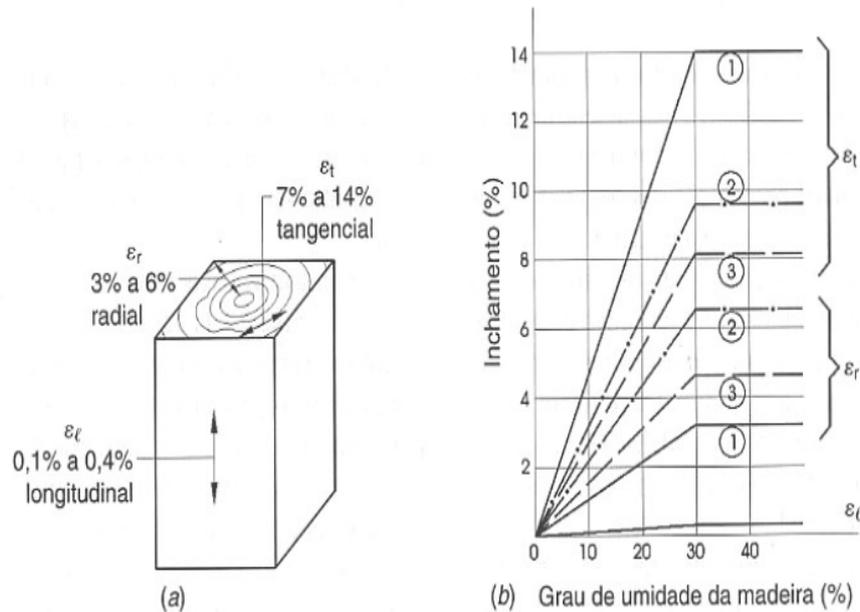


Figura 3.9. a) Vista isométrica da madeira mostrando três direções principais; b) Diagrama de retração ou inchamento linear, em função do teor de umidade da madeira 1) Carvalho brasileiro 2) Eucalipto 3) Pinho brasileiro (PFEIL, 2003).

3.1.3. Densidade

A densidade é uma propriedade que está relacionada com a umidade da madeira, através do indicador “Massa Específica Aparente” (MEA). Este indicador permite determinar o peso da madeira por cada unidade de volume aparente, a partir do teor de umidade que serve de base ao cálculo do mesmo, traduzindo também a compacticidade da madeira, ou seja, a maior ou menor concentração do tecido lenhoso por unidade de volume. Esta importante propriedade física da madeira é muito variável nas espécies comerciais, não só devido às condições climáticas do ambiente de crescimento, mas também pela umidade ou teor de água que apresentam e pela quantidade de infiltrações no lenho cerneiro. Com o fim de identificação, a densidade é apreciada por sobre-pesagem comparativa de peças de madeira de idênticas dimensões e estados de umidade.

Segundo Askeland (1996), a tensão na direção longitudinal é de 25 a 30 vezes maior que a tensão nas direções radial e tangencial. Isto ocorre devido a anisotropia da madeira. A densidade básica da madeira é reconhecida como um dos mais importantes parâmetros para avaliação da sua qualidade, por ser de fácil determinação e estar relacionada às suas demais características (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991).

A densidade é variável para cada espécie e dentro de uma mesma espécie também pode haver variação. Na Austrália ocorrem variações importantes na madeira de árvores de uma mesma espécie, como *E. pilularis* com variações de 0,6 a 0,8 g/cm³ (HILLIS; BROWN, 1978).

A densidade pode ser expressa de três formas:

- **Densidade aparente (ρ_{ap}):** definida como relação entre massa e o volume determinada nas mesmas condições de umidade (U). É uma variável dependente do valor de U conforme as Equações 3.7, 3.8 e 3.9. A razão entre a massa e o volume dos corpos com 12% de umidade é considerado como umidade de classe 1 conforme visto na Tabela 3.1.
- **Densidade a 0% (ρ_0):** definida como relação entre massa e volume obtidos para U=0, Equação (3.4), onde a massa e o volume são obtidos após secagem em estufa 103 ± 5%.

$$\rho_0 = \frac{m_s}{V_{seca}} \quad (3.4)$$

Onde:

m_s : é a massa seca da madeira, (kg);

V_{seca} : volume da madeira saturada, (m³).

- **Densidade básica (ρ_b):** de acordo com a norma NBR7190 (ABNT, 1997) densidade básica é definida como uma massa específica convencional definida pela razão entre massa seca (m_s) e volume saturado (V_{sat}) expresso pela Equação (3.5):

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (3.5)$$

Onde:

m_s : é a massa seca da madeira, (kg);

V_{sat} : volume da madeira saturada, (m³).

Os procedimentos indicados para cálculo da densidade segundo NBR 7190 (ABNT, 1997) são os seguintes:

- A massa seca do CP (m_s) deve ter uma exatidão de 0,01g;
- Deve ser determinado o volume saturado (com o CP saturado) por meio das medidas dos lados da secção transversal e do comprimento, com precisão de 0,1mm. Tomar mais de uma medida para levar em consideração as imperfeições devidas ao inchamento do CP;
- Como mencionado antes para medição da densidade aparente os CPs devem possuir umidade de 12 %;
- Conhecidos os valores de m_s, m_{12}, V_{sat} e V_{12} , determina-se a densidade básica e aparente.

O volume saturado é determinado pelas dimensões finais do CP submerso em água até que atinja massa constante ou com no máximo uma variação de 0,5% em relação a medida anterior. Newlin (1919) citado por Kollman e Cotê (1968), encontrou uma relação experimental relacionando a retratibilidade volumétrica com a densidade básica, independente da espécie de madeira.

Utilizando-se dessas relações, Oliveira et al. (2005) encontraram a Equação (3.6) que correlaciona densidade a 0% com a densidade básica através da retratividade total.

$$\rho_o = \frac{\rho_b}{1 - 0,28\rho_o} \quad (3.6)$$

Onde:

ρ_o : é a massa seca da madeira, (kg);

ρ_b : volume da madeira saturada (m³).

As Equações (3.7), (3.8) e (3.9) relacionam densidade aparente com a densidade a 0% para umidades de 0 a 25%, 25 a 90% e acima de 90%, respectivamente, segundo Oliveira et al. (2005). Essas equações foram obtidas por modelos experimentais teóricos que levam em consideração as variações de massa e volume com o teor de água da madeira e facilitam a determinação da densidade aparente de acordo com a umidade da madeira além de terem uma boa aproximação ao ábaco de Kollmann.

$$\rho_{ap} = \rho_o (0,01U + 1) \left[\frac{1 - 8,4 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_o}{1 + 0,28\rho_o} \right] \quad (3.7)$$

$$\rho_{ap} = \rho_o (0,01U + 1) \left[\frac{\rho_o (0,21 + 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot (U - 25))}{1 + 0,28\rho_o} \right] \quad (3.8)$$

$$\rho_{ap} = \rho_o (0,01U + 1) \left[1 - \frac{0,28\rho_o}{1 + 0,28\rho_o} \right] \quad (3.9)$$

Onde:

ρ_o : é a massa seca da madeira, (kg);

ρ_{ap} : volume da madeira saturada, (m³).

U : porcentagem de umidade

Onde para cada curva de ρ_o correspondente tem-se um valor de umidade aparente (U_{ap}) da madeira e um peso específico aparente (ρ_{ap}) conforme mostra a Figura 3.10.

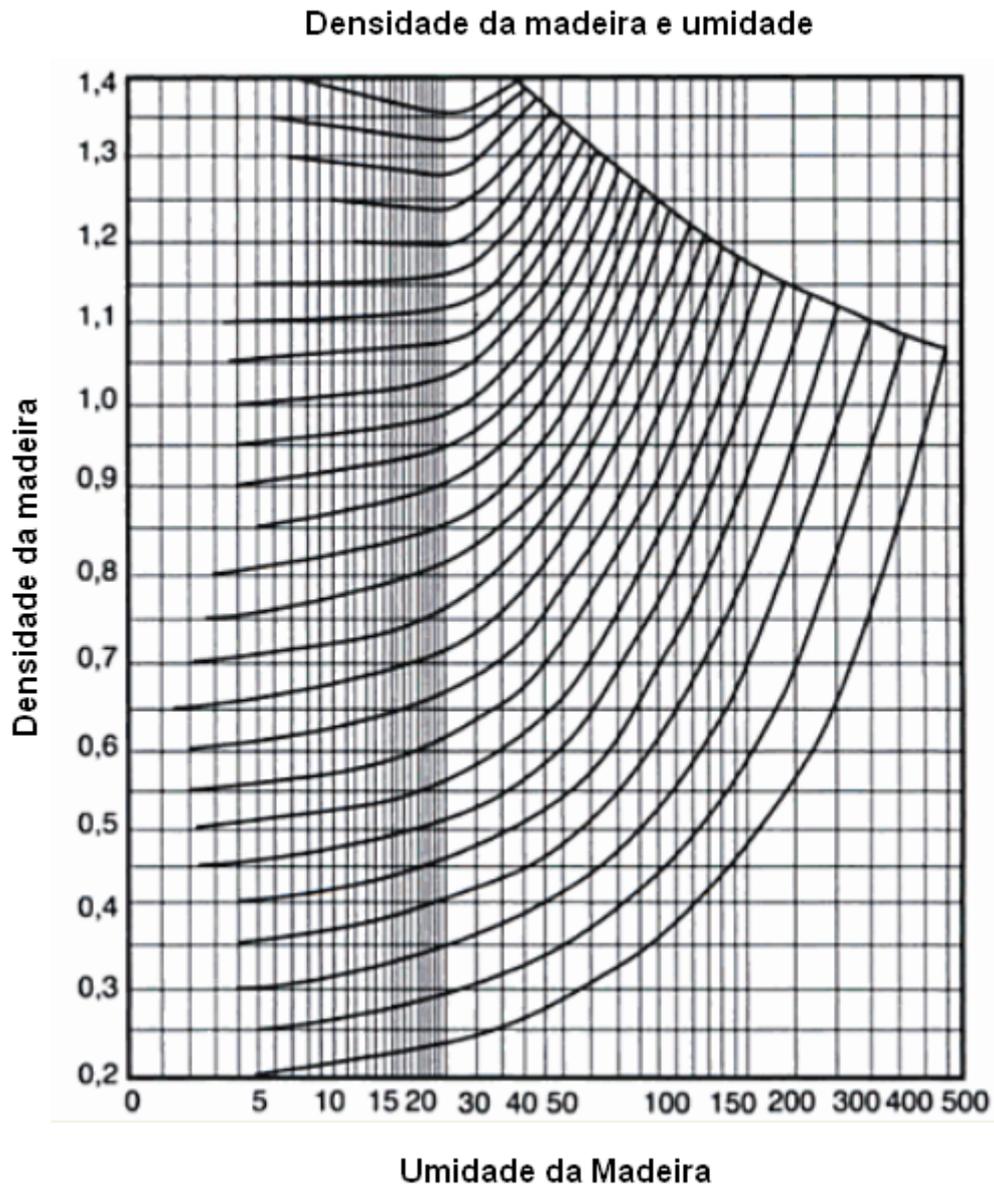


Figura 3.10. Ábaco de Kolmann (Relação entre umidade da madeira e seu peso específico) (KOLMANN; COTE, 1975).

3.1.3.1. Variações da densidade na madeira de eucalipto

Segundo OLIVEIRA, HELLMEISTER e FILHO, 2005 a densidade da madeira tende a aumentar da medula para o cerne periférico, com redução na região do albarno, ou seja a densidade básica aumenta até a região do albarno depois ela se reduz Figura 3.11. A variação dos parâmetros correspondentes ao comprimento das fibras, largura do anel, juntamente com a densidade podem ser vistas na Figura 3.12.

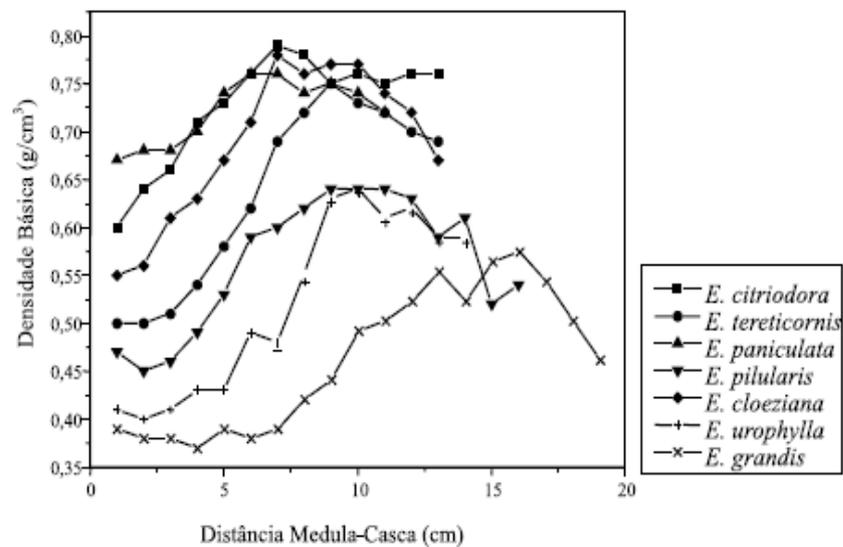


Figura 3.11. Variação da densidade em relação a medula casca (OLIVEIRA; HELLMEISTER; FILHO, 2005).

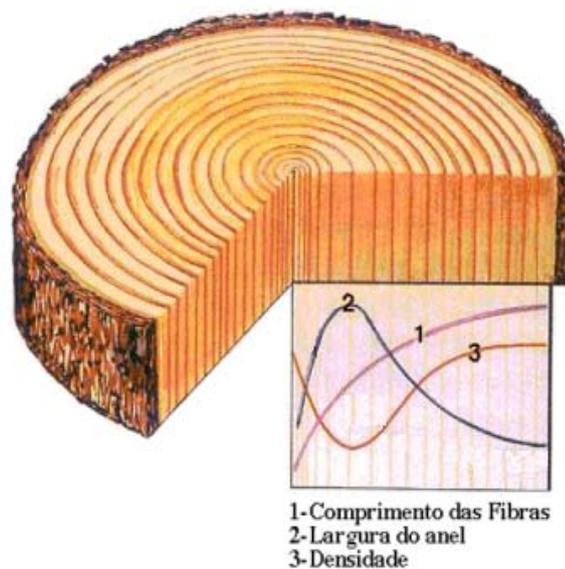


Figura 3.12. Seção transversal num tronco com gráfico comparativo: Comprimento das fibras, Largura do anel e Densidade (CARVALHO, 2007).

Já as variações da densidade ao longo do poste são bem variadas e dependem muito da espécie, mas possui tendência geral de aumentar no sentido base topo. A Figura 3.13 mostra a variação da densidade ao longo de sete espécies de eucalipto.

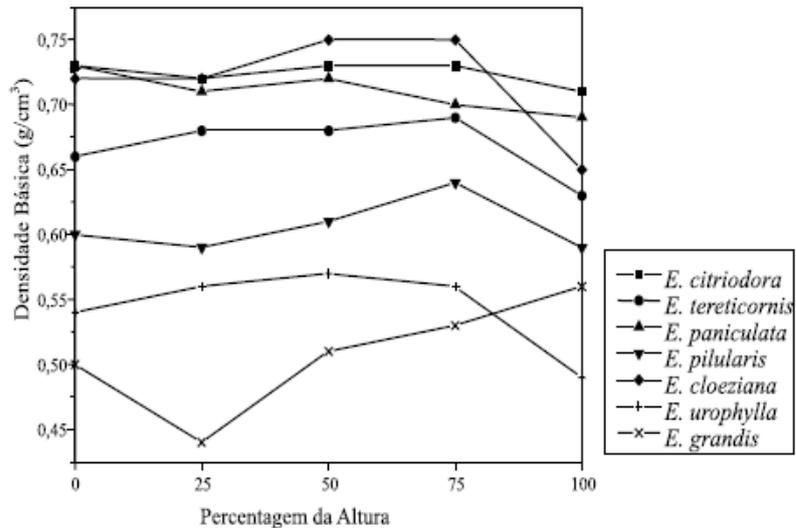


Figura 3.13. Variação da densidade em relação à altura (OLIVEIRA; HELLMESTER; FILHO, 2005)

As madeiras de maior densidade apresentam maior resistência mecânica o que se explica pela maior quantidade de madeira. Na Figura 3.14 apresenta-se um gráfico da variação da resistência a compressão (F_c) e módulo de elasticidade (E) com o peso específico para madeiras nacionais, a 15% de umidade. As relações podem ser expressas em equações empíricas, como por exemplo, as indicadas na Figura 3.14 (PFEIL, 2003).

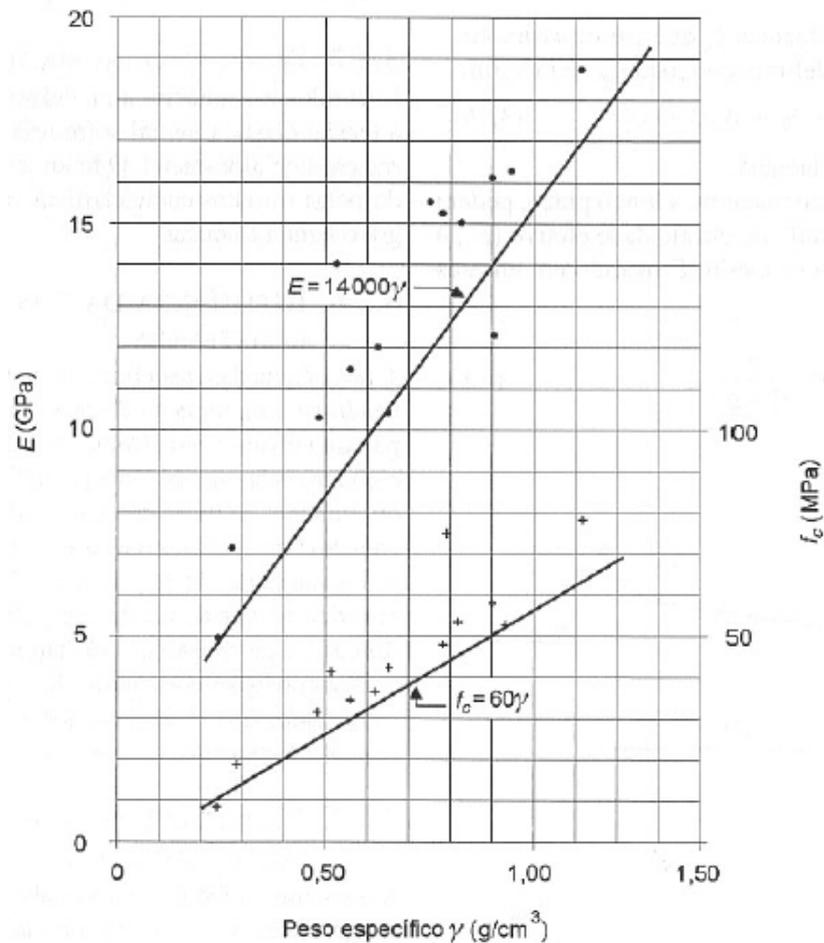


Figura 3.14. Variação da resistência a compressão F_c e do módulo de elasticidade E , em função do peso específico γ (propriedades a 15% de umidade) para diversas madeiras nacionais (IPT, 1985).

3.1.4. Velocidade de carga

A resistência das madeiras (f) é determinada em ensaios nos quais o carregamento atua durante cerca de 5 minutos. Aplicando-se uma carga inferior a esta resistência durante um período longo observa-se que a madeira pode romper após dias ou meses (ruptura retardada). Por outro lado se uma peça é rompida sob impacto, sua tensão resistente será maior que a resistência obtida no ensaio de curta duração (5 min). O trabalho clássico sobre o assunto foi realizado na década de 1940 no Forest Products Laboratory em Madison, Estados Unidos e publicado em 1951. A partir de CPs sem defeitos submetidos a flexão estabeleceu-se a relação entre o tempo de duração da carga e a resistência como ilustra a Figura 3.15 em que o tempo está expresso em escala logarítmica. Designando-se $f_{5\text{min}}$ a tensão

resistente obtidas em ensaios de curta duração quando-se aplica uma tensão de $0,62 f_{5\text{min}}$ a peça se rompe em 10 anos de atuação de carga. A perda da resistência com o tempo de aplicação da carga pode ser encarado como um fenômeno de acumulação de cargas cíclicas, só que para a ação de cargas permanentes (FOSCHI, 2000).

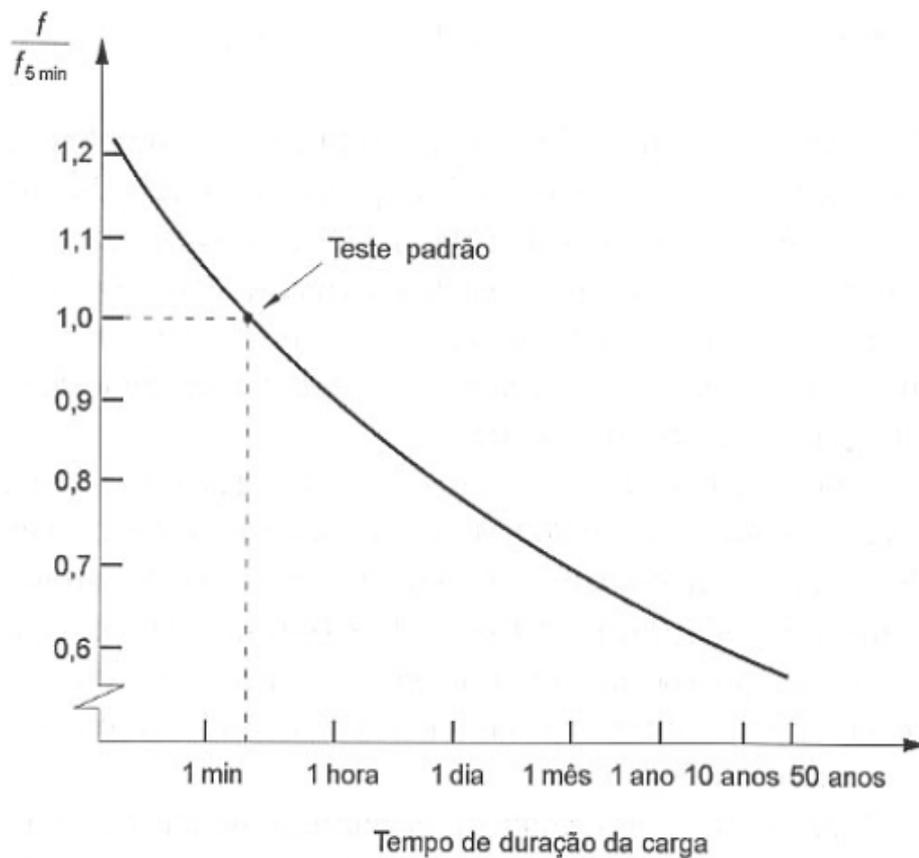


Figura 3.15. Variação da resistência referida a resistência obtida de ensaios com o tempo de duração da carga (FOSCHI, 2000).

É notável a influência da umidade da madeira neste fenômeno para uma mesma deformação uma peça com maior grau de umidade terá sua vida útil reduzida em relação a outra peça de menor grau.

3.1.5. Defeitos

A ocorrência de defeitos na madeira compromete o seu uso como matéria prima nas suas diversas aplicações. Os vários tipos de defeitos podem ter origem natural ou surgir tanto no tratamento e manejo silvicultural quanto nos processos de corte, secagem e usinagem. Alguns defeitos, como encanoamento, encurvamento, colapso, rachaduras superficiais e rachaduras de topo, são visíveis do exterior. Outros tipos, no entanto, ocorrem no interior da árvore ou da peça de madeira e podem ser visualizados apenas com o uso de técnicas não-destrutivas (QUOIRIN, 2004).

Os defeitos da madeira podem ser de diversas origens tais como:

- Defeitos de crescimento (nós, desvios de veio e gretas);
- Defeitos de produção (fraturas, fendas e danos do abate, cantos quebrados e fibras reversas);
- Defeitos de secagem (Rachaduras, Fendas ou Fendilhamento, Abaulamento, Arqueamento);
- Curvatura lateral;
- De conservação (Bolor, Apodrecimento, Furos de insetos).

Conforme a Figura 3.16 pode-se notar alguns defeitos encontrados na madeira, esses defeitos podem diminuir a tensão de ruptura para valores abaixo de 35 MPa.

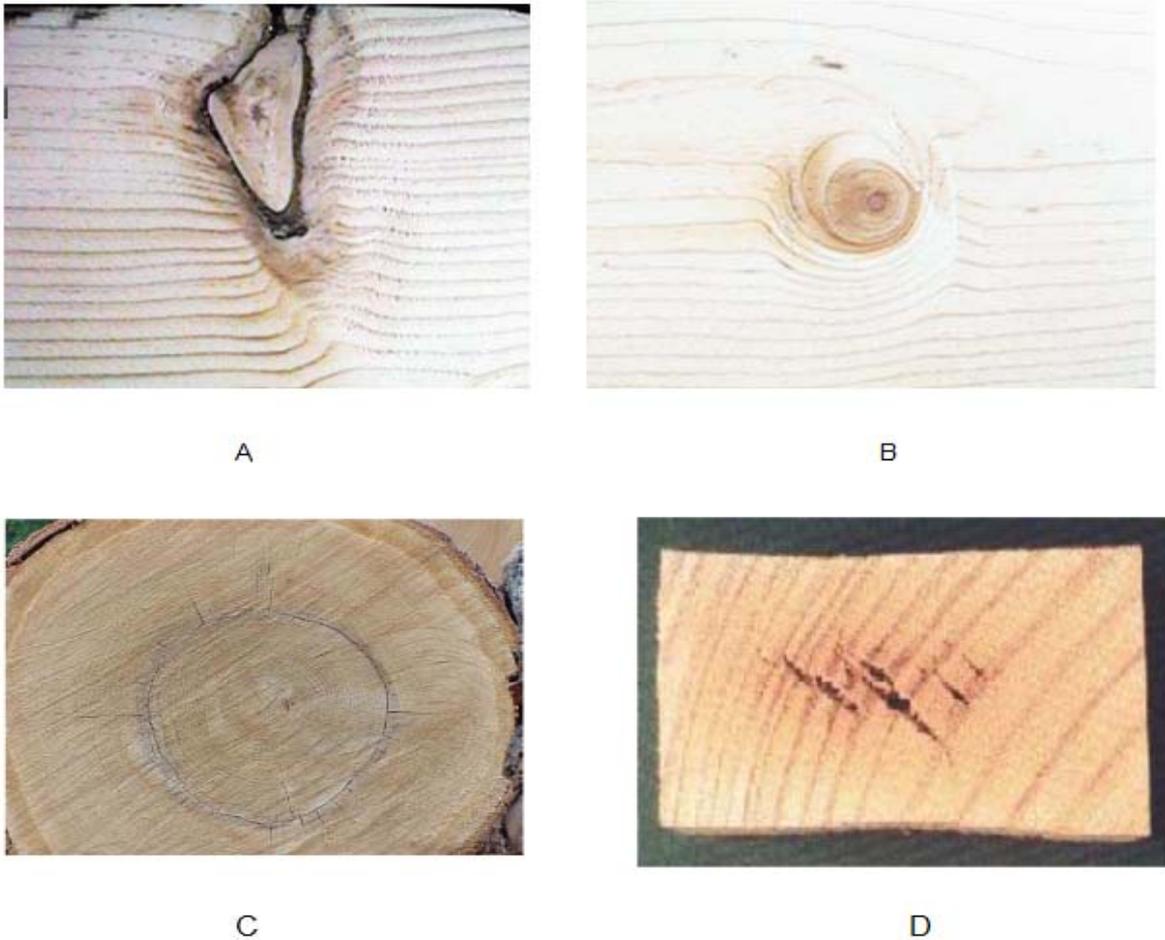


Figura 3.16. Defeitos da madeira: A - Fotografia de um nó morto, B - Fotografia de um nó vivo, C- Fotografia de um tronco com rachadura em forma de anel, D - Rachadura interna (QUOIRIN, 2004).

3.2. O Eucalipto

O eucalipto é uma árvore nativa da Austrália, do Timor e da Indonésia, sendo exótico em todas as outras partes do mundo. Os primeiros plantios datam do início do século XVIII, na Europa, na Ásia e na África. Já no século XIX, começou a ser plantado em países como Espanha, Índia, Brasil, Argentina e Portugal (PRYOR, 1976 e FAO, 1981). As principais espécies cultivadas atualmente no Brasil incluem o *E.grandis*, o *E. camaldulensis*, o *E. E.saligna* e o *E. urophylla*, entre outras. Além disso, foram desenvolvidos cruzamentos entre as espécies, resultando em híbridos, como é o caso do *E.urograndis* (*E.grandis* X *E. urophylla*). Na Figura 3.17 pode-se acompanhar um histórico das principais datas que marcaram acontecimentos importantes referentes ao eucalipto.



Figura 3.17. Linha do tempo do eucalipto (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).

Segundo a Associação brasileira de produtores de florestas plantadas ABRAF (2007), as plantações de eucalipto no Brasil ocupam 3.751.867 hectares. O setor florestal responde por 3,5% do nosso Produto Interno Bruto (PIB) e gera 4,6 milhões de empregos diretos e indiretos. As principais aplicações da madeira de eucalipto são as seguintes: combustível, carvão, estacaria para vedações, postes, dormentes para ferrovias, esteio para minas, estacaria para fundações, celulose painéis de madeira reconstituída, construção civil, caixotaria e marcenaria e tanoaria (tonéis e barris). Além das inúmeras aplicações diretas da madeira de eucalipto, as folhas da árvore são ricas em óleos essenciais, utilizados na indústria de higiene e limpeza, cosméticos e fármacos, contribui para minimizar o efeito estufa e melhorar o microclima local. Pesquisas recentes revelam que um hectare de eucalipto de rápido crescimento remove 60 toneladas de CO_2 da atmosfera, desde o plantio até a colheita, protege os solos contra processos erosivos, conferindo-lhes características de permeabilidade, aumentando a taxa de infiltração das águas pluviais e regularizando o regime de distribuição hídrica nas áreas plantadas. O mercado do eucalipto no Brasil se divide de acordo com o gráfico da Figura 3.18 onde os postes ficariam enquadrados na divisão dos serrados representando 19% (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).

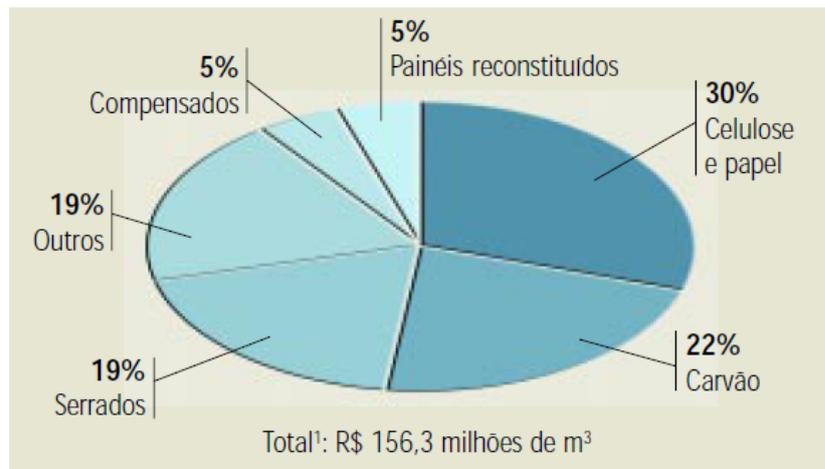


Figura 3.18. Mercado do Eucalipto no Brasil (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).

3.2.1. Eucalipto e sua utilização como postes de madeira

A produção mundial de madeira para fins estruturais encontra-se por volta de 10^9 toneladas ao ano, o que torna este material muito importante no contexto mundial. O Brasil apresenta uma grande disponibilidade de madeira proveniente de reservas tropicais e de reflorestamento, que necessitam de exploração adequada, (MACEDO, 2000).

Os primeiros registros históricos da utilização de postes de madeira data da década passada, quando o telégrafo começou a ser utilizado.

No Brasil os postes começaram no final do século passado. Mesmo existindo abundância de espécies de madeiras nativas a registros da utilização do eucalipto em postes em 1905. A utilização do Eucalipto deve-se a:

- Disponibilidade de matéria prima;
- Crescente demanda por postes;
- Expansão do telégrafo, telefone e energia elétrica.

