UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

ROBERTO RAMOS DE FREITAS

Modelo teórico-experimental de deterioração de postes de madeira aplicado ao Estado de São Paulo

São Carlos
2009

ROBERTO RAMOS DE FREITAS

Modelo teórico-experimental de deterioração de postes de madeira aplicado ao Estado de São Paulo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Júnior

São Carlos
2009

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Freitas, Roberto Ramos de.
Modelo teórico-experimental de deterioração de postes de madeira aplicado ao Estado de São Paulo / Roberto Ramos de Freitas; orientador Carlito Calil Junior.- edição revisada - São Carlos, 2009.
299 p.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos,Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Madeira. 2. Postes de madeira. 3. Durabilidade da madeira. 4. Perfuração controlada. I. Título..

Este exemplar foi revisado e alterado em relação a versão original, sob a exclusiva responsabilidade do autor.

São Carlos, 20 de outubro de 2009.

Dedico à minha amada esposa Tati,
minha companheira desde julho de 1997.

AGRADEÇO

A DEUS, que permite a minha existência e caminhada diária.

Agradeço à minha esposa Tati, pelo seu amor e paciência.

Aos meus pais Dulcídio e Eurentina, pelo amor, dedicação e renuncias.

À minha irmã Luciana, minha segunda mãe.

Às minhas queridas sobrinhas Júlia e Vitória, pela felicidade delas.

Aos meus sogros Reginaldo e Maria Amélia, pelos aconselhamentos e orações.

Aos meus queridos cunhados Rogério, Rafael e Talita, pelos agradáveis momentos juntos.

Ao meu querido orientador, amigo e padrinho Calil. A ele, não tenho palavras...

Aos Prof. Rocco e Prof. Dias pelo convívio e aprendizado.

Aos Técnicos do LaMEM Silvio Antônio Ferro, Samuel Inácio de Sá, ao Pós-doutorando Júlio César Molina, e à Fabiane Salles Ferro, graduanda do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UNESP de Itapeva, pela inestimável ajuda na realização das viagens e inspeções dos postes.

Aos amigos Márcio Rogério e Edna Moura, e ao restante da Família LaMEM, pelo prazeroso convívio.

À Professora Idalice Rillo, pelo apoio nas análises estatísticas.

Aos Engenheiros e Professores Angelo Rubens Migliore Júnior e Pedro Donizeti Zacarin, pelo apoio no momento de incertezas profissionais.

Aos Engenheiros Rui Carlos Giorgi e Cleiner Reame Júnior, pela oportunidade e ensinamentos profissionais.

Ao amigo Engenheiro José Carlos de Teixeira Filho, pela amizade e oportunidade.

Aos amigos Engenheiros João Carlos de Carvalho e Ailton Adriano Pissolati, pela valiosa oportunidade de estágio em junho de 1996, no Laboratório da Capi Engenharia, onde tudo começou.

Ao amigo Engenheiro Paulo Roberto Terzian, pelo incentivo, apoio e por me indicar o caminho.

Ao IAC-Instituto Agronômico de Campinas, pelo fornecimento dos dados climatológicos.

À FAPESP e CNPq, pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

À CPFL pelo fornecimento da bolsa.

I have a dream...

(Martin Luther King, Jr., 1963)

Yes We Can!

(Barack Hussein Obama II, 2008)

RESUMO

FREITAS, R.R. **Modelo teórico-experimental de deterioração de postes de madeira aplicado ao Estado de São Paulo.** 2009. 299 p.. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Este trabalho tem por finalidade o estudo teórico e experimental de avaliação da degradação em postes de madeira utilizados em redes de energia elétrica. Com base em ampla revisão bibliográfica, de dados climáticos de várias cidades do Estado de São Paulo e resultados de ensaios de perfuração controlada realizadas em campo, em vários municípios do Estado de São Paulo, apresenta um modelo de apodrecimento de madeira em contato com o solo, identificando quais as cidades são mais e menos agressivas à madeira nestas condições, propondo a simplificação deste modelo, facilitando sua utilização na previsão da vida útil de madeiras em contato com o solo, predizendo o grau de deterioração destes. O modelo proposto se mostrou bastante adequado, dando uma boa previsão da deterioração de postes nas diversas regiões do Estado.

Palavras-chave: Madeira, Postes de madeira, Durabilidade da madeira, Perfuração controlada.

ABSTRACT

FREITAS, R.R. **Theoretical-experimental model of timber pole deterioration applied to the State of São Paulo.** 2009. 299 p.. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

The purpose of this paper is the theoretical and experimental study of evaluation of timber deterioration in used poles in nets of electric energy. Basing on ample bibliographical reviews of climatic data of some cities in the State of São Paulo and results of controlled perforation testing done in field, in some cities of the State of São Paulo, it presents a model of timber decay in contact with the ground, identifying which cities are more aggressive or less aggressive to the wood in these conditions, proposing the simplification of this model, facilitating its use in the forecast of the timber service life in contact with the ground, predicting the degree of deterioration in them. The proposed model proved to be sufficiently adequate giving a good forecast of the pole deterioration in several regions of the State.

Keywords: Timber, Utility Timber Poles, Timber Durability, Controlled perforation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Série histórica de produção e consumo de produtos de peças roliças nos Estados Unidos – (HOWARD, 2001)..... 29

FIGURA 1.2 Produção anual de postes de madeira tratada em vários países - (REVISTA DA MADEIRA, 2001)..... 31

FIGURA 2.1 Desempenho ao longo do tempo de um elemento..... 40

FIGURA 2.2 Probabilidade de ruína – (FUSCO, 1976b)..... 43

FIGURA 2.3 Origem dos problemas patológicos com relação a etapas de produção e uso das obras civil – (GRUNAU, 1981 apud HELENE, 1982)..... 45

FIGURA 3.1 Distribuição de edifícios demolidos por material estrutural – (O´CONNOR; DANGERFIELD, 2005)..... 49

FIGURA 3.2 Funções idealizadas para dois parâmetros de apodrecimento – (LEICESTER, 2001)..... 58

FIGURA 3.3 Modelo de Arrhenius..... 59

FIGURA 3.4 Desempenho da durabilidade: (a) ataque por fungos ou corrosão; (b) ataque por térmitas – (LEICESTER, 2001)..... 60

FIGURA 3.5 Esquema do Ábaco de McLean..... 70

FIGURA 3.6 Fluxograma da missão econômica e social da preservação da madeira – (REZENDE et al., 1983)..... 72

FIGURA 3.7 Fluxograma que mostra as principais decisões a serem tomadas quando da utilização de madeiras em edificações – (IPT, 2001)..... 79

FIGURA 4.1 Região de afloramento do poste..... 90

FIGURA 4.2 Cruzetas deterioradas por fungos..... 91

FIGURA 4.3 Fendas na superfície de postes de eucalipto..... 92

FIGURA 4.4 Utilização da madeira de eucalipto como postes..... 95

FIGURA 4.5 Distribuição relativa das causas de retirada de postes – (BOTTAZZO et al., 1988)..... 96

FIGURA 4.6 Regiões climáticas da Austrália – (AS/NZS 4676:2000)..... 98

FIGURA 4.7 Regiões de vida útil nominal para postes de madeira – (AS/NZS 4676:2000)..... 99

FIGURA 4.8 Dispositivo para ensaio de resistência à flexão – (NBR 6231/1980)..... 102

FIGURA 4.9 Resistência pela espessura da casca residual do poste – (MORRELL, 1986)..... 107

FIGURA 4.10 Uso do Resistograph® na avaliação de postes de madeira..... 111
FIGURA 4.11 Uso de equipamento de perfuração controlada na avaliação de tesoura - (VALLE et al.; 2006)..... 111
FIGURA 4.12 Exemplo de perfil gerado por avaliação controlada em elemento de tesoura - (VALLE et al.; 2006)..... 112
FIGURA 4.13 Utilização do trado de amostragem para verificação superficial da sanidade do poste de aroeira..... 114
FIGURA 4.14 Material superficial retirado de poste de aroeira..... 114
FIGURA 4.15 Poste com pintura impermeabilizante e fita metálica no afloramento... 115
FIGURA 4.16 Poste com pintura impermeabilizante abaixo do nível do solo..... 115
FIGURA 4.17 Chapa de dente estampado no topo do poste..... 116
FIGURA 4.18 Chapa de dente estampado na base do poste..... 116
FIGURA 4.19 Poste de madeira instalado inadequadamente..... 118
FIGURA 4.20 Colarinho de concreto para proteção do afloramento..... 118
FIGURA 5.1 Método de aplicação tratamento no afloramento de poste em serviço – (IBACH, 1888)..... 120
FIGURA 5.2 Desempenho ao longo do tempo para poste em serviço..... 121
FIGURA 6.1 Produção de postes por espécies nos Estados Unidos – (WOLFE; MOODY, 1987)..... 131
FIGURA 7.1 Mapa do Índice Climático dos EUA – (SCHEFFER, 1971)..... 133
FIGURA 7.2 Potencial de Ataque Fúngico – (SILVA et al., 2001)..... 134
FIGURA 7.3 Estacas em contato com o solo – (LEICESTER et al., 2003)..... 135
FIGURA 7.4 Relação de apodrecimento idealizada – (LEICESTER et al. , 2003)... 136
FIGURA 7.5 Funções $f_0(R_{mean})$ e $g(T_{mean})$ - (LEICESTER etal., 2003)..... 137
FIGURA 7.6 Esquema ilustrativo da razão de apodrecimento relativo de diferentes tipos de madeira – (LEICESTER et al., 2003)..... 138
FIGURA 7.7 Progresso do apodrecimento externo para postes não-tratados sem albuno – (LEICESTER et al.,2003)..... 140
FIGURA 7.8 Progresso do apodrecimento externo para postes não-tratado com albuno – (LEICESTER et al.,2003)..... 141
FIGURA 7.8 Progresso do apodrecimento externo para postes tratado com albuno – (LEICESTER et al.,2003)..... 141
FIGURA 7.10 Progresso do apodrecimento interno para postes não-tratados sem albuno – (LEICESTER et al.,2003)..... 141
FIGURA 7.11 Progresso do apodrecimento externo para postes tratados com alburno – (LEICESTER et al.,2003)..... 142

FIGURA 7.12 Progresso do apodrecimento externo para postes tratados de softwood – (LEICESTER et al.,2003)..... 142
FIGURA 7.13 Progresso do apodrecimento externo para postes tratados de hardwood – (LEICESTER et al.,2003)..... 142
FIGURA 8.1 Localização do Estado de São Paulo..... 143
FIGURA 8.2 Histograma de frequência absoluta das temperaturas médias para as cidades do Estado de São Paulo..... 148
FIGURA 8.3 Histograma de frequência absoluta das precipitações anuais para as cidades do Estado de São Paulo..... 149
FIGURA 8.4 Histograma de frequência absoluta dos meses secos para as cidades do Estado de São Paulo..... 149
FIGURA 8.5 Histograma de frequência absoluta dos Índices Climáticos I_{ig} para as cidades do Estado de São Paulo..... 150
FIGURA 8.6 Histograma de frequência absoluta das temperaturas para $I_{ig<2,50}$..... 151
FIGURA 8.7 Histograma de frequência absoluta das temperaturas para $I_{ig>2,50}$..... 151
FIGURA 8.8 Histograma de frequência absoluta das precipitações para $I_{ig<2,50}$..... 152
FIGURA 8.9 Histograma de frequência absoluta das precipitações para $I_{ig>2,50}$..... 152
FIGURA 8.10 Histograma de frequência absoluta dos meses secos para $I_{ig<2,50}$..... 153
FIGURA 8.11 Histograma de frequência absoluta dos meses secos para $I_{ig>2,50}$..... 153
FIGURA 8.12 Teste de normalidade para temperatura..... 155
FIGURA 8.13 Teste de normalidade para precipitação..... 155
FIGURA 8.14 Teste de normalidade para meses secos..... 156
FIGURA 8.15 Teste de normalidade para I_{ig}..... 156
FIGURA 8.16 Teste de normalidade para temperatura de $I_{ig<2,50}$..... 158
FIGURA 8.17 Teste de normalidade para temperatura de $I_{ig>2,50}$..... 158
FIGURA 8.18 Teste de normalidade para precipitação de $I_{ig<2,50}$..... 159
FIGURA 8.19 Teste de normalidade para precipitação de $I_{ig>2,50}$..... 159
FIGURA 8.20 Teste de normalidade para meses secos de $I_{ig<2,50}$..... 160
FIGURA 8.21 Teste de normalidade para meses secos de $I_{ig>2,50}$..... 160
FIGURA 8.22 Populações de temperatura para $I_{ig<2,50}$ e $I_{ig>2,50}$..... 161
FIGURA 8.23 Populações de precipitação para $I_{ig<2,50}$ e $I_{ig>2,50}$..... 162
FIGURA 8.24 Populações de meses secos para $I_{ig<2,50}$ e $I_{ig>2,50}$..... 162
FIGURA 8.25 Diagrama de temperatura das dez cidades de menores I_{ig}..... 164
FIGURA 8.26 Diagrama de precipitação das dez cidades de menores I_{ig}..... 164
FIGURA 8.27 Diagrama de meses secos das dez cidades de menores I_{ig}..... 165
FIGURA 8.28 Diagrama de temperatura das dez cidades de maiores I_{ig}..... 166

FIGURA 8.29 Diagrama de precipitação das dez cidades de maiores I_{ig}..... 166
FIGURA 8.30 Diagrama de meses secos das dez cidades de maiores I_{ig}..... 167
FIGURA 9.1 Analogia de modelos Eficaz e Eficiente..... 178
FIGURA 9.2 Variação do fator redutor no modelo de LEICESTER..... 179
FIGURA 9.3 Histograma de frequência absoluta do coeficiente redutor do modelo de LEICESTER..... 179
FIGURA 9.4 Histograma de frequência absoluta dos $I_{ig;simplificado}$ para as cidades do Estado de São Paulo..... 184
FIGURA 9.5 Populações de I_{ig} e $I_{igsimplificado}$..... 184
FIGURA 9.6 Histograma de frequência absoluta da variação de I_{ig} para $I_{ig;simplificado}$..... 185
FIGURA 9.7 Regressão I_{ig} x $I_{ig;simplificado}$..... 185
FIGURA 9.8 Resíduos x $I_{ig;simplificado}$..... 186
FIGURA 9.9 Histograma de frequência absoluta das temperaturas para $I_{ig;simplificado<2,50}$..... 187
FIGURA 9.10 Histograma de frequência absoluta das temperaturas para $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 188
FIGURA 9.11 Histograma de frequência absoluta das precipitações para $I_{ig;simplificado<2,50}$..... 188
FIGURA 9.12 Histograma de frequência absoluta das precipitações para $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 189
FIGURA 9.13 Teste de normalidade para temperatura de $I_{ig;simplificado<2,50}$..... 190
FIGURA 9.14 Teste de normalidade para temperatura de $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 190
FIGURA 9.15 Teste de normalidade para precipitação de $I_{ig;simplificado<2,50}$..... 191
FIGURA 9.16 Teste de normalidade para precipitação de $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 191
FIGURA 9.17 Populações de temperatura para $I_{ig;simplificado<2,50}$ e $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 193
FIGURA 9.18 Populações de precipitação para $I_{ig;simplificado<2,50}$ e $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 193
FIGURA 9.19 Diagrama de temperatura das dez cidades de menor $I_{ig;simplificado}$..... 195
FIGURA 9.20 Diagrama de precipitação das dez cidades de menor $I_{ig;simplificado}$..... 195
FIGURA 9.21 Diagrama de temperatura das dez cidades de maior $I_{ig;simplificado}$..... 196
FIGURA 9.22 Diagrama de precipitação das dez cidades de maior $I_{ig;simplificado}$..... 197
FIGURA 9.23 Populações de temperatura para as dez cidades de menores I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 199
FIGURA 9.24 Populações de temperatura para as dez cidades de maiores I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 199

FIGURA 9.25 Populações de precipitação para as dez cidades de menores I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 200
FIGURA 9.26 Populações de precipitação para as dez cidades de maiores I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 200
FIGURA 9.27 Populações dos maiores dos dez maiores valores de I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 202
FIGURA 9.28 Regressão entre I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$ para as cidades de maiores valores de I_{ig}..... 203
FIGURA 9.29 Regressão entre I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$ para as cidades de menores valores de I_{ig}..... 204
FIGURA 9.30 Regressões de I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 205
FIGURA 10.1 Plaqueta de identificação dos postes..... 211
FIGURA 10.2 Determinação da circunferência no afloramento..... 212
FIGURA 10.3 Equipamento de perfuração controlada IML-RESI*F500-S*..... 213
FIGURA 10.4 Registro do perfil perfurado em papel..... 213
FIGURA 10.5 Tela de *software* para análise do perfil perfurado..... 214
FIGURA 10.6 Equipamento de perfuração com ponteira chanfrada..... 215
FIGURA 10.7 Perfuração no afloramento do poste..... 215
FIGURA 11.1 Histograma de frequência absoluta das idades..... 225
FIGURA 11.2 Histograma de frequência absoluta dos diâmetros..... 225
FIGURA 11.3 Teste de normalidade para as idades dos postes..... 226
FIGURA 11.4 Teste de normalidade para os diâmetros dos postes..... 226
FIGURA 11.5 Teste de normalidade para as temperaturas dos postes..... 228
FIGURA 11.6 Teste de normalidade para as precipitações dos postes..... 228
FIGURA 11.7 Teste de normalidade para os meses secos dos postes..... 229
FIGURA 11.8 Teste de normalidade para o I_{ig} dos postes..... 229
FIGURA 11.9 Teste de normalidade para o $I_{ig;simplificado}$ dos postes..... 230
FIGURA 11.10 Histograma de frequência absoluta dos comprimentos DETERIORADOS..... 231
FIGURA 11.11 Teste de normalidade para o comprimento deteriorado dos postes.... 231
FIGURA 11.12 Histograma de frequência absoluta dos diâmetros dos postes SÃOS. 232
FIGURA 11.13 Histograma de frequência absoluta dos diâmetros dos postes DETERIORADOS..... 233
FIGURA 11.14 Histograma de frequência absoluta das idades dos postes SÃOS..... 234
FIGURA 11.15 Histograma de frequência absoluta das idades dos postes DETERIORADOS..... 234

FIGURA 11.16 Populações dos diâmetros dos postes SÃOS e DETERIORADOS..... 235
FIGURA 11.17 Populações das idades dos postes SÃOS e DETERIORADOS..... 236
FIGURA 11.18 Valores de temperatura para postes SÃOS e DETERIORADOS..... 239
FIGURA 11.19 Valores de precipitação para postes SÃOS e DETERIORADOS..... 240
FIGURA 11.20 Valores de meses secos para postes SÃOS e DETERIORADOS..... 240
FIGURA 11.21 Valores de I_{ig} para postes SÃOS e DETERIORADOS..... 241
FIGURA 11.22 Valores de $I_{ig;simplificado}$ para postes SÃOS e DETERIORADOS..... 242
FIGURA 11.23 Histograma de frequência absoluta do Grau de Deterioração..... 243
FIGURA 11.24 Teste de normalidade para o Grau de Deterioração..... 244
FIGURA 11.25 Regressão Comprimento Deteriorado x Diâmetro..... 245
FIGURA 11.26 Regressão Comprimento Deteriorado x Idade..... 246
FIGURA 11.27 Regressão Grau de Deterioração x Idade..... 246

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 Resumo da atividade científica publicada pelo EBRAMEM..... 34

TABELA 3.1 Classificação da durabilidade natural das madeiras – (CASTRO SILVA, 2003)..... 51

TABELA 3.2 Durabilidade natural do cerne de árvores adulta de *Eucaliptus* em contato com o solo – (CSIRO, 1987 apud SILVA OLIVEIRA; CASTRO SILVA, 2001)..... 52

TABELA 3.3 Organismos comumente encontrados nos solos – (BUCKMAN; BRADY -1966)..... 64

TABELA 3.4 Classificação da tratabilidade das madeiras – (Castro Silva, 2003)..... 67

TABELA 3.5 Composição dos três tipos de Arseniato de Cobre Cromatado – (IBACH, 1988)..... 68

TABELA 3.6 Critério de avaliação do estado de sanidade – (BARILLARI, JANKOWSKY, FREITAS - 2002)..... 69

TABELA 3.7 Comparação entre os valores médios do Índice de Comportamento (I.C.) para os diferentes produtos, por nível de retenção (*) – (BARILLARI, JANKOWSKY, FREITAS, 2002)..... 69

TABELA 3.8 Custos de produção de postes de eucalipto preservado - (SACCO, 1983)..... 73

TABELA 3.9 Classes de umidade – (NBR 7180/1987)..... 75

TABELA 3.10 Classe de duração – (NBR 7180/1987)..... 75

TABELA 3.11 Agentes biológicos em função das situações de risco de deterioração da madeira – (NBR 7180/1987)..... 77

TABELA 3.12 Classe de risco – Grupos de organismos xilófagos que podem atacar a madeira, conforme o local e as condições em que ela é empregada – (EN 335-1; EN 335-2 apud IPT, 2001)..... 78

TABELA 3.13 Tipos de tratamentos e de preservantes em função da classe de risco na qual se encontrará a madeira – (IPT, 2001)..... 78

TABELA 3.14 Guia de seleção de classe de risco – (AS 1604.1-2005)..... 81

TABELA 3.15 Durabilidade natural – Expectativa de vida provável – (AS 5604 - 2005)..... 82

TABELA 3.16 Resistência a brocas marinhas – Provável expectativa de vida – (AS 5604-2005)..... 82

TABELA 3.17 Índices de durabilidade natural de *Eucaliptus* – (AS 5604-2005)..... 83

TABELA 3.18 Classes de Durabilidade – (AS 1720.2-1990)..... 84

TABELA 3.19 Classes de risco para uso da madeira na construção civil – (BRAZOLIN et at.; 2004)..... 85
TABELA 3.20 Classes de agressividade ambiental – (NBR 6118/2003)..... 86
TABELA 3.21 Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto – (NBR 6118/2003)..... 86
TABELA 3.22 Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento – (NBR 6118/2003)..... 87
TABELA 3.23 Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto – (NBR 12655/2006)..... 87
TABELA 4.1 Madeira roliça..... 89
TABELA 4.2 Resistência natural ao ataque de cupins e permeabilidade das madeiras – (CASTRO SILVA, 2003)..... 93
TABELA 4.3 Valores de concentração de CCA - (SALES et al., 2004)..... 94
TABELA 4.4 Classificação sugerida da vida útil nominal dos postes de madeira (AS/NZS 4676:2000)..... 99
TABELA 4.5 Fator de degradação – (AS/NZS 4676:2000)..... 101
TABELA 4.6 Períodos recomendados para inspeção de postes de madeira – (AS/NZS 4676:2000)..... 106
TABELA 5.1 Número de anos após instalação que os postes não romperam no afloramento quando submetido a aplicação de força – (DeGROOT, 1981)..... 123
TABELA 5.2 Grautes produzidos pela FOSROC REAX (2002)..... 124
TABELA 5.3 Valores médios de f_{c0} e E_{c0} para o gênero *Eucaliptus spp*. - (NBR 7180/1987)..... 125
TABELA 6.1 Valores médios e madeiras coníferas de florestamento, ensaios de amostras isentas de defeito – (CALIL JÚNIOR, 2002)..... 128
TABELA 6.2 Indicações de uso para o gênero Pínus - (BORTOLETTO JÚNIOR, 1883)..... 129
TABELA 6.3 Índices de durabilidade natural de Pinus – (AS 5604-2005)..... 130
TABELA 6.4 Espécies de postes por tensão de ruptura pela ANSI 05.1 – (WOLFE; MOODY, 1987)..... 131
TABELA 6.5 Classificação dos postes de madeira pela ANSI 05.1 -(WOLFE; MOODY, 1887)..... 132
TABELA 7.1 Índice Climático representativo para quatro classes de agressividade 137
TABELA 7.2 Parâmetros de apodrecimento para cerne externo não tratado – (LEICESTER et al., 2003)..... 138

TABELA 8.1 Dados climatológicos e I_{ig} obtidos..... 145
TABELA 8.2 Estatística dos dados climátológicos..... 148
TABELA 8.3 Índice Climático representativo para quatro classes de agressividade 150
TABELA 8.4 Estatística descritiva para as variáveis das populações de I_{ig}..... 150
TABELA 8.5 Teste de normalidade variáveis de I_{ig}..... 154
TABELA 8.6 Teste de normalidade variáveis de $I_{ig;simplificado<2,50}$..... 157
TABELA 8.7 Teste de normalidade variáveis de $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 157
TABELA 8.8 Cidades menos agressivas à madeira no Estado de São Paulo..... 163
TABELA 8.9 Cidades mais agressivas à madeira no Estado de São Paulo..... 165
TABELA 8.10 Comparação de I_{ig} e parâmetros menos agressivos..... 168
TABELA 8.11 Comparação de I_{ig} e parâmetros mais agressivos..... 168
TABELA 8.12 Classificação de espécies por durabilidade..... 170
TABELA 8.13 Razão de apodrecimento do cerne de espécies de eucalipto e pínus em estacas em contato com o solo para as cidades menos agressivas do Estado de São Paulo..... 170
TABELA 8.14 Razão de apodrecimento do cerne de espécies de eucalipto e pínus em estacas em contato com o solo para as cidades mais agressivas do Estado de São Paulo..... 171
TABELA 8.15 Previsão de tempo necessário para apodrecimento de 5 mm de cerne em estaca com contato com o solo para espécies de normatizadas nacionalmente..... 172
TABELA 8.16 Percentual de ingrediente ativo adotado..... 173
TABELA 8.17 Razão de apodrecimento de alburno tratado para as cidades menos agressivas do Estado de São Paulo..... 173
TABELA 8.18 Razão de apodrecimento de alburno tratado para as cidades mais agressivas do Estado de São Paulo..... 174
TABELA 8.19 Tempo para perda da capacidade resistente para as cidades menos agressivas do Estado de São Paulo..... 175
TABELA 8.20 Tempo para perda da capacidade resistente para cidades mais agressivas do Estado de São Paulo..... 175
TABELA 9.1 Comparação de I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 181
TABELA 9.2 Estatística descritiva de $I_{ig;simplificado}$..... 183
TABELA 9.3 Índice Climático representativo para quatro classes de agressividade 186
TABELA 9.4 Estatística descritiva dos parâmetros das populações de $I_{ig;simplificado}$.... 187
TABELA 9.5 Teste de normalidade variáveis de $I_{ig;simplificado<2,50}$..... 189
TABELA 9.6 Teste de normalidade variáveis de $I_{ig;simplificado>2,50}$..... 189

TABELA 9.7 Cidades menos agressivas à madeira no Estado de São Paulo pelo modelo simplificado..... 194
TABELA 9.8 Cidades mais agressivas à madeira no Estado de São Paulo pelo modelo simplificado..... 196
TABELA 9.9 Comparação de $I_{ig;simplificado}$ e parâmetros menos agressivos..... 197
TABELA 9.10 Comparação de $I_{ig;simplificado}$ e parâmetros mais agressivos..... 198
TABELA 9.11 Cidades de menores valore de I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 201
TABELA 9.12 Cidades de menores valores de I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 201
TABELA 9.13 Comparação entre os valores de I_{ig} e $I_{ig;simplificado}$..... 202
TABELA 9.14 Valores dos coeficiente das regressões I_{ig} x $I_{ig;simplificado}$..... 205
TABELA 9.15 Valores de I_{ig} e I_{ig}'..... 206
TABELA 10.1 Perfis de deterioração de postes de madeira..... 216
TABELA 11.1 Identificação das cidades visitadas..... 219
TABELA 11.2 Dados do levantamento de campo..... 220
TABELA 11.3 Estatística descritiva dos postes inspecionados..... 224
TABELA 11.4 Teste de normalidade dos valores de idade e diâmetro dos postes inspecionados..... 225
TABELA 11.5 Distribuição absoluta e relativa do tipo de preservativo presente nos postes inspecionados..... 227
TABELA 11.6 Teste de normalidade dos dados climáticos..... 227
TABELA 11.7 Estatística descritiva do comprimento deteriorado..... 230
TABELA 11.8 Teste de normalidade dos valores de comprimento deteriorado..... 231
TABELA 11.9 Estatística descritiva dos diâmetros dos postes SÃOS e DETERIORADOS..... 232
TABELA 11.10 Estatística descritiva das idades dos postes SÃOS e DETERIORADOS..... 233
TABELA 11.11 Frequência observada dos tratamentos..... 237
TABELA 11.12 Frequências esperadas para os tratamentos..... 237
TABELA 11.13 Estatística descritiva do Grau de Deterioração..... 244
TABELA 11.14 Teste de normalidade dos valores de comprimento deteriorado..... 244

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI	American National Standards Institute
AS	Australian Standards
AWPA	American Wood-Preservers´Association.
CCA	Arseniato de Cobre Cromatado
CCB	Borato de Cobre Cromatado
C_{CCA}	Concentração de CCA em kg/kg
$C_{CCA\text{-}equiv.}$	Concentração de CCA equivalente em kg/kg
$C_{creosoto}$	Concentração de Creosoto em kg/kg
MDF	Medium density fiberboard (placa de fibra de madeira de média densidade)
NZS	New Zealand Standards
OSB	Oriented Strand Board
Af	Clima tropical úmido
Aw	Clima tropical com estação seca de inverno
Cfa	Clima temperado úmido com verão quente
Cfb	Clima temperado úmido com verão temperado
Cwa	Clima temperado úmido com Inverno seco e verão quente
Cwb	Clima temperado húmido com Inverno seco e verão temperado
I_{ig}	Índice climático de apodrecimento de madeiras em contato com o solo (LEICESTER et al.; 2003)
$I_{ig;simplificado}$	Índice climático simplificado de apodrecimento de madeiras em contato como solo proposto apartir de I_{ig}
$I_{ig<2,50}$	Índice climático menor que 2,50
$I_{ig>2,50}$	Índice climático maior que 2,50
$I_{ig;simplificado<2,50}$	Índice climático simplificado menor que 2,50
$I_{ig;simplificado>2,50}$	Índice climático simplificado maior que 2,50
$I_{LL\text{-}SP}$	Índice climático de apodrecimento de madeiras em contato como o solo para o Estado de São Paulo/Brasil
$Lag_{nt,alb,estaca}$	Período inicial para o aprodrecimento de alburno não-tratado em estaca experimental
$Lag_{nt,alb,poste}$	Período inicial para o aprodrecimento de alburno não-tratado em poste
$Lag_{nt,cer,estaca}$	Período inicial para o aprodrecimento de cerne não-tratado em estaca experimental
$Lag_{nt,cer,poste}$	Período inicial para o aprodrecimento de cerne não-tratado em poste

$Lag_{nt,juv,estaca}$	Período inicial para o aprodrecimento de madeira juvenil não-tratada em estaca experimental
$Lag_{nt,juv,poste}$	Período inicial para o aprodrecimento de madeira juvenil não-tratada em poste
$Lag_{tr,alb,estaca}$	Período inicial para o aprodrecimento de alburno tratado em estaca experimental
$Lag_{tr,alb,poste}$	Período inicial para o aprodrecimento de alburno tratado em poste
$r_{nt,alb,estaca}$	Velocidade para o aprodrecimento de alburno não-tratado em estaca experimental
$r_{nt,alb,poste}$	Velocidade para o aprodrecimento de alburno não-tratado em poste
$r_{nt,cer,estaca}$	Velocidade para o aprodrecimento de cerne não-tratado em estaca experimental
$r_{nt,cer,estaca}$	Velocidade para o aprodrecimento de cerne não-tratado em poste
$r_{nt,juv,estaca}$	Velocidade para o aprodrecimento de madeira juvenil não-tratada em estaca experimental
$r_{nt,juv,poste}$	Velocidade para o aprodrecimento de madeira juvenil não-tratada em poste
$r_{tr,alb,estaca}$	Velocidade para o aprodrecimento de alburno tratado em estaca experimental
$r_{tr,alb,estaca}$	Velocidade para o aprodrecimento de alburno tratado em poste

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 27
1.1 A utilização de peças roliças..... 28
1.2 Os postes de madeira..... 29
1.3 O estudo da durabilidade e patologia das estruturas de madeira no Brasil..... 33
1.4 Justificativa do trabalho..... 35
1.5 Objetivos do trabalho..... 36
1.5.1 Objetivos gerais..... 37
1.5.2 Objetivos específicos..... 37
2 DURABILIDADE, CONFIBILIDADE E PATOLOGIAS..... 39
2.1 Confiabilidade e segurança..... 41
2.2 Patologia e terapia..... 44
2.3 O custo da durabilidade..... 45
3 DURABILIDADE, DEGRADAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA MADEIRA..... 49
3.1 Durabilidade natural..... 50
3.2 Agentes de biodegradação da madeira..... 52
3.2.1 Bioquímica do apodrecimento..... 57
3.3 Cupins, crustáceos e moluscos..... 59
3.4 *Weathering*..... 61
3.5 A influência do solo na degradação da madeira..... 62
3.6 A preservação da madeira..... 65
3.6.1 Produtos preservativos..... 67
3.6.2 Métodos preservativos..... 70
3.7 Preservação *versus* Custos..... 72
3.8 Classes de riscos..... 75
3.8.1 As classes de risco no desenvolvimento de projetos..... 86
4 OS POSTES DE MADEIRA..... 89
4.1 A vida útil dos postes de madeira..... 97
4.2 Dimensionamento..... 99
4.3 Ensaio de caracterização mecânica..... 102
4.4 Inspeção dos postes de madeira em serviço..... 105
4.4.1 Metodologia de inspeção M-13..... 107
4.4.2 Metodologia de inspeção: A perfuração controlada..... 110
4.5 Inspeção empírica em postes..... 112
4.6 Proposta para aumento da durabilidade dos postes..... 114
5 MANUTENÇÃO E REFORÇO DE POSTES DE MADEIRA..... 119

6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DO PÍNUS..... 127
7 MODELOS DE ATAQUE E APODRECIMENTO..... 133
7.1 Progresso da deterioração..... 140
8 APLICAÇÃO DO MODELO DE APODRECIMENTO ÀS CIDADES DO ESTADO DE SÃO PAULO..... 143
8.1 O clima do Estado de São Paulo..... 143
8.2 Dados climatológicos e I_{ig} 144
8.3 Testes de Normalidade para as variáveis de I_{ig}..... 154
8.4 Testes de Hipótese para as variáveis de I_{ig} (Teste-*F*)..... 161
8.5 Identificação das cidades de menores e maiores agressividades..... 163
8.6 Previsão do apodrecimento em madeira não-tratada..... 169
8.7 Previsão do apodrecimento em postes tratados..... 172
9 PROPOSTA DE SIMPLIFICAÇÃO DE MODELO DE AGRESSIVIDADE..... 177
9.1 Justificativa da proposição..... 177
9.2 Simplificação do modelo..... 180
9.3 Testes de Hipótese das variáveis de $I_{ig;simplificado}$ (Teste-*F*)..... 192
9.4 Identificação das cidades de menores e maiores agressividades segundo $I_{ig;simplificado}$..... 194
9.4.1 Teste de hipótese para as cidade de menores e maiores agressividades..... 198
9.5 Análise de regressões..... 203
10 MATERIAIS E MÉTODOS..... 211
10.1 Dados dos postes..... 211
10.2 Inspeção por perfuração controlada..... 212
10.3 Análise dos perfis da perfuração controlada..... 216
11 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS..... 219
11.1 Descrição dos postes inspecionados..... 219
11.2 Identificação de populações..... 230
11.3 Teste de Hipóteses para os postes (Teste-*F*)..... 235
11.4 Análise dos tratamentos preservativos..... 236
11.5 Análise de variância (*ANOVA*)..... 237
11.6 Grau de Deterioração..... 243
11.7 Regressões..... 245
11.8 Resumo das conclusões da análise de dados..... 247
12 CONCLUSÕES..... 249
12.1 Índices climáticos de apodrecimento..... 249
12.2 Perfuração controlada..... 249

12.3 Sugestões de estudos futuros..... 249
REFERÊNCIAS..... 251
GLOSSÁRIO..... 259
ANEXO A ARTIGOS SOBRE DURABILIDADE PUBLICADOS NOS EBRAMEM'S – ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS..... 263
ANEXO B CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO NACIONAL DOS POSTES DE MADEIRA (NBR 8458/1984)..... 267
ANEXO C ESPÉCIES NORMATIZADAS PELA AS 2208-1984..... 275
ANEXO D ESPECIFICAÇÕES PARA A CLASSE DE RISCO H5 – AS 1604.1-2005 SPECIFICATIONS FOR PRESERVATIVE TREATMENT PART 1: SAWN AND ROUND TIMBER..... 279
ANEXO E PRODUTOS PRESERVATIVOS DE MADEIRA REGISTRADOS NO IBAMA – 13 DE MARÇO DE 2007……..... 281
ANEXO F ÁBACO DE MCLEAN..... 285
ANEXO G DADOS CLIMÁTICOS – INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS/SP..... 287
ANEXO H COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS CIDADES..... 291
ANEXO I TESTES ESTATÍSTICOS..... 295

1 INTRODUÇÃO

Seguramente, a madeira é um dos materiais mais versáteis que a natureza dispõe à humanidade. Há milhares de anos a madeira vem sendo utilizada para suprir as necessidades oriundas de uma sociedade cada vez mais sedenta por novas fontes de energia e matéria-prima.

Conforme Pfeil, W; Pfeil, M (2003), na atualidade a madeira tem sido utilizada de diversas formas na construção:

- Madeira maciça: bruta ou roliça, falqueada ou serrada;
- Madeira industrializada: compensada, laminada e colada, recomposta.

Entretanto, segundo Uriartt (2001), a madeira não deve ser apresentada apenas como material de construção, mas também como matéria-prima para múltiplas possibilidades de aproveitamento industrial, como por exemplo, a utilização da celulose para obtenção de papéis, rayon, açúcares, álcoois, resinas, taninos e a lignina para a obtenção de resinas.

Segundo Fusco (1989), a usinagem da madeira é extraordinariamente mais simples do que a usinagem do concreto ou do aço. Desta forma, os investimentos industriais necessários são muito menos onerosos, e a qualificação da mão-de-obra a ser empregada é muitíssimo menos exigente.

"Quando devidamente estudada e adequadamente empregada, respeitando-se a essência de sua estrutura interna, a madeira é um material estrutural de primeira qualidade, cujo emprego deverá crescer consideravelmente nos anos vindouros", (FUSCO, 1989).

Outro ponto importante é que a madeira é o único material que ao invés do CO_2 ser liberado para a atmosfera em sua produção, este é absorvido, sendo assim realizado o chamado "sequestro de carbono".

Segundo Romano (2004), a madeira e seus produtos derivados assumem um papel de destaque como materiais que contribuem para a construção, para o cumprimento dos objetivos do *Protocolo de Kioto* e para a redução de emissões dos gases do efeito estufa, dadas as suas características ecológicas, econômicas e sociais. As florestas e os produtos de madeira desempenham um papel muito importante no ciclo global do carbono, pois agem como sumidouros de carbono através da:

- Manutenção e/ou aumento dos reservatórios de carbono existentes, através do melhoramento da proteção e gestão das florestas atuais;
- Expansão da área de florestas através da arborização;

- Substituição dos combustíveis fósseis por madeira proveniente de florestas geridas de modo sustentável;
- Substituição de produtos de alto consumo de energia (por exemplo, aço, alumínio ou concreto) por produtos lenhosos industriais (matérias-prima renováveis de baixo consumo de energia).

O´Connor; Dangerfield (2004) relatam que o sequestro de carbono em produtos de madeira e em florestas é uma área complexa e controversa de estudo devido à perspectiva de estimar e modelar o fluxo mundial de carbono. Embora ainda não sejam solucionados os métodos de contabilidade para medidas exatas, não há dúvidas que os produtos de madeira são incomparáveis entre os materiais estruturais principais, visto que eles isolam mais carbono do que é libertado durante a produção destes.

1.1 A utilização de peças roliças

Devido às várias possibilidades da utilização da madeira, tanto na construção civil, bem como no setor industrial, as peças estruturais roliças (estacas, escoramentos, postes, colunas etc.) representam alguns dos mais eficientes usos dos recursos florestais naturais, requerendo o mínimo de processamento entre o abate da árvore e a venda do produto estrutural, em razão destes serem relativamente econômicos para produzir, comparados com madeira laminada colada, aço e produtos de concreto, eles são comumente utilizados por toda parte nos Estados Unidos, (WOLFE, 1999).

Como exemplo da viável utilização de peças roliças, Costa; Watai (1992), avaliando a produção de cruzetas em madeira de reflorestamento, relata que as cruzetas roliças apresentaram bons resultados mecânicos e custos bem inferiores em relação aos das cruzetas serradas.

Segundo Howard (2001), a produção industrial de diversos produtos de madeira roliças nos Estados Unidos[1], os quais incluem postes de reforço, postes e estacas, mourões, dormentes lavrados, escoramentos de minas, cavilhas e outros produtos, no ano de 1999 foi estimado em 13,7 milhões de metros cúbicos, correspondendo a um consumo per capta de 0,050 metros cúbicos. A Figura 1.1 mostra a série histórica da produção dos produtos de peças roliças no período de 1965 a 1999, respectivamente.

---

[1] O consumo de todos os produtos de madeira (peças estruturais, madeira compensada e laminados, produtos à base de polpa de madeira, troncos, polpa de cavaco e madeira para combustível) nos Estados Unidos em 1999 foi de 656,8 milhões de metros cúbicos, com produção de 497,6 milhões de metros cúbicos – (HOWARD, 2001*)*.