Preocupações em aumentar a vida útil dos postes surgiu somente em 1945 com a construção da primeira usina a pressão para madeira. Na década de 70, o

setor ganhou um grande impulso com o aperfeiçoamento das indústrias e do surgimento das grandes florestas plantadas principalmente de Eucalipto (REVISTA DA MADEIRA, 2001).

3.2.2. Vantagens da utilização do eucalipto como postes para rede elétrica

Entre as vantagens da utilização do eucalipto como postes de madeira segundo REVISTA DA MADEIRA, (2001), cita-se:

- **Ecológico:** Os postes de madeira advindos de madeira de reflorestamento atualmente são um importante fator ecológico como produto renovável assim como estratégico. Sabe-se que para produção de um poste de energia renovável consome 1056 Kcal, enquanto que um poste de concreto chega a consumir 550.000 Kcal envolvendo componentes não renováveis, como ferro e cimento;
- **Desempenho elétrico:** Como a madeira possui baixa condutibilidade térmica há uma redução de riscos de acidentes e desligamento por fugas ou descargas elétricas devido a suas características. O nível básico de impulso elétrico da madeira é cerca de 400Kv, tornando-a quase 6 vezes melhor isolante que o concreto;
- **Nível de isolamento:** Segundo o *Transmission and Distribution Reference Bookäs*, estruturas de madeira suportam tensões de impulso atmosférico, no mínimo, 51% acima das estruturas metálicas;
- **Transporte:** O poste de madeira pesa em torno de 60% menos que o de concreto, o que equivale a uma redução de custo de transporte. O manuseio para carga e descarga pode ser feito sem utilização de muitos equipamentos e cuidados maiores. A relação média da capacidade de carga é de 3:1, em comparação com postes de concreto;

- **Choque mecânico:** Em função de sua elevada elasticidade os postes de madeira possuem boa resistência ao choque mecânico quando comparados com postes de concreto;
- **Instalação:** Por ser um material leve o poste de madeira pode ser arrastado por animais mata a dentro e instalado por operários sem utilização de equipamentos especiais e sem riscos de quebrar como acontece com o concreto que não pode ser arrastado e necessita de caminhão Munck e exige cuidados de manuseio;
- **Acessórios:** As estruturas de madeira necessitam de um menor número de acessórios (como ferro, etc.) proporcionando economia em escala. Existem alguns casos que a relação de itens pode chegar a 1:12, quando comparados com estruturas de concreto;
- **Performance:** O poste de madeira suporta esforços em qualquer direção, enquanto que um poste de concreto tipo T suportaria uma mesma carga na direção dos fios e a metade na direção perpendicular, de modo que numa mesma direção de cobertura de 4 postes de concreto, somente 3 postes de Eucalipto seriam necessários;

3.2.3. Desvantagens da utilização do eucalipto como postes para rede elétrica

Entre as desvantagens da utilização do eucalipto como postes de madeira segundo Revista da Madeira (2001), cita-se:

- **Durabilidade:** Por ser de natureza orgânica a madeira é atacada por organismos vivos (xilógafo, principalmente), bem como pode ser destruída pela ação do fogo (queimadas e incêndios);
- **Manutenção:** Devido a questões apresentadas quanto a durabilidade, os postes de madeira necessitam manutenção, fazendo-se o tratamento e o

retratamento do solo contra fungos e cupins, bem como aceiramento nas regiões onde é comum a prática de queimadas;

- **Indisponibilidade de madeira:** Não existem estoques suficientes de madeira em quantidade e qualidade necessárias e satisfatórias. Não foram realizadas plantios com espécies adequadas e práticas de manejos específicos para a produção.

3.2.4. Clonagem do Eucalipto

Em sua forma mais comum, o melhoramento florestal se dá através da seleção de indivíduos superiores, identificados em plantações comerciais, os quais podem ser vegetativamente multiplicados, ou restabelecidos em um delineamento adequado para a comprovação de sua superioridade genética, para a produção de sementes ou para a propagação comercial. Dependendo do produto a ser obtido, as árvores terão que apresentar características adequadas e distintas, o que faz com que as técnicas e métodos de melhoramento empregados para celulose e carvão sejam bastante diferentes daqueles utilizados para a produção de lâminas ou móveis e até mesmo para postes. Assim, para que se possa estabelecer um programa de melhoramento genético florestal é importante que o setor industrial tenha definido muito bem os parâmetros de qualidade e a sua grandeza ideais para a obtenção de um determinado produto final. Num melhoramento genético primeiramente ocorre a hibridização e após a clonagem e multiplicação. O chamado *E. urograndis* é um dos híbridos de eucalipto mais conhecidos e usados no Brasil. Essa mistura reúne as melhores características do *E.grandis* (crescimento e qualidade da madeira) e do *E. urophylla* (adaptação e resistência a doenças, particularmente ao fungo causador do cancro do eucalipto). A Figura 3.19 ilustra o processo de clonagem (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).

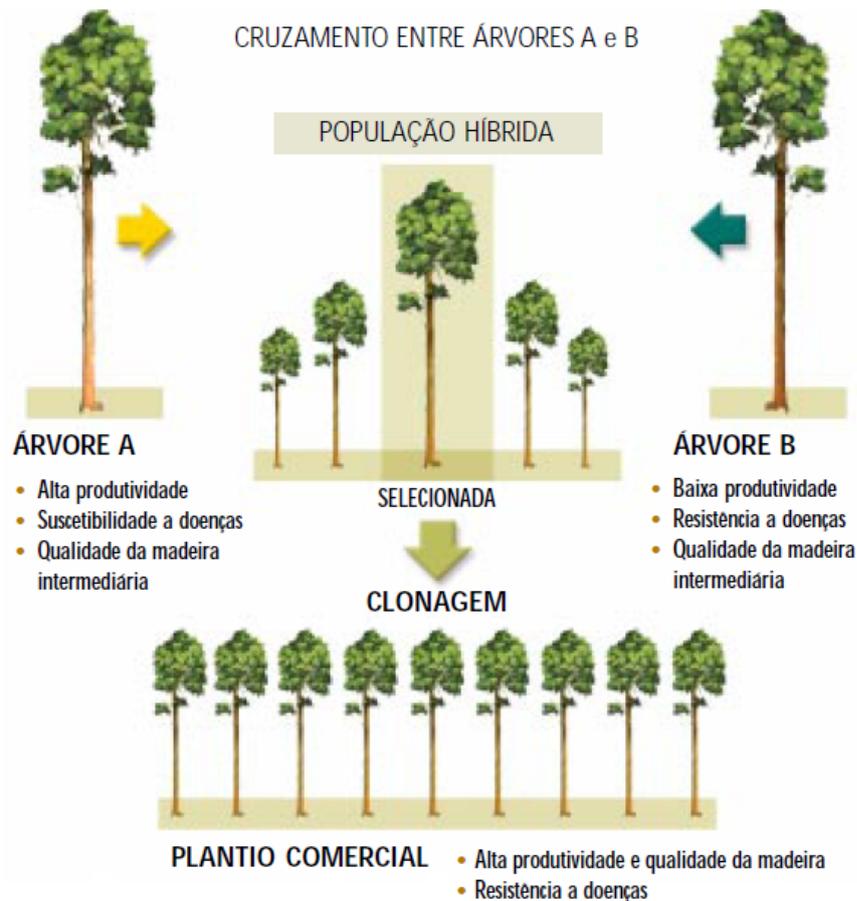


Figura 3.19. Melhoramento do Eucalipto (GUIA DO EUCALIPTO, 2008).

3.2.4.1. Clonagem para postes de madeira

Ocorre que o processo de clonagem não é voltado especificamente para a produção de postes para rede de distribuição de energia elétrica. Nota-se uma tendência muito grande voltada a indústria de celulose, onde as características como o teor de lignina não é importante devido ao escurecimento que ela provoca no papel, o que para um poste o teor de lignina é muito importante devido a resistência que ela proporciona à madeira. No entanto, o processo de clonagem pode ser voltado para a produção de postes para rede de distribuição de energia elétrica, pois as boas características que um poste precisa tais como:

- Menor índice de tensões de crescimento;
- Menor quantidade de madeira juvenil;
- Menor podridão do cerne;

- Menor colapso;
- Maior densidade.

Estudos realizados quanto à tensões de crescimento em 11 clones com 6 anos de idade mostraram que houve variações de deformação residual tangencial (DRL) e deformação residual tangencial (DRT) entre os clones estudados por TRUGILHO (2004), sendo necessário classificar cada clone estudado para uma aplicação específica e que as variáveis DRL e DRT possuíam alta herdabilidade e fácil manipulação genética (TRUGILHO,2007).

Além disso alta quantidade de celulose provocaria maiores DRL e DRT segundo Alves (2008). Estudos realizados por Ferreira (2006), em clones de eucalipto mostraram que alta densidade básica, por exemplo, não é uma característica desejável para produção de papel de imprimir e de escrever o que é uma característica muito importante para produção de postes, pois proporciona maior resistência mecânica.

A densidade básica e coeficiente de anisotropia também possuem alta herdabilidade (RODRIGUES, 2008). Para confecção de postes alto " σ_r ", " E " e densidade básica são de suma importância, estudos realizados por Haselen (2002), em clones mostraram que quanto maior o espaçamento de plantio melhores são essas propriedades mecânicas.

3.2.5. Deteriorização da madeira

A madeira está sujeita a deterioração por diversas origens dentre as quais se destacam ataque biológico e ação do fogo, fungos, cupins, moluscos e crustáceos marinhos a Figura 3.20 mostra uma peça de madeira que foi atacada por moluscos marinhos (PFEIL, 2003).

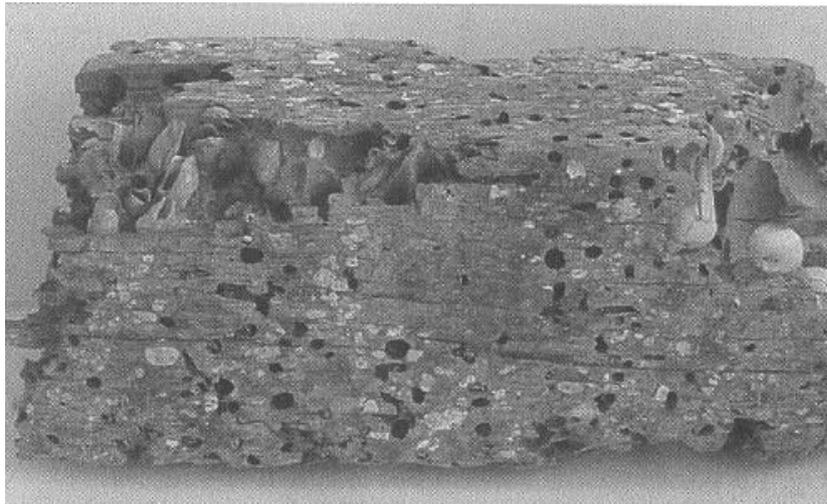


Figura 3.20. Peça de madeira que sofreu ataque de moluscos marinhos (PFEIL, 2003).

A vulnerabilidade da madeira depende:

- Da camada do tronco onde foi extraída a madeira (o alburno é o mais sensível à biodegradação do que o cerne);
- Da espécie da madeira (algumas espécies são mais resistentes a biodegradação);
- Condições ambientais, caracterizados pelos ciclos de reumidificação, pelo contato com o solo, com a água doce ou salgada.

3.3. Inspeção e re-tratamento de postes de eucalipto

Com a ajuda de um martelo, Figura 3.21-a, através da sonoridade da batida do martelo com a madeira do poste verifica-se se a quantidade de madeira na parte interna do poste, sabendo-se assim se o poste está oco ou não. Para análise externa é analisado a profundidade da madeira podre existente, Figura 3.21-b. Na seqüência é realizado um furo com uma furadeira e inserido uma ferramenta para analisar a serragem retirada Figura 3.21-c. Após procede-se a classificação segundo a Quadro 3.1. Se a classificação for 2 o poste é retratado com inserção de giz de boro-flúor em três furos ao redor do poste próximo a região de engastamento, Figura 3.21-d.

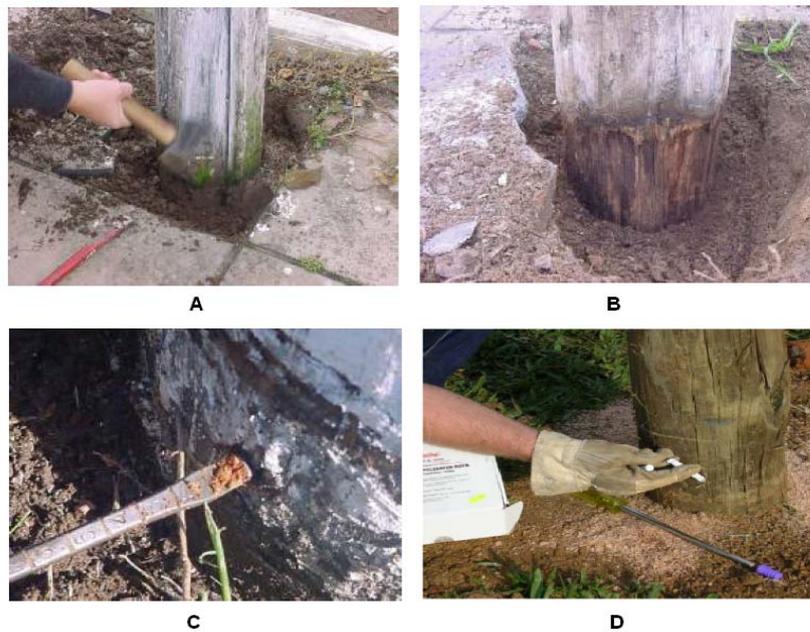


Figura 3.21. Etapas: A: Análise da parte interna através de batidas com martelo; B: Verificação do apodrecimento externo, C: Verificação do apodrecimento interno; D: Re-tratamento (ARRUDA, 2006).

Quadro 3.1. Parâmetro para classificação dos postes inspecionados e procedimentos (VIDOR, 2003)

Inspeção		Classificação do poste	Tomada de decisões	
Interna	Externa		Estado do poste	Procedimento
Mais de 100 mm De madeira sadia	Externo sem apodrecimento	1	Poste sadio	Nenhum
De 70 a 100 mm de madeira sadia	Max 10mm de madeira podre	2	Início do apodrecimento	Retratar interno e/ou externo
De 30 – 70 mm de madeira sadia	Max. 20 mm de madeira podre	3	Apodrecimento avançado	Retratar interno e/ou substituir
Menos de 30 mm de madeira sadia	Externo totalmente podre	4	Poste comprometido	Substituir

Entre os fatores que afetam a durabilidade da madeira segundo (CAMPOS, 2002) pode-se dividir em três campos:

- Condições de exposição: intemperismo, solo, umidade e temperatura;
- Particularidades do projeto: reentrâncias e cortes, escoamento de água, ventilação e interfaces;
- Preservativos: tipos de preservativos e forma que é usado.

A durabilidade do poste de madeira pode ser garantida por meio de ações que permitam aferir os parâmetros descritos, não só no processo de tratamento na usina de preservação, mas também antes e após esta etapa, de modo a permitir a rastreabilidade da qualidade da matéria-prima do seu plantio até a sua instalação na rede, estudos realizados pelo grupo AES Sul e PUCRS em 2.750 postes indicam que (52%) não possuíam placa de identificação, o que prejudica a avaliação da durabilidade dessas estruturas (GABIATTI et al., 2009).

Todavia, a implantação e verificação destes parâmetros de controle envolvem diversos setores das empresas concessionárias, sendo também importante a participação dos produtores e preservadores de postes, no sentido de se buscar a qualidade desde o plantio, passando pelo abate, sazonalidade, tratamento e armazenamento do poste, sem os quais se torna difícil a garantia da vida útil do poste de madeira, mesmo que este apresente níveis de retenção e penetração de preservativo compatíveis com as exigências da normalização (SALES, 2002).

3.3.1. Características de postes de madeira utilizados pela AES Sul

Entre os postes utilizados pela AES Sul citam-se postes de 9 a 13 m de altura os quais são utilizados para a distribuição e transmissão de energia. A Figura 3.22 mostra o modelo de poste utilizado na rede de distribuição de energia elétrica. A base e o topo do poste recebem reforços para evitar rachamento devido aos intempéries do tempo, para base se utiliza uma chapa de metal que é pregada ao poste e no topo um arame que evita rachamentos e entrada de água na parte superior do poste. Os postes após a produção saem com uma placa metálica de identificação com dados do fabricante tais como: altura, preservativo utilizado e data de fabricação (ARRUDA, 2006).

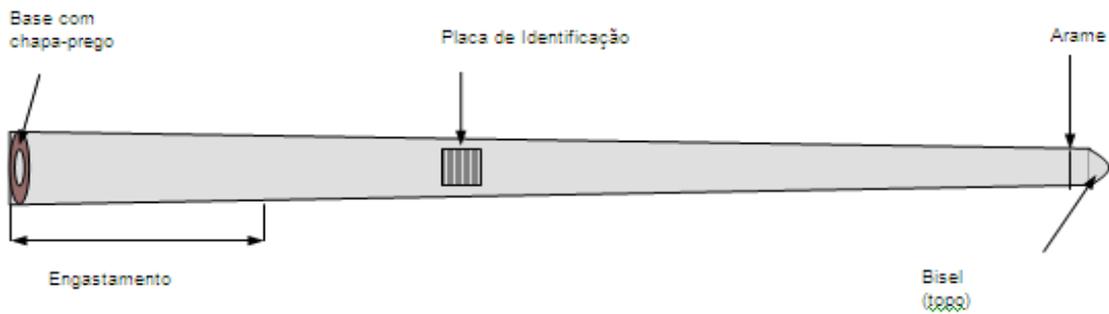


Figura 3.22. Poste de madeira utilizado pela AES Sul (VIDOR, 2003).

A regra para a área de engastamento depende da altura do poste e é definida pela Equação (3.10).

$$E = 0,1 \times H + 0,6m \quad (3.10)$$

Onde:

E: Engastamento, (m);

H: Altura do poste, (m).

Os postes e as estruturas de madeira utilizadas pela empresa AES Sul, são provenientes de madeira de Eucalipto cultivado. Sua origem na sua grande maioria foram produzidos pela companhia estadual de energia elétrica CEEE (até outubro de 1998) e pela AES florestal desta data até o ano de 2005. A partir de então os postes são provenientes de fornecedores do RS (Mariani, Flosul e outros) e são comprados segundo a demanda. As espécies utilizadas podem variar em função do seu uso (distribuição ou transmissão elétrica) e da disponibilidade de madeira no momento da produção. As espécies mais utilizadas são:

- *Eucalyptus citriodora*;
- *Eucalyptus saligna*;
- *Eucalyptus Alba*;
- *Eucalyptus grandis*;
- *Eucalyptus tereticornis*;
- *Eucalyptus paniculata*;
- *Eucalyptus botryoides*;
- *Eucalyptus Rostrata*.

Na fabricação de postes para linhas de transmissão onde as exigências de esforço são maiores as espécies mais adequadas são: *E.citrodora* e o *E.tereticornis*, devido á maior resistência mecânica e boa durabilidade da madeira quando tratada (ARRUDA, 2006).

Atualmente, a empresa AES Sul considera mais indicada a espécie *E.saligna* para as redes de Distribuição e o *E.citriodora* para redes de Transmissão.

3.4. Ensaio mecânicos

A determinação das propriedades mecânicas de um material é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização do material. Existem ainda os chamados ensaios não destrutivos utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do material. Na categoria de ensaios destrutivos estão classificados entre outros os ensaios de:

- Tração;
- Flexão;
- Torção;
- Fadiga;
- Impacto;
- Compressão.

Dentre os ensaios não destrutivos que são mais utilizados para ensaios em madeira pode-se citar:

- Raios X;
- Ultra-som.

Quando os ensaios visam a controlar a produção de determinada indústria eles são chamados de ensaios de rotina. Esses ensaios podem ser efetuados em máquinas industriais, laboratório de análises ou de indústria e não necessitam de

uma precisão muito grande, em geral admite-se um erro de máquina de até 1% para os ensaios de rotina. Entretanto, quando se pretende determinar as propriedades mecânicas com finalidades de estudo ou pesquisa de materiais, deve se utilizar máquinas mais precisas, que possuam aparelhagem de controle bem mais sensíveis que as máquinas comuns dos ensaios de rotina. A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto depende da finalidade do material dos tipos de esforços que esse material vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. Dois fatores são determinantes para realização de um dado tipo de ensaio mecânico que são: a quantidade e o tamanho das amostras a serem testadas, a especificação do produto deve mencionar esses fatores bem como a maneira de retirar as amostras para os testes a fim de que os mesmos sejam representativos do material a ser ensaiado, devido a possibilidade de variações nas propriedades, conforme a região do material de onde foi retirada a amostra (GARCIA, 2000).

3.4.1. Ensaios não destrutivos

Segundo a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos (ABENDE) os ensaios não-destrutivos são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Os métodos mais usuais utilizam-se de ultra-som, radiografia, correntes parasitas, análise de vibrações, emissão acústica, entre outros. Na área de pesquisas, as avaliações não-destrutivas, utilizando vibrações e ultra-som, são empregadas para a determinação das propriedades físicas e mecânicas de materiais. Para alguns materiais, como os metais e ligas metálicas, essa técnica tem sido bastante usada, uma vez que pode detectar defeitos e descontinuidade nesses materiais. No caso da madeira, como esses problemas são característicos do material, os ensaios não-destrutivos são usados, quase sempre, para verificar como essas ocorrências afetam as suas características físicas e mecânicas. As primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não-destrutivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que

detenham a primazia de conhecimentos nessa área específica, alguns países como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, também já se destacam nesse cenário. Embora seja grande a variedade de técnicas não-destrutivas para avaliação da madeira, algumas delas, citadas por Ross e Pellerin (1994), têm sido objeto de maior investigação e uso por parte dos institutos de pesquisa (TARGA, 2005). Como exemplo, pode-se citar:

3.4.1.1. Raios x

Método não destrutivo que detecta a presença de discontinuidades na massa do material como bolhas, inclusões, mudanças de massa específica (densidade), microondas e outros. Na indústria é realizado com três propósitos: investigação, inspeção de rotina e controle de qualidade, tanto no produto final como nas etapas intermediárias de um processo de fabricação, os raios x apresentam propriedades que o tornam de uso muito diferenciado, entre tais características pode-se citar:

- Capacidade de penetração nos materiais;
- Diferença na absorção da energia para diferentes materiais;
- Propagação de ondas em linha reta;
- Capacidade de afetar um filme radiográfico;
- Capacidade de ionizar gases;
- Capacidade de estimular ou destruir vida nos materiais;
- Invisibilidade.

O processo consiste em um feixe de elétrons altamente acelerados por meio de choque entre duas placas de alta tensão (cátodo e ânodo). O cátodo consiste em uma bobina de fio de tungstênio e o ânodo em um disco de tungstênio ou molibdênio (placa) como mostra a Figura 3.23.

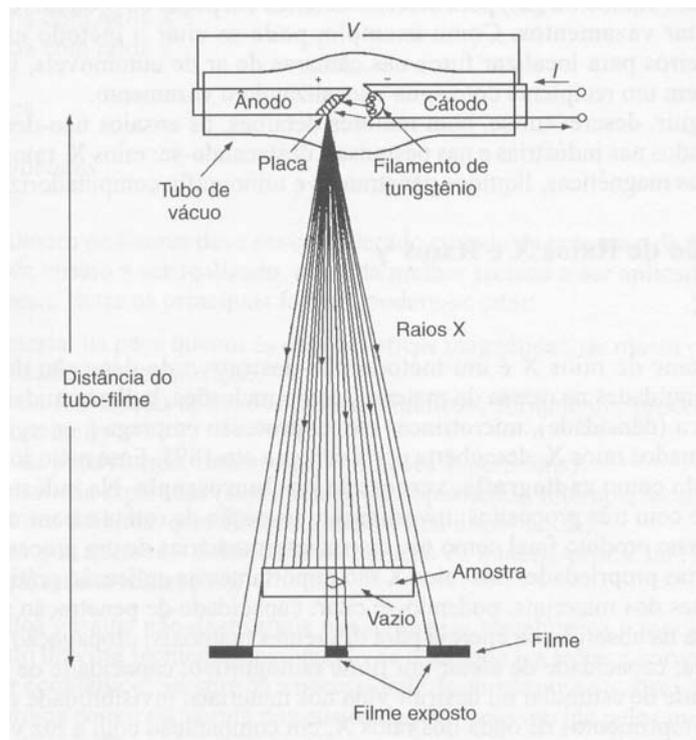


Figura 3.23. Esquema representativo do bulbo de vidro com alto vácuo para a produção de feixe de raios X (GARCIA, 2000).

As principais vantagens são:

- Alta sensibilidade de inspeção;
- Facilidade de interpretação da imagem;
- Exatidão dimensional da imagem resultante;
- Resultado permanente.

Como desvantagem poderia ser relacionado com a capacidade que os raios x possuem para destruição da vida dependendo do tempo de exposição às radiações (GARCIA, 2000).

3.4.1.2. Ultra som

O ultra som corresponde as ondas com freqüência acima de 20.000KHz, muito utilizado para avaliação ou controle de qualidade de vários componentes das indústrias aeroespacial, automobilística petroquímica e outros. É um método que

possui baixo custo de equipamentos, rapidez e praticidade dos testes. Para aplicação na madeira o método ultra-sonoro apóia-se na análise de propagação de uma onda e sua relação com as constantes elásticas da mesma (GARCIA, 1999).

Segundo Oliveira et al. (2002), os métodos não destrutivos apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para caracterização da madeira pois possibilita avaliar a integridade estrutural de uma peça sem extração de CPs, maior rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção. Entre os métodos de inspeção por ultra som o método de transmissão é o mais usado para madeira onde se utiliza de duas sondas (uma transmissora e outra receptora) em duas faces opostas da peça, A Figura 3.24 ilustra a situação. A Figura 3.25 mostra um aparelho de ultra som típico para uso em madeira.



Figura 3.24. Técnica de transmissão do ultra som (ROSS; PELLE, 1994).



Figura 3.25. Equipamento de ultra - som (SYLVATEST).

A velocidade da onda sonora depende da densidade e constantes elásticas do material, ou seja depende das vibrações nas direções longitudinal e transversal dependendo das propriedades do material (HALABE,1996).

O ultra-som possui uma gama de aplicações desde a árvore em pé até os produtos finais da madeira. Assim, quando aplicado longitudinalmente em árvores é possível uma primeira classificação mecânica. O ultra-som quando aplicado ao eixo radial pode fornecer informações sobre o apodrecimento interno, Figura 3.26. Num elemento de madeira sã, a velocidade ultra-sônica no eixo radial é aproximadamente constante. Para cada espécie é necessária uma calibração que indica a variação da velocidade em que ela pode ser considerada sã. Assim quando a velocidade for menor que a esperada, pode ser indício de apodrecimento.

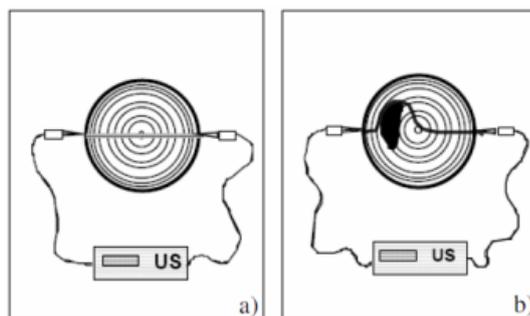


Figura 3.26. Esquema de propagação de uma onda ultrasônica em a) tronco sã; b) tronco deteriorado (SANDOZ, 2003).

De acordo com McDonald (1990), boas correlações têm sido observadas entre o módulo de elasticidade dinâmico obtidos a partir do ultra som e os obtidos por flexão estática, no entanto é mais difícil correlacionar " σ_r " com o módulo de elasticidade dinâmico pois a presença de inclinação das fibras têm efeito mais significativo no " σ_r " do que a velocidade longitudinal da onda. Como os defeitos na madeira afetam a inclinação das fibras, qualquer método que seja sensível a isso, terá potencial para determinar a resistência da madeira. Segundo Halabe (1995), encontrou-se baixos valores de R^2 para regressões entre " σ_r " e módulo de elasticidade dinâmico.

3.5. Ensaio destrutivos

Serão comentados neste item ensaios de compressão e flexão fazendo referência a norma e aos procedimentos utilizados em estruturas de madeira e postes de madeira.

3.5.1. Ensaio de compressão

No ensaio de compressão uma carga uniaxial aplicada em um CP provoca uma deformação que será a distância entre as placas que comprimem os corpos versus a carga de compressão, Figura 3.27. O ensaio de compressão é para quantificar o comportamento de materiais principalmente os de baixa ductilidade, os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados nos ensaios de tração. E as variáveis que influenciam nos testes são as mesmas que nos ensaio mecânicos convencionais como: temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho do grão, porcentagem de impurezas e condições ambientais. Além disso deve ser considerado a porcentagem de água contida no material quando ele for concreto ou madeira (GARCIA, 2000).

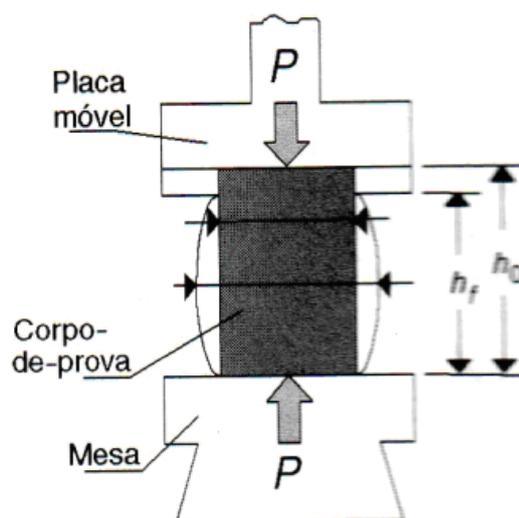


Figura 3.27. Ensaio de compressão longitudinal (GARCIA, 1999).

Onde h_0 e h representam a distância inicial e final entre a placa móvel e a mesa. Para o ensaio de compressão os dados de tensão de ruptura e módulo de elasticidade são obtidos de acordo com as Equações (3.11) e (3.12) que representam a tensão convencional e a tensão real, respectivamente.

$$\sigma_c = \frac{P}{S_o} = \frac{P}{l_o^2} \quad (3.11)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{S} = \frac{P}{l^2} \quad (3.12)$$

Onde:

σ_r : Tensão real, (MPa);

σ_c : Tensão convencional, (MPa);

P: Força aplicada, (N);

l: Comprimento final, (m);

l₀: Comprimento inicial, (m);

S: Área final, (m²);

S₀: Área inicial, (m²).

Como o volume da amostra continua sendo sempre o mesmo tem-se que o volume inicial é igual ao volume final.

$$V_o = V$$

$$l_o^2 \cdot h_o = l^2 \cdot h \quad (3.13)$$

$$l^2 = \frac{l_o^2 \cdot h_o}{h} \quad (3.14)$$

Onde:

h: Altura inicial em (m);

h₀: Altura final em (m);

V: Volume final, (m³);

V₀: Volume inicial, (m³);

Como o volume inicial é igual o volume final, tem-se a Equação (3.13) e isolando-se o comprimento final (l), tem-se a Equação (3.14) que substituído na Equação (3.12) tem-se o valor da tensão real dado pela Equação (3.15), que é a tensão de ruptura real sofrida pelo CP.

$$\sigma_r = \frac{P.h}{l_o^2.h_o} \quad (3.15)$$

A deformação convencional pode ser obtida pela Equação (3.16):

$$\varepsilon_c = \frac{h - h_o}{h_o} = -\left(1 - \frac{h}{h_o}\right) \quad (3.16)$$

Onde:

ε_c : Deformação convencional (m).

Desse modo é calculada a tensão de deformação e a deformação convencional que após obtidos são usados na Equação (3.18) para calcular-se o módulo de elasticidade.

3.5.1.1. Norma para ensaio de compressão paralelo as fibras

A resistência a compressão f_{c0} paralela as fibras é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um CP com seção transversal quadrada de acordo com a Figura 3.28 e é calculado pela Equação (3.17).

$$f_{c0} = \frac{F_{c0 \max}}{A} \quad (3.17)$$

Onde:

$F_{c0 \max}$: é a força máxima a compressão aplicada ao CP durante o ensaio, (N);

A: área inicial da secção transversal comprimida do trecho central do CP, (m²);

f_{c0} : é a resistência a compressão paralela as fibras, (MPa).