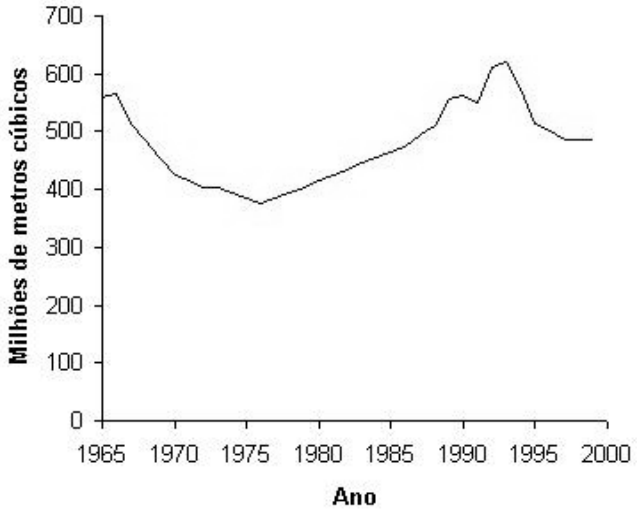

FIGURA 1.1 – Série histórica de produção e consumo de produtos de peças roliças nos Estados Unidos – (HOWARD, 2001).

Internacionalmente tem-se a ASTM D25 - Standard specifications for round timber piles, que especifica as características físicas de estacas roliças de madeira. Segundo Wolfe (2005), a ASTM D25 foi a primeira norma publicada para peças roliças, em 1915. Com exceção de nós permissíveis maiores e exigências mais tolerantes para veios inclinados dispostos para postes, esta norma era idêntica à primeira especificação de postes proposta pelo Bell Labs como norma nacional 15 anos mais tarde.

No Brasil, a utilização de estacas de madeira é normatizada apenas pela NBR 6122 – Projeto e execução de fundações, a qual se dedica às descrições das características deste tipo de estaca apenas em metade de uma página. Até mesmo a NBR 7190/1997 – Projeto de estruturas de madeira, não normatiza a utilização das peças roliças. Algo um tanto quanto contraditório em um país de grande potencial madeireiro.

1.2 Os postes de madeira

Segundo dados de BRASIL (2004), cerca de 2 milhões de domicílios rurais no Brasil não são providos de energia elétrica, representando 80% do total nacional da exclusão elétrica, o que corresponde a 10 milhões de brasileiros vivendo no meio rural sem acesso a esse serviço público, e aproximadamente 90% dessas famílias possuem renda inferior a 3 salários mínimos.

O Decreto nº 4.873, de 11 de novembro de 2003, do Governo Federal, instituiu o Programa LUZ PARA TODOS, destinado a propiciar até, o ano de 2008, o atendimento em

energia elétrica à parcela da população brasileira do meio rural que ainda não possui acesso a este serviço. Para alcançar seus objetivos e otimizar a utilização dos recursos públicos, o programa prioriza o atendimento com tecnologia de rede de baixo custo e, de forma complementar, com sistemas de geração descentralizada com rede isolada e sistemas individuais. Para as redes aéreas de distribuição rural, os agentes executores deverão priorizar tecnologia, materiais e equipamento de redes que resultem em redução do custo das redes, tendo como componentes citados as cruzetas e postes de madeira, BRASIL (2004).

Segundo Sales et at. (2002), a produção de postes de madeira para eletrificação e telefonia está entre as aplicações estruturais de significativa importância no Brasil e várias concessionárias de energia elétrica continuam utilizando quantidades significativas de postes de madeira, principalmente em áreas rurais.

Sales et al. (2003), relatam que no Estado de São Paulo a companhia ELEKTRO possui aproximadamente 600.000 postes de madeira preservada instalados e, no Rio Grande do Sul, a empresa Rio Grande Energia – RGE possui em torno de 500.000 unidades instaladas.

Conforme Geraldo (2001), países pobres em floresta, porém ricos em cimento e ferro, tal como a Inglaterra, preferem os postes de madeira tratada aos de concreto e aço, devido à economia que proporcionam na construção de redes rurais de energia. Nos Estados Unidos, 99% dos postes são de madeira tratada, utilizados na distribuição de energia elétrica para tensões de até 345 kV e na rede de telefonia, sendo que em 6 milhões de unidades por ano, um milhão de peças são importadas. No Brasil, que é um país de evidente vocação florestal, por provável desinformação, a demanda anual é da ordem de 250 mil unidades, (GERALDO, 2001).

Por mais de 140 anos, os postes de madeira têm provido uma solução a baixo custo para a utilização em redes de telecomunicações e energia elétrica nos Estados Unidos. No fim da Segunda Guerra Mundial, a produção de postes de madeira havia crescido para 8,1 milhões e seu uso havia se tornado uma importante influência no crescimento da infra-estrutura do país, (WOLFE; KLUGE, 2005).

Durante todo o Século XX, a madeira dominou o mercado de postes nos Estados Unidos. Procedimento de projetos para estruturas tem evoluído para compensar a alta variabilidade relativa da resistência dos postes de madeira. Antes de 1990, contudo, a madeira perdeu uma importante parcela do mercado de linhas de transmissão por materiais fabricados competitivos (aço, concreto, polímeros reforçados com fibras), (WOLFE, 2005).

Contrariamente ao Brasil, onde os postes de madeira são utilizados como membros singulares em linhas de distribuição, nos Estados Unidos segundo Green; Hernandez

(1998), estes são utilizados em linhas de transmissão na forma singular, ou como componente de estruturas mais complexa.

Obino (1987) define os postes de madeira tratados como um material de alta qualidade, baixo custo e bom desempenho, e que sua consagração somente acontecerá quando houver uma conscientização da importância de todas as etapas de sua fabricação.

Até mesmo o Japão, que possui pequena área territorial, produz mais postes de madeira tratada anualmente que o Brasil, Figura 1.2, este possuindo grande área territorial e abundância em recursos florestais, (REVISTA DA MADEIRA, 2001).

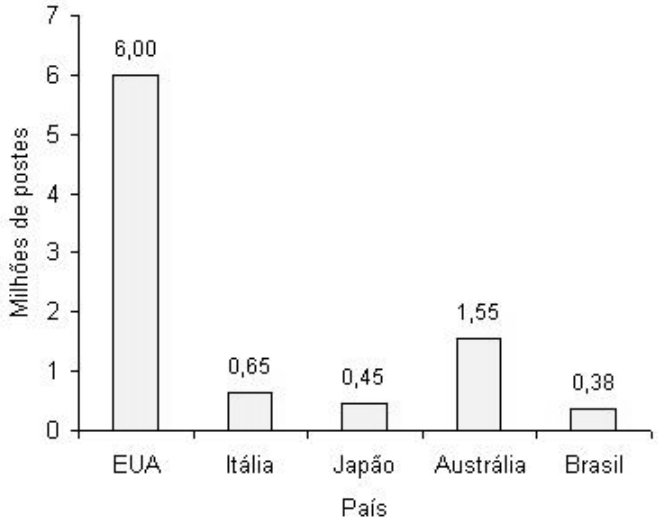

FIGURA 1.2 – Produção anual de postes de madeira tratada em vários países - (REVISTA DA MADEIRA, 2001)

As vantagens na utilização dos postes de madeira são citadas pela Revista da Madeira (2001), considerando os postes de eucalipto:

- Regulador de preço: atuam como reguladores de preços no mercado nacional. Quando as empresas de distribuição diminuíram a utilização de postes de madeira, os preços dos postes de concreto subiram rapidamente;
- Redutor de custos: quando os preços dos postes de madeira se apresentam inferiores ao de concreto, tais diferenças se refletem quase que na mesma proporção no custo das linhas de transmissão;
- Ecológico: a utilização de postes preservados, advindos de madeira de reflorestamento, representa atualmente um importante fator ecológico, como produto renovável, assim como estratégico de conservação de energia;
- Desempenho elétrico: como a madeira possui baixa condutividade elétrica, há uma redução sensível dos riscos de acidentes e desligamento por fugas ou descargas elétricas, devido suas características dielétricas;

- Nível de isolamento: as estruturas de madeira suportam tensões de impulso atmosférico, no mínimo, 51% acima das estruturas metálicas;
- Transporte: os postes de madeira pesam em torno de 60% menos que o de concreto equivalente, trazendo uma redução de custos no transporte;
- Choque mecânico: em função de sua elevada elasticidade, os postes de madeira apresentam maior resistência aos choques mecânicos, quando comparados a outros tipos de postes;
- Instalação: por ser um material leve, pode ser arrastado por animais, morro acima e mata adentro e instalados por operários sem equipamentos especiais e sem riscos de se romper; os postes de concreto não podem ser arrastados e necessita de caminhão "munck", exigindo-se cuidados extremos no seu manuseio;
- Acessórios: as estruturas de madeira necessitam de um número menor de acessórios (ferramentas, travessas, etc), proporcionando economia de escala, podendo chegar a relação 1:12, quando comparados com a utilização de postes de concreto;
- Performance: considerando o poste de madeira de 400 daN, suporta tal esforço em qualquer direção, enquanto o poste de concreto duplo T suporta essa carga apenas na direção dos fios e somente 200 daN, na perpendicular. Se a linha não for reta e plana, a situação para os postes de concreto se agrava, exigindo-se estais ou adensamento;

José Carlos et al. (1990) citam que dentre as espécies de madeira disponíveis para a fabricação de postes de madeira preservada, as do gênero *Eucaliptus* mereceram a preferência por suas qualidades, sendo elas:

- Alta resistência mecânica;
- Alburno facilmente impregnável com soluções preservativas;
- Crescimento rápido;
- O cerne de algumas espécies possui alta resistência ao apodrecimento;
- Fácil remoção da casca;
- Podem ser cultivadas em praticamente todas as regiões do país;
- Crescem bem, mesmo em terrenos de baixa fertilidade, incluindo terrenos arenosos (terreno de praia) e terras esgotadas;
- Não exige muitos cuidados, nem tratos culturais de custo elevado;
- Pode ser manuseado e transportado de forma rústica, incluindo deixar cair de cima do caminhão, arrastar com juntas de animais, instalar pelo sistema de mutirão, etc;
- Durante a secagem e a fabricação do poste, de uma forma geral, não ocorre ataque biológico que comprometa seriamente a qualidade da madeira, nenhum tratamento profilático é necessário a não ser em ocasiões muito chuvosas;
- São relativamente poucas as pragas que atacam a árvore de eucalipto.

Pertile et al. (1990), considerando a grande utilização dos postes de madeira nos países desenvolvidos (USA, Rússia, Austrália, Alemanha, etc), fazem a seguinte pergunta, ainda sem resposta: “(...) Porque um país pobre como o Brasil usa, em Estados inteiros da Federação, somente postes de concreto, bem mais caros que os de madeira (...)? Qual o motivo de nós brasileiros gastarmos mais que os países ricos?”

1.3 O estudo da durabilidade e patologia das estruturas de madeira no Brasil

Um bom indicativo da atividade científica em uma sociedade são os Simpósios e Congressos Científicos, nacionais e internacionais. Nestes, são discutidos novas teorias e técnicas, sobre o tema do qual tal evento trata.

No campo das Engenharias, e tendo ênfase na Engenharia Civil, alguns dos mais conhecidos Congressos Nacionais de destaque podem ser citados:

- EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira;
- COBRACON – Congresso Brasileiro do Concreto;
- Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental;
- COBENGE – Congresso Brasileiro do Ensino de Engenharia (todas as áreas);

Assim, da mesma forma, os artigos publicados em um dado evento também pode ser um bom indicativo dos temas desenvolvidos e estudados por tal sociedade científica.

O EBRAMEM, através dos artigos nele publicados e apresentados, mostra os vários temas desenvolvidos e estudados pelos pesquisadores da área das Estruturas de Madeira, durantes os seus atuais 22 anos de realização. Como indicação da atividade cientifica neste campo do conhecimento, a Tabela 1.1 mostra o número de artigos publicados nos onze EBRAMEM´s realizados.

Na área temática “Durabilidade, Patologias e Recuperação Estrutural”, a Tabela 1.1 mostra o número de artigos publicados no EBRAMEM.

TABELA 1.1 – Resumo da atividade científica publicada pelo EBRAMEM até 2008

Encontro	Ano	Áreas temáticas	Artigos publicados	
			Geral	Durabilidade, patologias e recuperação estrutural[2]
I	1983	6	47	0
II	1986	7	60	1
III	1989	-	61	0
IV	1992	-	106	3
V	1995	10	100	0
VI	1998	9	144	1
VII	2000	9	140	2
VIII	2002	13	202	8
IX	2004	17	224	6
X	2006	14	223	11
XI	2008	19	245	5
	Total		1552	37

Ao se comparar o número total de artigos publicados (1552 trabalhos), nas onze edições do EBRAMEM com o número de artigos publicados na área temática de "Durabilidade, Patologias e Recuperação" (37 trabalhos) verifica-se uma pequena atividade cientifica nesta área, devido estes representarem apenas 2,4% dos trabalhos publicados. Esta pequena atividade acarreta em um baixo desenvolvimento técnico em tal área. Desta forma, uma das principais funções da atividade acadêmica, que é a geração de conhecimento para o meio técnico e consequentemente sociedade civil, fica prejudicada.

Apesar da pequena atividade de pesquisa no tema em questão, os Encontros VIII e IX mostraram um aumento substancial na quantidade de trabalhos publicados, totalizando 14 artigos, mais que o publicado nos sete eventos anteriores. Além disso, a partir do EBRAMEM IX, realizado na cidade de Cuiabá-Mato Grosso, os artigos já foram apresentados em uma área temática exclusiva, o que anteriormente não era. No EBRAMEM X, realizado na cidade de São Pedro-SP em julho de 2006, a submissão de artigos considerou 14 temas, e novamente sendo um dedicado à patologia, recuperação e durabilidade, com 11 artigos publicados nesta área temática, mostrando uma maior atenção da comunidade acadêmica ao assunto nestes últimos anos.

[2] Ver no Anexo A, a indicação dos artigos publicados;

Entretanto, no último encontro, realizado em julho de 2008 em Londrina, apesar do tema ser tratado em um tópico exclusivo, houve uma queda no número de artigos publicados.

Um dos vários exemplos da contribuição acadêmica à sociedade técnica nacional são as revisões e as atualizações das normas técnicas, pois nelas são incluídos os novos conceitos e práticas desenvolvidas pela atividade acadêmica. Sem esta atividade, o processo de atualização das normas é totalmente prejudicado, não sendo possível corrigir erros, melhorar processos e vislumbrar novos horizontes.

A NBR 7190/1997, no item 10.7, descreve a madeira como um material orgânico sujeito à biodeterioração, fazendo as seguintes considerações:

> No desenvolvimento do projeto de uma estrutura de madeira, é preciso assegurar uma durabilidade mínima compatível com sua finalidade e com o investimento a ser realizado".
>
> Os componentes de uma construção de madeira podem estar expostos a diferentes classes de riscos de biodeterioração em função dos organismos xilófagos presentes no local e das condições ambientais que possam favorecer o ataque.
>
> Na execução das estruturas de madeira, devem ser empregadas espécies que apresentem boa resistência natural a biodeterioração ou que apresentem boa permeabilidade aos líquidos preservativos e que sejam submetidas a tratamentos preservativos adequados e seguros para as estruturas.

Porém, apesar da norma considerar a questão da durabilidade mínima e da escolha das espécies, esta norma ainda não prevê critérios para tais decisões, implicando assim em uma avaliação subjetiva destas questões por parte do profissional responsável pelo desenvolvimento do projeto.

Assim, podem ser questionados para uma futura revisão de norma:

1. *O que é uma durabilidade mínima compatível? Como avaliá-la? Como determiná-la?*
2. *Quais as espécies que apresentam boa resistência natural à biodeterioração ou boa permeabilidade aos líquidos preservativos?*

São falhas deste tipo, que estudos de durabilidade, patologias e recuperação devem abordar.

1.4 Justificativa do trabalho

Na Austrália, estima-se que existam 10 milhões de postes de madeira em serviço, com um valor de rede elétrica de $ 10 bilhões, e anualmente os três Estados do leste

consomem 130.000 peças, com custo total de substituição de aproximadamente $ 26 milhões, (CREWS; HORRIGON; BOUGHTON, 1998).

Morrel (1996) comenta que um programa de manutenção de postes resulta no aumento da vida útil dos postes em serviço. A NEW YORK STATE ELETRIC & GAS CORP. utiliza um tamanho médio de postes de madeira cravados, com custo de substituição de US$ 1,3 bilhões, com estimativa anual de economizar US$ 53 milhões, devido aos resultados do programa de manutenção. Continua descrevendo vários métodos de tratamento dos postes na região do afloramento, porém não cita a metodologia de reforço estrutural.

Bottazzo (1998), avaliando o sistema de manutenção de poste de madeira da CESP - COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, conclui que:

- A manutenção de um poste de madeira apresenta um custo de apenas 13% em relação ao custo de substituição do poste;
- Os benefícios podem ser ainda maiores se considerar os lucros cessantes decorrentes da desenergização do circuito para a substituição do poste;
- A manutenção evita os grandes desembolsos, consequentes da substituição, possibilitando que sejam efetuadas paulatinamente no que consiste em uma grande vantagem nestas épocas de escassez de recursos.

A Empresa LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A. (1994), concessionária de distribuição de energia no Estado do Rio de Janeiro, ao realizar um estudo piloto de manutenção de postes de madeira, e considerando uma vida útil do poste de 42 anos, previu um benefício anual de R$ 2.200.000,00, já sendo considerado também o lucro cessante decorrente do desligamento do trecho da linha de distribuição aérea.

Não se pode permitir que um material nobre e renovável como a madeira, seja desprezado e deixado de lado em um momento que a sociedade mundial tem-se voltado cada vez mais para a sustentabilidade. A possibilidade de uma maior e melhor utilização racional da madeira como material de construção, vem ao encontro da necessidade da obtenção conhecimento de sistemas e metodologias para a execução de reparos e reabilitação de estruturas deterioradas, (FREITAS; CALIL JÚNIOR, 2004).

1.5 Objetivos do estudo

A seguir são descritos os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.5.1 Objetivos gerais

Como objetivo geral do trabalho tem-se:

- Contribuir para a inserção da metodologia de perfuração controlada na avaliação de postes e de estruturas de madeira, no meio técnico-científico nacional.

1.5.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Propor a simplificação do índice climático proposto por Leicester et al. (2003);
- Propor um modelo de índice climático ao Estado de São Paulo;
- Utilizar a perfuração controlada como nova metodologia de inspeção de poste de madeira;
- Verificar a existência de variáveis que contribuam para a degradação dos postes de madeira em serviço.

2 DURABILIDADE, CONFIABILIDADE E PATOLOGIAS

Nenhum material é inerentemente durável devido as interações ambientais, e micro estruturais; consequentemente as propriedades dos materiais mudam com o decorrer do tempo, admitindo-se que este atingiu o Estado Limite de Stilização, quando suas propriedades sob dadas condições de uso deterioram a um ponto que a continuação do uso deste material é considerada como insegura ou antieconômica, (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Manzin; Vezzoli (2005) definem a vida útil como a medida do tempo de um produto e seus materiais, em que nas condições normais de uso (isto é, não posto em condições de *stress* além dos limites aceitáveis) podem durar conservando as próprias capacidades (serventia, rendimento, etc.) e o próprio comportamento, em um nível padrão preestabelecido.

Segundo Valle et al. (2006), hoje em dia é cada vez mais evidente a preocupação com a qualidade e durabilidade das edificações, com as diretrizes de projeto e execução, prescrevendo cuidados que aumentam as probabilidades de conservação da integridade física e mecânica das construções pelo período previsto para sua vida útil. Para tal, a realização de inspeções periódicas, que permitem a identificação de pontos de degradação no ciclo inicial, conduz a uma intervenção mais eficiente no ambiente construído. Entretanto, a prática de tais procedimentos de manutenção ainda não se tornou um hábito para a humanidade, o que se reflete no mau estado de conservação das edificações em geral, (VALLE et al., 2006).

No começo da década de 1980, surge o conceito de vida útil, perante a necessidade de estimar, desde o projeto, o tempo em serviço de uma estrutura de concreto armado, devido este bem, como todos os outros materiais, possuir uma duração limitada em condições aceitáveis, com implicações econômicas, tecnológicas e sociais, Borges (1998).

A ABNT, considerando edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, no Projeto de Norma 02:136.01.001:2002[1], define alguns conceitos importantes, porém ainda não normatizados, tais como desempenho, vida útil, vida útil de projeto, vida útil residual e vida total. A representação destes conceitos é feita pela Figura 2.1.

[1] Associação Brasileira de Normas Técnicas – Projeto 02:136.01.001:2002 – Desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimento – Parte 1: Requisitos gerais.