Para essa finalidade o módulo de elasticidade deverá ser determinado pela inclinação da reta secante da curva tensão X deformação específica como mostra o Figura 3.29.

O módulo de elasticidade é dado pela Equação (3.18):

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.18)$$

O módulo de elasticidade é determinado então pelas diferenças das tensões em 50 e 10 % da máxima força de tração, F_{c0} , dividido pela diferença das deformações específicas em 50 e 10 %. Na Figura 3.28 observa-se as dimensões do CP segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

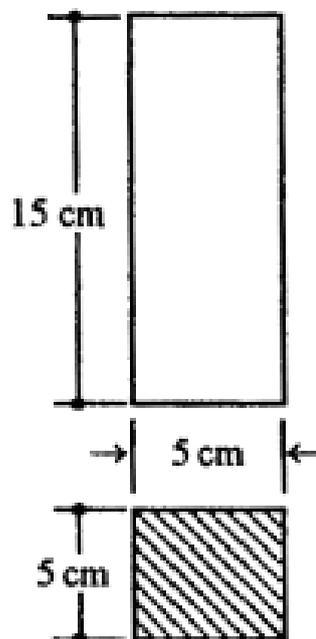


Figura 3.28. CP para ensaio de compressão, NBR 7190 (ABNT, 1997).

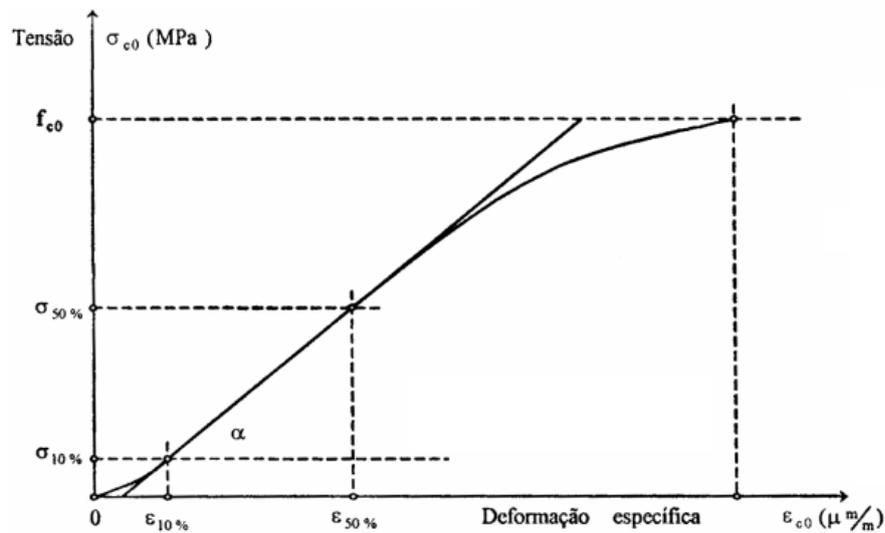


Figura 3.29. Diagrama tensão de formação específica para a determinação da rigidez à compressão paralela as fibras, NBR 7190, (ABNT, 1997).

3.5.1.2. Ensaio de compressão paralelo as fibras NBR 7190

O procedimento indicado para os ensaio de compressão paralelo as fibras para madeira, segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) é os seguinte:

- Para a determinação das propriedades de resistência e rigidez as medidas dos lados dos CPs, devem ser feitas com exatidão de 0,1mm;
- Para determinar o módulo de elasticidade " E_c ", devem ser feitas deformações em pelo menos duas faces opostas do CP utilizando relógios comparadores com precisão de 0,001mm;
- Os extensômetros para medir as deformações específicas devem possuir exatidão mínima de $50 \mu\text{m}/\text{m}$;
- Uma rótula entre o CP e a máquina de ensaio deve ser colocado para proporcionar um melhor ajuste;

- e) A resistência deve ser determinada com carregamento monotômico crescente, com uma taxa em torno de 10MPa/min;
- f) Para determinação da rigidez a resistência deve ser determinada pelo ensaio destrutivo de um CP idêntico, selecionado da mesma amostra a ser investigada;
- g) Para determinação do módulo de elasticidade deve-se construir diagramas tensão x deformação específica para todos ensaios realizados;
- h) Para o ensaio de compressão seja ele paralelo ou normal as fibras deve ser realizado de acordo com o gráfico da Figura 3.30 onde são realizados duas compressões para acomodação das fibras para depois ser realizado o ensaio definitivamente. Como pode-se ver no gráfico da Figura 3.30 é a partir do ponto 71 do gráfico é que é realizado o ensaio propriamente dito;
- i) Para caracterização mínima de espécies pouco conhecidas, deve-se utilizar duas amostras, sendo uma com CPs saturados e outra com CPs com teor de umidade em equilíbrio com o meio ambiente (seco ao ar). A determinação do teor de umidade deve ser feita de acordo com os procedimentos vistos anteriormente neste trabalho;
- j) Os resultados das propriedades da resistência e de rigidez devem ser apresentados com valor característico para a resistência e com valor médio para módulo de elasticidade, acompanhados do respectivo teor de umidade;
- k) Para os ensaios com uso de extensômetros mecânicos fixados no CP, as deformações devem ser registradas para cada ponto do diagrama de carregamento mostrado na, Figura 3.30, em até 70% da carga estimada. Em seguida deve-se retirar a instrumentação e elevar o carregamento até a ruptura do CP;

- l) Para determinação do módulo de elasticidade a compressão “ E_c ”, para o caso de compressão paralelo as fibras pode-se utilizar relógios comparadores ou extenssômetros com precisão de 0,001mm, fixados no CP, com distância nominal de 10cm entre as duas linhas de pregação.

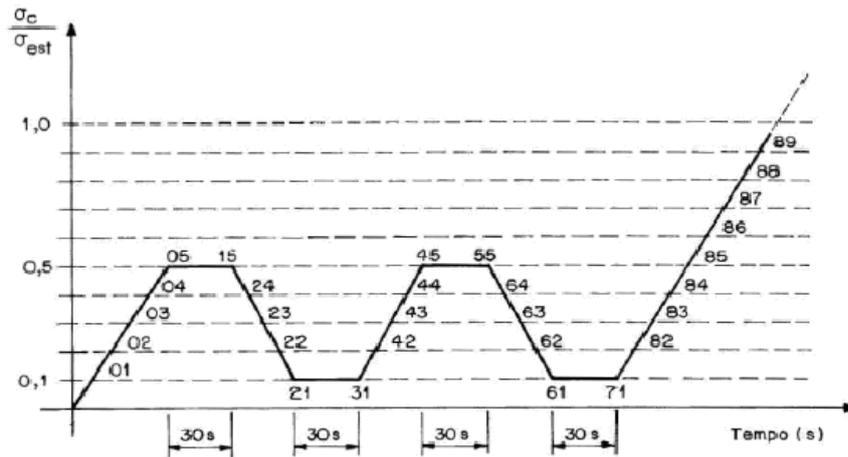


Figura 3.30. Diagrama de carregamento para determinação de rigidez da madeira em ensaios de compressão NBR 7190, (ABNT, 1997).

3.5.2. Ensaio de flexão

Segundo a norma técnica ASTM D 4761 (1996) (*Standart Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material*). Uma carga crescente é aplicada em determinados pontos de uma barra de geometria padronizada. São realizadas medidas dos valores da carga versus a deformação máxima. É utilizado na indústria de cerâmica e metais duros, como ferro fundido aço ferramenta e aço rápido, principalmente usado para controlar as especificações mecânicas dos componentes. Existem três tipos desse ensaio que são importantes. O ensaio de flexão em três pontos, e o ensaio de flexão em quatro pontos, e o método engastado. Os principais resultados dos ensaios são:

- Tensão de ruptura na flexão “ σ_{rf} ”;
- Módulo de elasticidade a flexão “ E_f ”;
- Módulo de resiliência (Urf);
- Módulo de tenacidade (Utf).

Os resultados do ensaio de flexão podem variar com a temperatura, velocidade, ponto de aplicação da carga, defeitos superficiais, características microscópicas e principalmente com a geometria da seção transversal da amostra.

3.5.2.1. Ensaio de flexão em postes de madeira

O ensaio de flexão estabelecido para a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) faz referência a madeira num contexto geral, mas essa norma não é suficiente para caracterização de postes de madeira pois existem mais variáveis a serem consideradas como: defeitos na madeira, rachas, nós, curvaturas e outros. Assim, torna-se necessário que se tenha um ensaio específico para flexão em postes de madeira. A atual norma para ensaio de flexão para postes de madeira NBR 6231 (ABNT, 1980) foi elaborada a 28 anos atrás e apresenta alguns erros referentes a dedução das equações para o cálculo de “ E ” e da velocidade de ensaio, que foram corrigidos somente no ano de 2006. A norma internacional para ensaios de flexão de postes de madeira ASTM D 1036 (1990) apresenta a necessidade de grande espaço físico para realização dos ensaios, mas possui grande semelhança a norma brasileira NBR 6231 (ABNT,1980). Neste contexto, serão discutidos adiante, parâmetros específicos dos ensaios segundo as normas americana e brasileira.

3.5.2.2. Método de fixação em três pontos

A norma técnica NBR 6122 (ABNT, 1996) recomenda o uso da norma NBR 7190 (ABNT, 1997) para a o cálculo da resistência de estacas de madeira, sendo que, esta última, limita-se a ensaios de resistência em CPs de pequenas dimensões e isentos de defeitos, mesmo sendo conveniente o uso da peça estrutural para a determinação de suas propriedades mecânicas. A norma ASTM D1036 (1990) (*Standard Test Methods of Static Tests of Wood Poles*) sugere dois tipos de ensaios estruturais para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal em postes de madeira destinados a redes de energia elétrica. O primeiro é o de viga engastada com uma força aplicada na sua extremidade livre e o segundo, o de viga bi-apoiada com uma força pontual aplicada. A norma ASTM D198-97 (1998) (*Standard Test Methods of Static of Timber in Structural Sizes*) propõe um esquema de ensaio à

flexão estática de quatro pontos para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal da peça, como ilustra a Figura 3.31 (DAMARZO, 2008).

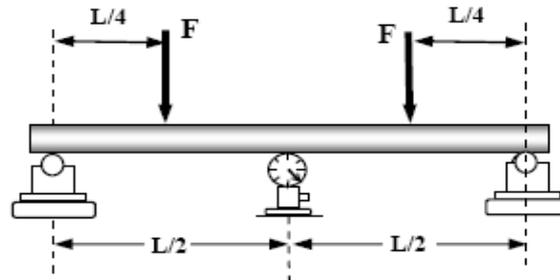


Figura 3.31. Ensaio de flexão estática de quatro pontos ASTM D4761 (1996).

Já a norma ASTM D4761 (1996) (Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material) propõe um esquema de ensaio à flexão estática de três pontos para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal da peça, como ilustra a Figura 3.32 (DAMARZO, 2008).

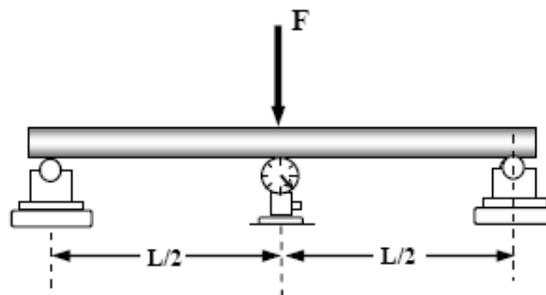


Figura 3.32. Ensaio de flexão estática segundo a norma ASTM D4761(1996).

3.5.2.3. Método engastado

Consiste no carregamento de um CP (poste) engastado submetido a um momento fletor, medindo-se durante a sua execução o momento aplicado e a deflexão do poste (flecha) no sentido horizontal e vertical com auxílio de uma régua graduada em cm. O poste então é preso na altura do engastamento específica de

cada poste, conforme visto no item 3.3.1, e tracionado por sua extremidade com um cabo de aço fixo a um dispositivo de tração carga “P” (motor ou morsa), onde desliza acima de em uma guia utilizada para evitar o atrito, Figura 3.33.

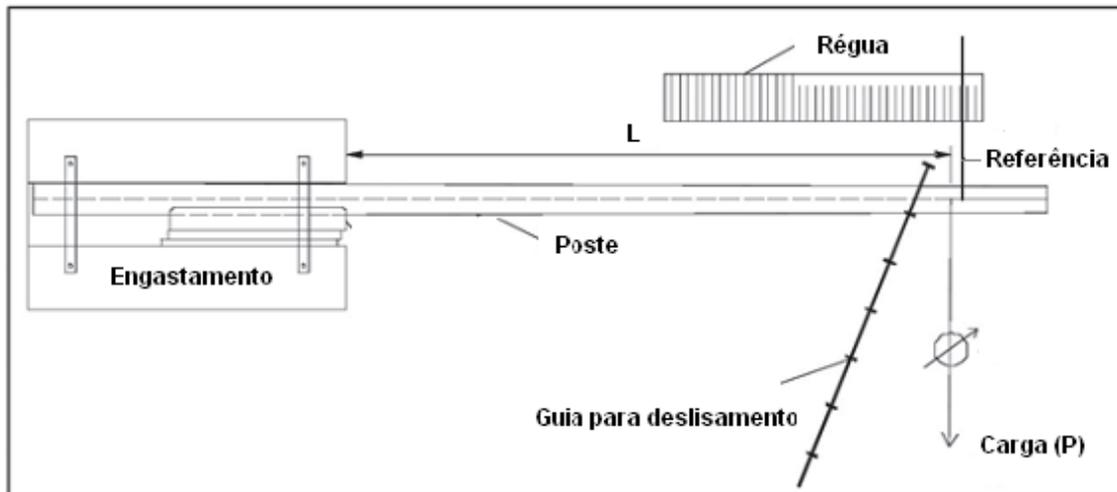


Figura 3.33. Ensaio de flexão pelo método engastado (TORRÁN, 2008).

3.5.2.4. Normas para flexão em postes de madeira NBR8456

A norma que especifica as características dos postes de eucalipto é a NBR 8456 (ABNT, 1984). Segundo a norma os postes são classificados em quatro classes de acordo com as características mecânicas e geométricas sendo:

- L: leve;
- M: Tipo médio;
- P: Tipo pesado;
- XP: Tipo extra pesado.

E de acordo com essas especificações os postes de Eucalipto são padronizados de acordo com o Tabela 3.2 e suas propriedades físico mecânicas descritas no Tabela 3.3. Esses parâmetros são válidos para as espécies: *E. Alba*, *E.citriodora*, *E.tereticornis*, *E.rostrata*, *E.paniculata*, *E.botryoides*.

Tabela 3.2. Dimensões para postes de eucalipto segundo NBR 8456.

Item	L (m)	Tipo	Resistência Nominal Rn (daN)	Flecha máx. (mm)	Dimensões (mm)						
					Engastamento (mm)	Diâmetro (mm)		Perímetro (mm)			
						A 200 mm do topo - Dc	Engastamento De	Topo A		Base B	
								Min.	Máx.	Min.	Máx.
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	51	556	961	836
4		XP	1000			220	270	297	685	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	961	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	961	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	961	958
16		XP	1000			220	270	320	685	851	1059

Tabela 3.3. Elementos característicos dos eucaliptos segundo NBR 8456.

Espécie de Eucalipto	Massa específica aparente (15 % de umidade) - (kg/m ³)	Características físicas				Características mecânicas						
		Retratibilidade				Limite de Resistência à flexão (daN/cm ²)		Índice de Ligidez (L/f)	Módulo de elasticidade à flexão (daN/cm ²)		Cisalhamento (daN/cm ²)	Dureza Janka (daN/cm ²)
		Radial (%)	Tangencial (%)	Volumétrica (%)	Coefficiente de Retratibilidade	Madeira verde	Madeira a 15 % de umidade		Módulo	Limite de proporcionalidade		
Alba	830	5,8	12,0	20,4	0,6	968	1247	23	131300	386	126	642
Bitryoides	890	6,9	13,1	22,0	0,63	1157	1460	26	154500	470	115	749
Citriodora	1090	6,5	9,6	17,8	0,76	1561	1730	32	181900	841	182	1045
	1040	6,6	9,5	19,4	0,77	1140	1238	36	136000	481	166	341
	980	6,9	9,4	18,2	0,78	1500	1673	24	177000	668	149	913
Paniculata	1090	7,3	13,6	23,1	0,79	1451	1772	39	201800	716	169	986
	1060	7,5	14,5	24,5	0,76	1320	1760	24	185000	554	155	890
Rostrata	870	6,8	15,5	25,9	0,48	878	1150	24	101600	389	105	645
Tereticornis	990	7,3	16,7	23,9	0,45	1018	1340	34	120200	509	110	839
	950	6,9	13,4	23,0	0,65	1270	1576	17	133200	490	137	689

Deve-se observar que estas características registradas em 1984 devem ser utilizadas com precaução. Com as novas formas de plantio e clonagem desenvolvidas durante esses 26 anos muitas das características foram modificadas para satisfazer a utilização do *Eucalipto* em suas aplicações estruturais. A norma NBR 8456 (ABNT, 1984) estabelece um padrão de qualidade para ensaio de flexão segundo dois requisitos básicos, onde a primeira diz que o poste deve apresentar carga de ruptura não inferior a duas vezes a carga nominal e a segunda estabelece que o poste não deve apresentar flecha superior a 5% do comprimento nominal do poste.

3.5.3. Apresentação da norma NBR 6231 (ABNT, 1980)

A caracterização mecânica dos postes de eucalipto nacionalmente é realizada por meio do método da viga engastada, normalizado pela NBR 6231 (ABNT, 1980) - Postes de Madeira, como mostra a Figura 3.34.



Onde:

- 1: Dispositivo para engastamento do poste a ensaiar;
- 2: Berço de madeira para acomodação do poste;
- 3: Cunhas de madeira;
- 4: Seção de engastamento;
- 5: Trena;
- 6: Moitão;
- 7: Suporte;
- 8: Dinamômetro;
- 9: Dispositivo para tração;
- H: Comprimento total do poste, (cm);
- E: Comprimento do engastamento, (cm);
- Hu: Comprimento útil, (cm);
- A: Escala graduada em centímetros;
- Y: Deslocamento do ponto de aplicação de carga em direção à base do poste quando este está sujeito a carga (flecha no sentido horizontal), (cm);
- X: Flecha no sentido vertical, (cm);

Figura 3.34. Esquema para ensaio de flexão segundo a norma NBR 6231 (ABNT, 1980).

A aplicação da carga deve se contínua e sua velocidade é dada pela Equação (3.19) em função da flecha no ponto de aplicação da mesma.

$$V = K \cdot \frac{Hu^2}{C} \quad (3.19)$$

Onde:

V: velocidade de deslocamento, (cm/mim);

Hu: braço de alavanca, (cm);

C: Circunferência na seção de engastamento, (cm);

K: Constante = 0,00146

Para os cálculos do limite ou tensão de ruptura à flexão da madeira na seção do engastamento “ σ_{rf} ” e do módulo de elasticidade a flexão “ E_f ”, tem-se as Equação (3.20) e (3.21).

$$\sigma_{rf} = \frac{32 \cdot \pi^2 \cdot P \cdot L}{C^3} \quad (3.20)$$

Onde:

σ_{rf} : tensão de ruptura a flexão da madeira na seção de engastamento, (MPa);

P: carga de ruptura, (N);

L: Distância da seção de engastamento ao ponto de aplicação da carga menos o valor de “y” (flecha no sentido horizontal), (cm);

C: circunferência na seção de engastamento, (cm).

$$E_f = \frac{64 \cdot \pi^3 \cdot L^3}{3 \cdot C^3 \cdot c} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (3.21)$$

Onde:

E_f : módulo de elasticidade da madeira a flexão, (MPa);

C: circunferência na seção de engastamento, (cm);

D1036 (1990) sugere as distâncias M e N que dependem do comprimento do poste em questão, Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Distância “M” e “N” para ensaio segundo a norma ASTM D 1036.

Comprim. do poste (m)	Distância M do poste (m)	Distância N da base de engastamento (m)
6,1	30,5	4,1
6,7	33,5	4,7
7,6	38,1	5,3
9,1	45,7	6,7
10,7	53,3	8,1
12,2	61,0	9,4
13,7	68,6	10,8
15,2	76,2	12,2
16,8	83,8	13,6
18,3	91,4	14,9

Deve-se possuir um campo de testes de tamanho suficiente para ensaiar postes de vários tamanhos, por exemplo, se o poste for de 12,2 metros a distância M deverá ser de 61m de acordo com a Quadro 3.4, assim quando se quer construir um campo de testes segundo essa norma utilizando vários tamanhos de postes ficaria inapropriado, devido o grande espaço necessário para realização dos testes.

A madeira por ser um material heterogêneo apresenta variações em suas propriedades mecânicas, principalmente em função da densidade e umidade. Essas variações ainda aumentam quando estudam-se espécies clonadas. O ensaio de compressão paralelo as fibras é o ensaio destrutivo que mais caracteriza os esforços de módulo análogo a um poste, pois quando comprimido no sentido longitudinal assemelha-se a essa estrutura de um poste quando sujeito a esforços verticais pelo peso transformadores ou laterais quando tensionado pelos cabos elétricos. O ensaio de compressão torna-se dessa forma o ensaio destrutivo mais semelhante ao de flexão pelo método engastado. O ensaio de flexão pelo método engastado por sua vez é o que mais simula os esforços reais sofridos pelo poste quando o mesmo está em serviço.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados para a extração, confecção em ensaios mecânicos de flexão e compressão postes de eucalipto.

4.1. Fluxograma dos procedimentos

Os procedimentos metodológicos seguem nos fluxogramas conforme mostra a Figura 4.1.

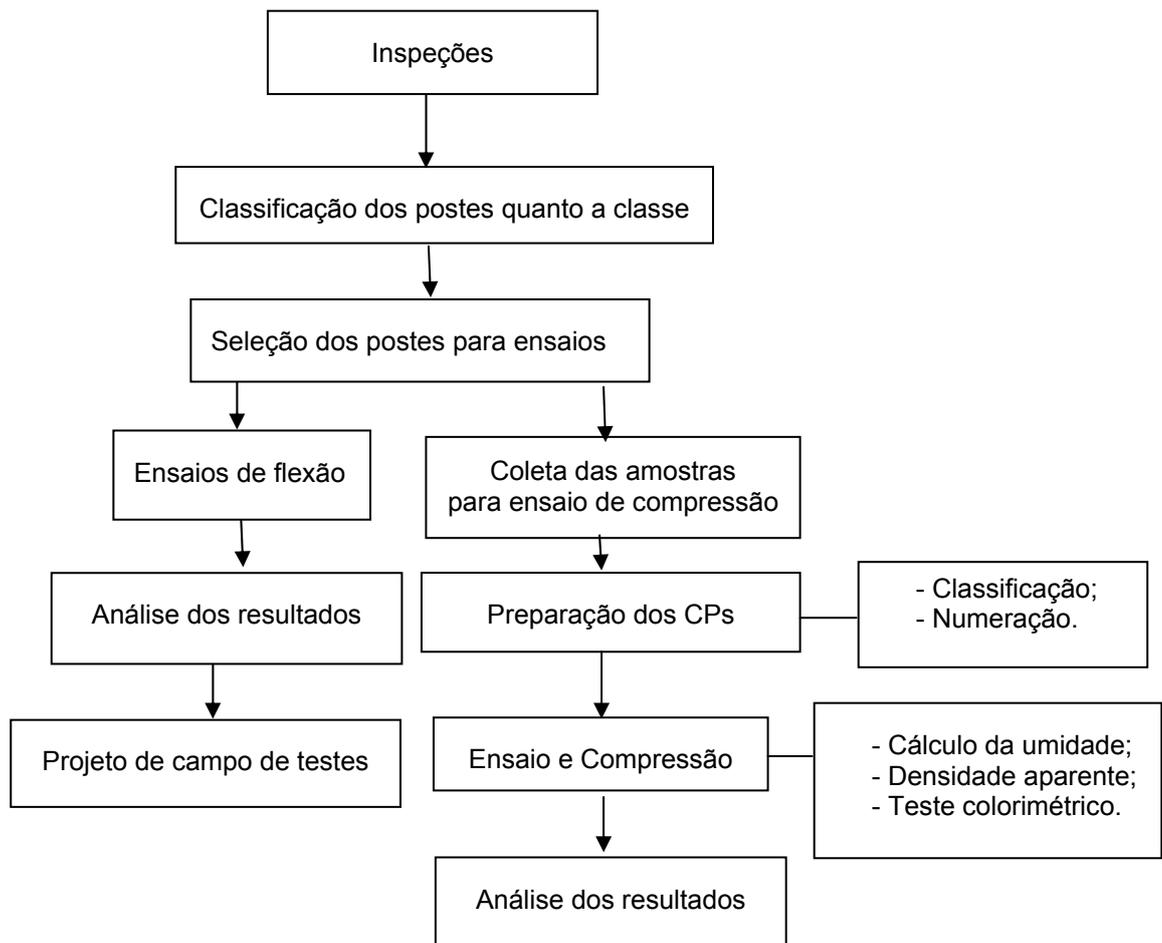


Figura 4.1. Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

Os postes utilizados foram retirados da rede elétrica da região de concessão da empresa AES Sul. Também foram analisados postes novos obtidos junto a fornecedores da concessionária. Em campo procedeu-se a inspeção, ensaios de flexão e coleta de amostras para o ensaio de compressão sendo que nessa última etapa as amostras foram confeccionadas de acordo com as dimensões estabelecidas pela norma NBR 7190 (ABNT, 1990) para ensaio de compressão, paralelo as fibras. Também foi feita a classificação dos dois melhores CPs de cada seção de quatro CPs para serem utilizados para cálculo do “ E_c ”. Em laboratório as amostras foram acondicionadas e tiveram a umidade monitorada para que todos os testes realizados estivessem dentro de um padrão de umidade relativa. A porcentagem de alburno foi realizada com teste colorimétrico para analisar a influência desse componente na resistência mecânica no ensaio de compressão paralelo as fibras. Um campo de testes para ensaio de flexão foi projetado e baseou-se nas normas ASTM D 1036 (1990) e NBR 6231 (ABNT, 1980). A discussão detalhada do fluxograma segue nos itens seguintes.

4.2. Inspeções

Em campo as inspeções foram realizadas e procedeu-se a inspeção e classificação e re-tratamento dos postes, onde alguns foram marcados para coleta, sendo 50% postes de classe 4, e os outros 50% divididos em postes de classe 1,2 e 3. Os postes para coleta foram marcados com a sigla: “PROJ.AES,PUCRS” conforme Figura 4.2. A Tabela 4.1 mostra as cidades e a quantidade de postes já inspecionados.



Figura 4.2. Poste marcado para coleta.

Tabela 4.1. Quantidade de postes e locais de realização a inspeção e coleta de postes para ensaio.

Cidade	Número de postes
Canoas	649
Estância Velha	395
Esteio	398
General Câmara	183
Harmonia	186
Ivoti	437
Lajeado	245
Montenegro	517
Rio Pardo	163
Novo Hamburgo	335
São Sebastião do Cai	228
São Leopoldo	490
Taquari	278
TOTAL	4504

Do total de 10.822 postes ainda restam 6.177 postes a serem inspecionados que estão distribuídos nas cidades de: Dois Irmãos, Portão, Rosário do Sul, Santa Cruz, Santa Maria, Santiago, São Borja, Sobradinho e Uruguaiana.

4.3. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a disposição da norma ASTM D1036 (1990), Figura 3.35, com algumas modificações referentes a inexistência da régua de medição do deslocamento horizontal ou flecha horizontal ("Y"), que foi considerado sempre 20cm. A tração foi realizada com ângulo de 90° entre o cabo e o poste sendo tracionado por um trator posicionado sempre a mesma distância da extremidade do poste, Figuras 4.3 e 4.4. O poste é levado até o local de ensaio onde era preso no engastamento utilizando-se estacas de madeira. Foram medidos o diâmetro na base, no topo e comprimento nominal do poste, após foi medida a

carga “P” registrada no dinamômetro da marca KRATOS (1500 kg), Figura 4.5. A flecha horizontal foi medida com carga nominal de 300kg para o cálculo do “ E_f ”. O comprimento e peso do poste estão relacionados com a carga nominal como visto anteriormente no Tabela 3.2, mas por medida de simplificação, pois não havia sistema de pesagem do poste, adotou-se o valor médio de 300kg. Por fim com obtenção desses valores calculou-se “ σ_{rf} ” e “ E_f ” através das equações (3.20) e (3.21) citadas anteriormente.

Foram coletados 93 postes que estavam em operação para ensaio de flexão mas apenas 37 deles puderam ser ensaiados devido as más condições de conservação que alguns se encontravam.



Figura 4.3. Ensaio em campo de testes com aproximação a ASTM D 1036 (1990), mostrando flecha vertical “x”.



Figura 4.4. Tração realizada com trator.



Figura 4.5. Dinamômetro utilizado.

Nos testes de flexão foram ensaiados 34 postes usados e 3 postes novos. Os valores de resistência “ σ_{rf} ” e o módulo de elasticidade a flexão “ E_f ” foram usados para determinar a condição de qualidade do poste segundo as especificações da norma NBR 8456 (ABNT, 1984) e para correlacionar com os resultados dos testes de compressão paralelo as fibras.

4.4. Coleta das amostras

Após o ensaio de flexão em postes retirados da rede e postes novos, foram obtidas amostras para compressão. No caso dos postes novos as amostras foram retiradas abaixo da linha de engastamento a altura de 80cm a 110 da base, conforme a Figura 4.6-a e em postes retirados da rede a uma altura de 150 a 180cm da base garantindo assim que a deteriorização característica do poste junto ao solo não afetasse os testes, Figura 4.6-b. Para avaliar a resistência mecânica ao longo do comprimento de três postes novos das espécies *E.citriodora*, *E.saligna* e *E.grandis*, retiraram-se amostras em sete alturas diferentes conforme indica a Figura 4.6-c. Também tiveram postes retirados da rede que foram ensaiados somente à flexão, Figura 4.6-d, e postes retirados da rede que foram ensaiados somente à compressão, com amostras retiradas da altura de 150cm a 180cm da base, Figura 4.6-e.

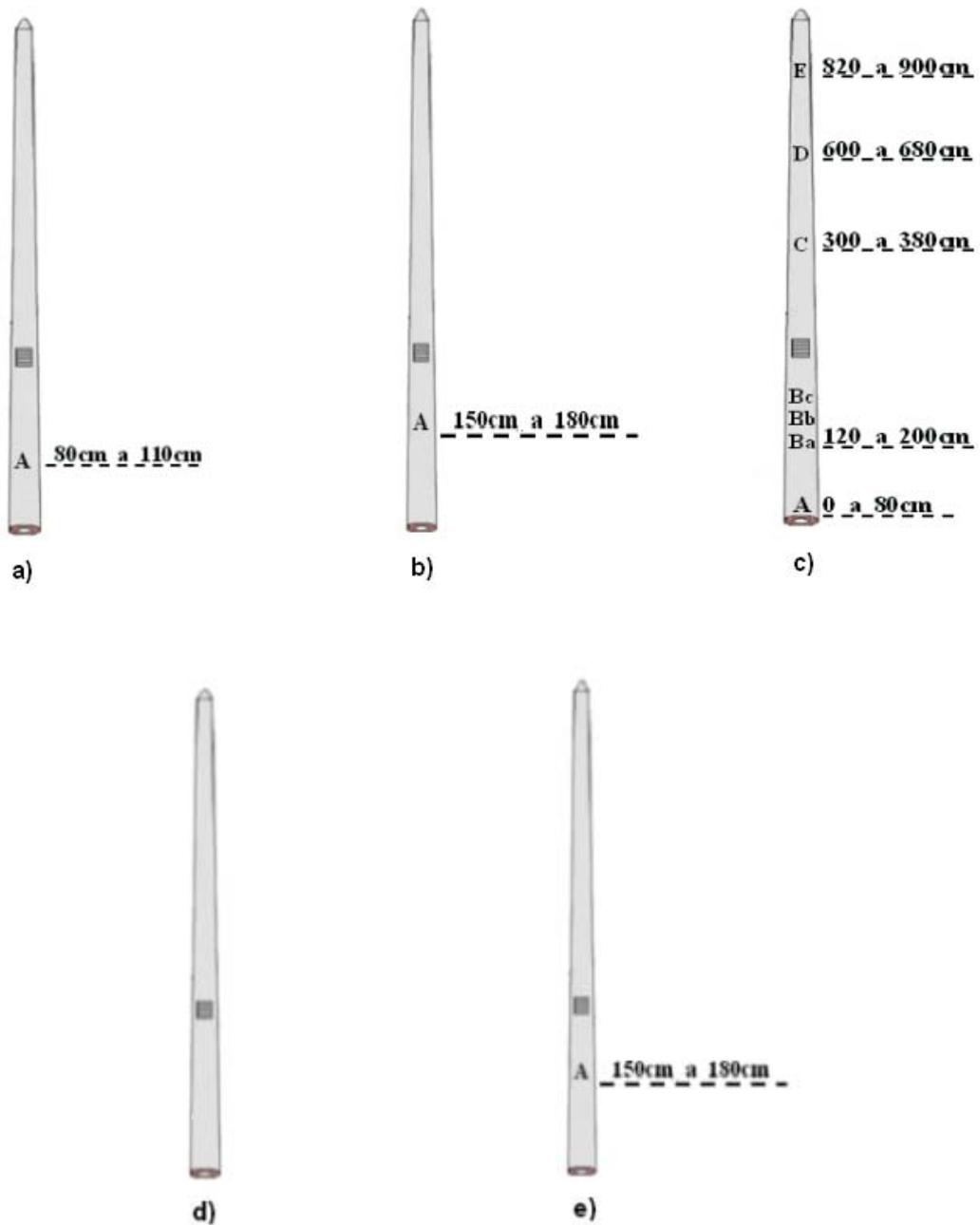


Figura 4.6. Regiões de coleta das amostras. Em a) Poste novo utilizado a flexão e compressão, b) Poste retirado da rede utilizado a flexão e compressão, c) Postes novos utilizados somente a compressão, d) Poste retirado da rede utilizado a flexão, e) Poste retirado da rede utilizados a compressão.