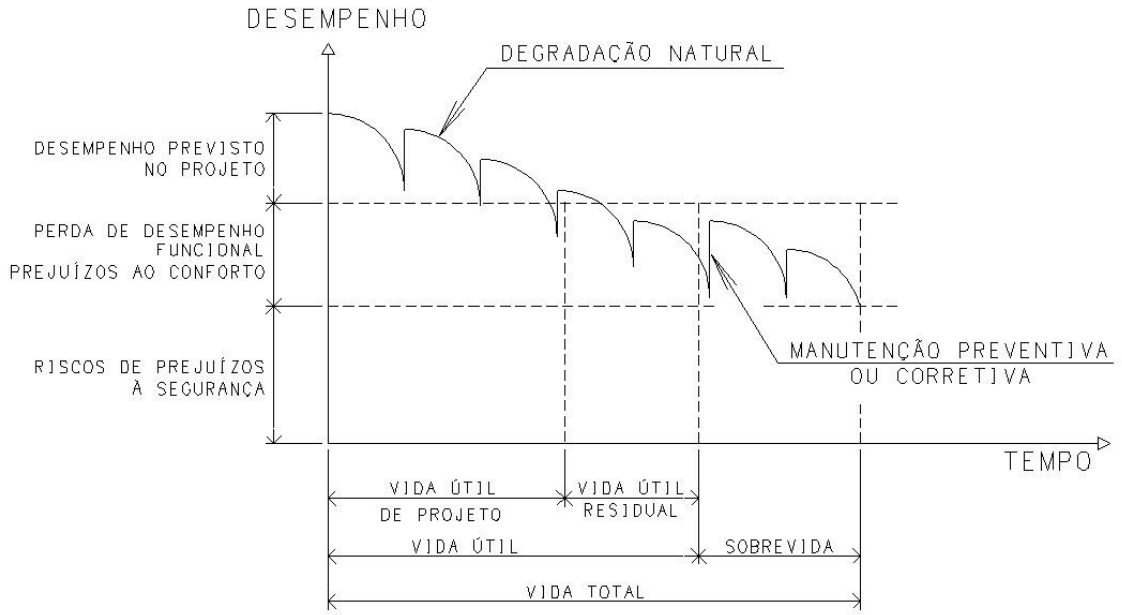

FIGURA 2.1 – Desempenho ao longo do tempo de um elemento

- **Desempenho**: comportamento em uso de um produto, frente às condições de exposição;
- **Durabilidade**: capacidade de o produto conservar, ao longo do tempo, propriedades compatíveis com a utilização prevista, sob condições de instalação, operação e manutenção especificadas pelo seu produtor e/ou fornecedor. Para a madeira, propriedade de resistir, em maior ou menor grau, ao ataque de agentes destruidores, sob condição natural de uso.
- **Vida útil**: a partir da disponibilização ao consumidor, período de tempo durante o qual o produto pode ser utilizado sob condições satisfatórias de segurança, saúde e higiene. A partir do atual estado da arte, é impossível estabelecer com precisão esse período. Recorrendo-se ao conhecimento disponível sobre os agentes agressivos, os diferentes processos degenerativos e as características físicas e químicas dos materiais constituintes de um produto, pode-se apenas estabelecer estimativas tecnicamente fundamentadas da vida útil de projeto.
- **Vida útil de projeto**: a partir da disponibilização ao consumidor, período estimado de tempo em que o componente, elemento, instalação ou sistema construtivo atende a todos os critérios previstos nesta norma, no respectivo nível de desempenho informado pelo fornecedor, devendo-se para tanto cumprir programa de manutenção por ele especificado. Para o atendimento à vida útil de projeto, mantidas as condições de exposição inicialmente presentes, o produto deverá ser aplicado, utilizado e mantido em estrita obediência às especificações do fornecedor;

- **Vida útil residual**: período de tempo, após a vida útil de projeto, em que o componente, elemento, instalação ou sistema construtivo vai apresentando decréscimo continuado do desempenho em função do uso e/ou do envelhecimento natural. Nesta fase, onde ainda são mantidas condições satisfatórias de segurança, saúde e higiene, para retomarem-se níveis adequados de estanqueidade, durabilidade, conforto térmico e acústico etc, há necessidade de manutenções e reformas mais dispendiosas;
- **Vida total**: período de tempo que compreende a vida útil de projeto, a vida útil residual e uma sobrevida na qual passa a existir a possibilidade de que os níveis de segurança comecem a ser perigosamente afetados;

O desempenho de um material ou elemento, em função da degradação natural devido ao meio-ambiente, diminui ao longo do tempo; porém, com a realização de manutenções preventivas ou corretivas, tal desempenho é levado para níveis acima do estado anterior. Entretanto, a degradação natural não é cessada, desta forma o desempenho em questão novamente entra em declínio, Figura 2.1.

Segundo Fusco (1976a), tendo em vista evitar-se que reações psicológicas dos usuários das construções levem a situações de risco de danos pessoais, como por exemplo, às situações de pânico coletivo, deve entender-se por estrutura segura aquela que atenda aos seguintes requisitos intuitivos de segurança:

- Durante a vida útil, a estrutura deve garantir a permanência das características da construção a um custo razoável de manutenção;
- Em condições normais de utilização, a construção não deve ter aparência que cause inquietação aos usuários ou ao público em geral, nem apresentar falsos sinais de alarme que lancem suspeitas sobre sua segurança;
- Em situações não previstas de utilização ou de manutenção, a estrutura deve apresentar sinais visíveis de advertência de eventuais estados perigosos.

2.1 Confiabilidade e segurança

Aggarwal (1993) relata que o conceito de confiabilidade tem sido interpretado de muitas maneiras em numerosos trabalhos, sendo que a definição que tem sido aceita por muitas autoridades contemporâneas em confiabilidade é dada pela *Electronics Industries Association (EIA)*:

> A confiabilidade de um item (um componente, um sistema complexo, um programa de computador ou um ser humano) é definida como a probabilidade de executar seu propósito adequadamente para o período de tempo pretendido sob operação e condições ambientais encontradas.

A noção intuitiva de segurança dos sistemas materiais está ligada à idéia de sobrevivência aos riscos inerentes à sua utilização normal. Assim, uma estrutura é considerada segura quando existe certa garantia de que durante a sua vida útil não serão atingidos estados de desempenho patológicos. A idéia de segurança está, portanto, intimamente ligada a um prazo de duração da vida útil do sistema, pois à medida que aumenta esse prazo também cresce o risco de aparecimento de estados excepcionais de utilização, bem como o risco de deterioração do próprio sistema, (FUSCO, 1976a).

Os estados de desempenho, nos quais surgem danos estruturais que caracterizam um esgotamento da capacidade de suporte da estrutura, são designados por estados de ruína, e a utilização ulterior dessa construção somente será possível após a realização de obras de reparo, de reforço, ou mesmo de substituição da estrutura, (FUSCO, 1976a).

Um sistema é confiável quando existe uma garantia razoável de sua permanência em condições de utilização normal. A confiabilidade do sistema é a garantia de sua permanência em serviço. Frequentemente, a ruína está associada ou às forças da natureza, contra as quais não há controle operacional possível, ou à deterioração dos materiais, cuja constatação é impossível. Desse modo, admiti-se que sempre existe certa probabilidade de ruína.

Considerando-se a aleatoriedade das ações, elas ou os esforços delas decorrentes podem ser representadas de forma simbólica pela Eq. 2.1:

$$S = S(X_1, X_2, \dots X_m; C_X) \tag{2.1}$$

onde as variáveis X_i (i = 1, 2,..., m) medem as grandezas aleatórias que afetam o nível de solicitação, simbolizado por S, e onde C_x simboliza um conjunto de constantes e de funções determinísticas que relacionam X_i a S, Fusco (1976b).

De forma análoga, a capacidade resistente da estrutura pode ser posta sob a forma simbólica:

$$R = R(R_1, R_2, \dots R_m; C_Y) \tag{2.2}$$

onde as variáveis Yj (j = 1, 2,..., m) medem as grandezas aleatórias que afetam as capacidade resistente, simbolizada por R, e onde C_y simboliza um conjunto de constantes e de funções determinísticas que relacionam Y_j a R, Fusco (1976b).

Para a efetiva determinação das condições de ruínas, tanto o nível de solicitações S quanto a capacidade resistente R devem ser medidos nas mesmas variáveis Z_p (p = 1, 2,...), sendo

$$Z_{S,p} = Z_P(X_1, X_2, \dots X_m; C_X) \tag{2.3}$$

$$Z_{R,p} = Z_P(Y_1, Y_2, \dots Y_m; C_Y) \tag{2.4}$$

onde “p” é número de efeitos estruturais de interesse para a segurança.

Admitindo-se que R e S sejam determinados por uma única variável Z e que a condição de ruína seja expressa por

$$Z_R \leq Z_S \tag{2.5}$$

a probabilidade de ruína será dada por

$$P_{ruína} = P(Z_R \leq Z_S) \tag{2.6}$$

que no caso geral pode ser posta sob a forma simbólica

$$P_{ruína} = P(R \leq S) \tag{2.7}$$

Conhecidas as funções de densidade de probabilidade f(S) = f(Z_S) e f(R) = f(Z_R), a probabilidade de que Z_R seja menor ou igual a certo valor z é dado pela Eq. 2.8, Figura 2.2.

$$P(Z_R \leq z) = \int_{-\infty}^{z} f_R(z)dz \tag{2.8}$$

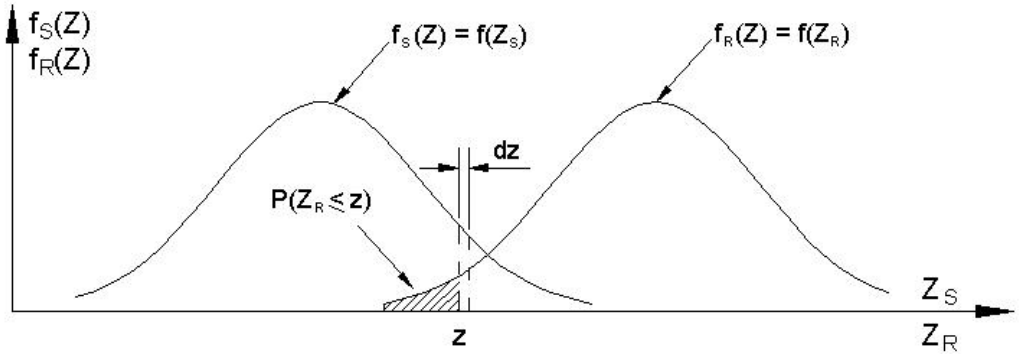

FIGURA 2.2 – Probabilidade de ruína – (FUSCO, 1976b)

2.2 Patologia e terapia

Helene (1992), ao tratar sobre reforço de estruturas de concreto, faz uma importante contribuição ao meio técnico, definindo termos no ramo das patologias das construções.

a) Patologia: parte da Engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema.

- **Sintomas**: salvo raras exceções, os problemas patológicos apresentam manifestação externa característica, a partir da qual se pode deduzir qual a natureza, origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, assim como se pode estimar suas prováveis consequências. Esses sintomas, também denominados lesões, danos, defeitos ou manifestações patológicas, podem ser descritos e classificados, orientando um primeiro diagnóstico, a partir de minuciosas e experientes observações visuais;
- **Mecanismo**: todo problema patológico, ocorre a partir de um processo, de um mecanismo, podendo ser físico, químico, biológico ou mecânico, e até mesmo ser a interação de dois ou mais destes. Conhecer o mecanismo do problema é fundamental para uma terapêutica adequada;
- **Origem**: o processo de construção e uso pode ser dividido em cinco grandes etapas: planejamento, projeto, fabricação de materiais e componentes fora do canteiro, execução propriamente dita e uso, sendo esta última etapa mais longa, que envolve a operação e manutenção das obras civis. Se por um lado, as quatro primeiras etapas envolvem um período relativamente curto – em geral menos de dois anos – por outro lado, as construções devem ser utilizadas durante períodos longos. Assim, os problemas patológicos só se manifestam após o início da execução propriamente dita. Normalmente ocorrem com maior incidência na etapa de uso. Entretanto, uma elevada porcentagem das manifestações patológicas tem origem nas etapas de planejamento e projeto. As falhas de planejamento ou de projeto são, em geral, mais graves que as falhas de qualidade dos materiais ou de má execução, Figura 2.3.

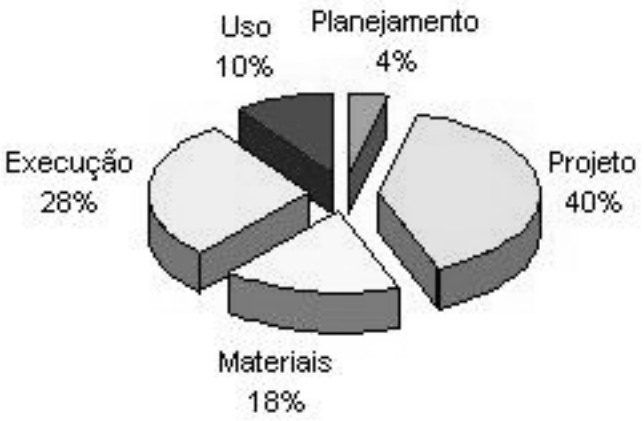

FIGURA 2.3 – Origem dos problemas patológicos com relação as etapas de produção e uso das obras civil – (GRUNAU, 1981 apud HELENE, 1992)

- **Causas**: os agentes causadores dos problemas patológicos podem ser vários: cargas, variação da umidade, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao material, agentes biológicos, incompatibilidade de materiais, agentes atmosféricos e outros;
- **Consequências**: um diagnóstico se completa com algumas considerações sobre as consequências do problema no comportamento geral da estrutura, ou seja, um prognóstico da questão. De forma geral, costuma-se separar as considerações em dois tipos: as que afetam as condições de segurança (associadas ao Estado Limite Último) e as que comprometem as condições de higiene, estética, etc., ou seja, as denominadas condições de serviço e funcionamento da construção (associadas aos Estados Limites de Serviço). Os problemas patológicos são evolutivos e tendem a se agravar com o passar do tempo, além de acarretarem outros problemas associados ao inicial;

b) Terapia: estuda a correção e a solução desses problemas patológicos. Para obter êxito nas medidas terapêuticas, é necessário que o estudo precedente, o diagnóstico da questão, tenha sido bem conduzido.

- **Procedimento:** a escolha dos materiais e da técnica de correção a ser empregada depende do diagnóstico do problema, das características da região a ser corrigida e das exigências de funcionamento do elemento que vai ser objeto da correção

2.3 O custo da durabilidade

Na busca da segurança estrutural é preciso salientar um fato importante que ocorre com todos os materiais estruturais. As catástrofes nunca foram

> provocadas pela etapa de análise de projeto, isto é, as catástrofes nunca decorreram de erro de cálculo estrutural. As catástrofes sempre decorreram de deficiência de concepção de detalhamento ou manutenção das estruturas, (FUSCO, 1989a).

Segundo Kropf (1998), de todas as estruturas de madeira que tem desaparecido com o tempo, muito poucas falharam devido a erros estruturais, mas muitas têm degradado progressivamente como consequência de ataque por fungos, não sendo considerados os térmitas devido estes não existirem na Suíça.

Tecendo comentários de vantagens e desvantagens quanto à durabilidade em função de projetos e tratamentos preservativos, Kropf (1998) propõe estratégias para aumentar a durabilidade das estruturas de madeira, sendo elas:

- Melhores detalhes de projetos, seguidos por uma cuidadosa execução;
- Aplicação de camadas superficiais de preservativos químicos, quando apropriados;
- Prover manutenção periódica e limpeza, para manter as características de durabilidade em toda a estrutura.

Considerando a vida útil inteira, a madeira não é mais cara para a manutenção que outros materiais, mas os reparos devem começar alguns anos mais cedo em relação ao aço ou concreto, (KROPF, 1998).

Helene (1992) afirma que as correções serão mais efetivas, mais fáceis de executar e muito mais baratas quando mais cedo executadas. Continuando, Helene (1992) cita a chamada "Lei de Sitter"[2], que mostra um custo crescente em cada fase da estrutura segundo uma progressão geométrica (de razão 5), para as estruturas de concreto. Tal lei pode ser descrita e exemplificada conforme segue:

- **Projeto:** toda medida tomada em nível de projeto com o objetivo de aumentar a proteção e a durabilidade da estrutura, implica num custo que pode ser associado ao número 1 (um);
- **Execução:** toda medida extra-projeto, tomada durante a execução propriamente dita, incluindo nesse período a obra recém-construída, implica num custo 5 (cinco) vezes superior ao custo que teria sido acarretado se esta medida tivesse sido tomada na fase de projeto, para obter-se o mesmo "grau" de proteção e durabilidade da estrutura;
- **Manutenção preventiva:** toda medida tomada com antecedência e previsão, durante o período de uso e manutenção da estrutura, pode ser associada a um custo 5 (cinco) vezes menor que aquele necessário à correção dos problemas gerados a partir de uma não intervenção preventiva tomada como antecedência à manifestação explicita de patologias. Ao mesmo tempo estará associada a um custo 25 (vinte e cinco) vez superior àquele que

[2] SITTER, W.R. Costs for service life optimization. The "law of fives" In: CEB-RILEM. Durability of concrete structures. Proceedings of the international workshop held in Copenhagem, on 18-20 May 1983. Copenhagen, 1984. (Workshop Report by Steen Rostam).

teria acarretado uma decisão de projeto para obtenção do mesmo “grau” de proteção e durabilidade da estrutura;

- **Manutenção corretiva:** correspondem aos trabalhos de diagnóstico, prognóstico, reparo e proteção das estruturas que já apresentam manifestações patológicas, ou seja, correção de problemas evidentes. A estas atividades pode-se associar um custo de 125 (cento e vinte e cinco) vezes superior ao custo das medidas que poderiam ter sido tomadas no momento do projeto e que implicariam num mesmo “grau” de proteção e durabilidade que se estime da obra a partir da correção.

Desenvolvido tendo como referência as estruturas de concreto, este estudo provavelmente não representa as mesmas proporções de cada fase (projeto, execução, manutenções preventivas e corretivas) para as estruturas de madeira, e até mesmo para as estruturas de aço, visto que cada material possui suas próprias características para tais fases. Entretanto, mostra que independentemente do material utilizado, quanto mais se demorar a vislumbrar uma maior durabilidade de uma estrutura, maior será o custo para tal.

3 DURABILIDADE, DEGRADAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA MADEIRA

A natureza biológica da madeira a torna suscetível a agressões por fungos e insetos; entretanto, a secagem, a preservação e a associação a outros materiais nos locais das construções mais sujeitos a ataques de outros, tornam as estruturas de madeira tão duráveis quanto as de aço ou concreto, desde que sua concepção respeite certas regras de proteção do material, (FUSCO, 1989).

Enquanto se pensa que a madeira tem uma probabilidade de vida útil curta devido ao risco de fogo ou biodegradação, O´Connor; Dangerfield (2004) obtiveram resultados demonstrando que edifícios de madeira possuem os períodos de vida útil maior. Ao estudarem os benefícios ambientais das construções de madeira, foram obtidos resultados surpreendentes demonstrando que a maioria dos edifícios de madeira demolidos são mais velhos que 75 anos, enquanto mais da metade de todos os edifícios de concretos, demolidos, entrou na categoria entre 26-50 anos, Figura 3.1.

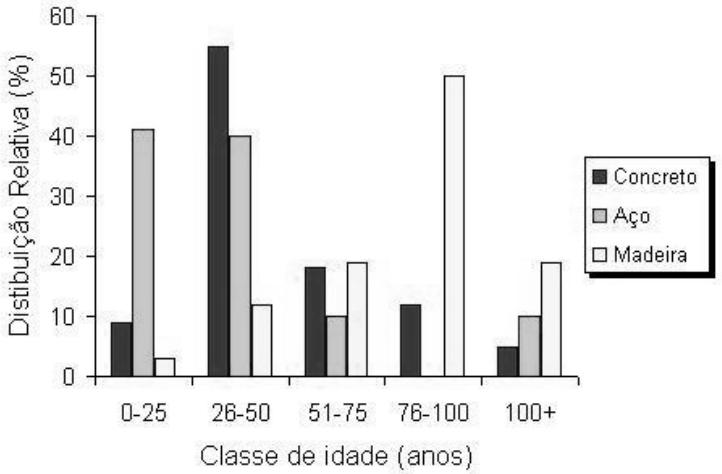

FIGURA 3.1 – Distribuição de edifícios demolidos por material estrutural – (O´CONNOR; DANGERFIELD, 2005)

A vida útil de uma madeira é determinada, de uma parte, por aspectos inerentes a sua natureza e de outra, pelas condições especiais de serviço, (PRID, 1988).

3.1 Durabilidade natural da madeira

Desde o momento em que se corta uma árvore, tornando-se um tecido morto, ela é apetecida por diversos organismos que vão à ela, seja em busca de alimento ou de um lugar que lhes proporcione seu ciclo de vida. Qualquer que seja seu objetivo, a presença de um organismo estranho na madeira, em todos os casos, produz uma deterioração que pode influenciar em maior ou menor grau em sua vida útil, (PRID, 1988).

A madeira apresenta três principais componentes: celulose, hemicelulose e lignina; e em menores quantidades estão presentes materiais nitrogenosos, pectina, amido, açúcares, havendo na natureza diversos organismos capazes de utilizar, direta ou indiretamente, aqueles componentes como fonte de energia e com isso provocar a biodeterioração[1] da madeira, (CAVALCANTE, 1982).

Segundo Castro Silva (2003), o alburno é a parte da madeira que apresenta materiais nutritivos armazenados, o que torna mais susceptível ao ataque de agentes biológicos. Quanto ao cerne, normalmente, apresenta maior durabilidade natural, devido à ausência de materiais nutritivos, e, principalmente, à presença de extrativos.

Entretanto, Lopez; Milano (1986) relatam que faz parte do conhecimento popular que diferentes espécies de madeira podem apresentar durabilidades bastante distintas.

O termo durabilidade se refere à capacidade natural da madeira resistir ao ataque de fungos, insetos, desgaste mecânico, fogo ou ação dos agentes atmosféricos. Porém, em função da preponderante presença dos fungos sobre os outros agentes, a durabilidade é definida geralmente como a resistência da madeira ao apodrecimento de ação micósica, (PRID, 1988).

Para estabelecer a classificação da durabilidade natural, Castro Silva (2003) relata que se leva em conta apenas a resistência natural do cerne, uma vez que o alburno de todas as madeiras é considerado de baixa resistência, e cita a seguinte escala de resistência natural mostrada na Tabela 3.1.

---

[1] Biodeterioração é definida como alterações indesejáveis provocadas por organismos, (CAVALCANTE, 1982).

TABELA 3.1 – Classificação da durabilidade natural das madeiras – (CASTRO SILVA, 2003)

Classificação de durabilidade	Nível
Muito durável	1
Durável	2
Moderadamente durável	3
Pouco durável	4
Não durável	5

Conforme Simpson; TenWolde (1999), considerável diferença na vida útil pode ser obtida a partir de peças de madeira cortadas de uma mesma espécie, até mesmo proveniente da mesma árvore, e usadas sob condições similares. Além disso, Simpson; TenWolde (1999) relatam que a magnitude da variação na resistência ao apodrecimento de árvores individuais ou amostras de madeira de uma mesma espécie é muito maior para a maioria das espécies mais resistentes do que para as ligeiramente ou não-resistentes.

CSIRO (1997) apud Silva Oliveira; Castro Silva (2001) apresenta uma classificação de algumas espécies de eucalipto que apresentam satisfatória durabilidade natural, tanto ao apodrecimento quanto aos cupins, Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Durabilidade natural do cerne de árvores adultas de Eucaliptus em contato com o solo – (CSIRO, 1997 apud SILVA OLIVEIRA; CASTRO SILVA, 2001)

Espécie	Apodrecimento*	Apodrecimento + Térmitas
E. pilularis	MD – D	MD
E. polyanthemos	AD	AD
E. melliodora	AD	AD
E. saligna	MD – D	MD
E. tereticornis	D – AD	D – AD
E. caldulensis	D	D
E. grandis	MD	MD
E. maculata	D	D
E. cladocalyx	AD	AD
E. paniculata	AD	AD
E. sideroxylon	AD	AD
E. marginata	MD – D	MD – D
E. diversicolor	MD – D	MD
E. resinifera	D	D
E. acmenioides	AD	AD
E. cloeziana	AD	AD
E. microcorys	AD	AD
E. wandoo	AD	AD
E. longifolia	AD	AD

(*) MD – moderadamente durável; D – durável; AD – altamente durável

3.2 Agentes de biodegradação da madeira

Segundo Cavalcante (1982), os principais grupos de organismos xilófagos são as bactérias, fungos, insetos, moluscos, crustáceos.

Cavalcante (1982) e IPT (2001) relatam que os fungos apodrecedores são responsáveis por profundas alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, devido à progressiva destruição das moléculas que constituem suas paredes celulares.

Oliveira et al. (1986) descrevem a sucessão ecológica de microorganismos em madeiras com ou sem contato com o solo, e têm mostrado a existência de seis grupos fisiológicos e nichos ecológicos que ocorrem sequencialmente nesta ordem:

a) Bactérias;

b) Bolores Primários;
c) Fungos Manchadores;
d) Fungos de podridão mole;
e) Basidiomicetos apodrecedores;
f) Bolores Secundários;

As bactérias desempenham um papel ecológico bastante importante durante a colonização da madeira, sendo muitas delas capazes de decompor as membranas das pontuações, facilitando as trocas gasosas e que favorece o posterior desenvolvimento dos fungos que são aeróbios, facilitando a passagem das hifas de uma célula para outra, favorecendo o posterior processo de colonização por fungos. Além disso, algumas bactérias, que colonizam a madeira nestes estágios iniciais, promovem a fixação de nitrogênio, baixando a relação C/N (carbono/nitrogênio) e favorecendo a decomposição da madeira, que normalmente não apresenta um alto teor de nitrogênio.

Após a colonização predominante das bactérias, aparecem os bolores primários e fungos manchadores, ocorrendo quase que concomitantemente, ocupando nichos ecológicos bastante próximos. São Ascomicetos, Deuteromicetos e alguns Ficomicetos de crescimento rápido que se alimentam especialmente de carboidratos simples depositados no lúmen das células.

Com o desenvolvimento das bactérias, bolores primários e fungos manchadores, ocorrem a gradativa diminuição na quantidade de açúcares simples, facilmente metabolizáveis, de modo que passa a existir uma pressão ecológica no sentido de que sejam explorados os carboidratos de parede celular, surgindo a predominância dos fungos de podridão mole que são Ascomicetos e Deuteromicetos, cujas hifas desenvolvem-se dentro das paredes celulares e que decompõem, fundamentalmente, a celulose e hemiceluloses.

O clímax da sucessão ocorre quando a população de fungos de podridão mole declina e é substituída por Basidiomicetos, os quais colonizam profundamente a madeira e decompõem os tecidos lenhosos numa velocidade normalmente bastante alta. Os Basidiomicetos, capazes de decompor a madeira, são divididos em dois tipos: fungos de podridão parda e fungos de podridão branca.

Juntamente com os Basidiomicetos e fungos de podridão mole, normalmente desenvolvem-se os bolores secundários que são Deuteromicetos e Ascomicetos, alguns dos quais apesar de apresentarem um sistema celulolítico demonstrável em laboratório, não são capazes de utilizar a celulose na parede celular não decomposta por outros organismos.

Tratando da decomposição dos resíduos orgânicos, Moreira; Siqueira (2006) descreve os organismos presentes no solo, responsáveis pela degradação da celulose, hemicelulose e lignina.

Celulose: a decomposição da celulose no solo ocorre por ação de enzimas (celulases) produzidas por uma vasta e diversa população fúngica, pericialmente representantes dos gêneros *trichoderma, Chaetomium, Penicillium, Aspergellus, Fusarium e Phoma* e bactérias aeróbias e anaeróbias, como os exemplos a seguir:

- Anaeróbias e aeróbias facultativas: *Acetovibrio, Bacteróides, Butyrivibrio, Caldocellum, Clostridium, Erwinia, Eubacterium, Micromonospora, Pseudonocardia, Ruminococcus* e *Thermoanaerobacter.*
- Aeróbios e anaeróbios facultativos: *Acidothermus, Actinoplanes, Actnopolyspora, Archangium, Arthrobacter, Bacillus, Cellulomonas, Celvibrio, Corybacterium, Cytophaga, Frankia, Herpetosiphon, Micromonospora, Polyangium, Pseudomonas, Serratia, Sorangium, Sporocytophaga, Staphylococcus, Streptomomyces, Thermoactinomyces, Thermonospora, Xanthomonas.*

Hemicelulose: a decomposição das hemiceluloses pode ser dificultada quando ela se liga a outras substâncias vegetais, como fibrilas de celulose, quando formam pontes de hidrogênio com fibras na matriz da parede celular vegetal. Muitas enzimas são envolvidas na sua degradação, sendo geralmente produzidas por fungos, que parecem iniciar o ataque, seguidos por bactérias. Os actinomicetos exercem ação mais lenta e prolongada na decomposição. Bactérias do gênero *Bacillus* são especialistas na degradação da hemiceluloses do tipo xilanas.

Lignina: a degradação da lignina no solo dá-se, principalmente, por grupos especializados de Basidomicetos pertencentes à ordem Agaricales e por alguns Ascomicetos. Entre os mais eficientes e mais estudados, tem-se *Pleurot,us ostreatus, Phanerochaete versicolor e Phanerochaete chrysosporium*, sendo o último exemplo típico de decompositor da lignina. Esses fungos degradam tanto a lignina quanto a celulose. Os fungos que causam a podridão-parda, que se diferenciam dos que causam a podridão-branca, por serem incapazes de metabolizar anéis aromáticos ou seus produtos alifáticos, são por isso, mais eficientes na decomposição da celulose e hemicelulose. Entre os fungos da podridão-parda, destacam-se: *Poria coeus, Gloephyllum trabeum, Lenzites trabea*. Os fungos da podridão-branca são tanto Ascomicetos quanto fungos imperfeitos, citando-se como gêneros principais: *Graphium, Monodictys, Allescheria, Paecilomyces, Populospora e Thielevia.*

O apodrecimento afeta inicialmente a dureza, a habilidade do material resistir a impactos, sendo geralmente seguida por redução da resistência à flexão estática, e finalmente, todas as propriedades de resistência da madeira são seriamente reduzidas, (HIGHLEY, 1999).

Oliveira et al. (1986) relata os efeitos do ataque de microorganismos na madeira.

a) Fungos Emboloradores

O emboloramento da madeira é produzido por fungos pertencentes aos grupos dos Ascomicetos, Deuteromicetos e, mais raramente, Ficomicetos, apresentando em sua superfície uma formação pulverulenta, de coloração variada, facilmente removível por raspagem que exponha a camada imediatamente inferior à superfície da madeira, sendo esta camada pulverulenta devido à produção, na superfície da madeira, de massas de esporos coloridos. O emboloramento é comum em toras recém abatidas e em peças de madeira serrada durante o período de secagem. Além disso, madeiras mantidas com alto teor de umidade, ou secas, mas expostas continuamente em ambientes com umidade relativa acima de 90%, podem apresentar desenvolvimento de bolor.

A madeira intensamente embolorada apresenta redução na sua resistência ao impacto, sendo que as demais propriedades mecânicas são pouco afetadas.

A permeabilidade da madeira embolorada é bem maior que a madeira sadia, podendo provocar uma absorção desuniforme e variável de preservativos, especialmente em tratamentos que não envolvem pressão, além de permitir que peças de madeira reumidecidas pela chuva permaneçam por mais tempo com condições de umidade que favoreçam o apodrecimento.

Outro aspecto importante dos fungos emboloradores é a capacidade, apresentada por muitas espécies, de tolerar altas concentrações de diversos preservativos, sendo inclusive capazes de detoxificar alguns destes produtos, (OLIVEIRA et al., 1986).

b) Fungos manchadores

Grande número de espécies de Ascomicetos e Deuteromicetos são capazes de provocar manchas profundas no alburno da madeira, as quais são devidas ao desenvolvimento, no interior da madeira, de hifas pigmentadas ou de hifas que secretam substâncias coloridas.

A madeira atacada por estes fungos apresentam, no alburno, áreas de coloração variável, geralmente de azul a cinza escuro, de forma e tamanho variáveis nas superfícies longitudinais, distribuindo-se radialmente, na seção transversal.

Os fungos manchadores ocorrem frequentemente em toras recém-abatidas e em peças de madeira serrada durante a secagem. Além disso, madeiras secas ao ar e posteriormente submetidas a reumedecimento, contínuo ou intermitente, podem ser colonizadas por este fungos.

Outra característica importante deste grupo de fungos é a elevada tolerância a diversos preservativo, apresentada por várias espécies, (OLIVEIRA et al., 1986).

c) Bactérias

O ataque por bactérias é comum em madeiras mantidas submersas por algumas semanas ou meses, ou submetidas a condições de anaerobiose, como em estacas de fundações. O fator mais importante para a instalação de bactérias na madeira é o elevado teor de umidade.

Macroscopicamente, o ataque aparece como manchas pequenas, muitas vezes distribuídas aleatoriamente na superfície da madeira. Em estágios avançados de ataque, pode ocorrer o amolecimento nestas áreas.

Algumas bactérias podem inativar preservativos, como exemplo a *Pseudomonas creosotensis*, a qual é capaz de detoxificar o creosoto em estacas marinha, permitindo o ataque de moluscos e crustáceos xilófagos, em peças de madeira preservadas expostas no mar, em regiões de ocorrência desta bactéria.

O ataque por bactérias aumenta a permeabilidade da madeira, podendo apresentar redução em suas características mecânicas, (OLIVEIRA et al., 1986).

d) Fungos de podridão mole

Diversas espécies de Ascomicetos e Deutoromicetos são capazes de desenvolver hifas no interior da parede secundária das células da madeira, produzindo a podridão mole.

A madeira atacada por este tipo de fungo apresenta-se com sua camada superficial escurecida e, quando úmida, bastante amolecida e facilmente removível.

A profundidade deste apodrecimento é variável de acordo coma as condições de exposição, porém, é sempre superficial. Em postes de eucalipto, a profundidade pode ultrapassar dois centímetros, atingindo às vezes todo o alburno. A madeira com podridão mole, quando seca tende a apresentar pequenas fissuras paralelas e perpendiculares à grã.

A madeira atacada intensamente apresenta marcante redução em todas as suas características mecânicas, devido à destruição dos seus elementos estruturais. Porém, como este é um apodrecimento geralmente superficial, a sua importância para a peça como um todo vai depender muito da seção transversal da mesma, (OLIVEIRA et al., 1986).

e) Fungos de podridão parda

Este tipo de apodrecimento é provocado por Basidiomicetos que, como os fungos de podridão mole, nutrem-se dos hidratos de carbono componente da parede celular.

A madeira atacada pela podridão parda, apresenta-se em estágios iniciais, ligeiramente escurecida, assumindo, à medida que o apodrecimento progride, uma coloração pardo-escura. Ao contrário do que a podridão mole, este tipo de apodrecimento pode ocorrer em porções profundas da madeira. Em estágios avançados do ataque, e

quando seca, tende a colapsar parcialmente, provocando a formação de trincas paralelas e perpendiculares à grã.

Além da alteração na coloração da madeira com podridão parda, a densidade desta madeira diminui. Quanto às propriedades mecânicas, estes fungos provocam um enfraquecimento bastante rápido na madeira, sendo que a resistência ao impacto é a propriedade mais rapidamente afetada. A madeira apodrecida é também mais permeável e ligeiramente mais higroscópica que a madeira sadia, (OLIVEIRA et al., 1986).

f) Fungos de podridão branca

Da mesma maneira que a podridão parda, a podridão branca é provocada por Basidiomicetos. Porém, neste caso, além dos hidratos de carbono, a lignina também é removida da parede celular e utilizada na nutrição do fungo.

A madeira com podridão branca apresenta-se mais clara que a sadia e mais macia que esta. Às vezes, as áreas apodrecidas podem estar delimitadas por linhas escuras. Em outros casos, pequenas áreas apodrecidas encontram-se intermeadas por áreas sadias. Neste caso, o apodrecimento recebe o nome de podridão branca em bolsas.

Com relação às alterações provocadas na madeira pelo fungos de podridão branca, à exceção da coloração, os aspectos discutidos para a podridão parda são válidos também aqui. A única diferença é que a podridão parda provoca a diminuição nas características mecânicas da madeira mais rapidamente que a podridão branca, e que as quedas na densidade, ao final do processo são maiores nesta última, (OLIVEIRA et al., 1986).

3.2.1 Bioquímica do apodrecimento

Segundo Oliveira et al. (1986)a a madeira é uma fonte de carbono, rica em calorias, apresentando a desvantagem de ser altamente insolúvel, devido ao alto grau de polimerização dos seus constituintes e, para servir de fonte de energia para um microorganismo, estes constituintes devem ser quebrados em moléculas menores e solúveis em água.

O fato da madeira ser uma mistura bastante estável de polímeros exige a presença de catalisadores para que esta quebra ocorra mais rapidamente. As enzimas dos microorganismos, para atuarem como catalisadores sobre os constituintes da madeira, devem ser capazes de agir fora da célula microbiana para que haja o necessário contacto enzima-substrato, (OLIVEIRA et al., 1986).

Diversos fatores estruturais afetam a decomposição dos diferentes polímeros constituintes da madeira pelos microorganismos. Um destes fatores é a umidade. A madeira não é decomposta se o seu teor de umidade estiver abaixo de um nível crítico, normalmente em torno de 30%, ou seja, ligeiramente acima do ponto de saturação das fibras. Este valor é importante, pois, nesta situação de umidade, as paredes celulares atingem o máximo de inchamento, criando aberturas dentro da matriz polimérica. A difusão das enzimas pela parede exige a abertura desta matriz. Além disto, a água serve como um solvente, criando condições para que as enzimas sejam transportadas do microorganismo até o substrato, e as moléculas resultantes da decomposição do substrato sejam trazidas até os microorganismos, (OLIVEIRA et al., 1986).

A velocidade de crescimento dos fungos é extremamente baixa para valores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, Figura 3.2 (a), sendo que a menor umidade a qual os fungos crescem, e que tem sido observado, é de 19%; e o limite superior corresponde à umidade de 80% das cavidades celulares preenchidas, (LEICESTER, 2001).

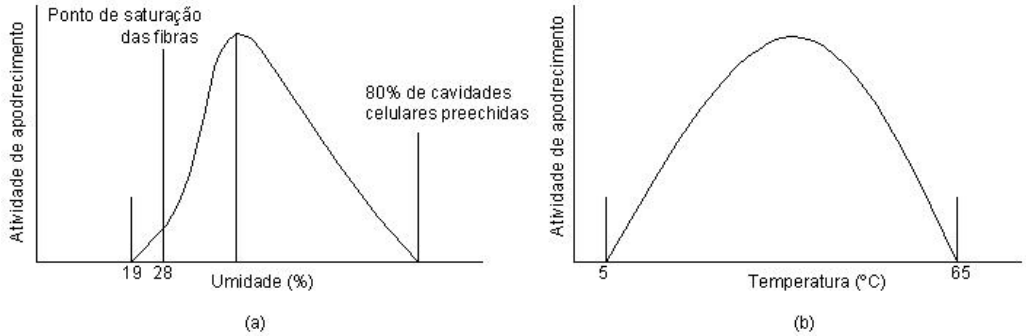

FIGURA 3.2 - Funções idealizadas para dois parâmetros de apodrecimento – (LEICESTER, 2001)

Segundo Moreira; Siqueira (2006), a atividade das células e de outros organismos é governada pelas leis da termodinâmica, conforme modelo de Arrhenius, Eq. 3.1, Figura 3.3.

$$K = A \cdot e^{-E/R \cdot T} \tag{3.1}$$

sendo

K = velocidade da reação;

A = frequência na qual as moléculas colidem;

E = energia de ativação da reação;

R = constante dos gases;

T = temperatura em graus Kelvin;

e = base de logaritmo natural - (2,71828);

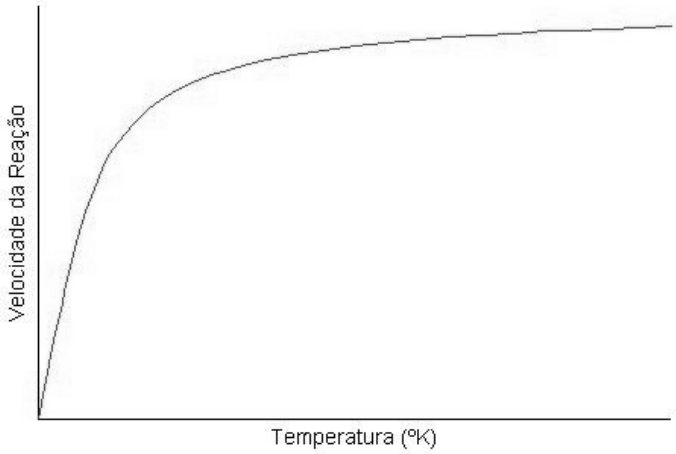

FIGURA 3.3 – Modelo de Arrhenius

As condições de crescimento dos fungos variam muito de espécie para espécie, mas como regra geral tem sido observado que para temperaturas abaixo de 5ºC os fungos viveram dormentes, enquanto para temperaturas acima de 65ºC estes serão mortos dentro de poucas horas, (LEICESTER, 2001).

Quanto ao pH, Cavalcante (1982) relata que, para o desenvolvimentos de fungos xilófagos, se encontram entre 4,5 e 5,5, que coincidem como os valores de pH apresentados pela maioria das espécies de madeira. O mínimo valor de pH é de 2,0 e o máximo é pouco acima de 7,0.

3.3 Cupins, crustáceos e moluscos

Os cupins são insetos sociais que formam colônias compostas por diferentes categorias de indivíduos, estando, estes, presentes principalmente nas regiões tropicais do mundo e apresentam uma grande variedade de hábitos, (IPT, 2001).

Os térmitas subterrâneos desenvolvem suas colônias no solo, construindo seus túneis neste e a redor de obstruções para alcançar a madeira, sendo necessária a eles também uma constante umidade tanto na madeira em que se alimentam, bem como no solo em que se aninham, (HIGHLEY, 1999).