Em cada secção cilíndrica de aproximadamente 25 cm de altura retirada de cada poste foram confeccionados 4 CPs conforme NBR 7190 (ABNT, 1990) determina. Sendo que dois deles seriam utilizados para cálculo da tensão de ruptura a compressão “ σ_{rc} ” e os outros dois para módulo de elasticidade a compressão “ E_c ”, Figura 4.7.

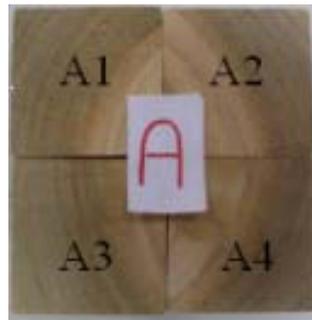


Figura 4.7. Amostras depois de preparadas retiradas de cada secção

O Tabela 4.2 ilustra a quantidade de CPs utilizados para os ensaios de compressão e flexão de acordo com a Figura 4.6.

Tabela 4.2. Indicativo dos testes de compressão e flexão em postes novos e retirados da rede.

Amostras	Nº de Postes	Nº de CPs a Flexão	Nº de CPs a Compressão
a	3	3	12
b	17	17	68
c	3	3	108
d	17	17	-
e	21	-	84
Total	61	40	272

Foram utilizados 61 postes, 55 postes usados e 6 novos para realização dos testes de compressão e flexão. De 6 postes novos 3 foram ensaiadas a flexão e desses foram confeccionados 12 CPs para compressão, os outros três restantes foram ensaiados somente a compressão onde confeccionou-se para tanto 84 CPs para estudo do comportamento de " σ_{rc} ", " E_c ", densidade, % alburno e umidade ao longo do comprimento do poste. Em mais 24 CPs constituídos metade com a maior quantidade de alburno e metade com a maior quantidade de cerne com o objetivo de verificar a influência do alburno na resistência mecânica ao ensaio de compressão paralelo as fibras. Totalizando 108 CPs a compressão.

Nos postes retirados da rede flexionaram-se 34 postes e em 17 deles confeccionou-se 68 CPs para o teste de compressão após procedeu-se a retirada de

amostras em mais 21 postes retirados da rede que não foram ensaiados a flexão e confeccionou-se mais 84 CPs para o teste de compressão. Totalizando para postes retirados da rede 150 CPs para compressão.

4.5. Preparação dos CPs

Após a coleta em campo as amostras foram levadas até a marcenaria para corte e preparação dos CPs. As dimensões 5 x 5 x 15 cm são definidas de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) para o ensaio de compressão paralelo as fibras. Essas etapas são mostradas na Figura 4.8.

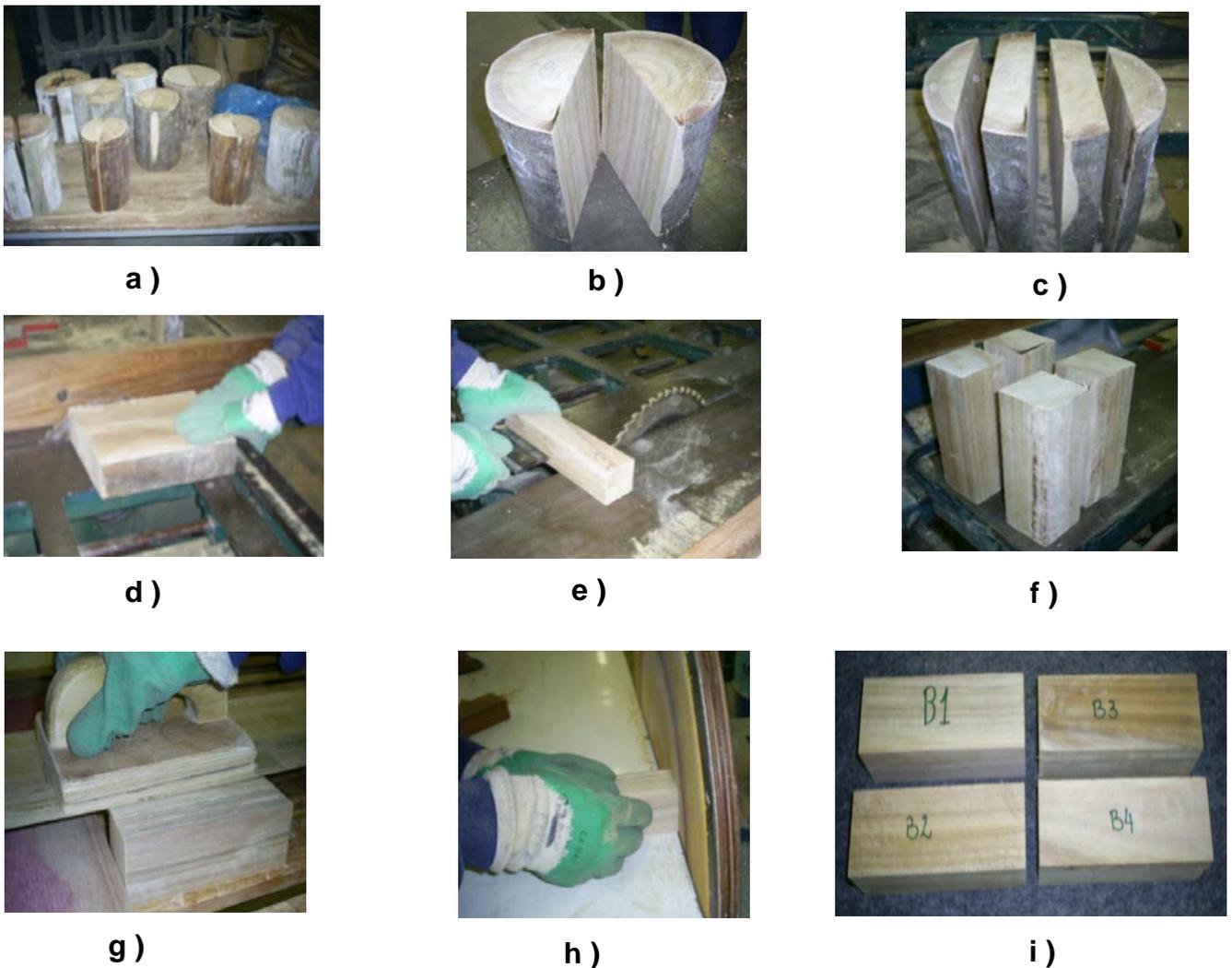


Figura 4.8. Etapas da preparação dos CPs para compressão. Em a) e b) Corte em duas partes, c) Corte em 4 partes, d), e) Corte das regiões centrais para obtenção dos CPs, f) CPs sem acabamento, g) Aplainamento, h) Retificação, i) CPs finais com acabamento.

Os CPs após prontos foram acondicionados em ambiente controlado a 65% de umidade relativa para estabilização de sua umidade a 12 % conforme indica a norma NBR 7190 (ABNT,1997). Dessa forma os ensaios de compressão e os testes de densidade deveriam também ocorrer a 65% de umidade ambiente, estabelecendo-se assim um padrão na realização dos testes de acordo com a porcentagem de umidade relativa. Quanto a preparação dos CPs a norma NBR 7190 (ABNT,1997) estabelece como padrão as dimensões necessárias para realização do ensaio de compressão, mas não comenta por exemplo a quantidade de cerne e alburno presentes nos CPs. Neste trabalho procurou-se estabelecer uma proporção de 50% de cerne e 50% de alburno sempre que isso fosse possível.

4.5.1. Classificação e Numeração dos CPs

Os CPs apresentavam condições adversas muitos possuíam nós, e alguns um pouco de rachaduras, dessa foram cada CP de cada secção foi escolhido sendo que os dois melhores foram usados para determinar o módulo de elasticidade a compressão " E_c ", devido a sensibilidade do ensaio para obtenção do " E_c " ser maior, pois CPs que apresentassem nós e rachaduras poderiam sofrer rompimento brusco e danificar os extensômetros utilizados no ensaio. Os CPs de cada secção tiveram sua numeração em uma seqüência continua fazendo-se a contagem em espiral da base para o topo em cada poste e continuando a seqüência no poste seguinte.

4.6. Ensaio de compressão

Após processados na marcenaria chegaram ao laboratório onde foram acondicionados em laboratório numa caixa onde havia a presença de sílica, Figura 4.9 que foi utilizada para manter a umidade relativa do ar a 65%. Em todos os testes adotou-se 65% o que condiciona a umidade do CP a 12% como estipula a NBR 7190 (ABNT, 1997). Nessa etapa os CPs já tiveram suas dimensões medidas, para depois de ensaiados serem pesados para obtenção de sua densidade aparente.

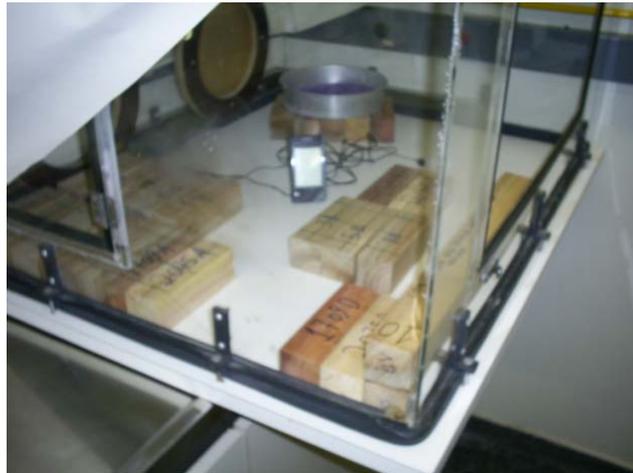


Figura 4.9. Amostras na caixa de acondicionamento com sílica-Gel.

Num recipiente fechado de isopor, Figura 4.10, com sílica os CPs foram levados até o local de ensaio. Ao serem retirados da caixa a umidade relativa do ar deveria estar menor ou igual a 65% para poder realizar-se o ensaio, pois esse era o padrão de umidade relativa adotada de acordo com a norma NBR7190 (ABNT, 1997).



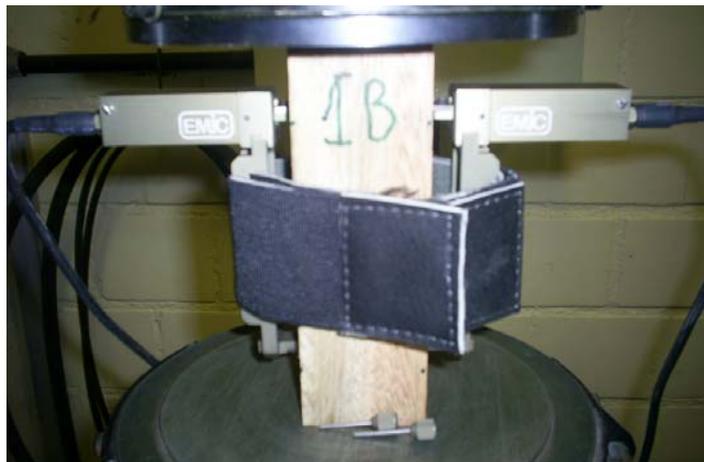
Figura 4.10. Amostras na caixa de acondicionamento com sílica-Gel.

Os ensaios de compressão paralelo as fibras foram realizados na máquina de compressão universal da marca EMIC, fabricada nacionalmente, Figura 4.11-a. A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece a realização de duas pré-cargas para acomodação das fibras conforme já visto anteriormente e estabelece velocidade de 10 MPa/min, aproximadamente 2500 kg/min. Procurou-se com a ajuda de um

cronômetro e de um disco com graduação em graus acoplado ao comando de vazão de óleo da máquina de compressão utilizada controlar a velocidade de ensaio para que a mesma fosse constante. Assim foi possível obter-se um padrão de velocidade de ensaio em todos ensaios. Dois extensômetros foram utilizados para medidas de “ E_c ”, Figura 4.11-b.



A



B

Figura 4.11: A - Máquina para realização de testes de compressão. B - Extensômetros utilizados para medir deformação no cálculo do módulo de elasticidade “ E_c ” (ARRUDA, 2006).

Foram ensaiados 270 CPs a compressão paralela as fibras de postes novos e retirados da rede. Em 3 postes novos os CPs retirados ao longo do eixo longitudinal foram utilizados para avaliar as propriedades mecânicas ao longo do comprimento do poste.

Em postes retirados da rede as amostras eram coletadas a 30 cm acima da linha do engastamento porque abaixo dessa linha a maioria dos postes impossibilitava a confecção de CPs devido ao estado de deteriorização da madeira. A correlação entre os ensaios de compressão e flexão em amostras retiradas de um mesmo poste acima da linha do engastamento gerava dúvida quanto ao estado das fibras, pois o poste já teria sido flexionado. Devido a isso, optou-se em retirar mais amostras a mesma altura em postes que não foram flexionados garantindo assim a integridade das fibras pois não estariam rompidas porque o poste nesse caso não

teria sido submetido ao ensaio de flexão. Dessa forma poderia-se estabelecer uma comparação das variáveis mecânicas de um CP de um poste que foi flexionado e de outro que não foi. Se fossem muito discrepantes os valores de " σ_{rc} " e " E_c " a correlação entre ensaios de compressão e flexão se daria em postes diferentes utilizando como critério para comparação: densidade, comprimento e classe.

Mas se os valores de " σ_{rc} " e " E_c " nos dois ensaios fossem próximos, isso indicaria que tanto as propriedades mecânicas a compressão das amostras retiradas de um poste já flexionado e outro não flexionado poderiam ser considerados equivalentes, concluindo-se que a correlação entre os ensaios poderia ocorrer com amostras retiradas para compressão no mesmo poste que foi flexionado.

4.7. Ensaio para avaliação da umidade

Após os ensaios os CPs voltaram ao laboratório onde foram levados até uma estufa, Figura 4.12, com circulação e renovação de ar, a uma temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. A cada intervalo de uma hora na estufa o CPs eram retirados e pesados com o auxílio de uma balança analítica, Figura 4.13, até atingirem o equilíbrio que ocorreu com uma variação inferior a 0,5% em relação a última medida, decorrendo num tempo total de nove horas em estufa. A esta altura os CPs encontravam-se em condição seca ao ar, ou seja, apresentavam um teor de umidade de aproximadamente 12%.



Figura 4.12. Estufa utilizada para secagem de CPs depois de ensaiados.



Figura 4.13. Balança analítica utilizada para pesagem de CPs.

O teor de umidade de cada CP foi calculado conforme a Equação (3.3), onde “m” equivale à massa do CP úmido e “m₀” a massa do CP seco na última pesagem. Para cálculo da densidade aparente foi realizado com a medida da massa úmida m_u de cada CP. Com um auxílio de um paquímetro foram medidas todas dimensões dos CPs antes de serem levados a realização do ensaio de compressão e com essas dimensões foi medido o volume de cada CP. Assim dividindo-se a massa úmida pelo volume obteve-se a densidade aparente de cada CP. Estudou-se a umidade ao longo do comprimento de 3 postes novos através dos CPs definidos pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.8. Medidas de Densidade

A densidade e a umidade da madeira ensaiada são parâmetros importantes a serem considerados conforme relatado no capítulo 3. A densidade e a umidade estão relacionadas com a resistência mecânica da madeira. Depois de saírem da caixa de acondicionamento, quando mantidos a uma umidade relativa de 65 %, os CPs supostamente estariam com umidade aproximada a 12 %. Ao chegarem na sala de ensaio de compressão os CPs deveriam estar submetidos a umidade relativa também de 65%. Mas nem todos os CPs estariam exatamente a 12 % de umidade mesmo que a umidade relativa estivesse a 65%. Por não estarem todos os

CPs a 12%, as propriedades mecânicas de “ σ_{rc} ” e “ E_c ” poderiam ser corrigidos segundo as Equações (3.1) e (3.2) que recalculam os valores a 12% de umidade. A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) além de considerar os valores indicativos “ σ_{rc} ” e “ E_c ” a 12 % de umidade também considera a densidade aparente a medidas nessa mesma umidade. Portanto, para regularizar a densidade de acordo com a umidade de cada CP utilizou-se as Equações (3.7), (3.8) e (3.9) estudadas por Rezende (1988), que são uma aproximação ao ábaco de Kolmann, Figura 3.10, capítulo 3. Nas equações citadas com o valor ρ_0 (densidade a 0% de umidade), obtido experimentalmente, e com a umidade de referência de 12 % calculou-se ρ_{ap} (densidade aparente a 12%). Dessa forma os valores de “ σ_{rc} ”, “ E_c ” e de densidade estariam padronizados a umidade de 12% estando de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Por fim com o uso da Equação (3.6) calculou-se ρ_b (densidade básica) de cada CP que é a densidade padrão de referência na bibliografia citada e estudou-se essa propriedade ao longo do comprimento de 3 postes novos através dos CPs definidos pela NBR 7190 (ABNT 1990), para o ensaio de compressão. Sabe-se que “ σ_r ” e “ E ” estão diretamente relacionados a densidade. Alguns autores como Oliveira (1988), Trugilho (1996), Latorraca e Albuquerque (2000) e Cruz (2003) mencionam que a densidade é a característica mais utilizada em pesquisas relacionadas a qualidade da madeira, sendo essa a mais importante e a que melhor se relaciona com as demais propriedades. Lobão et al., (2004) afirmam que a resistência mecânica da madeira é influenciada diretamente pela densidade. Sendo assim classificou-se os CPs por faixas de densidade a 12 % num intervalo de cada cem unidades começando a 400 kg/m³ e indo até 1000 kg/m³. Para que nos passos seguintes pudesse se correlacionar as propriedades mecânicas.

4.8.1. Relação de Cerne e Alburno

Em 270 CPs confeccionados foram observadas a quantidade de cerne e alburno presentes. Sabe-se que as propriedades mecânicas do cerne e do alburno são diferentes. Para isso, em dois dos postes novos das espécies *E.grandis* e

E.saligna ao longo do seu comprimento e no restante dos CPs submetidos a compressão estudou-se a quantidade de alburno presente. Utilizou-se para tanto, um corante: O.Anisidina, com o objetivo de demarcar a região que separa cerne e alburno, após realizou-se a medição com uma régua.

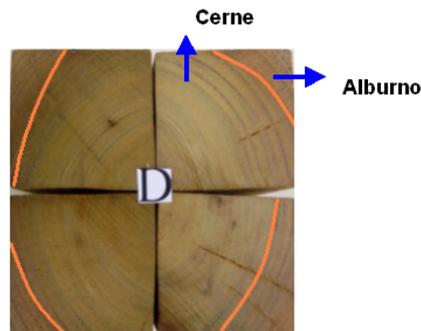


Figura 4.14. CPs marcados com o-anisidina para diferenciar região de cerne e alburno (limitada pela linha laranja).

4.8.2. Método para análise dos resultados

Em CPs de postes novos submetidos a compressão foi estabelecida uma média de cada seção para cada 4 CPs para valores de densidade a qual foi dividida em densidade básica (Db), aparente (Dap), aparente a 12% (Dap 12%), umidade %(U), Tensão de ruptura a compressão " σ_{rc} ", módulo de elasticidade a compressão " E_c " e % de alburno (%Alb). Após foi gerada a tabela das médias das variáveis desses três postes e procedeu-se em seguida ao estabelecimento da correlação linear de Pearson utilizando Excel para estudar-se a proporcionalidade dessas variáveis em função da altura do poste. Nas melhores correlações encontradas, geraram-se gráficos.

Em 15 postes retirados da rede submetidos ao teste de flexão, com CPs retirados após o ensaio estabeleceram-se as tabelas de correlação de Pearson segundo: Classe, % de Alburno (% Alb), densidade a 12% (Dap 12%), tensão de ruptura a compressão " σ_{rc} ", módulo de elasticidade a compressão " E_c ", tensão de ruptura a flexão " σ_{rf} ", módulo de elasticidade a flexão " E_f ", umidade a flexão (%Uf) e umidade a compressão (%Uc). Após isso, em 20 postes retirados da rede não submetidos a flexão estabeleceram-se tabelas de correlação Pearson entre: Classe, % de alburno (%Alb), densidade aparente a 12% (Dap 12%), tensão de ruptura a

compressão “ σ_{rc} ”, módulo de elasticidade a compressão “ E_c ” e umidade medida a compressão (%Uc). Tanto nos postes retirados da rede quanto em postes novos tinha-se o objetivo de determinar a proporcionalidade existente entre as variáveis envolvidas para propor uma correlação entre os ensaios de compressão e flexão. Todos os CPs foram separados por faixas de densidade como comentado no item 4.8, onde estabeleceu-se uma média para valores de “ σ_{rc} ”, “ E_c ”, “ σ_{rf} ” e “ E_f ” e $Dap12\%$ para estabelecer as correlações entre os ensaios de compressão e flexão.

4.9. Campo de testes para ensaio de flexão no sistema engastado

Para garantir uma maior confiabilidade nos testes de flexão pelo método engastado nas estruturas de Eucalipto foi projetado um campo de testes de acordo NBR 6231 (ABNT, 1980) e ASTM D 1036 (1990). Ambas as normas são equivalentes para cálculo de “ σ_{rf} ” e “ E_f ” sendo distintas apenas no arranjo dos dispositivos em campo. O campo de testes tem as dimensões de 32 x 18m, e está localizado no Campus de Viamão da PUCRS, Figura 4.15. Possui dois estaleiros com capacidade de 80 postes cada um, onde cada poste poderá ser conduzido até a região de engastamento por meio de uma empilhadeira ou por meio dispositivo tipo “girafa”. O campo de testes projetado terá a capacidade de ensaiar quatro tamanhos de postes ou seja de 9,10,11 e 12 metros de comprimento com tração de 90° do cabo em relação ao poste.

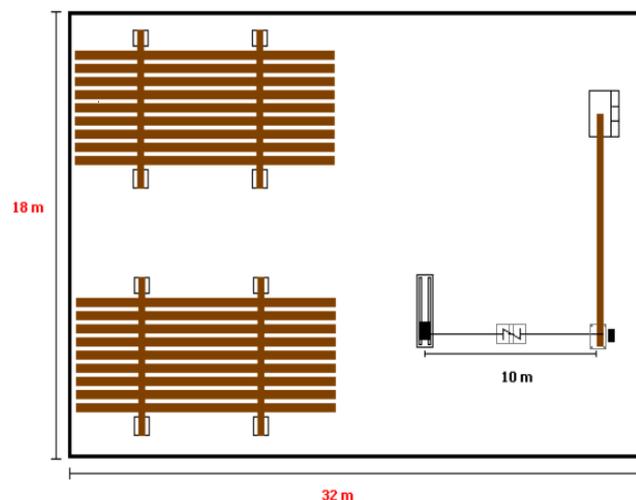


Figura 4.15. Campo de testes para ensaio de flexão – AES Sul / PUCRS (Viamão).

4.9.1. Motor

O poste será tracionado com um guincho da marca Work com capacidade para até 3000kg, Figura 4.16 em velocidade constante ajustada por inversor de frequência. O guincho possui carretel de 7 metros, redução planetária de três estágios, inversor de frequência e alinhador de cabo.



Figura 4.16. Guincho para tração do poste.

4.9.2. Célula de carga e indicador

Foi adquirida uma célula de carga tipo Z, Figura 4.17, com capacidade de 5 toneladas, um indicador para aquisição e transferência de dados, Figuras 4.18 e 4.19 com certificação do INMETRO capaz de enviar via serial até quatro medidas de carga por segundo em arquivos com extensão .doc ou .xls. As especificações do indicador estão representadas abaixo:

- Modelo: SB 5000 SII, (Gabinete em aço carbono);
- Capacidade / divisão: 3 t / 500;
- Indicador de peso montado em gabinete próprio, apropriado para montagem em mesa ou parede com cabo de alimentação com comprimento de 2 m;
- Display de lcd com 6 dígitos (14 mm de altura) para indicação de peso medido;

- Fonte de alimentação: externa 110 e 220 Vac;
- Saída serial rs 232 c.

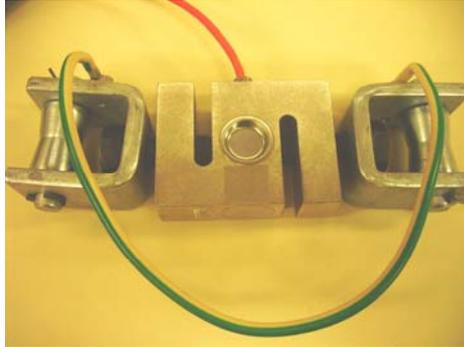


Figura 4.17. Célula de carga com olhais, capacidade de 5T.



Figura 4.18. Indicador para aquisição e transferência de dados.



Figura 4.19. Indicador, certificado pelo Immetro.

A aquisição de dados através da célula de carga poderá ser feita diretamente para uma placa de aquisição de dados, mas optou-se em comprar o indicador SB 5000II devido sua certificação pelo INMETRO garantindo assim a confiabilidade dos dados mensurados e certificando mais ainda os ensaios de flexão.

4.9.3. Dispositivos mecânicos

O guincho da marca Work será colocado sobre uma plataforma com rodízios rolamentados que possibilitarão o deslocamento do motor para ensaiar postes dos tamanhos de 9 a 12 metros, Figura 4.20. Para o transporte do poste do estaleiro até o engastamento, será utilizado uma estrutura tipo “girafa” onde será acoplado um dinamômetro e uma talha para “pescagem” do poste no estaleiro e medição do peso do mesmo antes de cada ensaio, Figura 4.21. Com a aquisição do peso do poste conforme a Tabela da NBR 8456 (ABNT, 1984) vista no Capítulo 3 irá obter-se a carga nominal necessária para verificar a condição de qualidade do mesmo. O poste antes de ser ensaiado terá a base apoiada sobre o engastamento Figura 4.22 e sua extremidade sobre um carrinho, Figura 4.23-a, a célula de carga também será colocada sobre um carrinho, Figura 4.23-b e será devidamente protegida para evitar queda. Esses dois carrinhos possuem regulagem de altura para alinhamento das estruturas no momento do ensaio. A disposição completa é vista na Figura 4.24.

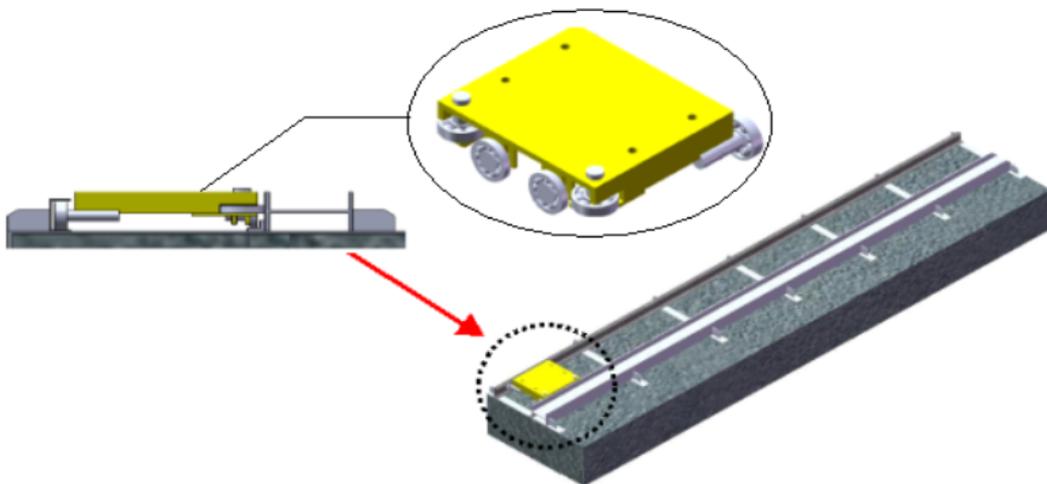


Figura 4.20. Trilho para deslocamento do guincho para tração para quatro tamanhos de poste.

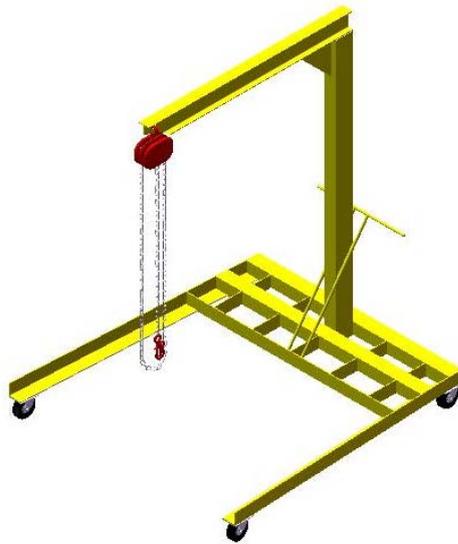


Figura 4.21. Estrutura “Girafa “ para deslocamento de poste do estaleiro até o engastamento.

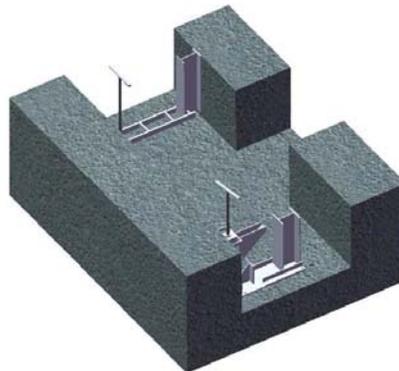


Figura 4.22. Engastamento com dispositivo de aprisionamento do poste.

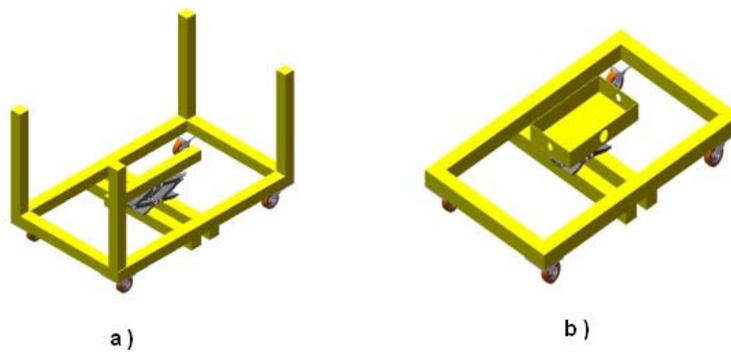


Figura 4.23. Em a) Carrinho para suporte do poste a ser ensaiado e b) carrinho para célula de carga.