Trabalhando internamente à madeira, não há nenhuma evidência externa da presença dos térmitas, até que os adultos alados emergem e se aglomerem, no fim do verão e começo do outono, (MORRELL, 1996).

Leicester (2001), estudando modelo para predição da durabilidade de estruturas de madeira, além dos riscos biológicos de degradação, cita também:

- Degradação mecânica;
- Degradação química (incluindo perda da resistência na linha de colagem);
- Corrosão de conectores metálicos.

Para o caso de ataque por fungos e corrosão de conectores metálicos, assume-se que a resistência decresce com o tempo, Figura 3.3 (a). Em um tempo t_L, vida útil da construção, a resistência tem sido reduzida a uma proporção k_d da resistência original, a qual deve ser adequada para resistir à carga aplicada, (LEICESTER, 2001).

Porém, para o caso de ataque de térmitas (cupins), é assumido que, sendo a construção infestada, a falha ocorre relativamente rápido (tempo de ataque - t_A), assumindo que esta independe de outro tipo de agente, e sendo este tempo de ataque menor que o da vida útil da construção, Figura 3.2 (b), (LEICESTER, 2001).

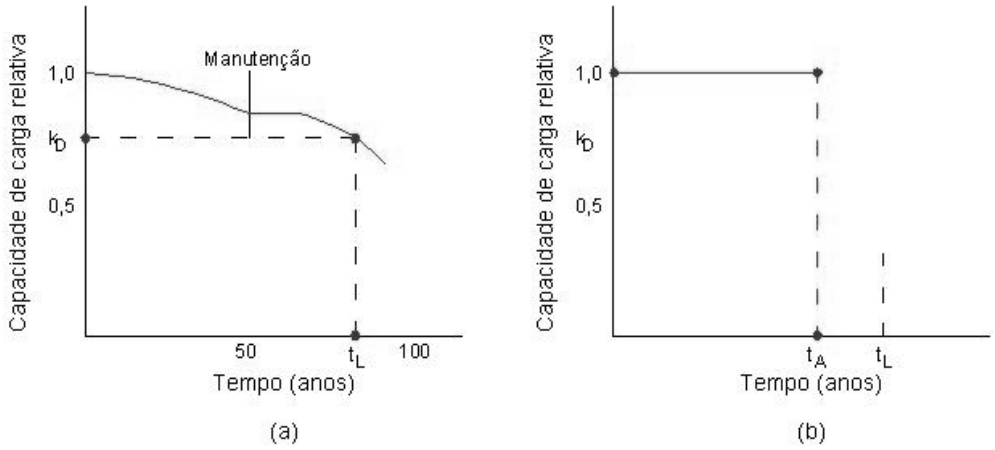

FIGURA 3.4 – Desempenho da durabilidade: (a) ataque por fungos ou corrosão; (b) ataque por térmitas – (LEICESTER, 2001)

O ataque de moluscos é geralmente bastante severo no interior da madeira, mas dificilmente perceptível na superfície, sendo que os moluscos de maior importância em relação ao ataque a madeiras são *Teredo spp, Bankia spp* e *Martesia spp*, (CAVALCANTE, 1982).

Já os crustáceos produzem inúmeros túneis logo abaixo da superfície da madeira e, quando a infestação é alta, pode haver dezenas de indivíduos por centímetro quadrado, sendo o gênero *Limnoria spp* mais danoso à madeira, (CAVALCANTE, 1982).

3.4 *Weathering*

Segundo Oliveira et al. (1986), quando a madeira é exposta às intempéries, fora de contato com o solo, vários fatores químicos, mecânicos e energéticos (luz) contribuem para a ocorrência de um fenômeno que recebe o nome genérico de *weathering*. Esse fenômeno não deve ser confundido com qualquer forma de apodrecimento causado por microorganismos em condições favoráveis de umidade, temperatura e umidade.

A madeira exposta ao tempo torna-se rugosa, ocorre levantamento da grã, surge fendilhamento que podem aumentar de magnitude, as fibras podem ficar soltas e a peça pode sofrer empenamento. A superfície muda de cor, torna-se suja, pode ser atacada por fungos ficando com a aparência desagradável. Todos esses efeitos provocados pela ação conjunta da luz (UV, visível e IV), umidade (chuva e orvalho), temperatura e oxigênio podem ser chamados de *weathering*.

De todos esses fatores, os fótons emitidos pela radiação solar são os componentes mais deletérios que promovem uma ampla gama de variações químicas na superfície da madeira. O outro fator que tem adquirido importância nos últimos anos é a poluição atmosférica (NO_2, SO_2 e O_3) que atua tanto na presença como na ausência de radiação ultravioleta.

Os fatores que promovem o *weathering* são:

- Umidade: devido à contração e inchamento da parede celular;
- Luz: a degradação fotoquímica da madeira provocada pela luz solar ocorre rapidamente em sua superfície exposta. Inicialmente ocorre um amarelamento ou escurecimento da madeira, seguido, eventualmente, por uma coloração acinzentada. Essa alteração de cor pode ser relacionada à decomposição da lignina, sendo um fenômeno estritamente superficial (0,05 mm a 2,50 mm), e é resultante da radiação ultravioleta que inicia a fotodegradação.
- Calor: acelerando as velocidades das reações químicas;
- SO_2: promovem o amolecimento da lignina;
- Abrasão: provocada por partículas sólidas levadas pelo vento.

Embora o *weathering* dependa de muitos fatores ambientais, há evidências que uma estreita banda de espectro eletromagnético, isto é, a luz ultravioleta (menos que 300 nm) seja responsável pela degradação foto-oxidativa primária da madeira.

A energia absorvida pela madeira através dos raios UV causa a dissolução das ligações das moléculas dos constituintes. Este processo produz radicais livres como produtos primários fotoquímicos. Independente da participação do oxigênio e água, pode dar origem à despolimerização.

A madeira no seu todo é um excelente absorvedor de luz. Embora a celulose não seja, ela deve absorver luz intensamente abaixo de 200 nm, com indicações de alguma absorção entre 200 nm e 300 nm e uma cauda de absorção estendendo-se até 400 nm.

Em virtude de sua semelhança química, as hemiceluloses comportam-se de maneira análoga à celulose, quanto a absorção de UV.

Como consequência, alguns componentes da madeira são capazes de absorver suficiente radiação UV que promovem reações fotoquímicas que, em última análise, levam à descoloração e degradação superficial da madeira, através da formação de radicais livres.

O *weathering* da superfície da madeira produz a formação de fendas intercelular ou intracelulares. A resistência das ligações da parede celular é perdida nas proximidades da superfície da madeira. A medida que o *weathering* prossegue, a água da chuva remove as porções degradadas, dando margem à nova erosão. O processo de erosão das folhosas é mais lento que o das coníferas. Nesta últimas, a erosão é mais intensa no lenho inicial do que no lenho tardio.

3.5 A influência do solo na degradação da madeira

Todas as obras de Engenharia Civil se assentam sobre o terreno e inevitavelmente requerem que o comportamento do solo seja devidamente considerado. A Mecânica dos Solos, que estuda o comportamento dos solos quando tensões são aplicadas, como nas fundações, ou aliviadas, no caso de escavações, ou perante o escoamento de água nos seus vazios, constitui-se numa Ciência de Engenharia, na qual o engenheiro civil se baseia para desenvolver seus projetos, (SOUSA PINTO, 2006).

Segundo Buckman; Brady (1966) os solos minerais são constituídos por quatro componentes principais: Minerais; Matéria Orgânica; Água e Ar. Tais constituintes estão intimamente misturados, tornando muitas vezes muito difícil uma separação satisfatória, (BUCKMAN; BRADY, 1966).

- **Matéria orgânica:** a matéria orgânica do solo representa uma acumulação de resíduos animais e vegetais parcialmente decompostos e novamente sintetizados. Tal material encontra-se num estado de decomposição ativa, submetido a ataques de microorganismos dos solos. O teor de matéria orgânica do solo é reduzido apenas 3% a 5% do seu peso, no caso de solo mineral típico de superfície. Sua influência nas propriedades do solo e consequentemente no crescimento dos vegetais é, entretanto, muito maior do que este baixo teor leva a acreditar. Em primeiro lugar, a matéria orgânica funciona como um “granulador” das partículas minerais, sendo o principal

responsável pelo aspecto frouxo e friável dos solos produtivos. Igualmente, a matéria orgânica é, no solo, uma das principais fontes de dois importantes elementos minerais, fósforo e enxofre; é essencialmente a única fonte de nitrogênio. Mediante seus efeitos nas condições físicas do solo, a matéria orgânica ajuda também a aumentar as quantidades de água que um solo pode absorver e a proporção desta água que fica disponível para o crescimento vegetal. Além disso, a matéria orgânica é a principal fonte de energia para os microorganismos do solo. Sem ela, a atividade bioquímica redundaria praticamente numa paralisação.

- **Água:** são necessárias duas conceituações principais sobre água do solo – a água é retida nos poros do solo em graus variáveis de persistência, dependendo da quantidade existente desta; e, juntamente com os sais em solução a água do solo forma a denominada solução do solo, que é sobremodo importante como veículo para fornecer nutrientes aos vegetais em crescimento.
- **Ar:** o ar do solo difere do atmosférico sob vários aspectos. Em primeiro lugar, o ar do solo não é contínuo, localizado no labirinto de poros do solo, separados pelos sólidos do mesmo solo. Este fato responde pelas variações na sua composição, de um lugar para o outro. Em bolsões localizados, as reações que abracem os gases podem modificar profundamente a composição do ar do solo. Além disso, o ar do solo tem um teor de umidade mais elevado do que o atmosférico; a umidade relativa se aproxima dos 100% quando é ótima a umidade do solo. Finalmente, o teor de dióxido de carbono, é várias centenas de vezes mais concentrado do que os 0,03% comumente encontrados na atmosfera. O oxigênio diminui de maneira semelhante e, em casos extremos, pode não atingir mais do que 10% a 12%, quando comparado com cerca de 20% da atmosfera normal. O teor e a composição do ar do solo é determinado, em grande parte, pelas relações solo-água. Sendo uma mistura de gases, o ar simplesmente se movimenta nestes poros do solo não ocupados pela água. Após uma chuva, os poros inicialmente abandonados pela água do solo são os grandes, seguidos dos poros de tamanho médio, à medida que a água é removida pela evaporação e pela utilização das plantas. Assim, o ar do solo ocupa geralmente os poros grandes e, à medida que o solo seca, os tamanhos intermediários. Isto explica a tendência dos solos com elevada proporção de poros minúsculos terem aeração deficiente.

Segundo Buckman; Brady (1966) uma imensa quantidade de organismos vivem no solo, sendo que a grande maioria deles pertencentes ao reino vegetal.

TABELA 3.3 – Organismos comumente encontrados nos solos – (BUCKMAN; BRADY, 1966)

Animais	Macro	Nutrem-se principalmente de matérias vegetais; predatórios na sua maioria;	Pequenos mamíferos
			Insetos, Formigas, Besouros, Larvas
			Miriápodes, Crustáceos, Acarinos, Lesmas e Caracóis, Minhocas
	Micro	Preparatórios ou parasitas que se nutrem de resíduos vegetais;	Formigas, Besouros, Acarinos, Centopéias, Aranhas
			Nematóides, Protozoários, Rotíferos;
Vegetais	Raízes de plantas superiores		
	Actinomicetes de vários tipos		
	Algas	Verdes; Azul-esverdeadas, Diatomáceas	
	Fungos	Fungos em forma de cogumelos, leveduras, bolores	
	Bactérias	Aeróbias, Anaeróbias	
		Autotróficas, heterotróficas	

Na sua destreza em decompor os resíduos orgânicos, os fungos são mais versáteis e talvez mais persistentes que quaisquer outros grupos. Celulose, amido, resinas, e lignina, sucumbem prontamente aos seus ataques, como também açúcares e proteínas são facilmente afetados. Considerados de maior importância para a degradação da madeira em contato com o solo, segundo Buckman; Brady (1966), os fungos podem ser divididos nos três principais grupos: leveduras, bolores e macromicetes. Entretanto, as leveduras são encontradas em quantidades muito limitadas no solo, sendo de maior importância os bolores e macromicetes.

Os bolores se desenvolvem com vigor em solos ácidos, neutros ou alcalinos, sendo alguns mais favorecidos do que prejudicados por pH reduzido, sendo muito abundantes em solos ácidos onde as bactérias e actinomicetes podem lhes oferecer apenas competição moderada.

A existência de bolores ocorre em todos os horizontes dos perfis de solos, sendo mais numerosos nas camadas superficiais, onde há fartura de matéria orgânica e aeração adequada.

Em geral, as maiores concentrações de bactérias se encontram nos horizontes de superfície, por serem aí mais favoráveis as condições de temperatura, umidade, aeração e alimentação. As bactérias autotróficas obtêm sua energia pela oxidação de componentes minerais, tais como amônio, enxofre e ferro, e, a maioria de seu carbono, pelo dióxido de carbono. Já as bactérias heterotróficas, sua energia e seu carbono, provêm diretamente da matéria orgânica do solo. As bactérias de decomposição de finalidades gerais e as amonificantes assim como os fungos e os actinomicetes são de natureza heterotrófica.

Segundo Moreira, Siqueira (2006); a maioria dos solos tem pH entre 4,0 e 8,5, sendo que os horizontes superficiais de solos em climas mais úmidos são geralmente ácidos devido à lixiviação de base e decomposição da serrapilha. Já, os solos de regiões mais secas ou semi-áridas são geralmente alcalinos.

Os organismos do solo são influenciados pelas flutuações reativas da solução do solo. Em geral, verifica-se que nos solos minerais, bactérias e actinomicetes trabalham melhor com valores de pH intermediários e elevados, diminuindo esta atividade quando o pH diminui para valores abaixo de 5,5. Os fungos, entretanto, são bastante facultativos, florescendo mais ou menos para valores baixos e altos de pH, porém, para os valores intermediários e altos, sofrem a competição das bactérias e actinomicetes. Moreira; Siqueira (2006), também afirma que a menor incidência de fungos em solos com pH entre 6 e 8 é devido ao fato de que bactérias e actinomicetos sejam mais eficientes, prejudicando, assim, o estabelecimento de fungos.

A literatura da Mecânica dos Solos relata a interatividade dos solos finos (silte e argila) com a água, devido ao efeito de superfície. Devido ao diminuto tamanho das partículas finas de solo, existe na superfície destes uma carga elétrica negativa capaz de atrair o cátion H^+, presente na água, através de ligações químicas secundárias, formando uma camada de água adsorvida. Desta forma, os solos finos possuem maior facilidade de retenção de água, e por mais tempo.

Pode-se questionar se a maior e mais longa retenção de água no solo em contado com a madeira; propicia uma maior facilidade ao apodrecimento desta através dos microorganismos presentes.

3.6 A preservação da madeira

Segundo IPT (2001), tratar ou preservar a madeira é propiciar o aumento da sua resistência aos organismos deterioradores, pela aplicação de preservantes químicos.

A madeira é utilizada em várias situações[2], cada uma das quais apresentando uma composição peculiar de organismos; assim, segundo Cavalcante (1982), os produtos preservativos necessitam possuir algumas características:

- Seja tóxico a uma grande variedade de organismos xilófagos;
- Baixo toxicidez para organismos não-xilófagos (inclusive o homem);
- Ação duradoura;
- Alta fixação à madeira;
- Não alterar as características da madeira (exceto a resistência aos organismos xilófagos);
- Não provocar alterações nos materiais com os quais a madeira tratada entrará em contato;
- Deve ser barato e facilmente encontrado no mercado.

Entretanto, não há preservativo de madeira que apresente todas estas sete propriedades mencionadas; consequentemente, a escolha de um preservativo estará sempre na dependência da situação em que a madeira será utilizada, (CAVALCANTE, 1982).

O Anexo E mostra os produtos preservativos de madeira atualmente registrados no IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, com suas respectivas classificações de toxidade e risco ambiental.

Considerando a vida útil de madeiras preservadas, Cavalcante (1982) cita outros fatores além das condições de serviço e das características inerentes à madeira, sendo:

- Toxidez do preservativo;
- Tratabilidade da madeira;
- Quantidade de preservativo absorvida;
- Macrodistribuição do preservativo (profundidade em que o preservativo penetrou na madeira e sua distribuição);
- Microdistribuição do preservativo (penetração na parede celular ou deposição apenas no lúmem);
- Afinidade química entre o preservativo e a madeira;
- Características inerentes ao próprio preservativo como estabilidade química, lixiviabilidade, volatilidade, resistência a detoxificação microbiológica.

No que tange a penetração e distribuição do preservativo, Ibach (1999) relata que, para a máxima proteção, é desejável selecionar para quais a boa penetração é assegurada. O cerne de algumas espécies é dificilmente tratado, isto ocorrendo em função da baixa

[2] (Dormente, poste, moirão, fundação, ancoradouro em água doce ou salgada, embarcações, componentes estruturais de construção, batente, porta, janela, taco, rodapé, telhado, móveis, etc).

permeabilidade que este apresenta. Quanto ao alburno, em geral a maioria das espécies não dificulta o tratamento sob pressão. Para peças roliças, como postes e estacas, a penetração do preservativo no alburno é importante para se conseguir uma proteção da zona externa do cerne, (IBACH, 1999).

Castro Silva (2003) cita uma escala de tratabilidade, a qual depende da facilidade de se imunizar a madeira, Tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Classificação da tratabilidade das madeiras – (CASTRO SILVA, 2003)

Classificação	Nível
Fácil de tratar	1
Moderadamente fácil de tratar	2
Difícil de tratar	3
Muito difícil de tratar	4

3.6.1 Produtos preservativos

Conforme Cavalcante (1982), Ibach (1999) os produtos preservativos podem ser divididos nas duas categorias abaixo.

a) Oleossolúveis - produtos contendo misturas complexas de agentes fungicidas e/inseticidas, à base de compostos de natureza orgânica e/ou organometálica. Os principais preservativos desta classe são:

- Creosoto – obtido da destilação de alcatrão da hulha (carvão), contendo mais de 200 substâncias diferentes agrupadas em hidrocarbonetos, ácidos e bases de alcatrão. Em função de sua gama de substâncias componentes, é altamente eficaz na preservação da madeira, sendo recomendado para situações de alta incidência de ataque de organismos xilófagos, como em contato com o solo ou água. Entretanto, possui a desvantagem da peça após tratada ficar com a superfície oleosa, não aceitando pintura;
- Pentaclorofenol – obtido pela reação entre o fenol e o cloro, até a completa substituição de todos os átomos de hidrogênio por átomos de cloro. Encontrado sob a forma de pequenas escamas, é solúvel em vários tipos de óleos, desde petróleo bruto até óleos leves, como o diesel. É eficiente contra muitos organismos como fungos, mofo, fungos manchadores e insetos, mas não é eficiente contra brocas marinhas.

Tanto o creosoto bem como o pentaclorofenol não devem ser aplicados em moradias ocupadas por humanos.

Em função da alta toxidade, a fabricação e o uso comercial do Pentaclorofenol foi proibido no Brasil pela INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 132, DE 10 DE NOVEMBRO DE 2006, do IBAMA.

b) Hidrossolúveis: produtos contendo misturas mais ou menos complexas de sais metálicos, tais como boro, compostos de arsênico, cromo, cobre, zinco e fluorestos.

- CCA – Arseniato de cobre cromatado – um dos principais preservativos deste grupo, empregado em várias formulações, cada qual variando as porcentagens do crobre, cromo ou arsênico, sendo chamados de Tipo A, B e C, segundo a AWPA P5[3], Tabela 3.5. O cromo provoca a precipitação de grande quantidade de cobre e arsênico, os quais são tóxicos a vários organismos xilófagos, sendo de grande eficiência este preservativo, com recomendação para as mais variadas situações.

TABELA 3.5 – Composição dos tres tipos de CCA – (IBACH, 1999)

Componente	CCA – Arseniato de Cobre Cromatado (partes em massa)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Trióxido de cromo	65,5	35,3	47,5
Oxido de Cobre	18,1	19,6	18,5
Pentoxido de Arsenico	16,4	45,1	34,0

Segundo Barillari et al. (2002), apesar do CCA apresentar ótimo desempenho quanto a biodeterioração, nos últimos anos, o uso de produtos a base de arsênio, tem sido questionado quanto à segurança, à saúde humana e ao meio-ambiente. Continuando, Barillari et al. (2002) relatam que as restrições ao uso de madeira tratada com CCA tem sido principalmente as utilizações em que a peça ficará em contato direto com o homem.

- CCB – Borato de cobre cromatado - tendo havido várias críticas às formulações contendo sais de cobre, cromo e arsênio, associadas aos possíveis perigos representados pelo último elemento e à rápida fixação que dificultaria o tratamento de madeiras impermeáveis, (LAPAGE, 1986). Assim, fez-se uma tentativa de substitui-lo pelo boro, começando a ser comercializado na Alemanha no início da década de 60.