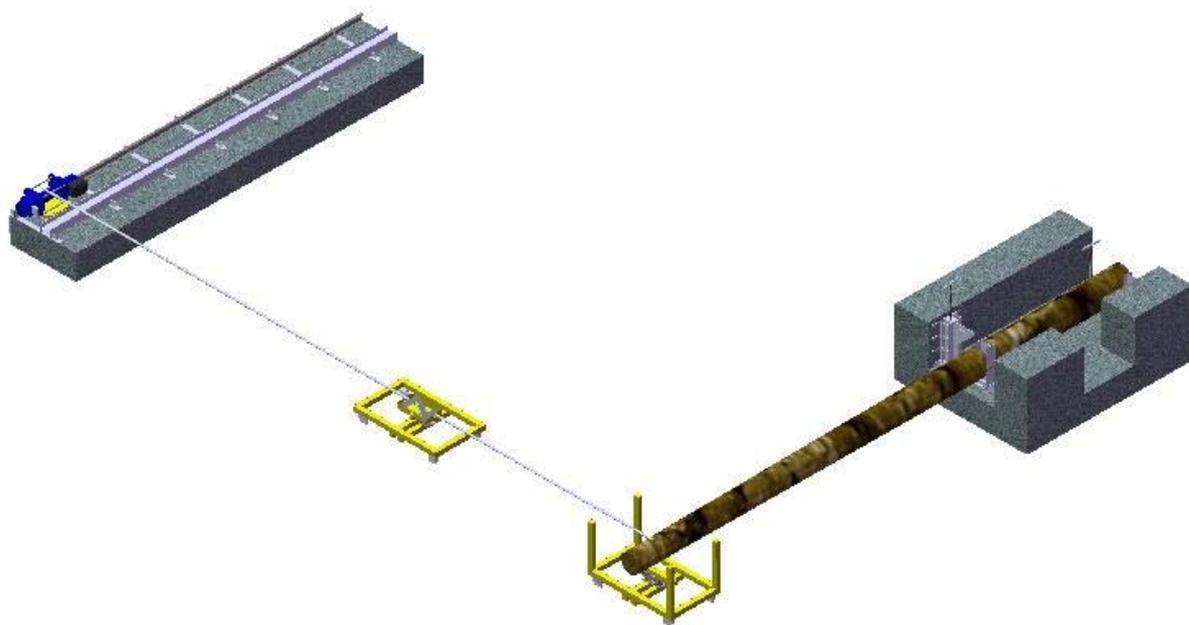


Figura 4.24. Arranjo final dos dispositivos no campo de testes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados as discussões dos resultados obtidos com ensaios mecânicos de flexão e compressão paralelo às fibras da madeira. Procurou-se relacionar a variação da tensão de ruptura à compressão “ σ_{rc} ” e do módulo de elasticidade à compressão “ E_c ” com a variação da quantidade de alburno. Fez-se uma avaliação dos procedimentos de inspeção quanto a classificação e também verificou-se se as mesmos estavam condizentes com as variáveis mecânicas de “ σ_{rf} ” e “ E_f ”. Analisou-se qual o grau de comprometimento mecânico que sofreria um poste após o ensaio de flexão, através de ensaios de compressão paralelo as fibras em amostras retiradas de postes já flexionados. Estabeleceu-se correlações entre os ensaio de flexão e compressão e variáveis envolvidas. Mediu-se a densidade básica (Db), umidade, “ σ_{rc} ”, “ E_c ” ao longo do comprimento de três postes novos de 9 metros das espécies *E.grandis*, *E.citriodora* e *E.saligna* com o objetivo de mapear o comportamento dessas propriedades. Por fim estabeleceu-se comentários referentes ao ensaio de flexão realizado e ao estudo do ângulo de tração do mesmo.

5.1. Inspeções

Os postes em serviço na rede elétrica inspecionados e retratados foram distribuídos em classes segundo a metodologia proposta no Quadro 5.1. Os postes marcados com a escrita PROJ. PUCRS AES SUL foram selecionados para os ensaios de flexão e compressão apresentados neste trabalho.

Quadro 5.1. Classificação segundo a metodologia proposta (GABIATT et al., 2010)

Classe	Estado do Poste
1	Poste sadio
2	Início de apodrecimento
3	Apodrecimento avançado
4	Poste comprometido

Pela gráfico da Figura 5.1 observa-se que a rede está bem conservada, pois 63% dos postes foram classificados nas classes 1 e 2, sendo que a maior parte 37% foram classificados como **postes sadios**.

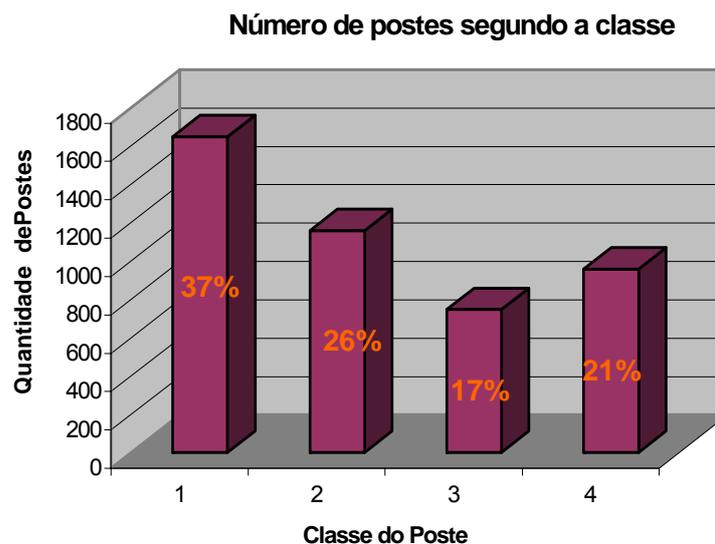


Figura 5.1. Mostra a relação entre o número de postes inspecionados e a classe.

Porém, a quantidade de postes Classe 3 e 4 existentes na rede leva ao questionamento sobre as condições de resistência destas estruturas de madeira. Por isso, a análise dos resultados dos testes de flexão e compressão realizada ao longo deste capítulo tem o objetivo de esclarecer se o tensão de ruptura a flexão “ σ_{rf} ” e o módulo de elasticidade a flexão “ E_f ” atendem a classificação da NBR 8456 (ABNT, 1984).

5.2. Ensaio de flexão

Os resultados obtidos com os ensaios de flexão estão registrados na Tabela 5.1. Nesta Tabela é apresentada uma análise das condições de serviço (na coluna **CS**) realizada com os seguintes critérios:

- **DENTRO:** foi atribuída ao poste que não **atingiu** a carga de ruptura (**P**) superior a duas vezes a resistência nominal e não apresentou flecha (**Δx**) superior a 5% do comprimento nominal do poste;
- **FORA:** foi atribuído ao poste que **não atingiu** os valores de tensão de ruptura e/ou os valores de flecha exigidos por norma;
- O (*) na coluna " E_f " foi atribuído aos postes que romperam antes de atingir a carga mínima de 300kgf utilizada para a obtenção do módulo de elasticidade à flexão;
- As barras (//) na coluna - **Ano de fabricação** - foram atribuídas aos postes sem a placa de identificação. A placa de identificação entre outros dados estampa a data de fabricação do poste.

As legendas para a Tabela seguem abaixo:

CN: Comprimento nominal, (cm);

Δx : Flecha máxima na direção vertical a carga nominal, (cm);

P: Carga de ruptura, (kgf);

Hu: Altura útil (altura total menos a área de engastamento e aplicação da carga), (cm);

σ_{rf} : Tensão de ruptura a flexão (secção engastamento), (MPa);

E_f : Módulo de elasticidade a flexão, (MPa);

Tabela 5.1. Resultados do ensaio de flexão.

Classe	Ano Fab.	CN (cm)	5% CN (cm)	Δx (cm)	P (kgf)	CS	Hu (cm)	σ_{rf} (MPa)	E_f (MPa)
1	2004	900	45	24	800	Dentro	720	27	6.119
1	1998	900	45	69	700	Fora	720	59	8.183
1	//	900	45	0	100	Fora	720	7	*
1	2003	900	45	0	100	Fora	720	6	*
1	2004	900	45	62	450	Fora	720	32	6.889
1	2004	900	45	0	250	Fora	720	16	*
1	//	820	41	0	600	Fora	648	30	*
1	1993	900	45	39	800	Dentro	720	59	11.242
1	//	900	45	42	610	Dentro	720	36	8.116
1	//	900	45	62	450	Fora	720	35	8.138
2	1995	900	45	66	520	Fora	720	46	8.789
2	//	900	45	43	800	Dentro	720	54	9.873
2	//	900	45	48	370	Fora	720	24	7.728
2	1995	1000	50	55	800	Fora	810	61	10.391
2	//	820	41	0	180	Fora	648	11	*
2	2003	900	45	0	220	Fora	720	17	*
2	//	900	45	37	560	Fora	720	40	10.937
2	1991	1100	55	50	700	Dentro	900	35	7.785
2	//	900	45	32	720	Dentro	720	74	20.985
3	//	900	45	0	130	Fora	720	7	*
3	//	900	45	34	600	Dentro	720	27	6.181
3	2000	1100	55	52	780	Dentro	900	46	9.897
4	//	900	45	53	350	Fora	720	17	4.834
4	1990	900	45	48	480	Fora	720	29	6.636
4	//	900	45	77	520	Fora	720	39	6.663
4	1989	900	45	79	380	Fora	720	31	6.964
4	//	900	45	44	700	Dentro	720	37	6.854
4	//	900	45	66	350	Fora	720	28	8.166
4	1992	900	45	76	390	Fora	720	23	4.333
4	1989	900	45	36	510	Fora	720	22	5.786
4	//	900	45	26	550	Fora	720	29	11.020
4	1992	1000	50	55	450	Fora	810	45	15.976

4	//	1100	55	52	480	Fora	900	36	14.035
4	1991	1100	55	67	920	Fora	900	63	9.844
1° NOVO	2009	900	45	27	950	Dentro	720	50	10.978
2° NOVO	2009	1000	50	44	800	Dentro	810	42	9.331
3° NOVO	2009	1100	55	45	1000	Dentro	900	59	10.699

Observa-se que dos dez postes classificados como classe 1, quatro estavam tão comprometidos que romperam antes de ser alcançada a carga mínima de 300kgf. É interessante notar que, destes dez postes apenas três atingiram a resistência mecânica mínima e receberam **CS – dentro**, e entre eles está um poste novo com apenas 6 anos de uso na rede. O tempo mínimo de permanência na rede de postes considerado é de 15 anos segundo a norma NBR 8456 (ABNT, 1984).

Observa-se um único poste classe 4 sem placa de identificação. Portanto, nada se pode comentar sobre esta estrutura. Por outro lado, dos três postes classe 3 ensaiados apenas um deles estava fora das especificações da norma. Apesar do número de postes ensaiados, classificados na classe 3 ser pequeno, esperava-se encontrar maior número de postes **CS-fora** do que **CS-dentro**. Somente um poste com dez anos de uso, classe 3 apresentou placa de identificação. Por isso, não foi possível uma análise em função do tempo de serviço. Os três postes novos ensaiados apresentaram todos **CS-dentro**, como esperado. A Tabela 5.2 apresenta a relação entre a classe atribuída na inspeção (em campo) e os resultados dos ensaios de flexão, quando comparados com a NBR 8456 (ABNT, 1984), somente para os 34 postes que receberam **CS-dentro** ou **CS-fora**. Não foram contabilizados os postes novos.

Tabela 5.2. Postes dentro das condições de uso segundo NBR 8456 (ABNT, 1984) com a classe.

Classe	N° Postes	N° Postes Qualificados
1	10	3
2	9	2
3	3	3
4	12	1

5.2.1. Ensaio de flexão e inspeções para faixa de densidade de 800 kg/m³

A faixa de densidade de 800kg/m³ foi a faixa que apresentou maior quantidade de postes ensaiados. Em sete postes, ensaiados à flexão, pode-se correlacionar estas variáveis de resistência mecânica com a classe atribuída no processo de inspeção. A Tabela 5.3 mostra os resultados da tensão de ruptura a flexão “ σ_{rf} ” e o módulo de elasticidade a flexão “ E_f ”, para faixa de densidade de 800 kg/m³.

Tabela 5.3. Ensaio de flexão e inspeções.

Classe	σ_{rf} (MPa)	E_f (MPa)	Dap 12 % (kg/m ³)
2	54	9.873	896
2	46	8.789	832
2	40	10.937	793
MÉDIA	47	9.866	840
3	27	6.181	834
4	37	6.854	866
4	28	8.166	845
4	39	6.663	870
MÉDIA	45	7.228	860

Observa-se que o poste classe 3 apresenta “ σ_{rf} ” (27MPa) bem menor que a média dos postes classe 4 (45 MPa) comprometidos que devem ser retirados da rede. Porém, isso pode ser atribuído ao pequeno número de amostras de postes classe três.

5.2.2. Correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas e a classe no ensaio de flexão para faixa de densidade de 800 kg/m³

Com os dados da Tabela 5.3 realizou-se a correlação de Pearson, Tabela 5.4, onde mostra uma correlação significativa entre classe e os valores de “ σ_{rf} ” e “ E_f ”, observa-se uma proporcionalidade negativa entre a classe e as variáveis mecânicas de “ σ_{rf} ” e “ E_f ” significativa sendo de (-0,63) e (-0,74), respectivamente. Isso

comprova que o ensaio de flexão justifica a classe atribuída ao poste no processo de inspeção.

Tabela 5.4. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.

	Classe	σ_{rf}	E_f
Classe	1		
σ_{rf}	-0,63	1	
E_f	-0,74	0,58	1

5.3. Relação entre densidade e espécie

A densidade aparente a 12% de umidade, (Dap 12%), de sete postes ensaiados à flexão, foi calculada a partir de dados obtidos em laboratório, conforme descrito na capítulo 4. A densidade está relacionada à espécie de Eucalipto utilizado na fabricação dos postes, conforme indica a Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Densidade aparente de algumas espécies de Eucalipto (Calil JR e Dias, 1997).

Nome Científico	Dap(12%) kg/m³
<i>Eucalyptus E.citriodora</i>	999
<i>Eucalyptus E.saligna</i>	731
<i>Eucalyptus E.grandis</i>	640

Comparando a Tabela 5.5 com a Tabela 5.3 para os ensaios de flexão observa-se que os sete postes ensaiados apresentam densidade média de 844 kg/m³. Portanto, pode-se considerar que os mesmos são da espécie *E.saligna*.

5.4. Ensaio de compressão e estudo das variáveis ao longo do poste

Para caracterizar a variação das propriedades mecânicas ao longo do poste foram realizados ensaios de compressão paralelos as fibras. As Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 mostram os resultados obtidos pela média das propriedades de % de alburno, densidade básica (Db), densidade a 12% (Dap 12%), porcentagem de umidade, tensão de ruptura a compressão " σ_{rc} " e módulo de elasticidade a compressão " E_C " de cada quatro CPs retirados a cada altura mostradas nas Tabelas.

Tabela 5.6. Média das variáveis ao longo do poste de *E.citriodora*.

E.CITRIODORA						
Altura	% Alburno	Db (kg/cm ³)	Dap 12% (kg/m ³)	U %	σ_{rc} (MPa)	E_C (MPa)
0	35,6	726	1044	9,3	52,44	17.621
120	34,1	712	1015	8,9	57,63	21.452
125	30,0	711	1012	8,9	54,78	18.993
150	27,8	708	1006	9,1	53,94	21.909
300	38,3	698	984	10,4	45,86	21.546
600	38,2	690	968	11,0	51,52	23.565
820	42,2	680	948	11,2	57,93	19.336
DESV. PAD	5,0	15	32	1	4,1	2048
MÉDIA =	35,2	703	997	9,8	53,44	20.632
NBR 7190			999		62	18.421

Tabela 5.7. Média das variáveis ao longo do poste de *E.saligna*.

E.SALIGNA						
Altura	% Alburno	Db (kg/cm ³)	Dap 12% (kg/m ³)	U %	σ_{rc} (MPa)	E_C (MPa)
0	23,66	611	820	9,6	39,79	15.024
120	20,49	599	798	15,8	38,08	16.223
125	24,32	599	798	14,5	37,80	17.832
150	20,64	606	812	15,3	39,87	17.595
300	10,53	598	796	18,4	36,67	22.402
600	12,01	594	789	15,9	40,21	20.713
820	15,20	574	757	17,8	37,57	21.799
DESV.PAD	5,4	12	20	2,8	1,37	2.855
MÉDIA =	18,12	597	796	15,3	38,57	18.798
NBR 7190			731		46,93	14.933

Tabela 5.8. Média das variáveis ao longo do poste para eucalipto *E.grandis*.

E.GRANDIS						
Altura	% Alburno	Db (kg/cm ³)	Dap 12% (kg/m ³)	U %	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
0	27,30	620	575	18,9	45,79	13.404
120	24,65	575	539	17,5	40,02	14.088
125	24,16	600	559	17,4	40,97	13.635
150	21,43	570	535	16,9	40,76	13.840
300	25,13	557	524	17,2	40,54	14.491
600	26,28	600	559	16,5	38,30	14.777
820	27,22	599	558	15,9	41,38	14.709
DESV,PAD	2	22	18	0,9	2,3	539
MÉDIA =	25,17	590	550	17,19	41,11	14.135
NBR 7190			640		40,3	12.813

Observa-se que as médias encontradas quanto a Dap 12%, " σ_{rc} " e " E_c " obtidas das médias experimentais são aproximadas das sugeridas pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) a não ser para a espécie *E.saligna*, onde os valores de Dap 12%, " σ_r " e " E_c " estão em maior desacordo com as médias apresentadas pela norma indicando a possibilidade de ser um clone.

5.4.1. Correlações entre as propriedades para CPs de postes novos ao longo do comprimento do poste

Os valores das correlações foram obtidos dos valores médios das Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8. É importante salientar que as variáveis mencionadas nessas Tabelas sofrem variações dependendo da espécie estudada. No entanto, certas tendências, como: diminuição da densidade com a altura, tensão de ruptura e módulo de elasticidade e umidade, podem ser citadas, embora, não seja uma regra fechada. Isto porque em alturas diferentes pode-se ter um comportamento diferenciado, como, por exemplo o aumento do módulo de elasticidade a compressão " E_c " com a altura comportando-se de forma inversa a ao tensão de ruptura a compressão " σ_{rc} " e a densidade, como pode ser visto nas Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11, onde foi feita a correlação de Pearson, o que confirma a heterogeneidade da madeira ao longo do seu comprimento. Dessa forma, para a realização das correlações entre os ensaios deveria-se conhecer esse comportamento para estabelecer um padrão de altura para retirada de amostras para o ensaio de compressão, pois foi observado que as variáveis de densidade, " σ_{rc} " e " E_c " variam ao longo do comprimento do poste.

Tabela 5.9. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes para *E.citriodora*.

E.CITRIODORA						
	Altura	% ALB.	Db	U%	σ_{rc}	E_C
Altura	1,00					
% ALB.	//	1,00				
Db	-0,96	-0,64	1,00			
U%	0,92	0,84	-0,88	1,00		
σ_{rc}	0,13	-0,11	-0,02	-0,22	1,00	
E_C	0,29	-0,01	-0,43	0,30	-0,27	1,00

Tabela 5.10. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes para *E.saligna*.

E.SALIGNA						
	Altura	% ALB.	Db	U%	σ_{rc}	E_C
Altura	1,00					
% ALB.	//	1,00				
Db	-0,91	0,51	1,00			
U%	0,63	-0,73	-0,69	1,00		
σ_{rc}	-0,15	0,25	0,45	-0,59	1,00	
E_C	0,80	-0,88	-0,72	0,83	-0,46	1,00

Tabela 5.11. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes para *E. grandis*.

E.GRANDIS						
	Altura	% ALB.	Db	U%	σ_{rc}	E_C
Altura	1,00					
% ALB.	//	1,00				
Db	0,06	0,62	1,00			
U%	-0,87	0,06	0,29	1,00		
σ_{rc}	-0,45	0,34	0,52	0,72	1,00	
E_C	0,88	0,29	-0,29	-0,83	-0,68	1,00

5.4.1.1. Densidade ao longo do poste

A variação da densidade para as três espécies mostrou tendência em decrescer da base para o topo nas espécies *E.citriodora* e *E.saligna*. Já para a espécie *E.grandis*, a densidade básica decresceu até a altura próxima a 4 metros e depois voltou a aumentar, Gonsalvez (2006), encontrou a mesma variação de densidade básica para a espécie *E.Grandis*. Para o *E.globulos*, Folkel (2002), encontrou como crescente a densidade básica da base para o topo. Sendo assim a variação da densidade com a altura é uma variável que pode mudar de espécie para espécie, mas em geral, a densidade diminui da base para o topo.

Observando-se o gráfico da Figura 5.2 verifica-se que densidade tende a diminuir da base para o topo nas espécies *E.citriodora* e *E.saligna*. Para a espécie *E. grandis* verifica-se que a densidade tende a diminuir aproximadamente 10% do valor médio da Dap 12% encontrada até a altura correspondente a altura de engastamento, o que para o *E.saligna* e *E.citriodora* variaram cerca de 1,4%. Sabe-se que a região do engastamento do postes que é situada entre 1,5 e 1,8 m é a região mais crítica por motivos da degradação da madeira por agentes físicos e biológicos. A espécie *E.grandis*, além de apresentar a densidade média mais baixa na região de engastamento, possui uma queda de densidade mais acentuada quando comparada com as espécies *E.saligna* e *E.citriodora*.

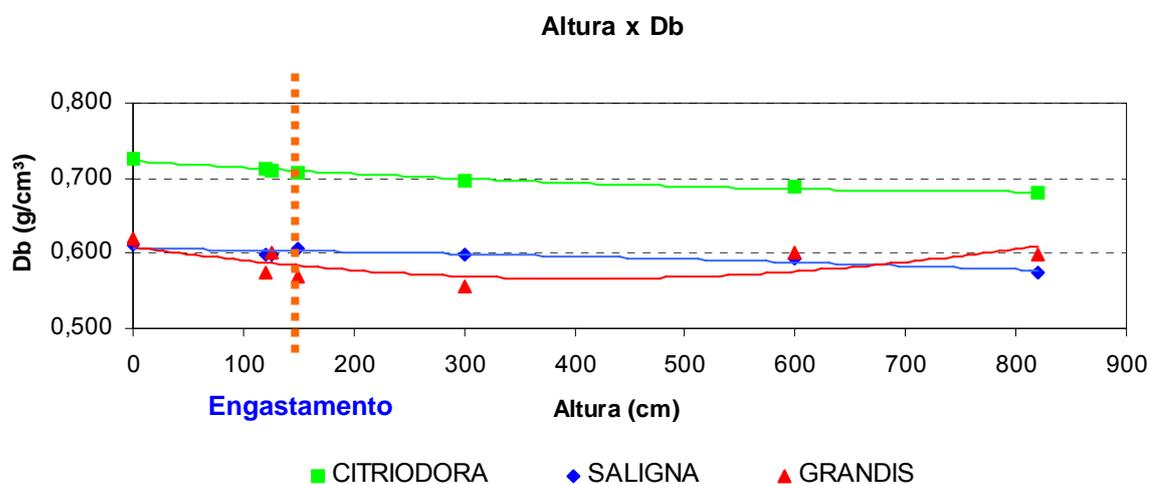


Figura 5.2. Variação da densidade com a altura do poste de 9 metros da espécie *E.citriodora*.

5.4.1.2. Umidade ao longo do poste

A umidade é outra variável importante, pois interfere nas propriedades mecânicas da madeira. Em vista disso, foi estudado a variação da umidade ao longo da estrutura das três espécies de Eucalipto já citadas. Observou-se que a espécie *E.grandis* apresentou a maior umidade média. Sendo que na linha do engastamento foi encontrada umidade 20 % contra 9 % e 15 % das espécies *E.citriodora* e *E.saligna*, Figura 5.3. Esses resultados podem ser utilizados para a seleção de espécies para postes para a rede elétrica. A espécie *E.grandis* seria a menos indicada, pois com o acúmulo da umidade a madeira está mais sujeita ao desenvolvimento de microorganismos degradadores. Além disso, a região com maior umidade desenvolveria apodrecimento mais rápido e também menor seriam as propriedades mecânicas de “ σ_r ” e “ E ”.

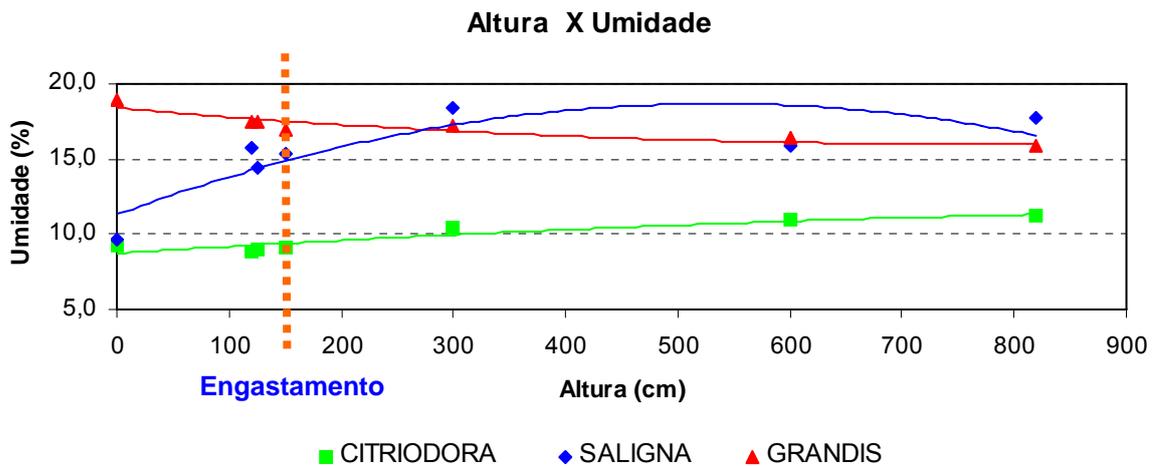


Figura 5.3. Variação da umidade com a altura do poste de 9 metros da espécie *E.citriodora*.

5.4.1.3. Tensão de ruptura ao longo do poste “ σ_{rc} ”

O conhecimento do “ σ_{rc} ”, ao longo do poste de Eucalipto também pode ser utilizado como parâmetro para a escolha das melhores espécies para fabricação de postes. Além disso, a tensão de ruptura tem a tendência de acompanhar os valores de densidade para um mesmo poste. Isto é, quanto maior a densidade mais resistente é a estrutura. A Figura 5.4, mostra a tendência da variação de “ σ_{rc} ” em relação a altura para as três espécies.

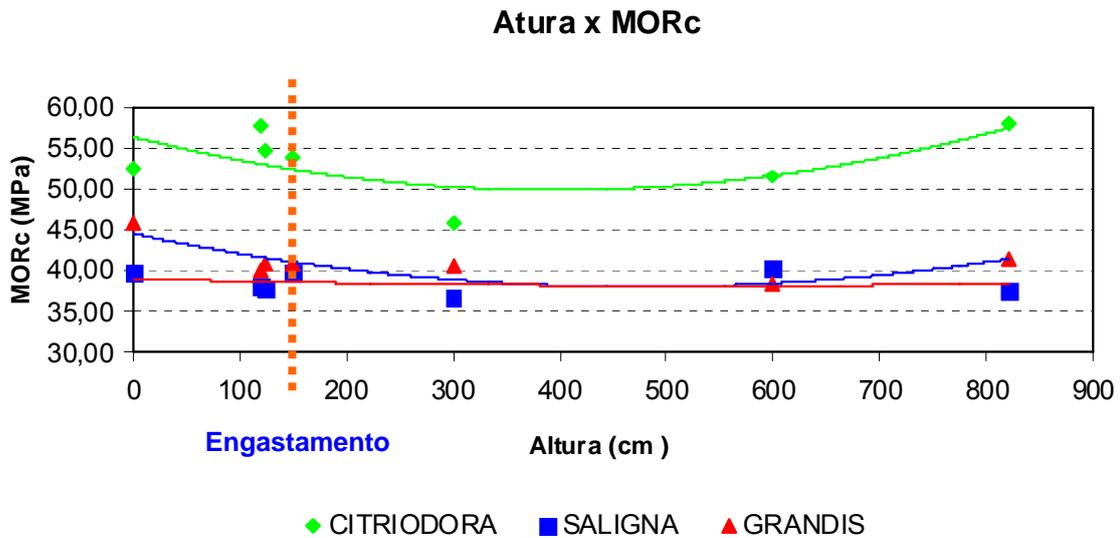


Figura 5.4. Variação de “ σ_{rc} ” com a altura do poste de 9 metros da espécie *E.grandis*.

Para as espécies *E.citriodora* e *E.grandis* nota-se certa tendência de diminuição do tensão de ruptura a compressão “ σ_{rc} ” até a altura de 4 metros e depois retornando a subir. No caso do *E.saligna* manteve-se praticamente constante. Portanto, a espécie *E.saligna* seria a mais indicada sob este ponto de vista, já que é mais uniforme, enquanto que a espécie *E.citriodora* e *E.grandis* apresentam uma diminuição na região do engastamento, mostrando que a espécie *E.grandis* é a menos indicada.

5.4.1.4. Módulo de elasticidade a compressão ao longo do poste “ E_c ”

O módulo de elasticidade obteve aproximações adequadas quando aproximado por um polinômio de segundo grau mostrando que possui tendência de aumentar até a altura de 4m a 6m e após diminuir, Figuras 5.5. O módulo de elasticidade é uma propriedade de grande importância para postes para a rede de distribuição de energia elétrica. Visto que um poste deve possuir além de uma boa densidade e “ σ_{rf} ” um “ E_f ” suficiente para que quando solicitado por ação de ventos ou esforços estruturais como tensões em cabos elétricos e peso de transformadores resista a esses esforços de forma segura. Novamente a espécie *E. grandis* mostrou-se a menos indicada para confecção de postes pois foi a que apresentou menor módulo de elasticidade.

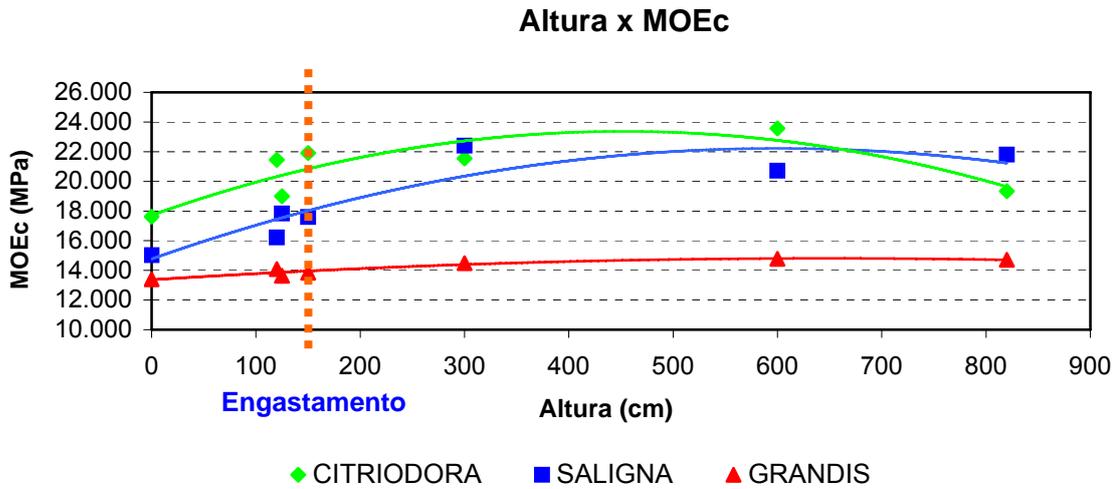


Figura 5.5. Variação de “ E_c ” com a altura do poste de 9 metros da espécie *E.citriodora*.

Como visto nas Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 as correlações foram negativas para módulo de elasticidade a compressão “ E_c ” quando relacionadas a densidade e tensão de ruptura a compressão “ σ_{rc} ” e positivas quando relaciona a essa última com a densidade, indicando que para as espécies estudadas quando a tensão de ruptura é alta a densidade também é, o que não ocorre com o módulo de elasticidade que obteve correlação negativa com as variáveis de tensão de ruptura e densidade, mas isso ocorreu quando considerou-se amostras retiradas em diferentes regiões ao longo do poste.

5.4.1.5. Regressões encontradas para as caracterizações ao longo do poste

As melhores aproximações foram obtidas quando aproximadas por um polinômio de segundo grau, as Tabelas 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 mostram as regressões encontradas com o respectivo coeficiente de determinação (R^2):

Tabela 5.12. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para umidade.

UMIDADE		
Espécie	Equação	R^2
CITRIODORA	$y = -2E-06x^2 + 0,0047x + 8,7302$	0,860
SALIGNA	$y = -3E-05x^2 + 0,0276x + 11,31$	0,687
GRANDIS	$y = 4E-06x^2 - 0,0063x + 18,386$	0,823

Tabela 5.13. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para densidade.

DENSIDADE BÁSICA		
Espécie	Equação	R ²
CITRIODORA	$y = 6E-08x^2 - 1E-04x + 0,722$	0,973
SALIGNA	$y = -2E-08x^2 - 2E-05x + 0,6062$	0,838
GRANDIS	$y = 3E-07x^2 - 0,0002x + 0,6089$	0,493

Tabela 5.14. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para tensão de ruptura a compressão.

Tensão de ruptura a compressão		
Espécie	Equação	R ²
CITRIODORA	$y = 4E-05x^2 - 0,033x + 56,386$	0,389
SALIGNA	$y = -0,0149x^2 + 0,5803x + 33,997$	0,064
GRANDIS	$y = 3E-05x^2 - 0,0274x + 44,554$	0,765

Tabela 5.15. Regressões e coeficiente de determinação encontrados para módulo de elasticidade a compressão.

Módulo de elasticidade a compressão		
Espécie	Equação	R ²
CITRIODORA	$y = -0,0276x^2 + 24,977x + 17720$	0,739
SALIGNA	$y = -0,0206x^2 + 24,794x + 14768$	0,823
GRANDIS	$y = -0,0034x^2 + 4,4478x + 13368$	0,921

5.4.1.6. Comentários das variações de “ σ_{rc} ” e “ E_c ” ao longo do poste

A madeira é um material heterogêneo e em diferentes regiões ao longo do comprimento do poste ela apresenta propriedades diferentes. A diminuição do valor de “ E_c ” na altura de 6 metros Figura 5.5, possivelmente deve-se ao fato que nessa região a madeira ainda é jovem. Apesar da madeira nessa altura ser mais jovem o valor de “ σ_{rc} ” volta a subir supostamente devido as estruturas que deram origem aos ramificações (galhos) serem mais densas Figura 5.4. Também há a suposição

que nessa região (altura de 6 metros) por adaptação natural devido a ação do vento o material tornou-se mais elástico e menos resistente devido ao efeito cíclico desses esforços.

5.5. Correlações com Alburno

A correlação entre alburno e altura foi desconsiderado visto que na confecção dos CPs a quantidade de alburno, embora procurava-se seguir uma relação de 50% de cerne e 50 % de alburno, essa relação não era uniforme, porém sabe-se que o alburno aumenta com a altura. Segundo Gonçalves (2005) a densidade na direção medula casca aumenta, concluindo-se que tensão de ruptura a compressão " σ_{rc} " e módulo de elasticidade a compressão " E_c " também aumentam. Segundo Oliveira (2004) sabe-se que na maioria das espécies de Eucalipto possuem tendência em aumentar a densidade até o alburno e diminuir a partir dele.

Dessa forma a densidade se compensaria, o que para o um teste de compressão ficaria uma propriedade que não teria grande influência a não ser que o CP fosse constituído somente com cerne ou somente com alburno. Na prática 50 % de cerne e 50% de alburno na confecção dos CPs não ocorre, mas da mesma forma, a quantidade de alburno não apresentou uma tendência significativa padrão em todas as correlações referentes em aumentar ou diminuir o " σ_{rc} " e " E_c " quando procurou-se seguir a proporção entre cerne e alburno na confecção dos CPs.

Por vezes a quantidade de alburno apresentou correlação positiva com " σ_{rc} " e " E_c " o que não deveria ocorrer mas isso deve-se a densidade ao longo do poste variar. No caso da espécie *E.grandis* a diferença de densidade entre o maior e menor valor foi de 0,137g/cm³ para *E.citriodora* 0,067g/cm³ e *E.saligna* 0,107g/cm³, o que explica que para a espécie *E.grandis* a variação de proporção positiva entre " σ_{rc} " e " E_c " com alburno modificou-se devido a variação da densidade.

Para o *E.saligna* ainda que para " E_c " tenha um resultado negativo de proporcionalidade, para " σ_{rc} " foi ainda positivo e no *E.citriodora* que teve a menor variação de densidade a correlação de alburno com " σ_{rc} " e " E_c " não foi significativa,

ou seja, a densidade nos CPs da espécie *E.grandis* apresentaram uma densidade mais linear ao longo do poste. Dessa forma observou-se que se a quantidade de alburno e cerne fossem relativamente próximas a 50% cada uma, não haveria variação de " σ_{rc} " ou " E_c ". Observando-se a face 5 x 5 cm do CP, Figura 5.6-a nota-se a divisão entre cerne e alburno na face 5 x 5 cm de um CP utilizado no ensaio de compressão paralelo as fibras e na Figura 5.6-b que a densidade aumenta na região até chegar no alburno mas logo depois começa a diminuir.

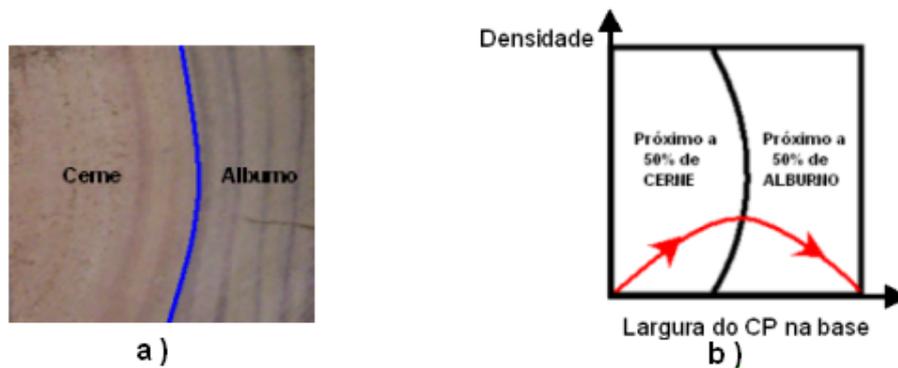


Figura 5.6. a) Face 5 x 5 cm do CP com cerne e alburno, b) Variação da Densidade no CP.

Já nas Tabelas 5.16 e 5.17 mostram-se os valores de " σ_{rc} " e " E_c " para CPs das espécies *E.grandis* e *E.citriodora* constituídos apenas de cerne e outros com a maior quantidade de alburno possível, observou-se que CPs constituído somente de cerne continham uma pequena parte de medula, o que diminui os valores de " σ_{rc} " e " E_c ".

Tabela 5.16. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.

E.GRANDIS			
CERNE		MAIOR QUANTIDADE DE ALBURNO	
σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
30,89	10.861	36,32	11.931
29,06	10.934	31,82	14.796
MÉDIAS			
29,97	10.897	34,07	13.336

Tabela 5.17. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.

E.SALIGNA			
CERNE		MAIOR QUANTIDADE DE ALBURNO	
σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
28,21	12.564	45,47	15.418
30,61	10.728	43,97	16.406
MÉDIAS			
29,41	11.646	44,72	15.912

Além disso, sabe-se que a região que contém alburno é menos densa e portanto menor seriam os valores de “ σ_{rc} ” e “ E_c ”. Acontece que o CP considerado com maior quantidade de alburno foi retirado na região de subida da densidade sendo que alguns CPs estavam muito próximos a região da medula. No caso de CP2 e no caso de CP1 na região de descida da densidade, Figura 5.7. Por esse motivo os CPs retirados com a maior quantidade de alburno, ou seja, mais próximo a região do alburno, apresentaram propriedades mecânicas melhores.

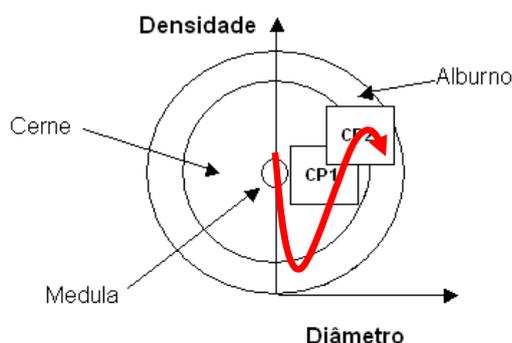


Figura 5.7. Densidade variando na secção tangencial no Eucalipto.

5.6. Correlações entre as propriedades para CPs da mesma região de postes novos e retirados da rede que foram flexionados

Após a realização dos ensaios de compressão paralelo as fibras e o de flexão. As variáveis foram correlacionadas. Primeiro estabeleceu-se a correlação de Pearson entre as propriedades envolvidas em 17 postes retirados da rede, sendo

todos flexionados e após o ensaio de flexão, tiveram 60 CPs retirados a 30cm acima da linha do engastamento, Tabela 5.18.

Tabela 5.18. Correlação entre as variáveis em postes usados.

	CLASSE	%ALB.	dap 12 %	σ_{rc}	E_c	% Uc	σ_{rf}	E_f	% Uf
CLASSE	1								
%ALB.	0,07	1							
dap12 %	0,59	-0,05	1						
σ_{rc}	0,49	0,27	0,81	1					
E_c	0,44	0,43	0,68	0,83	1				
% Uc	-0,57	-0,01	-0,87	-0,62	-0,49	1			
σ_{rf}	-0,03	-0,34	0,63	0,29	0,16	-0,62	1		
E_f	-0,20	0,07	0,29	0,04	0,16	-0,29	0,71	1	
% Uf	0,03	0,32	-0,17	-0,29	-0,22	-0,19	0,18	0,33	1

A Tabela 5.18 mostra uma correlação positiva entre Dap 12% e “ σ_{rc} ”, “ E_c ”, “ σ_{rf} ”, “ E_f ”, e negativa com porcentagem de umidade a compressão (% Uc). Ou seja, quanto mais denso o material maior sua tensão de ruptura “ σ_r ” e módulo de elasticidade “ E ” e menor sua umidade. Por outro lado, observou-se que postes mais densos possuem classe maior numa proporção positiva de 0,59, ou seja estão piores que os menos densos. Isso se explica porque postes de maior densidade ficaram mais tempo na rede e por isso chegaram a classes maiores que condicionaram o pior caso.

5.6.1. Correlações envolvendo a Durabilidade

Para avaliar a durabilidade dos postes e correlacioná-la com as demais propriedades mostradas pela Tabela 5.19 dos 17 postes ensaiados a flexão e que após foram ensaiados a compressão, apenas 5 postes possuíam placa de identificação, onde está estampado dados sobre a data de fabricação.

Tabela 5.19. Postes com placa de identificação e classes.

Classe	ANO	Durabilidade (anos)
1	2004	6
1	2004	6
1	1998	12
2	1995	15
3	1995	15

A Tabela 5.20 mostra uma correlação de Pearson sendo positiva entre Dap12%, " σ_{rc} ", " E_c ", " σ_{rf} ", " E_f " e com a durabilidade do poste. Postes com maior densidade possuíram uma maior durabilidade com fator de proporcionalidade 0,92. Outro fato a se observar foi em relação a correlação negativa da durabilidade com alburno, sabe-se que quanto mais alburno maiores as chances de ataques de microorganismos, mas em contrapartida a região do alburno possui maior capacidade de absorção de material para tratamento e não deveria possuir uma correlação negativa quantificado em 65%. A quantidade de alburno é uma variável que não define especificamente o " σ_{rf} " e " E_f " nesse caso, pois a quantidade de alburno foi medida em CPs para ensaio de compressão nas dimensões 5 x 5 x 15 cm e não no poste inteiro.

Tabela 5.20. Correlação entre as variáveis em postes usados com placa considerando durabilidade.

	DUR.	CLASSE	%ALB.	Dap	σ_{rc}	E_c	% Uc	σ_{rf}	E_f	% Uf
DUR.	1									
CLASSE	0,84	1								
%ALB.	-0,65	-0,48	1							
Dap12 %	0,92	0,58	-0,66	1						
σ_{rc}	0,63	0,15	-0,26	0,84	1					
E_c	0,96	0,68	-0,57	0,98	0,82	1				
% Uc	-0,93	-0,65	0,83	-0,97	-0,69	-0,93	1			
σ_{rf}	0,90	0,66	-0,85	0,93	0,62	0,89	-0,98	1		
E_f	0,82	0,94	-0,68	0,62	0,15	0,67	-0,73	0,79	1	
% Uf	-0,57	-0,08	0,37	-0,84	-0,97	-0,76	0,70	-0,68	-0,16	1

Mesmo que fosse considerada no CP submetido à compressão, a quantidade de alburno possui uma relação positiva com " σ_{rc} " e " E_c ", hora apresenta uma

correlação negativa devido ao fato da variável densidade modificar-se pela presença de diferentes espécies na análise. Em relação a umidade, da mesma forma que no Tabela 5.18, a porcentagem de umidade a compressão (%Uc) teve uma correlação negativa com " σ_{rc} " e " E_c ", comprovando que quanto menos úmido maior a tensão de ruptura " σ_r " e módulo de elasticidade " E " e quanto menos úmido maior a densidade, ou seja, a madeira mais densa absorve menos água.

5.7. Correlações para CPs da mesma região de postes retirados da rede que não foram flexionados

Logo procedeu-se a correlação entre as variáveis em 21 postes, totalizando 80 CPs a compressão paralela as fibras que não foram submetidos a flexão por estarem muito deteriorados na base, ou danificados na parte superior. A Tabela 5.21 mostra a correlação entre as propriedades mecânicas, classe, densidade e quantidade de alburno.

Tabela 5.21. Correlações entre propriedades mecânicas em postes usados com amostras retiradas para compressão.

	CLASSE	% ALB.	Dap 12 %	σ_{rc}	E_c	% Uc
CLASSE	1,00					
%ALB.	-0,06	1,00				
DAP 12%	0,12	0,01	1,00			
σ_{rc}	-0,11	0,05	0,86	1,00		
MEC	0,31	0,08	0,86	0,74	1,00	
% Uc	0,15	0,10	-0,81	-0,78	-0,68	1

Novamente o comportamento esperado se comprovou, ou seja, correlacionou forte e positivamente a proporção entre Dap 12%, " σ_r " e " E " e negativa com essas três variáveis e a umidade. A quantidade de alburno em relação as propriedades mecânicas como comentado anteriormente não deve ser analisado por se tratar das variações de densidade nos CPs estudados.

5.8. Correlações entre “ σ_{rc} ”, “ σ_{rf} ”, “ E_c ” e “ E_f ”

Uma questão de interesse é a de se ter uma correlação entre as variáveis mecânicas a compressão e a flexão para poder estimar apenas com o ensaio de compressão os esforços sofridos por flexão em um poste em serviço. A questão teria mais variáveis envolvidas como peso de transformadores, cabos, postes em início de circuito, mas que são variáveis estimáveis. Assim tendo-se conhecimento de uma relação entre esses dois ensaios, facilitaria processo de investigação de queda do poste, por exemplo. Sabe-se que densidade correlaciona-se forte e positivamente com “ σ_r ” e “ E ”, principalmente quando referenciada ao ensaio de compressão para amostras retiradas da mesma altura, no caso a 30cm acima da linha do engastamento, como visto no estudo realizado anteriormente e confirmada pela literatura citada no capítulo 3. Em vista disso optou-se por separar por faixas de densidade todos os postes estudados como apresentados nas Tabelas 5.22, 5.23, 5.24, 5.25.

Tabela 5.22. Faixa de densidade 400 kg/m³ e média das variáveis na compressão e flexão.

Faixa de 400 kg/m ³					
Dados gerais		Compressão		Flexão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	σ_{rf} (MPa)	E_f (MPa)
1	490	38,74	12.194	33	7.678
1	452	27,09	10.643	20	//
1	474	32,25	10.916	40	7.991
2	498	36,27	11.573	21	//
3	442	27,63	10.565	9	//
DESV. PAD	23,65	5,15	692,60	12,19	221,46

Tabela 5.23. Faixa de densidade de 500kg/m³ e média das variáveis na compressão e flexão.

Faixa de 500 kg/m ³					
Dados gerais		Compressão		Flexão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	σ_{rf} (MPa)	E_f (MPa)
1	579	38,91	16.589	40	8.765
1	525	35,33	9.373	42	9.277
1	531	42,63	12.228	14	//
Novo (9)	581	37,35	13.944	62	12.734
Novo (10)	506	35,18	12.237	52	10.824
Novo (11)	590	38,57	13.310	73	12.411
DESV. PAD	35,62	2,757	2.368	20,56	1788,59

Tabela 5.24. Faixa de densidade de 800 kg/m³ e média das variáveis na compressão e flexão.

Faixa de 800 kg/m ³					
Dados gerais		Compressão		Flexão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	σ_{rf} (MPa)	E_f (MPa)
2	896	48,89	17.516	67	11.453
2	832	41,77	17.839	57	10.195
2	793	44,05	20.140	50	12.687
3	834	49,92	23.410	33	7.133
4	845	44,68	11.389	35	9.473
4	870	40,47	12.229	48	7.729
4	866	50,71	21.223	46	7.951
DESV. PAD	33	4,07	4.486	11,85	2.065

Tabela 5.25. Faixa de densidade de 900 kg/m³ e media das variáveis na compressão e flexão.

Faixa de 900 kg/m ³					
Dados gerais		Compressão		Flexão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	σ_{rf} (MPa)	E_f (MPa)
1	931	49,97	17.703	70	9.230
2	912	42,50	18.042	76	12.054
DESV. PAD	13,42	5,28	240,06	3,75	1996,25

Todas as amostras foram retiradas a 30 cm acima da linha do engastamento em postes que foram flexionados e logo após em postes que não foram flexionados por não estarem em condições de serem submetidas a esse ensaio. Optou-se em retirar as amostras dessa região por ser a região mais característica da criticidade e por ser a região em melhores condições de retirar amostras para confecção de CPs de acordo com as dimensões necessárias segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Acreditava-se que amostras retiradas dessa região, em postes já flexionados, estariam com as fibras da madeira comprometidas e conseqüentemente apresentariam um menor " σ_{rc} " e " E_c ", se comparados com um poste que não fora submetido ao teste de flexão. Dessa forma optou-se em retirar amostras a mesma altura em postes que não puderam ser submetidos ao ensaio de flexão podendo dessa forma comparar os valores de " σ_{rc} " e " E_c " de amostras de postes já flexionados e de postes não flexionados. No caso de postes novos as amostras foram retiradas 30 cm abaixo da linha do engastamento, logicamente por não apresentar apodrecimento e por não se ter a preocupação que as fibras estivessem rompidas com o ensaio de flexão, pois durante o ensaio, essa região estava engastada, sem problemas, portando, de lascas e romper as fibras. As Tabelas 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam os valores médios de Dap12%, " σ_{rc} " e " E_c " de cada secção que deu origem a quatro CPs retirados a 30cm acima da linha do engastamento, para o caso de postes usados, e 30cm abaixo da linha do engastamento no caso dos três postes novos.

Tabela 5.26. " σ_{rc} " e " E_c " médios para faixa de densidade de 400kg/m³.

Faixa de 400 kg/m ³			
Dados gerais		Compressão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
1	430	28,70	10.030
2	456	30,97	11.035
4	434	26,94	10.293
4	464	35,93	11.474
4	459	30,74	10.992
4	442	30,46	10.489
DESV. PAD	14,00	3,01	539,20

Tabela 5.27. " σ_{rc} " e " E_c " médios para faixa de densidade de 500kg/m³.

Faixa de 500 kg/m ³			
Dados gerais		Compressão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
2	532	43,76	13.518
3	546	35,24	15.925
DESV. PAD	9,69	5,14	1.702

Tabela 5.28. " σ_{rc} " e " E_c " médios para faixa de densidade de 600kg/m³.

Faixa de 600 kg/m ³			
Dados gerais		Compressão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
3	623	36,35	12.922
4	646	41,67	15.318
4	645	43,12	15.478
4	620	30,85	14.209
4	620	37,38	13.478
DESV. PAD	13,39	4,84	1.118

Tabela 5.29. " σ_{rc} " e " E_c " médios para faixa de densidade de 700kg/m³.

Faixa de 700 kg/m ³			
Dados gerais		Compressão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
2	692	44,49	14.244
4	680	46,45	18.082
4	739	41,54	15.540
4	755	29,87	10.853
DESV. PAD	36,09	7,42	3.008

Tabela 5.30. " σ_{rc} " e " E_c " médios para faixa de densidade de 800kg/m³.

Faixa de 400 kg/m ³			
Dados gerais		Compressão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
1	882	64,92	14.707
4	847	39,28	17.010
4	883	58,48	18.333
DESV. PAD	84,22	11,19	1.889

Tabela 5.31. Correlações entre propriedades mecânicas a flexão e classes.

Faixa de 1000 kg/m ³			
Dados gerais		Compressão	
Classe	Dap 12%	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)
4	1036	59,38	18.985

Logo após, procedeu-se novamente ao cálculo de novas medidas de " σ_{rc} " e " E_c " médios separados por faixas de densidade em postes flexionados, postes não flexionados e novos. Pela observação das Tabelas 5.32, 5.33 e 5.34 nota-se um certo padrão dos valores de " σ_{rc} " e " E_c " tanto em postes usados submetidos ou não a flexão e postes novos. Percebe-se por exemplo que para as faixa de 400kg/m³ que os valores de " σ_{rc} " e " E_c " para postes flexionados são até maiores que em postes não flexionados. A faixa de 500kg/m³ apresentou proximidade desses valores para os três casos, apenas na faixa de 800kg/m³ foi que o " σ_{rc} " e " E_c " apresentaram-se maiores em postes não flexionados.

Tais tabelas sugerem que tanto um poste flexionado ou não flexionados e independente de ser novo ou não, quando analisados sobre a mesma faixa de densidade possuem valores semelhantes para " σ_{rc} " e " E_c ". Assim optou-se em estabelecer a correlação entre os ensaios de flexão e compressão para o mesmo poste que foi já flexionado e teve as amostras retiradas após o ensaio. Também poderia ser estabelecida uma correlação entre os ensaios de flexão e compressão em postes que foram somente flexionados sem coleta de amostras para compressão, para isso teria-se que utilizar um segundo poste que teria amostras

retiradas somente para compressão sem poder ser flexionado, e a comparação deveriam ser feita levando-se em consideração: mesma faixa de densidade, comprimento e classe. A segunda opção foi descartada por que diminuiriam a quantidade de amostras, ou seja, necessitaria-se de dois postes para estabelecimento da correlação dos ensaios de compressão e flexão.

Tabela 5.32. Média de " σ_{rc} " e " E_c " por faixas de densidade para postes usados flexionados.

FLEXIONADOS A COMPRESSÃO			
Dap 12% (kg/m³)	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	N° de CPs
400	32,40	11.555	20
500	37,99	12.944	24
800	45,78	17.678	26
900	46,24	17.872	26
Total de CPs			96

Tabela 5.33. Média de " σ_{rc} " e " E_c " por faixas de densidade para postes usados não flexionados.

NÃO FLEXIONADOS A COMPRESSÃO			
Dap 12% (kg/m³)	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	N° de CPs
400	30,62	10.719	30
500	39,50	14.722	7
600	37,87	14.281	30
700	40,58	14.680	24
800	54,23	16.683	26
Total de CPs			117

Tabela 5.34. Média de " σ_{rc} " e " E_c " por faixas de densidade para postes novos flexionados.

NOVOS FLEXIONADOS A COMPRESSÃO			
Dap 12% (kg/m³)	σ_{rc} (MPa)	E_c (MPa)	N° de CPs
500	37,03	13.164	12
Total de CPs			12

5.8.1. Correlação entre compressão e flexão em postes flexionados e não flexionados

Sabendo-se que não houve valores discrepantes quanto as propriedades mecânicas nos CPs submetidos a compressão retirados de postes já flexionados e CPs retirados de postes não flexionados, procedeu-se a correlação através das médias de " σ_{rc} ", " σ_{rf} ", " E_c " e " E_f " obtidas em cada faixa densidade. E por final estabeleceu-se a correlação entre os ensaios de compressão e de flexão utilizando-se para isso o mesmo poste.

A correlação entre os ensaios torna-se interessante na medida que um poste que pela ação do vento, impacto de um veículo, tensões mecânicas dos cabos elétricos ou pelo peso de transformadores, venha a cair por um desses motivos. Pode-se através do ensaio de compressão estimar se o poste anteriormente tinha as condições mecânicas suficientes para estar na rede. Para isso quanto maior fosse a quantidade de CPs ensaiados melhor seria a correlação entre " σ_{rc} " e " σ_{rf} " e entre " E_c " e " E_f ". A Tabela 5.35 mostra a correlação entre essas variáveis.

Tabela 5.35. Correlações entre propriedades " σ_{rc} ", " σ_{rf} ", " E_c " e " E_f ".

CORRELAÇÃO – FLEXÃO E COMPRESSÃO				
Dap 12% (kg/m ³)	$\sigma_{rc} / \sigma_{rf}$ (MPa)	Nº de CPs	E_c / E_f (MPa)	Nº de CPs
400	1,32	19	1,47	5
500	1,21	24	1,44	3
800	0,95	26	1,86	7
900	0,63	8	1,68	2
Total de CPs =		77		17

5.9. Comentários do ensaio de flexão realizado

Os cálculos para o ensaio de flexão realizado na Tabela 5.1 foi por aproximação a norma NBR 6231 (ABNT, 1980) e disposição de ensaio semelhante

a norma americana ASTM D1036 (1990). Um dos postes de classe 4 apresentou maior resistência a flexão no entanto foi considerado fora do padrão de qualidade por apresentar flecha superior a 5% do comprimento nominal do poste. Outra observação importante é que um poste considerado classe 1 pode estar fora do padrão de qualidade e um de classe 4 pode estar dentro. A questão é que existem variáveis referentes a forma de realização e características específicas dos postes que interferem no enquadramento dentro do padrão de qualidade de acordo com a norma NBR 8456 (ABNT, 1984). Podem ser citados:

- Umidade da madeira;
- Imperfeições na madeira (nós, curvaturas);
- Grau de apodrecimento no engastamento e demais regiões do poste;
- Velocidade de ensaio;
- Conicidade do poste;
- Densidade da madeira.

5.9.1. Estudo do ângulo de aplicação da carga no ensaio de flexão

Para adaptar a norma ASTM D 1036 (1990), Figura 5.8, as dimensões do campo de testes fornecido pela PUCRS, foi elaborado um estudo sobre o ângulo de aplicação da carga no ensaio de flexão pelo método engastado.

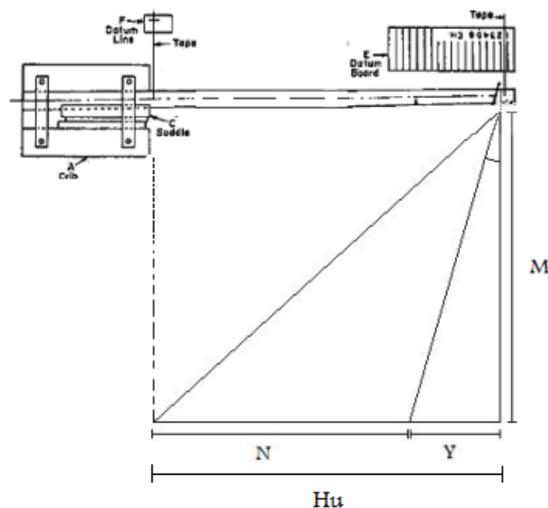


Figura 5.8. Configuração de ensaio a flexão segundo ASTM D1036 (1990).

A norma americana especifica as distâncias M e N que assumem valores pré-estabelecidos conforme a Tabela 5.36:

Tabela 5.36. ASTM 1036 D (1990) e distância “Y” e ângulo calculados para quatro tamanhos de postes.

Comp. Poste (m)	M (m)	N (m)	Eng. (m)	Hu (m)	Y (m)	Ang.Graus
9,144	45,72	6,70	1,70	6,84	0,14	0,17
10,668	53,34	8,08	1,70	8,37	0,29	0,31
12,192	60,96	9,45	1,80	9,79	0,34	0,32
13,716	68,58	10,82	2,00	11,12	0,30	0,25

O arranjo sugere distâncias fixas para M e N onde Y é posição afastada da secção de carregamento, onde deverá ser colocado o dispositivo de tração. A norma americana adota tracionar com um ângulo menor que 90° para que no momento de ruptura o ângulo formado entre o poste e o cabo que traciona seja aproximadamente 90°, tornando assim a leitura no dinamômetro para carga de ruptura mais precisa. O maior problema dessa configuração de ensaio é referente ao grande comprimento das distâncias M que se torna inviável devido as grandes dimensões que o campo de testes deveria possuir. De acordo com a norma ASTM D 1036 (1990) o motivo da grande distância de M que é cerca de 5 vezes maior que o comprimento do poste é a de proporcionar uma maior segurança para os operadores do ensaio evitando riscos de acidentes, além disso observa-se também que com as distâncias M e N e a dimensão Y ($Y = hu - n$), mantém se um ângulo praticamente constante e pequeno para todos tamanhos de poste. A norma brasileira não especifica a que distância deve ficar o dispositivo de tração em relação ao poste. A Tabela 5.37 mostra cálculos referentes a uma aproximação da norma americana para a brasileira, considerando as condições de engastamento e posicionamento do cabo no topo do poste segundo essa última. A aproximação também leva em conta a dimensão da distância M como sendo sempre 10 m, que foi a distância escolhida no projeto determinada dentro das condições da área disponível no local de ensaio. Para a aproximação manteve-se o ângulo de tração da norma americana e foram encontrados novos valores de Y e conseqüentemente um novo valor para N. As distâncias Y encontradas foram irrelevantes quando aproximados pela norma americana, Tabela 5.37. A norma americana embora determine a tração com um

ângulo mostrado na Tabela 5.36 afirma que o erro assumido em fazer uma puxada a 90° seria pequeno.

Tabela 5.37. ASTM 1036 D e distância “Y” e ângulo calculados adaptados a NBR 6231(1980) e espaço disponível para ensaio.

Aproximação para espaço da Pucrs considerando a norma brasileira						
Comp. Poste (m)	M (m)	N (m)	Eng. (m)	Hu (m)	Y (m)	Ang,Graus
9	10	7,17	1,50	7,20	0,03	0,17
10	10	8,05	1,60	8,10	0,05	0,31
11	10	8,95	1,70	9,00	0,05	0,32
12	10	9,86	1,80	9,90	0,04	0,25

Dessa forma se o teste fosse feito nas condições da norma Americana quando adaptado a norma brasileira as condições das dimensões “Y” seriam irrelevantes como visto na Tabela 5.37. A norma brasileira NBR 6231 (1980) não faz a correção do ângulo de tração.

Como as condições climáticas de cada região afetam as características da madeira considerando também que no Brasil a grande quantidade de madeira de eucalipto preservada tem como destino a produção de celulose o que poderia indicar um comportamento de flexão diferenciada nos postes aqui no Brasil.

Assim abandonou-se a aproximação feita na Tabela 5.37 e levou-se em consideração apenas a correção do ângulo de aplicação da carga quando se quisesse que o teste atendesse a norma americana o que se torna interessante para exportação de postes por exemplo.

Na Figura 5.9 pode-se observar a variabilidade do ângulo de aplicação de carga assumindo onde inicialmente era de 90° entre F_n e a linha central do poste e no momento da ruptura tornou-se maior que 90°, sendo $\theta + 90^\circ$.