Estudando, tratamentos preservativos em pínus com CCA-A e CCB, Barillari, Jankowsky, Freitas (2002) realizam quarenta combinações em função de quatro espécies de pínus (Pinus elliottii var. ellitottii, Pinus caribea Mor. var. hondurensis, Pinus oocarpa Shied, Pinus kesiya Royle ex Gordon), dois produtos preservantes (CCA-A, CCB) e cinco níveis de retenção (R1=5 kg/m^3, R2=6,5 kg/m^3, R3=8 kg/m^3, R4=9,5 kg/m^3, R5=11 kg/m^3), sendo o tratamento feito sob pressão pelo método BETHEL (célula-cheia).

[3] AWPA – American Wood-Preservers´ Association.

Para a avaliação, Barillari, Jankowsky, Freitas (2002) utilizaram o critério proposto por (LEPAGE ,1970)[4], Tabela 3.6.

TABELA 3.6 – Critério de avaliação do estado de sanidade – (BARILLARI; JANKOWSKY; FREITAS, 2002)

Estado de Sanidade	Índice de Comportamento
Sadio – nenhum ataque	100
Ataque leve ou superficial de fungos ou de térmitas	90
Ataque evidente mas moderado de fungos ou térmitas	70
Apodrecimento intenso ou ataque interno de térmitas	40
Quebra / perda quase total de resistência	0

Como resultado do experimento, através de análise de variância, não se detectou diferença significativa para o fator "espécie"; entretanto, os fatores "nível de retenção" e "produto preservante" apresentaram diferenças significativas entre si, assim como o efeito de interação "produto-retenção", (BARILLARI; JANKOWSKY; FREITAS, 2002), Tabela 3.7.

TABELA 3.7 – Comparação entre os valores médios do Índice de Comportamento (I.C.) para os diferentes produtos, por nível de retenção (*) – (BARILLARI; JANKOWSKY; FREITAS, 2002)

Produto	Nível de Retenção	I.C. médio	Comparações			
CCA-A	R4	96,9	a			
CCA-A	R5	95,4	a			
CCA-A	R3	95,3	a	b		
CCA-A	R2	95,2	a	b		
CCB	R5	91,6	a	b	c	
CCA-A	R1	90,3	a	b	c	
CCB	R3	88,0	a	b	c	
CCB	R1	87,4	a	b	c	d
CCB	R4	84,7		b	c	d
CCB	R2	77,1				d

(*) Médias com pelo menos uma letra igual não diferem entre si, em nível de 5% de probabilidade.

Os menores Índices de Comportamento correspondem aos tratamentos com CCB/R2. Utilizando o "Ábaco de McLean", Barillari, Jankowsky, Freitas (2002) estimam uma

[4] LAPAGE, E.S. Método padrão sugerido pela IUFRO pra ensaios de campo com estacas de madeira. *Preservação de madeiras*. São Paulo, p.205-16, out./dez., 1970.

vida média da ordem de 30 anos para este tratamento, e, para os demais, vida útil superior a 35 anos.

Tais estimativas são superiores aos valores obtidos quando utilizadas as especificações da NBR 8456/1984, (16% de falhas permitidas no fim do período de 15 anos) no Ábaco de McLean (Figura 3.5 e Anexo F). Para estas especificações, obtém-se vida útil de aproximadamente 22 anos.

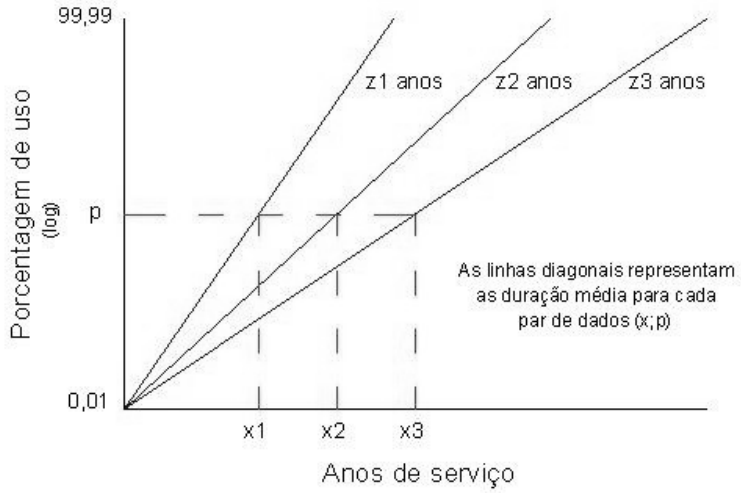

FIGURA 3.5 – Esquema do Ábaco de McLean

3.6.2 Métodos preservativos

Segundo IPT (2001), a seleção do método de aplicação é igualmente importante, sendo que produto algum poderá conferir proteção satisfatória à madeira se não for corretamente aplicado. O método de aplicação mais adequado dependerá da classe de risco ao qual a componente de madeira estará sujeita na edificação.

Todos os autores, Cavalcante (1982) Uriartt (1994) Ibach (1999) IPT (2001), entre outros, classificam os tratamentos preservativos em dois tipos básicos:

a) **Processos de impregnação superficial (sem pressão):** caracterizam-se por não utilizarem pressão externa para forçar a penetração do preservante na madeira. A impregnação é baseada nos princípios da difusão e/ou da capilaridade, porporcionando, na maioria das vezes, uma penetração do preservante apenas superficial (2 a 3 mm), proporcionando uma proteção limitada contra organismos xilófagos, sendo recomendados para preservação de peças que estarão sujeitas a baixos riscos de deterioração biológica. São procedimentos econômicos, porém muitas vezes utilizando

preservativos inadequados. Os principais métodos são os de aspersão, pincelamento, imersão, difusão, banho quente-banho frio.

b) **Processos de impregnação sob pressão:** tais processos utilizam pressões efetivas para forçar a penetração do preservante, sendo os métodos mais eficientes na preservação da madeira. Eles promovem a penetração total do preservante em madeiras permeáveis com teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (~30%). São realizados em instalações industriais, denomidada usinas de preservação de madeiras, compostas basicamente por uma autoclave e sistemas de tancagem e de bombeamento para operação dos preservativos. Estes processos são divididos em duas categorias:

- Célula-cheia ou Bethell: a madeira é colocada no cilindro de tratamento e um vácuo inicial, que extrai o ar do seu interior; em seguida, o preservativo é introduzido no cilindro de tratamento e é forçado, sob pressão, a penetrar na madeira, variando o período de pressão entre 1 a 5 horas. O preservativo remanescente é bombeado do cilindro de tratamento para o tanque de armazenamento, sendo proporcionado um vácuo final para remover o excesso de preservativo na madeira. Este método é chamadao de célula-cheia pois o preservativo fica retido tanto na parede como no lúmen, das células da madeira;
- Célula-vazia: a madeira é colocada no cilindro e uma pequena pressão é aplicada, para comprimir o ar no interior da madeira. Sob esta pressão, o preservativo é introduzido no cilindro e depois a pressão é aumentada até o nível desejado, ali permanecendo até que preservativo suficiente penetre na madeira. Em seguida, a pressão é liberada, provocando a expansão do ar contido no interior da madeira, resultando na expulsão de parte do preservativo presente no lúmen das células. O preservativo é bombeado do cilindro de tratamento para o tanque de armazenamento, com uma posterior aplicação de vácuo para que seja retirado algum preservativo que ainda se encontre no lumén das células. Este processo é chamado de Rueping. Outro processo, chamado de Lowry, difere do primeiro apenas porque, neste segundo processo, a pressão inicial aplicada não é realizada, sendo o produto preservantivo introduzido no cilindro de tratamento à pressão atmosférica.

3.7 Preservação *versus* Custos

Segundo Rezende et al. (1993), o tratamento de madeira aumenta o tempo de serviço, mas também ocorre aumento no custo inicial, que pode ser compensado se a vida útil for suficientemente longa. Assim a tecnologia de preservação de madeira tem uma importante missão econômica e social a cumprir e que pode ser resumida pela Figura 3.5.

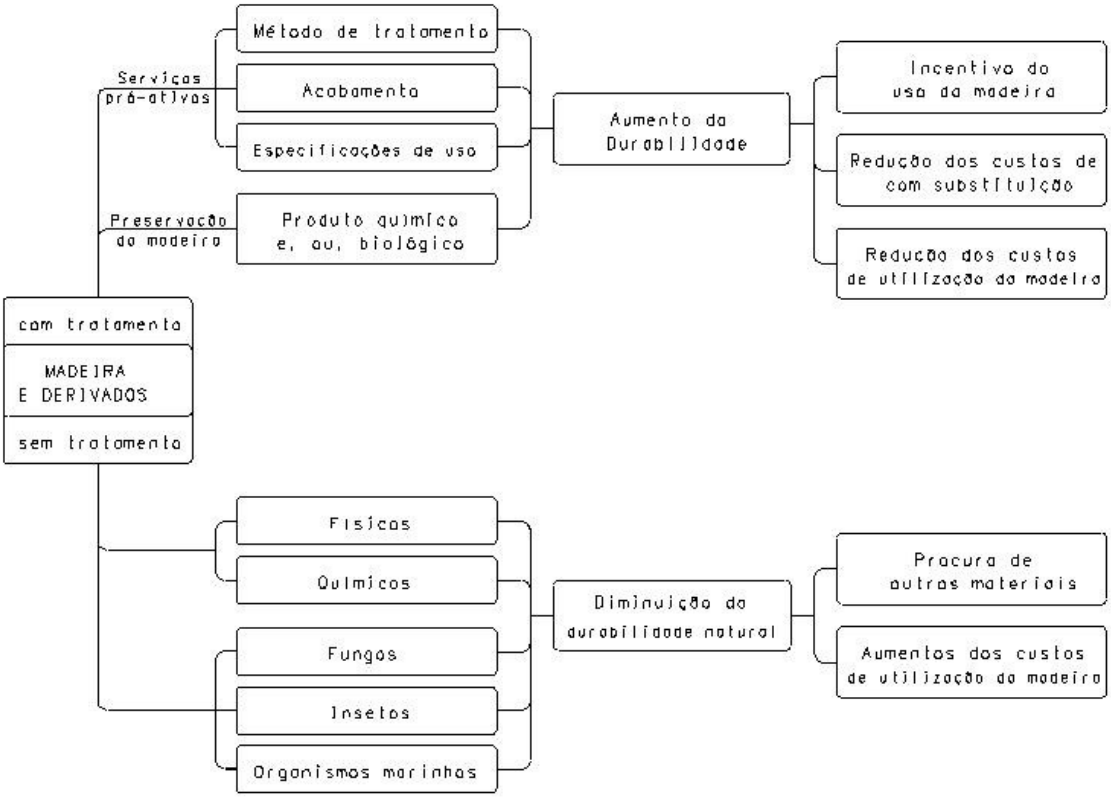

FIGURA 3.6 - Fluxograma da missão econômica e social da preservação da madeira – (REZENDE et al., 1993)

Sendo que o fator que propulsiona as empresas é o lucro, se estas usam madeira tratada é porque, antes de tudo, ela acarreta um menor custo. O custo anual, que representa o valor total do investimento inicial mais juros, devidadmente atualizados anualmente ao longo da vida útil da madeira tratada, deve ser inferior ao custo anual da madeira sem tratamento, (REZENDE et al, 1993).

Sacco (1983) com apoio, com apoio da ABPM – *Associação Brasileira de Preservadores de Madeira*, e coloboração de 10 empresas do ramo da preservação, realizou

estudo de avaliação dos custos[5] da produção de postes de eucalipto preservado, tomando como unidade padrão o poste 10 metros, considerando os seguintes itens:

- **Matérias-primas:** madeira, preservativo, impermeabilizante, amarração, plaqueta de identificação;
- **Mão de obra direta:** salários, encargos sociais;
- **Gastos gerais:** fretes e carretos, consertos e reposição de máquinas, combustível, energia elétrica, água, quebra de madeira, despesas diversas.

Os dados dos respectivos custos enviados pelas empresas possibilitou a obtenção dos seguintes valores médios para a produção de postes preservados, Tabela 3.8.

TABELA 3.8 – Custos de produção de postes de eucalipto preservado - (SACCO, 1983)[6]

	Componete	Porcentagem Média
Matérias-primas	Madeira	24,96
	Preservativo	34,46
	Impermeabilizante	0,99
	Amarração	0,68
	Plaqueta de identificação	0,30
Mão de obra direta	Salários	9,48
	Encargos sociais	4,64
Gastos gerais	Fretes/carretos	11,47
	Consertos/Rep. de Maq.	2,72
	Combustível	2,87
	Energia elétrica/água	0,50
	Quebras de madeiras	3,34
	Despersas diversas	3,59

Verifca-se, pela Tabela 3.8, que para o ano de 1983 os itens mais significativos em média para a composição dos custos foram em ordem decrescente: o preservativo, a madeira, fretes/carretos e os salários.

Há muitos critérios para a escolha de investimentos, sendo as opções dependentes dos meios disponívies para iniciar o processo de produção e dos objetivos a serem alcançados, bem como das formas de aplicação de capital. Entre estes critérios[7] de avaliação econômica, o mais indicado para comparações entre opções para a execução de

[5] Custo médio entre as empresas.
[6] Pesquisa realizada entre os meses de maio e junho de 1983;
[7] Outros critérios utilizados para avaliações econômicas são o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

uma mesma tarefa (como o caso de madeira tratada e não-tratada) é o Custo Anual, (REZENDE et al., 1993).

Para a avalição por tal critério adota-se a Eq. (3.1)

$$R = \frac{A \cdot i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{3.1}$$

onde:

R: custo anual;

A: investimento inicial;

i: taxa de juros anual;

n: vida útil em anos.

Realizando comparações entre dormentes de madeira tratada e não-tratadas, Rezende et al. (1993) faz as seguintes conclusões quanto à taxa de juros e a vida útil:

- **Taxa de juros:** para taxas mais elevadas, o uso de madeira tratada, que é um material de maior custo de aquisição, tende a se tornar uma opção menos interessante economicamente. Quando as taxas de desconto são altas, os projetos de longo prazo são menos atrativos, o mesmo acontecendo com projetos que geram produtos de melhor qualidade;[8]

  Vida útil: embora não sendo possível predizer com exatidão o verdadeiro período de serviço que se pode obter de uma instalação qualquer, construída com determinado tipo de madeira, quanto maior for a taxa de juros[9], maior deve ser a vida útil mínima para que o custo anual da madeira preservada seja menor ou igual ao custo da madeira não-tratada, ou para que o tratamento químico seja econômico;

Ao comparar postes de madeira tratada com postes de concreto, Rezende et al. (1993), obtem-se duas importantes conclusões:

- Quanto maior a taxa de juros vigente, menor deve ser a diferença entre o valor de aquisição do poste de concreto e o valor da madeira, para que os custos anuais sejam iguais;
- Por mais que se aumente a vida útil do poste de concreto, seu custo nunca será igual ou inferior ao custo anual do poste de madeira, para qualquer taxa de desconto.

---

[8] Isto mostra porque em nosso país, os projetos de infra-estrutura não são tratados como deveriam.

[9] No texto original foi utilizada o termo “taxa de desconto”.

Concluindo seu estudo, Rezende et al. (1993) relatam que dentro de uma economia estável, a utilização de madeira tratada é a melhor opção econômica, pois proporciona menor custo anual.

3.8 Classes de riscos

Além dos fatores inerentes da madeira, a durabilidade depende também das condições de utilização; assim, por exemplo, a madeira será mais susceptível a ser atacada em condições quentes e úmidas do que em climas frios e secos. Além disso, a probabilidade de ataque será maior se a madeira se encontrar em contato direto com o solo, (PRID, 1988).

Atualmente a NBR 7190/1997 em seu *Anexo D – Recomendações sobre a durabilidade das madeiras*[10], o qual é considerado apenas como informativo, relata que o risco de deterioração depende do teor de umidade da madeira e da duração do período de umidificação, sendo as classes de umidade da madeira especificadas na Tabela 3.9, e a classe de duração dos períodos de umidificação pela Tabela 3.9.

TABELA 3.9 – Classes de umidade – (NBR 7190/1997)

Classe e umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

[10] Páginas 88 e 89 da respectiva norma.

TABELA 3.10 – Classe de duração - (NBR 7190/1997)

Classe de carregamento	Ação variável principal da combinação	
	Duração acumulada	**Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica.**
Permanente	Permanente	Vída útil da construção
Longa duração	Longa duração	Mais de seis meses
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana
Duração instantânea	Duração instantânea	Muito curta

- **Situação 1:** caracterizada pelas condições em que a madeira está inteiramente protegida das intempéries e não sujeita à reumidificação. Estão nessa situação as madeiras que pertencem às classes de umidade 1 a 3, especificadas pela Tabela 3.9;
- **Situação 2:** caracterizada pelas condições em que a madeira está inteiramente protegida das intempéries, mas sujeita à reumidificação ocasional. Estão nesta situação as madeiras as madeiras pertencentes às classes de umidade 1 a 3, e sujeitas à reumidificação de curta duração, Tabela 3.9;
- **Situação 3:** caracterizada pelas condições em que a madeira não está protegida das intempéries, ou está protegida mas sujeita à reumidificação frequentemente. Estão nesta situação as madeiras pertencentes à classe de umidade 4, sujeitas à reumidificação de longa duração;
- **Situação 4:** caracterizada pelas condições em que a madeira está permanentemente em contato com o solo ou com água doce;
- **Situação 5:** caracterizada pelas condições em que a madeira está permanentemente em contato com água salgada.

Assim, a Tabela 3.11 mostra, em função das situações de risco, os principais agentes agressivos.

TABELA 3.11 – Agentes biológicos em função das situações de risco de deterioração da madeira – (NBR 7190/1997)

Situação de risco	Agentes biológicos					
	Fungos apodrecedores		Fungos manchadores e emboloradores	Insetos		Furadores marinhos
	Basídio micetos	Podridão mole	Azulão	Besouros	Cupíns	
1	-	-	-	L	L	-
2	U	-	U	L	L	-
3	U	-	U	L	L	-
4	U	U	U	L	L	-
5	U	U	U	L	L	U

U: presente; L: pontos localizados

Com relação ao tratamento preservativo, a NBR 7190/1977 recomenda:

a) **Métodos preservativos:** pincelamento, aspersão, pulverização, imersão, banho quente-frio, substituição da seiva e auto-clave;

b) **Tipos preservativos**

- Preservativos de longa duração – creosoto, pentaclorofenol, CCA e CCB;
- Preservativos de ação temporária hidrossolúveis – fungicidas e inseticidas;

c) **Preservação mínima recomendada -** em virtude da grande variabilidade da incidência de agentes biológicos de deterioração da madeira, bem como pela existência de espécies com boa durabilidade natural, recomenda-se, na falta de outras informações, os seguintes procedimentos mínimos de preservação;

- **Dicotiledôneas:** pincelamento;
- **Coníferas:** impregnação em auto-clave.

As normas EN 335-1; EN 335-2 apud IPT (2001)[11] chamam as várias condições em que a madeira está exposta de *classes de riscos*, as quais possuem maior ou menor probabilidade da madeira ser atacada por um ou mais grupos de organismos deterioradores, conforme as condições de sua utilização, Tabela 3.12.

[11] EUROPEAN NORM 1992 – EN 335-1: Hazard classes of wood and wood-based products against biological attack. Part 1: classification of hazard classes *apud* IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Biodeterioração de madeiras em edificações. São Paulo, 2001.

EUROPEN NORM 1992 – EN 335-2: Hazard classes of wood and wood based products against biological attack. Part 2: guide of the application of hazard classes to solid wood.

TABELA 3.12 – Classe de risco – Grupos de organismos xilófagos que podem atacar a madeira, conforme o local e as condições em que ela é empregada – (EN 335-1; EN 335-2 apud IPT, 2001)

Classe	Local e condições de uso	Exposição à umidade	Agentes biológicos			
			Fungos	Brocas	Cupins	Brocas marinhos
1	Acima do solo (coberto e seco)	Nenhuma	Não	Sim	Sim	Não
2	Acima do solo (coberto com riscos de umidade)	Ocasional	Sim	Sim	Sim	Não
3	Acima do solo (não coberto)	Frequente	Sim	Sim	Sim	Não
4	Em contato com solo ou água doce	Permanente	Sim	Sim	Sim	Não
5	Em contato com água salgada	Permanente	Sim	Sim	Sim	Sim

Com a identificação da classe de risco, pode-se verificar a combinação entre preservante e processo de impregnação necessária para proteção da madeira, com o respectivo comportamento do preservante, Tabela 3.13.