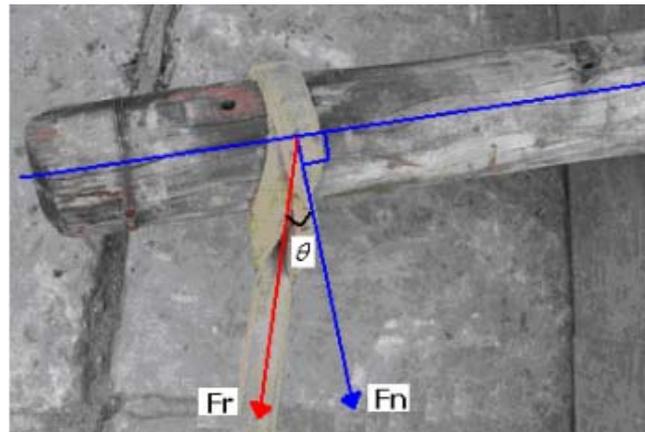
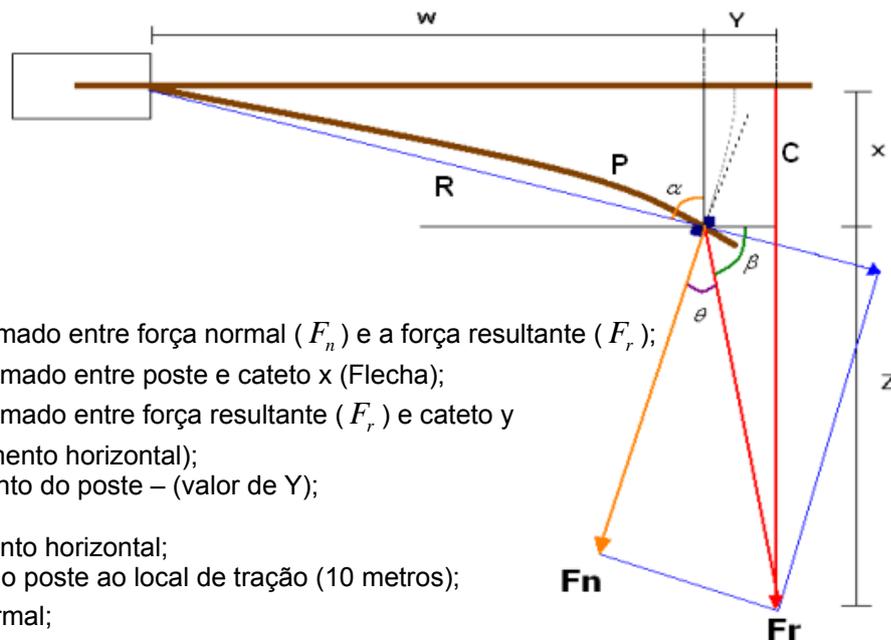


Figura 5.9. Força resultante (F_r), força normal (F_n) e ângulo (θ) para cálculo do fator de correção.

A Figura 5.10 expressa a situação do estudo da defasagem do ângulo de tração. A Equação (4.1) representa o somatório dos ângulos formados ao redor do ponto de aplicação da carga onde na Equação (4.2), θ representa o ângulo utilizado no fator de correção da força resultante F_r sendo F_n a força real medida pelo o dinamômetro.



Onde:

θ : Ângulo formado entre força normal (F_n) e a força resultante (F_r);

σ : Ângulo formado entre poste e cateto x (Flecha);

β : Ângulo formado entre força resultante (F_r) e cateto y (deslocamento horizontal);

w: Comprimento do poste – (valor de Y);

x: Flecha;

y: Deslocamento horizontal;

Z: Distância do poste ao local de tração (10 metros);

F_n : Força Normal;

F_r : Força Resultante;

R: Retta utilizada para aproximação dos cálculos;

P: Poste real;

C: Cabo.

Figura 5.10. Aproximação geométrica para estudo do ângulo de tração.

Dessa forma tem-se:

$$\theta + \alpha + \beta + 180^\circ = 360^\circ \quad (4.1)$$

$$\theta = 180 - (\alpha + \beta) \quad (4.2)$$

Para o estudo do ângulo de tração, θ , considerou-se que o poste sofre deflexão apenas na região de engastamento ficando linear ao longo de seu comprimento, assim, têm-se as medidas X e Y que podem ser adquiridas manualmente ou por sensores, no caso de se instrumentar o ensaio. Com o valor de w e x tem-se o ângulo α . Com x obtêm-se Z e com Z e y obtêm-se o ângulo β . Após a obtenção de θ pela Equação (4.2) obtêm-se a força F_n , através da Equação (4.3). Sabendo-se que F_r é a força medida pelo dinamômetro.

$$F_n = F_r \cdot \cos(\theta) \quad (4.3)$$

Ao fazer-se a correção do valor da carga F_r para um poste de 9 m por exemplo onde $W = 6,7$ (CN - Engastamento- 30cm do topo = 6,7) adotando-se uma flecha de $x = 1\text{m}$ e um deslocamento horizontal (flecha) em direção ao engastamento de $y = 0,5$ obteve-se $Z = 9$ pois $Z + X = 10$ m. A Figura 5.11 indicam os triângulos deduzidos com as respectivas medidas.

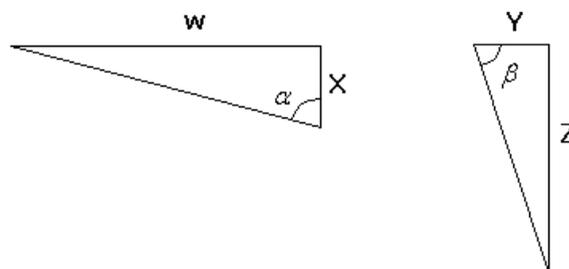


Figura 5.11. Triângulos deduzidos.

Calculando α e de β pelas Equações (4.4) e (4.5):

$$\operatorname{arctg}\alpha = \frac{w}{x} = \frac{6,7}{1} \quad (4.4)$$

$$\alpha = 81,51$$

$$\operatorname{arctg}\beta = \frac{Z}{y} = \frac{9}{0,5} \quad (4.5)$$

$$\beta = 77,47$$

Como: $\beta = 77,47$

Utilizando-se a Equação (4.2) e substituindo os valores de σ e β tem-se:

$$\theta = 180 - (\alpha + \beta)$$

$$\theta = 180 - (81,51 + 77,47)$$

$$\theta = 21^\circ$$

Utilizando-se da Equação (4.3) ao calcular-se $\cos(21^\circ) = 0,93$ ou seja para uma carga de $F_R = 1000$ kg lido do dinamômetro teria uma diferença de 70 kg ou seja 7% de carga a menos para essa condição, o que pode ser significativo quando se quer uma confiabilidade nos ensaios. Assim, adota-se uma tração sempre a 90° corrigindo o ângulo a cada ensaio realizado.

$$F_n = F_r \cdot \cos(\theta)$$

$$F_n = 1000 \cdot 0,93 = 930 \text{ kg}$$

5.9.2. Relações da carga nominal com densidade do poste

Como visto no Capítulo 3 e segundo boletim técnico N°1 de preservação de madeiras as madeiras (1973), classificam-se sendo: XL:Extra leve, L: Leve; M: Médio;P: Pesado; XP: extra pesado.

E de acordo com o Tabela 5.38, cada comprimento de poste corresponde a uma classificação por pesagem e outra para carga nominal. No ensaio de flexão realizado foi considerado um valor médio para carga nominal de 300 kgf e para cálculo de módulo de elasticidade também foi medido a flecha a essa carga. O procedimento mais indicado para uma melhor precisão do cálculo do módulo de elasticidade a flexão " E_f " seria pesar o poste antes do ensaio, para ter-se uma idéia da carga nominal a ser aplicada. Com isso poderia-se avaliar a qualidade, de acordo com a norma NBR 8456 (ABNT,1984).

Tabela 5.38. Carga nominal e peso de acordo com a classificação da NBR 8456 (ABNT,1984) para os tamanhos de postes estudados.

Comprimento (m)	Classificação	Carga Nominal (kgf)	Peso (kg)
9	XL	150	126
9	L	250	176
9	M	400	248
9	P	600	331
10	XL	150	154
10	L	250	212
10	M	400	294
10	P	600	293
11	XL	150	183
11	L	250	250
11	M	400	342
11	P	600	454
12	XL	150	291
12	L	250	397
12	M	600	527
12	P	800	647

5.9.3. Obtenção do Módulo de Elasticidade a flexão “ E_f ”

Quanto ao modo de elasticidade a flexão “ E_f ” pode-se dizer que a condição ideal para sua obtenção seria a de se ter um gráfico de tensão x deformação, onde na região linear o “ E_f ” fosse adquirido. Nos ensaios realizados em postes usados pressupõe-se que até alcançar a carga nominal ainda a madeira não tenha entrado em regime de escoamento, mas essa suposição não foi seguida como observado em todos os postes, pois muitos não alcançam a carga nominal e rompem antes. A norma NBR 6231 (1980) não especifica em qual variação de carga deve-se medir a flecha, se é na carga nominal ou na de ruptura ou entre a carga nominal e o dobro dessa carga nominal a norma apenas comenta uma variação de flecha para uma variação de carga, mas não especifica qual. Para aumentar a confiabilidade do ensaio quanto ao cálculo do módulo de elasticidade a flexão “ E_f ” teria-se a necessidade de se instrumentalizar o ensaio através de sensores para medir as flechas vertical “X” e horizontal “Y”. Com isso aperfeiçoaria a confiabilidade do ensaio tanto na precisão das medidas e cálculos específicos quanto na segurança do operador no momento do ensaio.

Outro procedimento para obtenção do “ E_f ” seria a de tracionar o poste até um certo limite, aliviar a carga e perceber o quanto voltaria a posição inicial, nesse momento então mediria-se distância desse deslocamento. No entanto esse procedimento além de não ser prático do ponto de vista ao processo de ensaio, a carga limite escolhida para flexionar o poste pela sua extremidade poderia ultrapassar o limite de ruptura ou deixar o material na região de engastamento enfraquecido na hora de realizar o ensaio para obtenção de “ σ_{rf} ”.

6. CONCLUSÕES

- As inspeções mostraram-se uma ferramenta indispensável para a manutenção preventiva dos postes na rede elétrica;
- O teste mecânico de flexão mostrou que a atribuição de classe mostra as condições mecânicas da madeira dos postes na rede. Todos os postes retirados da rede ensaiados foram classificados quanto a resistência a flexão segundo NBR 8456 (ABNT, 1984) para postes novos;
- Através das correlações de Pearson realizadas observou-se um índice de proporcionalidade positiva significativa entre tensão de resistência a compressão " σ_{rc} ", módulo de elasticidade a compressão " E_c " densidade aparente a 12% (Dap 12%) e negativa dessas variáveis quanto a umidade considerando amostras retiradas de uma mesma região, no caso de postes retirados da rede e numa região próxima a ela cerca de 30cm para postes novos;
- Sabendo-se que a tensão de ruptura a compressão " σ_{rc} " e o módulo de elasticidade a compressão " E_c " são proporcionais a densidade. Portanto separou-se por faixas de densidade e percebeu-se que essas variáveis apresentavam valores muito próximos tanto para amostras de postes usados que foram ou não flexionados e para postes novos, considerando assim a possibilidade de correlacionar os ensaios de compressão e flexão para amostras de postes usados ou novos com amostras retiradas do mesmo, após flexionado. As correlações foram apresentadas podendo ser melhoradas desde que se tenha maior quantidade de CPs envolvidos tanto na compressão quanto na flexão;

- O estudo das variáveis “ σ_{rc} ”, “ E_c ”, Dap12%, ao longo do poste mostraram no teste de correlação de Pearson proporcionalidade negativa para “ E_c ” e Dap 12%, mas positiva entre “ σ_{rc} ” e Dap12% mostrando que há mudança do comportamento dessas propriedades com a altura do poste. O “ E_c ” por exemplo aumentou da base para o topo significando que o poste possui maior elasticidade nas alturas próximas a região de 6 metros;
- No estudo realizado com postes novos das espécies *E.grandis*, *E.citriodora* e *E.saligna* percebeu-se que a espécie *E.grandis* é a menos indicada para confecção de postes pois na região de engastamento foi a que apresentou a menor densidade que diminuiu de forma acentuada, menores propriedades mecânicas e além disso, também observou-se uma maior umidade nessa região o que torna a madeira apta a desenvolver situações propícias para instalarem-se microorganismos causando assim a deteriorização da madeira. Sabe-se também que as regiões em que a madeira está mais úmida a resistência mecânica é menor;
- A variação da quantidade de alburno estudada não apresentou correlações significativas no teste Pearson com tensão de ruptura “ σ_r ” e módulo de elasticidade “ E ” nos ensaios de compressão. A norma NBR 7190 (1997) sugere que os CPs confeccionados sejam homogêneos mas não especifica a quantidade de cerne e alburno, e pelos testes realizados nos ensaios de compressão os resultados da tensão de ruptura a compressão “ σ_{rc} ” e módulo de elasticidade a compressão “ E_c ” para as espécies estudadas estavam coerentes com o que a norma apresenta;
- As discussões apresentadas quanto ao ensaio de flexão forneceram informações necessárias para o melhoramento do ensaio sugerindo a construção de um campo de testes onde pensou-se na possibilidade de refinar a mensuração de todas variáveis envolvidas de modo a proporcionar uma maior confiabilidade nos testes.

7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

A situação referida aos testes mecânicos de flexão indicam a necessidade de aumentar a confiabilidade e precisão. Sugere-se a utilização de sensores para medir as distâncias X e Y, flechas de deslocamento vertical e horizontal respectivamente, onde acompanharia-se suas variações em tempo real através de um software supervisor onde seria gerado gráfico tensão deformação para um melhor estudo do que acontece com o material no regime plástico e elástico. Dessa forma o ensaio se tornaria mais seguro para o operador, pois as medições das flechas X e Y são feitas com o cabo tensionado. Além disso, torna-se necessário ensaiar a maior quantidade de postes possíveis para aprimorar o estudo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6231: Postes de madeira - Resistência à Flexão. Rio de Janeiro: ABNT, dezembro de 1980.
2. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas da Madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.107p.
3. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8456: Postes de Eucalipto Preservado para Redes de Distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
4. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8457: Postes de Eucalipto Preservado para Redes de Distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
5. AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A. Dados técnicos, normas técnicas de materiais. NTD 004 007- Postes de madeira, 2003. Disponível em: <<http://www.aessul.com.br>>. Acesso em: Fevereiro de 2009.
6. ALMG, Assembléia Legislativa do Estado de Minas Gerais, disponível em: <http://www.almg.gov.br/Publicacoes/Eucalipto/brasil_minas.pdf>. Acesso em: Março de 2009.
7. ALVES, I. C. N. Relação entre as tensões de crescimento e algumas características em clones de *Eucalyptus*, **XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira** (XI EBRAMEM): 2008, Londrina.

8. ARRUDA, Rodrigo. **Melhorias nos métodos de identificação e controle dos postes de madeira por meio da rádio frequência 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, Porto Alegre.
9. ASKELAND, D. R. **The Science and Engineering of Materials**. Chapman & Hall, 3ª edição (1996).
10. ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods of Static Tests of Wood Poles. Designation D1036 – 90, EUA, ASTM, 1990.
11. ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test Methods for wood-based structural panels in compression. Designation D 3501 – 94, EUA, ASTM, 1994.
12. BALARIN, A. W. NOGUEIRA, M. **Determinação do Módulo de Elasticidade da Madeira Juvenil e Adulta de Pinus Taeda por Ultra-Som**. V25, n.1, p.19-18, 2005.
13. BENTO, F. R. Estudo da durabilidade de postes de madeira preservados com CCA por meio do controle da retenção de As, Cu e Cr. **15º Encontro Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2002, Natal.
14. BOLETIM TÉCNICO N°1 - Preservação de madeiras - Convênio IBDF – IPT – ABPM. Maio, 1973, Brasil Sp.
15. CALLISTER, Wilian D. JR. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro, L T C, 2002.
16. CAMPOS, J. A. O. **Método para avaliação da durabilidade e da reabilitação da madeira de estruturas em serviço**. São Carlos. 2002.99p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, USP.Brasil.

17. CARVALHO, A. **Madeiras Portuguesas – Estrutura Anatômica, Propriedades, Utilizações**, Volume I, Instituto Florestal. 1996.
18. CARVALHO Sandra Filipa Xavier de Freitas, **Impregnação de cor em Madeira**, Lisboa, 2007, 115p (Dissertação de mestrado, Escola de engenharia departamento de engenharia civil), Universidade do Minho, Portugal.
19. CRUZ, C. R.; LIMA, J. T.; MUNIZ, G. I. B. **Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de Eucaliptus Scientia Forestalis**, Piracicaba (SP), 64: 33-37, 2003.
20. DAMARZO, M. A. Módulo de Elasticidade Longitudinal considerando não linearidade geométrica em peças roliças de madeira da espécie pinus caribea, **5º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia**, 2008, Maputo.
21. DATLA, S.V. Estimation of life expectancy of Wood poles in eletrical distribution networks, **Elsevier**, 2005, Canadá.
22. DIAS, A. A. **Estudo da solicitação de compressão normal as fibras de madeira**.1994.144p.Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, departamento de arquitetura e planejamento. USP, São Carlos. Brasil.
23. ENERSUL. Especificações – Postes de Eucalipto para Redes Aéreas de Distribuição. Manual técnico de distribuição, ver.2, agosto 98,30p.
24. EVANS II, 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, Madison**, v.50, n.7/8, p.75-87. 2000.
25. FAO, **El eucalipto en la repoblacion vegetal**. Colección FAO Montes II. Roma, 723p.

26. FERREIRA, C. R. **Avaliação tecnológica de clones de eucalipto: parte 2 – qualidade da celulose branqueada Kraft para papel de imprimir e escrever** n. 71, p. 09-18, agosto 2006.
27. FOREST PRODUCTS LABORATORY. FPL. **Wood handbook**: Wood as an engineering material. Washington: U.S.D.A., 1987. 466p. (Agriculture Handbook, 72).
28. FOELKEL. C.E.B. **Variação radial da densidade básica em função da altura de árvores de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus saligna***. BRASIL, 2002.
29. FOSCHI, R. O. **Reability applications in wood design**, Progress in structural engineering and materials, Vol.2,pp.238-246,John Wiley & Sons Ltd,.UK, 2000.
30. GABIATTI A, VIDOR F. L. R., ALENCASTRO, J. I. D., PIRES. M., DEDAVID.B.A Validação de Métodos de Inspeção de Postes de Madeira Utilizados em Redes de Energia Elétrica,**The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE**: 2009.
31. GARCIA, A., SPIM, J. A; SANTOS, CA. **Ensaio dos Materiais**. LTC – Livros técnicos e Científicos, Editora Rio de Janeiro, 2000, 247 p.
32. GERALDO, F. C, Portal Referência, O portal do setor madeireiro, Postes a qualidade que vem da madeira. **Revista referência**. Disponível em: <<http://www.revistareferencia.com.br>> Acesso em: 2 de março de 2010.
33. GONZAGA, ARMANDO LUIZ, Madeira Uso e conservação, Cadernos Técnicos; 6, 246 p. Brasília, Brasil.
34. GONÇALVES, F.G. **Avaliação da qualidade da madeira de híbrido clonal de *Eucalyptus Urophylla* x *Grandis*, para produtos sólidos**. Espírito Santo 2006, 154p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo. Brasil.

35. GRATTAPAGLIA DARIO, PASQUALI, GIANCARLO, PIRES, ISMAEL, DI CIERO LUCIANA. Guia do Eucalipto – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura. Embrapa, Maio, 2008.
36. HALABE, U. B.; BIDIGALU, G. M.; GANGARAO, H. V. S.; ROSS, R. J. Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and tranverse vibration techiques. **Material Evaluation**. p.1013-1018.1995.
37. HASELEN,C.R. **Propriedades de flexão estática da madeira úmida e a 12% de umidade de um clone de *eucalyptus e.saligna*, sob o efeito do espaçamento e da adubação** **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 147-152,2002.
38. HERRERA.S. Nova tecnologia para inspeção de postes. **Congresso Latino Americano de distribuição de energia elétrica**. 2008. São Paulo.
39. HILLIS, W.E. Wood quality and utilization. In: HILLIS, W.E.; BROWN, A.G., (Eds). **Eucalyptus for wood production**. Melbourne: CSIRO, cap.12. 1978.
40. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO: DIVISÃO DE MADEIRAS. Madeira – O que é e como pode ser processada e utilizada. São Paulo, ABPM, 1985 (Boletim ABPM, 37).
41. LARA PALMA, H.A.; BALLARIN, A.W. Demarcação e densidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L.. In: **Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira**, 8., 2002, Uberlândia. *Anais*. Uberlândia: **IBRAMEM**, 2002.
42. LATORRACA, J. V.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Revista Floresta e Ambiente, Seropédica** (RJ), v.07, n.01, p 279-291, 2000.
43. LNEC - LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL Madeiras para construção, Especificações de Madeiras para estruturas (Lisboa, 1997).

44. LOBÃO, M. S et al. Caracterização das propriedades físico – químicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa (MG), v.28, n.6, p. 889-894, 2004.
45. KARLSEN, G.G et al, *Wooden Structures*, **Mir Publishers**, Moscow, 1967.
46. KLIEJUNAS, J. T. Pest risk assessment of the importation into the United States of unproc-essed Eucalyptus logs and chips from South America. **Gen.Tech. Rep. FPL-GTR-124**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 134 p.2001.USA.
47. KOLLMANN, F.F.P. & COTÉ, W.A. **Principles of wood and technology**. New York, Springer Verlag, 1975. v.1.
48. KRETSCHMANN, D.E. Effect of juvenile wood on shear parallel and compression perpendicular-tograin strength for loblolly pine. In: CTIA / IUFRO **International wood quality workshop**: 1997, Quebec. *Proceedings*. Quebec: Forintek Canada, 1997. p.23-30.
49. KRETSCHMANN, D.E.; BENDTSEN, B.A. Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fastgrown plantation loblolly pine lumber. **Wood and Fiber Science, Madison**, v.24, n.2, p.189-203, 1992.
50. MACEDO, A. N. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada**. São Carlos, 2000. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 195p. São Paulo. Brasil.
51. McALISTER, R.; CLARK, A. Effect of geographic location and seed source on the bending properties of juvenile and mature loblolly pine. **Forest Products Journal**, Madison, v.41, n.9, p.39-41.1991.
52. MCALISTER, R.; CLARK, A.; SAUCIER, J. Effect of initial spacing on mechanical properties of lumber sawn from unthinned slash pine at age 40. **Forest Products Journal, Madison**, v.47, n.7/8, p.107-9. 1997.

53. MCDONALD, K.A; FALCK, R.H.; PATTON-MALLORY, M. Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs. Madison, USDA / **Forest Service / Forest Products Laboratory**, p.137-147. 1990.
54. MINÁ, A. J. S. Comentários sobre a NBR 6231 / 1980 – Postes de Madeira – Resistência a flexão, **Anais do 10º encontro Brasileiro em Madeiras e em estruturas de Madeira – Revista da Madeira, EBRAMEM**, 2006, São Paulo.
55. MINÁ, A. J. S. Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultrassom. **Revista da Madeira**. v.65, p.188-196, 2004.
56. MINÁ, A. J. S. **Estudo de estacas de madeira para fundações de pontes de madeira**. São Carlos, 2004. (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. Brasil
57. MORESCHI, Oliveira João Carlos, **Propriedades tecnológicas da madeira**, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. Notas de aula. 168p.
58. OLIVEIRA, J. T. S, HELLMEISTER J.C e FILHO M. T. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto**. Viçosa - MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.
59. OLIVEIRA, J.T.S. **Estudo das propriedades físicas e tecnológicas da madeira pinaíba (*Xylopia sericea* st. hill)**. 1988. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. Brasil.
60. OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A. O.; SALES, A (2002). Evaluation of Mechanical Properties of Wood using ultrasonic measurements. **In World Conference on Timber Engineering, WCTE 2002**, Shad Alan, Malasya. The Proceedings of 7 WCTE 2002, v,n,p.110-117.
61. PFEILL, Walter. **Estruturas de Madeira** - Dimencionamento segundo a norma brasileira NBR 7190 e critérios das normas Norte Americanas NDS e Européia Eurocode 5, 6ª Edição, Rio de Janeiro, 2003. 241p.

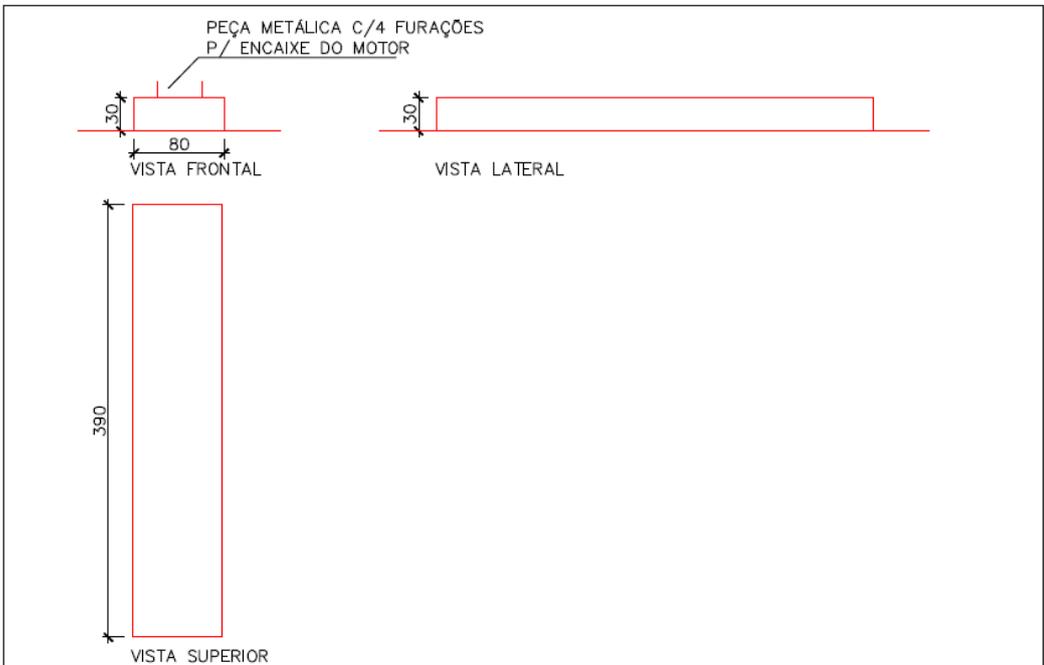
62. PRYOR, L. D., 1976, **Biology of eucalyptus**. The Institute of Biology. Studies in Biology. Studies in Biology 61. Edward Arnold, London, 82p.
63. QUOIRIN, Newton.S.R. **Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios x**. Curitiba 2004. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Materiais e Processos) Universidade Federal do Paraná. Brasil.
64. REMADE - Melhoramento genético em espécies florestais. **Revista da madeira** – Edição nº89 – Abril de 2005. <<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira>>. Acesso em: 08 de dezembro de 2009.
65. REMADE - Melhoramento genético para qualidade da madeira. **Revista da madeira** – Edição nº75 – Agosto de 2005. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira>>. Acesso em 22 de novembro de 2009.
66. REMADE - A madeira de eucalipto para postes **Revista da Madeira**. São Paulo: Editora, no 59 ano XI, setembro, 2001. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira>>. Acesso em 04 de novembro de 2009.
67. REZENDE, M.A. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade, **IPEF**, 1998, Piracicaba-SP, n.39, p.33-40.
68. RODRIGUES, E.A.C; Seleção de clones de eucalipto para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo **Cerne**. 2008, Lavras. MG. v. 14, n. 2, p. 147-152.
69. ROSS, RJ PELLERIN, R.F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures** – A review. Gen.Tech.Rep. FLP-GTR-70. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Laboratory. 1994. 40 p.

70. SALES. A. **Características de Resistência mecânica de algumas espécies de Eucalipto do estado de São Paulo**, 1991. 204p. Dissertação (Mestrado em arquitetura) – Escola de Engenharia, Departamento de Arquitetura e Planejamento). USP, São Carlos. Brasil.
71. SALES.A. Durabilidade de postes de madeira utilizados em redes de distribuição de energia elétrica. **8º Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira**, 2002, Uberlândia.
72. SAMPAIO, A. **O eucalipto no Brasil**, Aracruz celulose p 5 –10. Disponível em: <[http:// www.almog.gov.br](http://www.almog.gov.br)>. Acesso em 2 de março de 2010.
73. SANDOZ, J.; BENOIT, Y.; DEMAY, L. (2003b). Standing tree quality assessments using acousto-ultrasonic. Disponível em: <http://www.cbscibt.com/SERVICES/PUB/doc/testing_of_standing_trees>. Acesso em: 05 de junho de 2009.
74. SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELLO, L. E. G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.* In: **Congresso anual de celulose e papel**: 1991, São Paulo. Anais..., ABTCP, 1991. p.178-183.
75. TARGA, L.A. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, v.25, no 2, p.291-299, 2005, Engenharia Agrícola Jaboticabal - SP
76. TRUGILHO, P.F; **IX encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira**: 2004, Cuiabá. Deformação residual longitudinal e propriedades da madeira em clones de *Eucalyptus* n 9, p1137-1140.
77. TRUGILHO, P. F. Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. n. 73, p. 55-62, 2007.

78. TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDEZ, L. M. Influência da idade nas características físico químicas e anatômicas da madeira de eucalipto saligna. **Revista Cerne**, Lavras (MG), v.2, n.1, p.94 -111,1996.
79. VIDOR, Flávio L.R. **Avaliação de processos de Inspeção e retratamento de Postes de Madeira**. Porto Alegre. 2003.124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Física e Química. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Brasil.
80. TORRÁN, E. A., ZITTO, M. A., CALVO, C. F., CUFFRÉ, A. G., PITER, J. C. Comportamiento Resistente y Elástico de Postes de Eucalyptus E.grandis, **XI Encontro brasileiro em madeira e estruturas de madeiras (EBRAMEN)**: 2008. Londrina.
81. WANGAARD, F. F. **WOOD: Its structure and properties**, the Pennsylvania State University, USA, 1979.

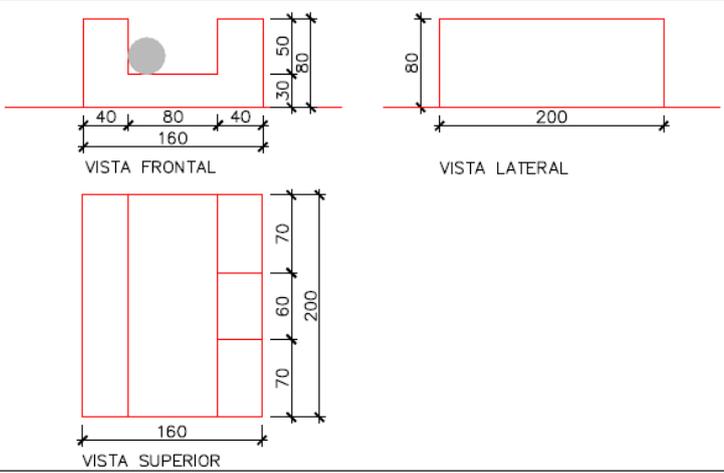
ANEXOS

- Planta baixa do projeto do Campo de testes AES Sul, PUCRS (Viamão);
- Dispositivos mecânicos do Campo de testes;
- Curvas da tensão de ruptura para ensaio de compressão paralelo as fibras.



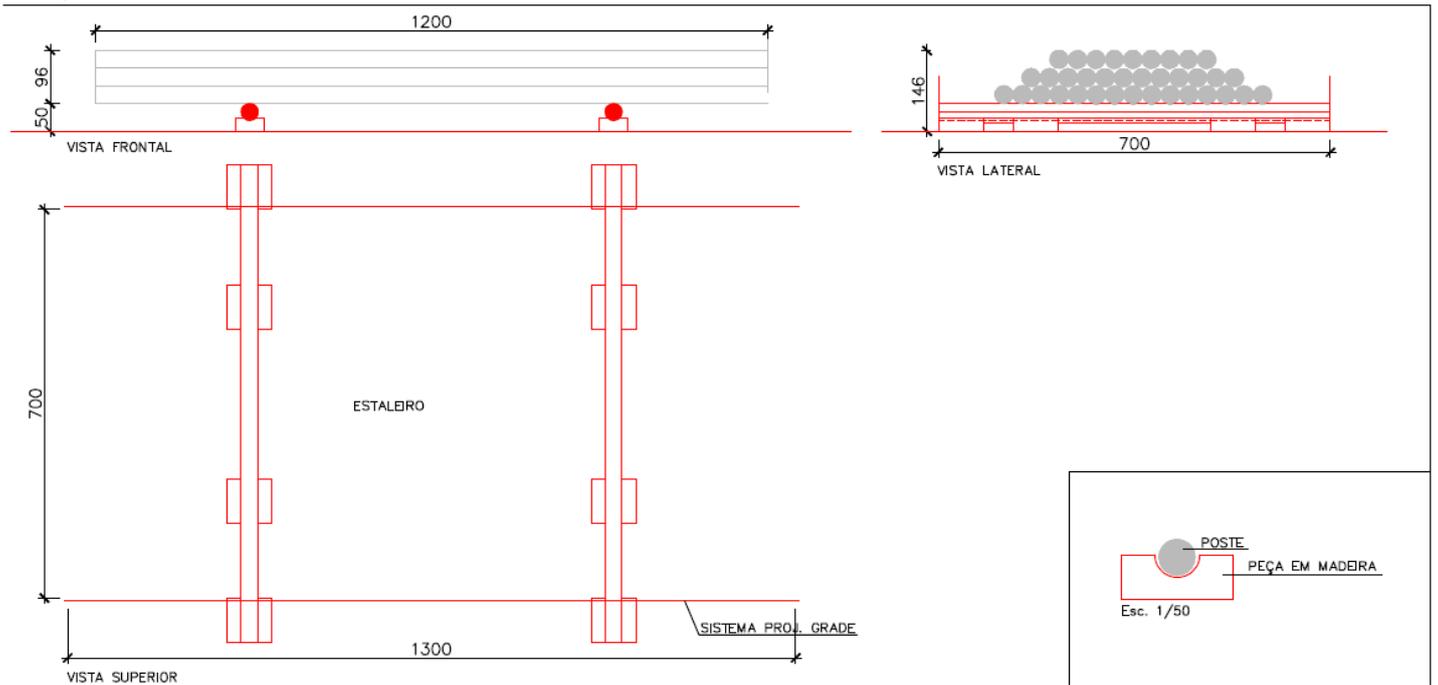
DETALHAMENTO DA BASE DE CONCRETO P/ TRILHO DO MOTOR

ESCALA:1/50

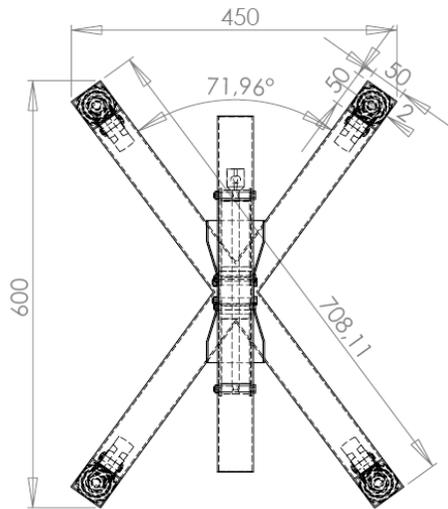
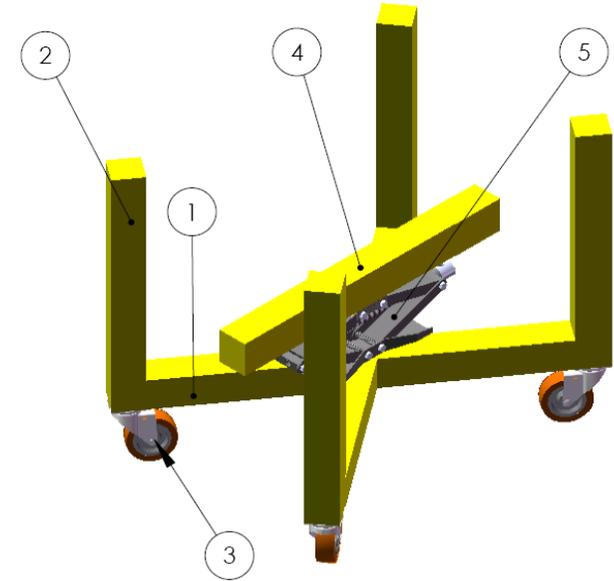
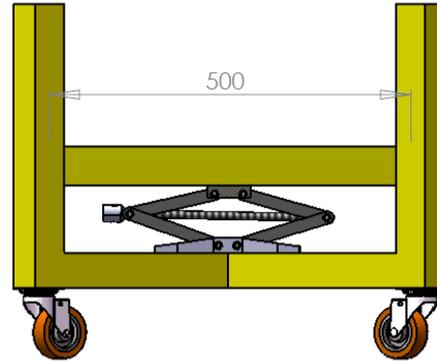
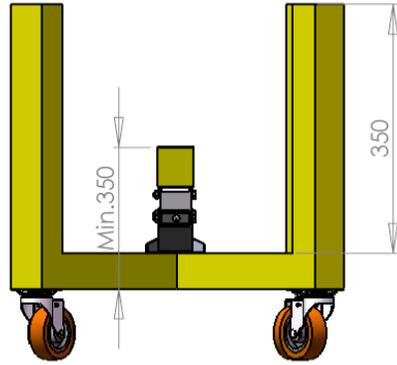


DETALHAMENTO DA BASE DE CONCRETO P/ ENGASTAMENTO DO POSTE

ESCALA:1/50



TODAS DIMENSÕES EM MILIMETROS



MASSA TOTAL: 14.85kg

01	Macaco Mecanico	05	Macaco m. tipo sanfona	2,20	2,20
01	Tubo Apoio	04	Tubo 50x50x2	1,51	1,51
04	Rodizio	03	Rodizio Novex 312-GL	0,65	2,60
04	Tubo Superior	02	Tubo 50x50x2	1,06	4,24
02	Base carro	01	Tubo 50x50x2	2,15	4,30
Quantidade	Especificação	Numero	Material	Peso Bruto	Peso Liquido

ESTE DESENHO ESTA PROTEGIDO PELA LEI DO DIREITO AUTORAL (COPYRIGHT) BRASILEIRA E EXPRESSAMENTE PROIBIDA SUA UTILIZACAO SEM NOSSA AUTORIZACAO PREVIA.

FINISH:

DEBUR AND BREAK SHARP EDGES

SCALE: 1:10

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DES	R.Souza		11/01/10
VIST	Eng.Rossi		11/01/10
APROV	Eng.Rossi		11/01/10

TITULO:

CARRO APOIO DO POSTE

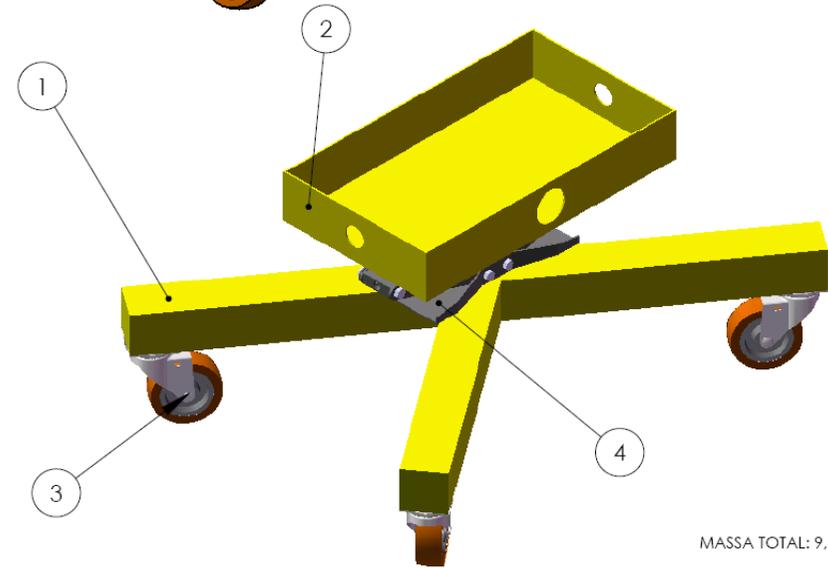
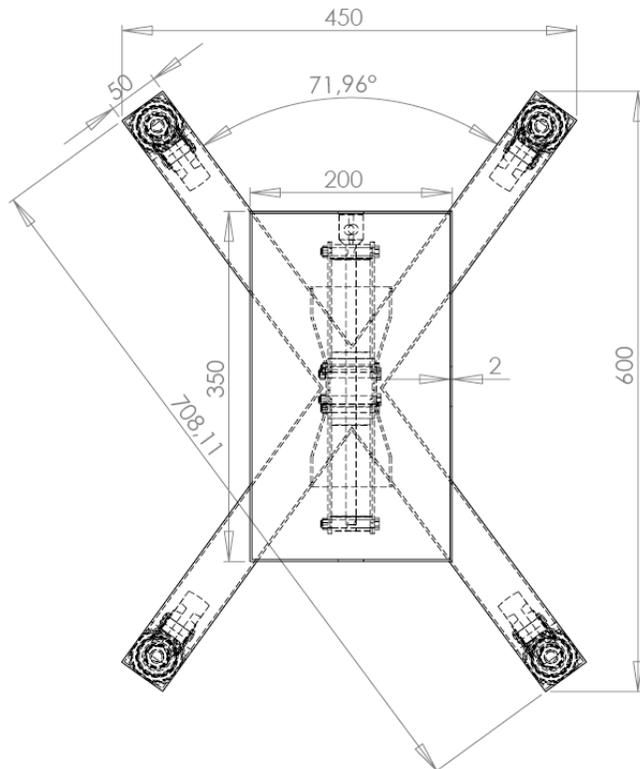
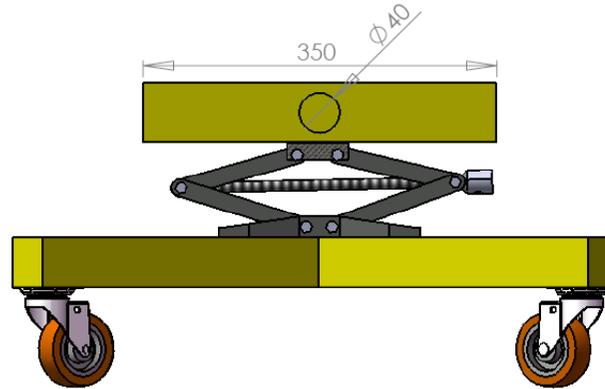
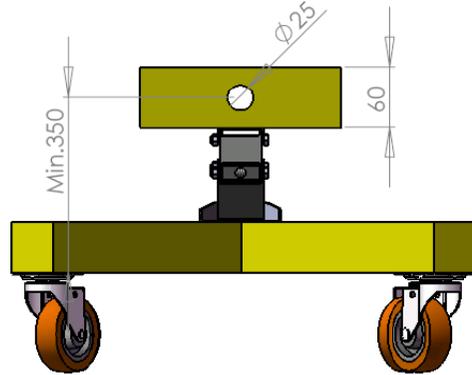
EMPRESA:

TONIOLO

A3

SCALE: 1:10

SHEET 1 OF 1

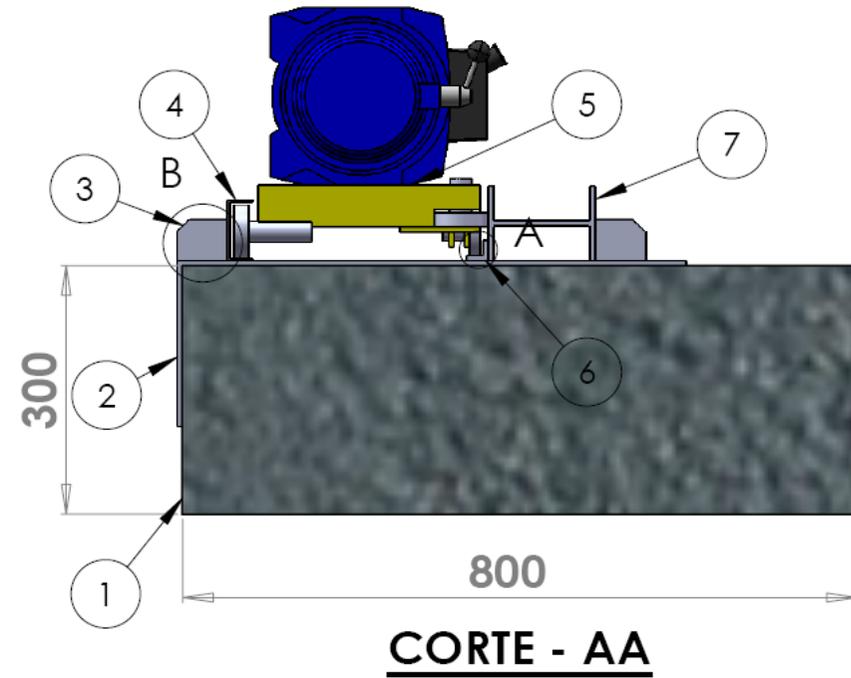
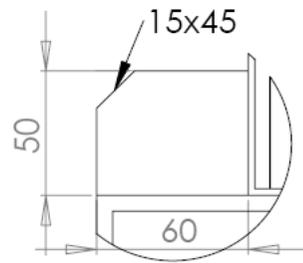
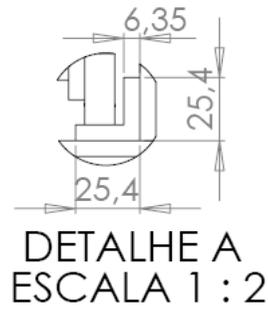
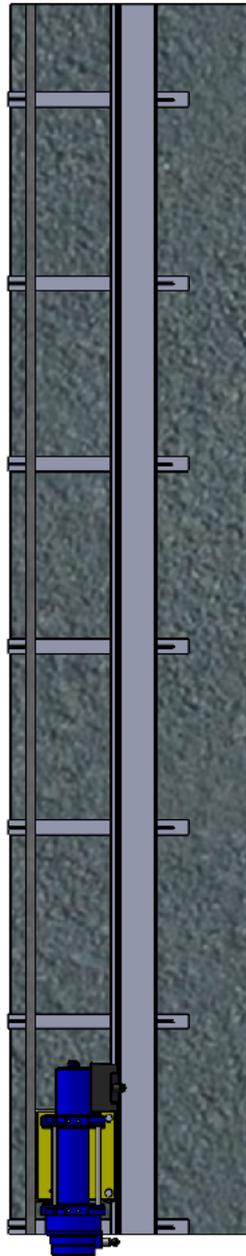


MASSA TOTAL: 9.48kg

Quantidade	Especificação	Numero	Material	Peso Bruto	Peso Liquido
01	Macaco mecanico	04	Macaco mec. sanfona	2.20	2.20
04	Rodizio	03	Rodizio Novex 312-GL	0.65	2.60
01	Bandeja	02	Ch.350x200x60x2,0	0.38	0.38
02	Base carro	01	Tubo 50x50x2	2.15	4.30

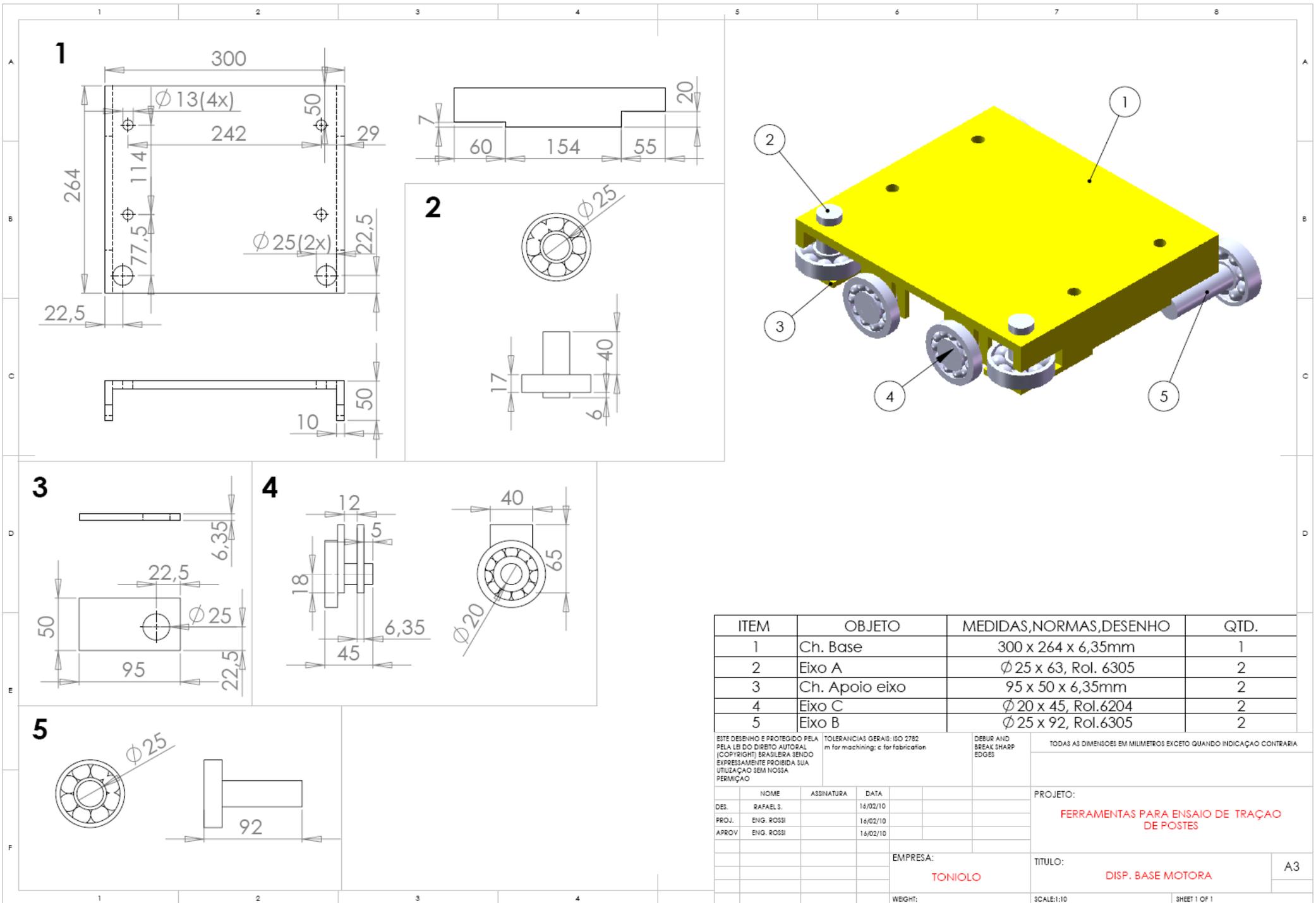
ESTE DESENHO ESTA PROTEGIDO PELA LEI DO DIREITO AUTORAL (COPYRIGHT) QUALQUER E EXPRESSAMENTE PROIBIDA SUA UTILIZACAO SEM NOSSA AUTORIZACAO PREVIA.		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	SCALE: 1:5	REVISION
DES	R.Souza	SIGNATURE	DATE	TITULO:	
VIST	Eng.Rossi		11/01/10	CARRO CELULA DE CARGA	
APROV	Eng.Rossi		11/01/10		
				EMPRESA:	A3
				TONIOLO	
				SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1

CORTE - CC



ITEM	OBJETO	MEDIDAS, NORMAS, DESENHO	QTD.
1	Base concreto	800 x 300 x (3900)	1
2	Ch. de Fixação	2x1/4 x 620 x 200	7
3	Ch. Reforço	60 x 50 x 6,35	14
4	Perfil c	68 x 28 x 2,65 x (4200)	1
5	Disp. Base motora	Conf. Desenho	1
6	Cantoneira	1" x 1/4" x (4200)	1
7	Part2		2
8	Bandeja celula de carga		1

<small>ESTE DESENHO É PROTEGIDO PELA LEI DO DIREITO AUTORAL (COPYRIGHT) BRASILEIRA SENDO EXPRESSAMENTE PROIBIDA SUA UTILIZAÇÃO SEM NOSSA PERMISSÃO</small>			<small>TOLERANCIAS GERAIS: ISO 2768 m for machining; c for fabrication</small>			<small>DEBUR AND BREAK SHARP EDGES</small>			<small>TODAS AS DIMENSÕES EM MILÍMETROS EXCETO QUANDO INDICAÇÃO CONTRÁRIA</small>		
<small>DES: RAFAEL S. DATA: 16/02/10</small>			<small>PROJ.: ENG. ROSSI DATA: 16/02/10</small>			<small>APROV.: ENG. ROSSI DATA: 16/02/10</small>			PROJETO: FERRAMENTAS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO DE POSTES		
EMPRESA: TONIOLO						TÍTULO: CONJUNTO BASE MOTORA			A3		
WEIGHT:						SCALE: 1:10			SHEET 1 OF 1		



ITEM	OBJETO	MEDIDAS,NORMAS,DESENHO	QTD.
1	Ch. Base	300 x 264 x 6,35mm	1
2	Eixo A	Ø 25 x 63, Rol. 6305	2
3	Ch. Apoio eixo	95 x 50 x 6,35mm	2
4	Eixo C	Ø 20 x 45, Rol.6204	2
5	Eixo B	Ø 25 x 92, Rol.6305	2

ESTE DESENHO É PROTEGIDO PELA
LEI DO DIREITO AUTORAL
(COPYRIGHT) BRASILEIRA SENDO
EXPRESSAMENTE PROIBIDA SUA
UTILIZAÇÃO SEM NOSSA
FERMIÇÃO

TOLERANCIAS GERAIS: ISO 2762
m for machining; c for fabrication

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

TODAS AS DIMENSÕES EM MILÍMETROS EXCETO QUANDO INDICAÇÃO CONTRÁRIA

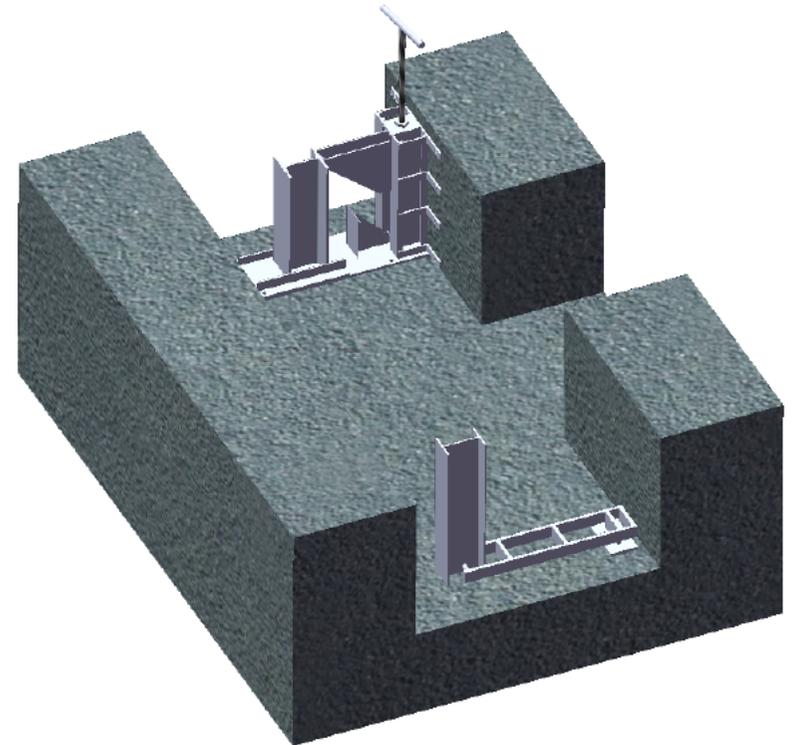
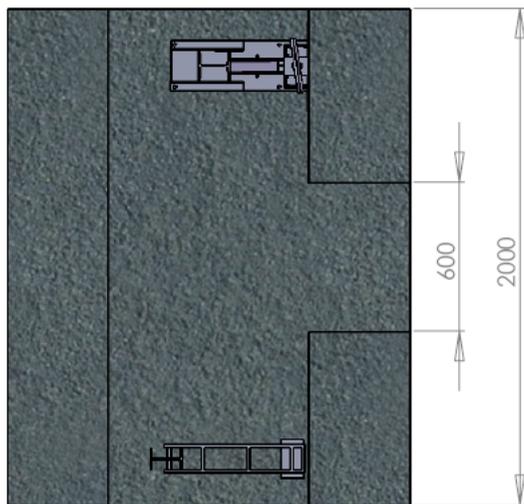
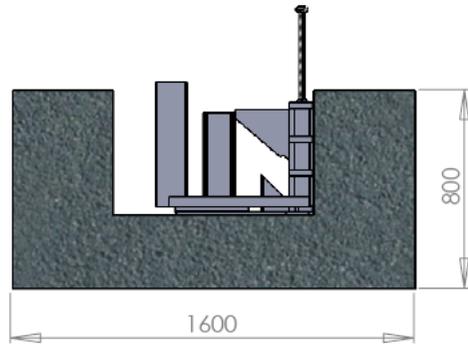
NOME	ASSINATURA	DATA
DES. RAFAEL S.		16/02/10
PROJ. ENG. ROSSI		16/02/10
APROV. ENG. ROSSI		16/02/10

PROJETO:
FERRAMENTAS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO DE POSTES

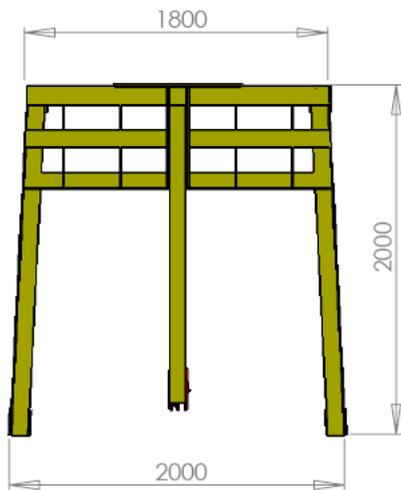
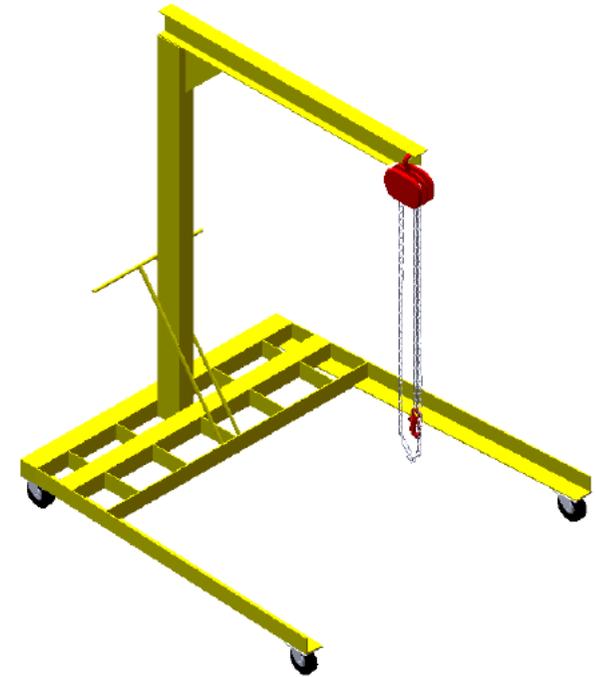
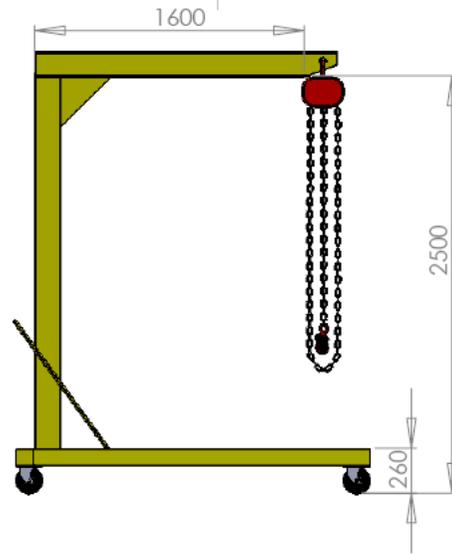
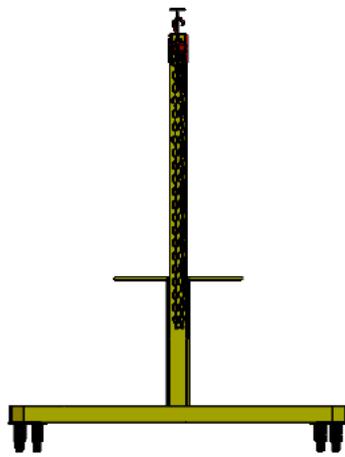
EMPRESA:
TONIOLO

TITULO:
DISP. BASE MOTORA

WEGHT: SCALE:1:10 SHEET 1 OF 1



ESTE DESENHO É PROTEGIDO PELA PELA LEI DO DIREITO AUTORAL. (COPYRIGHT) BRASILEIRA SENDO EXPRESSAMENTE PROIBIDA SUA UTILIZAÇÃO SEM NOSSA PERMISSÃO				TOLERANCIAS GERAIS: ISO 2782 m for machining; c for fabrication		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		TODAS AS DIMENSÕES EM MILÍMETROS EXCETO QUANDO INDICAÇÃO CONTRÁRIA	
PROJETO: FERRAMENTAS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO DE POSTES				EMPRESA: TONIOLO		TÍTULO: DISP. ENGASTAMENTO		A3	
DES. RAFAEL S.				ASSINATURA		DATA		WEIGHT:	
PROJ. ENG. ROSSI				DATA		SCALE: 1:50		SHEET 1 OF 1	
APPROV. ENG. ROSSI				DATA		SCALE: 1:50		SHEET 1 OF 1	



ESTE DESENHO É PROTEGIDO PELA
 PELA LEI DO DIREITO AUTORAL
 (COPYRIGHT) BRASILEIRA SENDO
 EXPRESSAMENTE PROIBIDA SUA
 UTILIZAÇÃO SEM NOSSA
 PERMISSÃO

TOLERANCIAS GERAIS: ISO 2782
 m for machining; c for fabrication

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

TODAS AS DIMENSÕES EM MILÍMETROS EXCETO QUANDO INDICAÇÃO CONTRÁRIA

	NOME	ASSINATURA	DATA
DES.	RAFAEL S.		28/01/10
PROJ.	ENG. ROSSI		28/01/10
APROV.	ENG. ROSSI		28/01/10

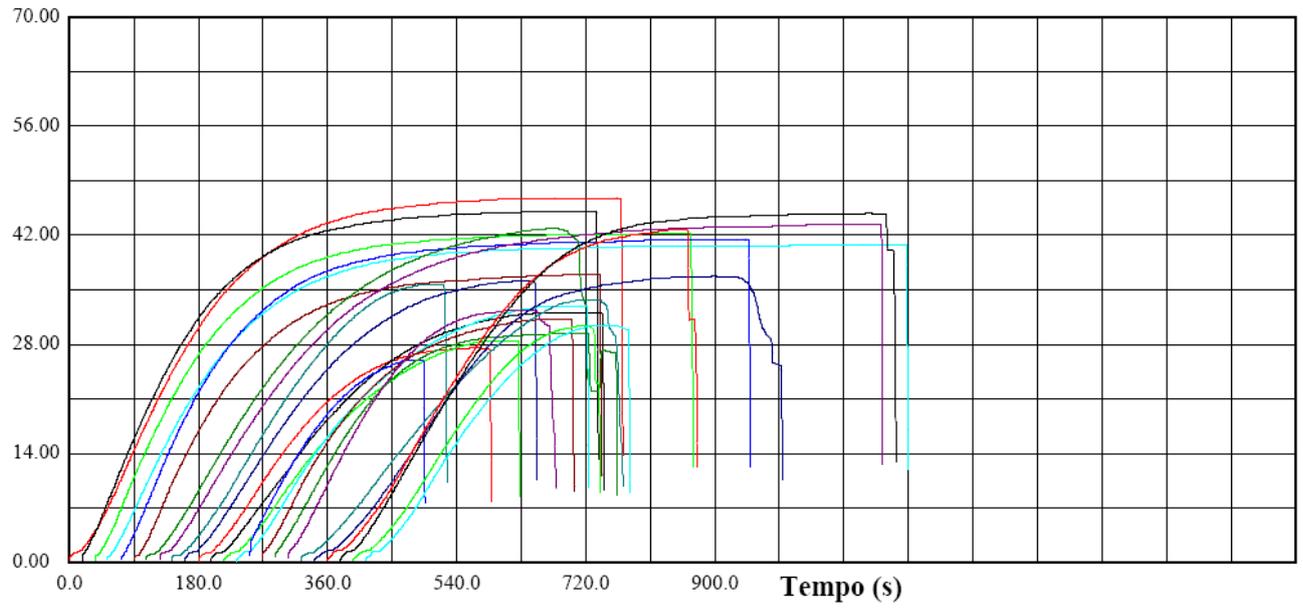
PROJETO:
**FERRAMENTAS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO
 DE POSTES**

EMPRESA:
TONIOLO

TÍTULO:
GUINDASTE GIRafa

A3

Tensão (MPa)



Tensão (MPa)