TABELA 3.13 – Tipos de tratamentos e de preservantes em função da classe de risco na qual se encontrará a madeira – (IPT, 2001)

Classe de risco	Preservação a aplicar		
	Processo de tratamento preconizado	Natureza do preservante	Comportamento do preservante
1	Aspersão, imersão, pincelamento ou com pressão	Inseticida	Resistente a perda spor evaporação
2	Aspersão, imersão, pincelamento ou com pressão	Inseticida e fungicida	Não ou pouco lixiviável e resistente a perdas por evaporação
3	Com pressão	Inseticida e fungicida	Não lixiviável e resistente a perdas por evaporação
4	Com pressão	Inseticida e fungicida	Não lixiviável e resistente a perdas por evaporação
5	Com pressão	Inseticida e fungicida, molucida, carcinocida	Não lixiviável e resistente a perdas por evaporação

Assim, IPT (2001), baseado nas normas EN 335-1; EN 335-2, apresenta um fluxograma sobre os principais passos a serem seguidos na escolha da madeira, pressupondo-se uma definição inicial da classe de risco a que vai ser submetida a peça de madeira quando for utilizada, Figura 3.7.

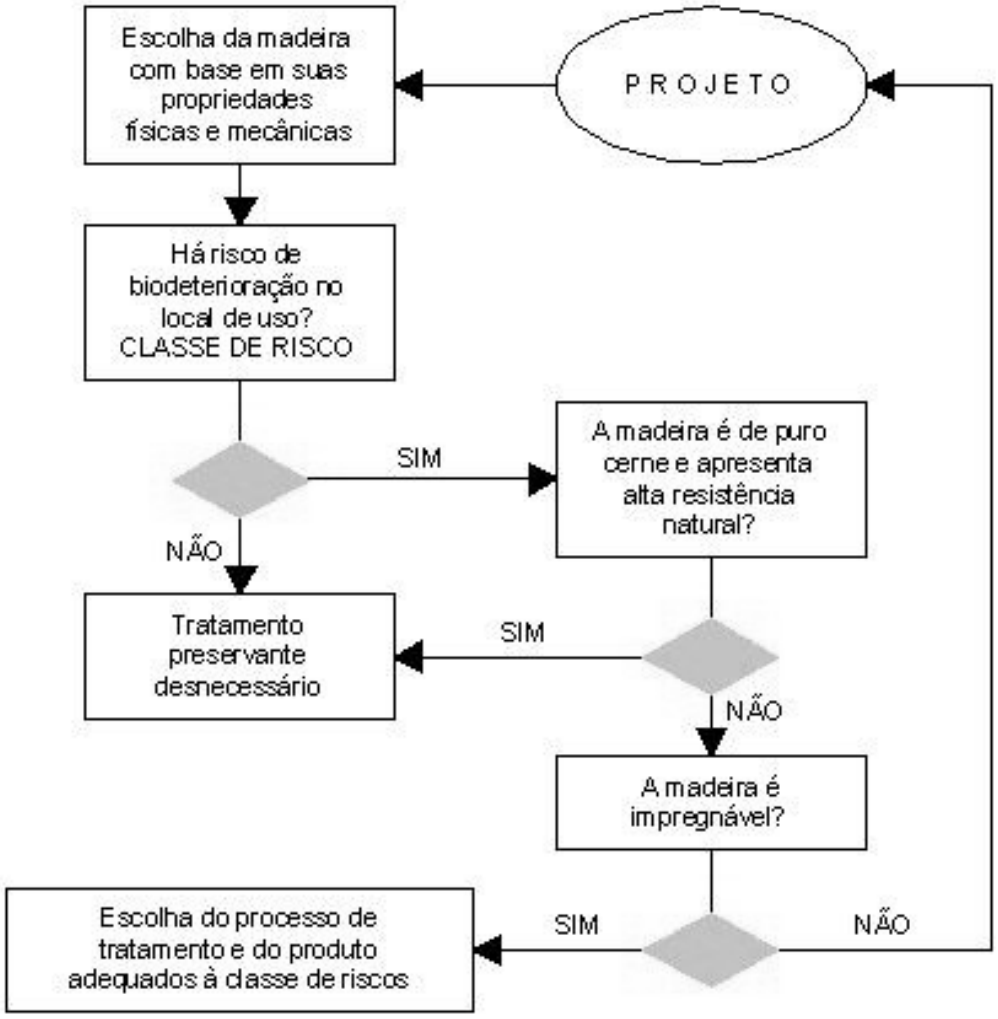

FIGURA 3.7 – Fluxograma que mostra as principais decisões a serem tomadas quando da utilização de madeiras em edificações – (IPT, 2001)

Campos; Oliveira; Sales (2002) propõem uma classificação de risco para a biodeterioração da madeira, diferindo da atual classificação adotada pela NBR 7190/1997, devido esta nova proposta possuir uma classe a mais, em virtude de uma classe de risco única para as estruturas imersas em água doce, onde, na respectiva norma, o contato com a água doce está preconizado junto com o contato direto no solo. Segundo Campos; Oliveira; Sales (2002):

- **Classe de risco 1:** estruturas de madeira isolada do solo, sob abrigo e protegida contra a reumidificação;
- **Classe de risco 2:** estrutura de madeira isolada do solo, sob abrigo e em contato permanente com fonte de umidade;
- **Classe de risco 3:** estrutura de madeira isolada do solo mas exposta às intempéries;

- **Classe de risco 4:** estrutura de madeira em contato direto com o solo e/ou sob intempéries;
- **Classe de risco 5:** estruturas de madeira imersa em água doce;
- **Classe de risco 6:** estruturas de madeira imersa em água salgada ou salobra.

Esta classificação proposta por Campos; Oliveira; Sales (2002) difere das indicadas pelas normas EN 335-1; EN 335-2 e NBR 7190/97 apenas para a madeira imersa em água doce, classe de risco 5, o que estas outras não possuem.

Considerando que no momento a NBR 7190/1997 está em processo de revisão, é pertinente que acima de tudo estas “situações” ou “classes” de riscos deixem de ser meramente recomendações, através do ANEXO D (informativo), e se tornem efetivas obrigações ao se projetar as estruturas de madeira, e, em anexo, a norma recomende as espécies mais adequadas para cada “situação” ou “classe” de risco, bem como os sistemas e produtos preservativos mais recomendados a cada espécie e situação.

A norma australiana *AS 1604.1-2005 Specifications for preservative - Part 1: Sawn and round timber* define seis classes de risco, Tabela 3.14, em função do tipo de exposição em que as peças de madeira estarão sujeitas.

TABELA 3.14 – Guia de seleção de classe de risco – (AS 1604.1-2005)

Classe de risco	Exposição	Condições Específicas de risco	Risco Biológico	Usos típicos
H1	Interna acima do solo	Completamente protegido de tempo e bem ventilado, e protegido de térmitas	Lictídeos Brocas	Estrutura, pavimento, mobília, ligações internas
H2	Interna acima do solo	Protegido de umidade. Sem lixiviação	Brocas e térmitas	Estruturas, pavimento, e uso similar, usado em situações secas
H3	Externa acima do solo	Sujeito a periódicos umedecimentos moderados e lixiviação	Apodrecimento moderado, brocas e térmitas	Tábuas de revestimento externo,outdoors, pérgolas (acima do solo) uniões de janelas, estruturas e decking
H4	Externa em contato com o solo	Sujeito a severo umedecimento e lixiviação	Apodrecimento severo, brocas e térmitas	Mourões, muros de jardins menores que 1m, estufas, pérgolas (no solo) e peças de jardins
H5	Externa em contato com o solo ou água fresca	Sujeito à extrema umidade e lixiviação e/ou onde o uso critico requer um maior grau de proteção	Apodrecimento muito severo, brocas e térmitas	Paredes de contenção, estaqueamento, casas de tronco, postes de edifícios, torres de esfriamento de abastecimento
H6	Água marinha	Sujeito a prolongada imersão em água marinha	Brocas de água marinha e apodrecimento	Cascos de barcos, estacas marítimas, ancoradouros, e similar

Além desta classificação de risco, outras duas normas, *AS 5604-2005 Timber-Natural durability ratings e a AS 1720.2-1990 Timber Structures - Part 2: Timber properties*, fazem importantes definições utilizadas no projeto de estruturas de madeira.

A *AS 5604-2005* define inicialmente que a durabilidade natural, é a resistência inerente de uma espécie de madeira ao apodrecimento, ou a insetos ou ao ataque de brocas marinhas. Considerando o ataque do alburno por Lictídeos, as espécies são classificadas qualitativamente como Susceptível e Não-Susceptível, “S” e “NS” respectivamente. Quanto ao ataque do cerne por térmitas, as espécies são novamente classificadas qualitativamente como “Resistentes a térmitas” e “Não Resistente a térmitas”, R e NR respectivamente.

Para o apodrecimento e ataque de brocas marinhas, a *AS 5604-2005* faz classificações quantitativas, conforme as Tabelas 3.15 e 3.16.

TABELA 3.15 – Durabilidade natural – Expectativa de vida provável – (AS 5604-2005)

Classe	Expectativa de vida provável em contato com o solo (anos)	Expectativa de vida provável acima do solo (anos)
1	Maior que 25	Maior que 40
2	15 a 25	15 a 40
3	5 a 15	7 a 15
4	0 a 5	0 a 7

TABELA 3.16 – Resistência a brocas marinhas – Provável expectativa de vida – (AS 5604-2005)

Classe	Resistência a brocas marinha Expectativa de vida em águas do Sul* (anos)
1	Maior que 60
2	41 a 60
3	21 a 40
4	0 a 20, geralmente menor que 5 anos

(*) Geralmente o ataque de brocas marinhas é mais severo nas águas do norte Australiano do que nas do Sul.

A Tabela 3.17 mostra os índices de durabilidade de algumas espécies contempladas pela *AS 5604-2005* e indicadas para o uso nacional, pelas normas *NBR 7190/1997 Projeto de estruturas de madeira*, e *NBR 8456/1984 Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia.*

TABELA 3.17 – Índices de durabilidade natural de Eucalyptus – (AS 5604-2005)

Nome vulgar *Nome científico*	Susceptibilidade do alburno a Lictídeos	Resistência de térmitas pelo cerne[3]	Classe de durabilidade natural do cerne		Resistência do cerne a brocas marinhas
			Em contato com o solo	Externo, acima do solo	
gum, blue, Sydnei *Eucalyptus saligna* (1)	S	NR	3	2	3
gum, grey *Eucalyptus propinqua* (1) *Eucalyptus punctata* (1)	NS	R	1	1	2
gum, Maiden´s *Eucalyptus maidenii* (1)	S	NR	2	2	4
Gum poplar *Eucalyptus alba* (1) (2)	-	NR	3	3	4
gum, red, Forest *Eucalyptus tereticornis* (1) (2)	NS	R	1	1	2
gum, red, river *Eucalyptus camaldulensis* (1)	S	R	2	-	-
gum, rose *Eucalyptus grandis* (1)	NS	NR	3	2	4
gum, spotted *Corrymbia maculata*[12](1) *Corymbia citriodora* (1) (2)	S	R	2	1	4
gum,white, Dunn´s *Eucalytpus dunnii* (1)	S	-	4	-	4
ironbark, grey *Eucalyptus paniculata* (1) (2)	NS	R	1	1	3
mahogany, sothern *Eucalyptus botryoides* (2)	NS	R	1	1	2
mahogany, White *Eucalyptus umbra* subesp. *Carnea* (1)	NS	R	1	1	2
messmat, gympie *Eucalyptus cloeziana* (1)	NS	R	1	1	-
tallow wood *Eucalyptus microcorys* (1)	S	R	1	1	3

(1) Espécie indicada para utilização pela NBR 7190/1997;
(2) Espécie indicada para utilização pela NBR 8456/1984;
(3) Interna acima do solo, aplicável à classe H2 da AS 1604.

A norma *AS 1702.2-1990* define “Classe de Durabilidade”, assumindo estas classes para um cerne não tratado (com no mínimo de 40 mm de espessura) em contato com o solo, conforme a Tabela 3.18.

[12] Espécies anteriormente designadas como *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora*, respectivamente.

TABELA 3.18 – Classes de Durabilidade – (AS 1720.2-1990)

Durabilidade	Definição
Classe 1	Peças de maiores durabilidades naturais das quais pode ser esperado resistir ao apodrecimento e ataque de térmitas por no mínimo 25 anos e até 50 anos;
Classe 2	Peças de alta durabilidade natural das quais pode ser esperado ter uma vida de entre 15 a 25 anos;
Classe 3	Peças de somente durabilidade moderada das quais pode ser esperada uma vida de 8 a 15 anos;
Classe 4	Peças de baixa durabilidade natural das quais possam durar aproximadamente entre 1 a 8 anos. Estas peças têm aproximadamente a mesma durabilidade de alburnos não tratados, as quais são geralmente consideradas Classe 4, independente da espécie.

Ao realizar uma proposta de classes de risco para a revisão da NBR 7190/1997, Brazolin et al. (2004) comentam que o propósito do SISTEMA DE CLASSES DE RISCO é dar uma ferramenta simplificada para a tomada de decisões quanto ao uso racional e inteligente da madeira na construção civil, fornecendo uma abordagem sistêmica ao produtor e usuário que garanta maior durabilidade das construções.

Esta proposta feita por Brazolin et al. (2004) considera seis classes de risco conforme Tabela 3.19.

TABELA 3.19 – Classes de risco para uso da madeira na construção civil – (BRAZOLIN et al. 2004)

Classes de risco (CR)	Condição de uso	Organismo xilófago
1	Interior de construções, fora de contato com o solo, fundações ou alvenaria, protegidos das intempéries, das fontes internas de umidade. Locais livres do acesso de cupins-subterrâneos ou arborícolas.	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira
2	Interior de construções, em contato com a alvenaria, sem contato com o solo ou fundações, protegidos das intempéries e das fontes internas de umidade.	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira Cupins-subterrâneos Cupins-arborícolas
3	Interior de construções, fora de contato com o solo e continuamente protegidos das intempéries, que podem, ocasionalmente, ser expostos a fontes de umidade.	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira Cupins-subterrâneos Cupins-arborícolas Fungos emboloradores/manchadores Fungos apodrecedores
4	Uso exterior, fora de contato com o solo e sujeitos a intempéries.	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira Cupins-subterrâneos Cupins-arborícolas Fungos emboloradores/manchadores Fungos apodrecedores
5	Contato com o solo, água doce e outras situações favoráveis à deterioração, como engaste em concreto e alvenaria.	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira Cupins-subterrâneos Cupins-arborícolas Fungos emboloradores/manchadores Fungos apodrecedores
6	Exposição à água salgada ou salobra.	Perfuradores marinhos Fungos emboloradores/manchadores Fungos apodrecedores

Em todas estas referências citadas, a agressividade à madeira é tratada como um fator dependente apenas das condições de umidade do local, deixando-se de lado a contribuição à degradação da madeira pela temperatura, assim desprezando a atividade biológica em função desta variável termodinâmica.

3.8.1 As classes de risco no desenvolvimento de projetos

Para exemplificar a utilização do sistema de classes de risco no desenvolvimento de projetos de estruturas, nacionalmente, cita-se o caso das estruturas de concreto.

A norma de projetos de estruturas de concreto[13], NBR 6118/2003, impõe a utilização das classes de riscos, dividindo a agressividade ambiental em 4 classes, conforme a Tabela 3.20.

TABELA 3.20 – Classes de agressividade ambiental – (NBR 6118/2003)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Após definida a classe de agressividade, determina-se o valor máximo da relação água/cimento, e o valor do f_{ck}[14] mínimo a ser utilizado, Tabela 3.21.

TABELA 3.21 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto – (NBR 6118/2003)

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto[15]	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
NBR 8953	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

CA – Elementos estruturais de concreto armado

CP – Elementos estruturais de concreto protendido

[13] Estruturas de concreto armado e protendido.
[14] Resistência característica do concreto à compressão.
[15] Classe de resistência do concreto C20 corresponde a uma resistência característica à compressão de 20 MPa, e assim sucessivamente.

Através da classe de agressividade define-se ainda o cobrimento de concreto que a armadura do concreto armado ou protendido deverá possuir. Tabela 3.22.

TABELA 3.22 – Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento – (NBR 6118/2003)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Além disso, a NBR 12655/2006 Concreto de cimento Porltand – Preparo, controle e recebimento, impõe o consumo mínimo de cimento por metro cúbico de concreto, em função da agressividade ambiental definida pela NBR 6118/2003, Tabela 3.23.

TABELA 3.23 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto – (NBR 12655/2006)

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
NBR 8953	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m^3)	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA – Elementos estruturais de concreto armado

CP – Elementos estruturais de concreto protendido

Pode-se perceber que todos os critérios que envolvem a durabilidade das estruturas de concreto estão vinculados com a definição inicial da classe de agressividade ambiental na qual a estrutura a ser projetada estará exposta. A definição da classe de agressividade é o primeiro critério definido ao se iniciar um projeto de estrutura de concreto.

O engenheiro que desenvolve projetos de estrutura de concreto utiliza a norma de projeto como um guia para a durabilidade da estrutura a ser executada e utilizada. Entretanto, deve-se lembrar que NÃO É UMA RECOMENDAÇÃO, É UMA IMPOSIÇÃO, a utilização das classes de agressividade.

Entende-se que a revisão da norma de projetos de estruturas de madeira, deve incorporar o sistema de classes de risco, não como uma recomendação e sim como uma imposição, no qual todo o desenvolvimento do projeto esteja atrelado a este sistema.

4 OS POSTES DE MADEIRA

Segundo o modelo proposto por Brazolin et al. (2004) para a revisão da NBR 7190/1997, os postes de energia e telefonia são enquadrados na classe de risco 5, conforme Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Madeira roliça

Aplicação	Classe de risco
Cerca	4 e 5
Coluna	2, 3, 4 e 5
Cruzeta	4
Defensa	5 e 6
Dormente	5
Estrutura de telhado (*)	2, 3 e 4
Fundação	5 e 6
Guarda-roda; guarda-trilho	4 e 5
Moirões/lasca	5
Móveis	1, 2, 3, 4 e 5
Playground	4 e 5
Ponte/passarela (**)	4, 5 e 6
Poste (energia e telefonia)	5
Tabuleiro	4

(*) cumeeira, frechal, ripa, terça, tesoura, tirante, travamento, e/ou caibro;
(**) tabuleiro, fundação, peças estruturais, guarda-corpo, e/ou corrimão.

Os postes de madeira recebem tratamento preservativo com a finalidade de prolongar sua vida útil; porém, ao longo do tempo, essa proteção perde a sua eficiência tornando-os suscetíveis à ação dos agentes externos, principalmente na região de contato do poste com o solo, denominada “afloramento”, Figura 4.1, a qual é mais crítica devido às condições favoráveis de desenvolvimento destes tipos de organismos, (SALES et al., 2002).

FIGURA 4.1 – Região de afloramento do poste

Oliveira et al. (1986) identifica quatro zonas diferentes de micro-climas em um poste instado, sendo:

a) No topo do poste, uma área de umedecimento e secagem intermitentes – eventualmente pode ocorrer apodrecimento;
b) Acima do nível do solo, condições permanentes de baixa umidade – a deterioração raramente ultrapassará a mudança superficial na coloração da madeira devido à fotodeterioração;
c) Na região do afloramento, condições permanentes de alto nível de umidade – umidade e oxigenação favorável, ocorrendo o processo de deterioração mais rapidamente;
d) Uma região com excesso de umidade na base do poste[1] - umidade favorável, porém nesta região o oxigênio passa a ser o fator limitante, diminuindo drasticamente a atividade dos fungos, até que, em regiões de maior anaerobiose, apenas bactérias colonizam a madeira, raramente ocorrendo apodrecimento significativo.

Oliveira et al. (1986) continua relatando que cada uma destas áreas apresentará características de colonização e deterioração bastante distintas. Eventualmente, poderá ocorrer apodrecimento na região “a”, enquanto na região “b” a deterioração raramente ultrapassará a mudança superficial de coloração, devido a fotodeterioração. Nestas áreas, apesar de existirem condições de oxigenação suficientes para o desenvolvimento de fungos, a baixa umidade evita que este desenvolvimento ocorra. Nas regiões “c” e “d”, a umidade é favorável, mas o oxigênio passa a ser o fator limitante. Na região de afloramento, as condições de umidade e oxigenação são favoráveis, e é aí que o processo de deterioração ocorre mais rapidamente. Nas regiões inferiores, o oxigênio passa a ser o fator limitante, e a

[1] Na referência citada, é considerado que o poste atinge o lençol freático.

atividade dos fungos diminui drasticamente, até que, em regiões de maior anaerobiose, apenas bactérias colonizam a madeira, raramente ocorrendo apodrecimento significativo.

Entretanto, deve-se lembrar que o topo do poste é uma região não qual, apesar de estar cortada em chanfro, devido à anatomia da madeira, esta posição possui grande facilidade de absorção de água.

Além disso, tanto o topo do poste bem como as cruzetas fixadas próximas ao topo, as aves utilizam como “poleiro”, e até mesmo construindo ninhos. A presença de aves no topo bem como nas cruzetas aumentam a proliferação de fungos, devido à deposição de excrementos. A Figura 4.2 mostra várias cruzetas que foram substituídas devido à deterioração pela ação de fungos.

FIGURA 4.2 – Cruzetas deterioradas por fungos

A região do topo dos postes e as cruzetas devem ser consideradas como criticas, pois é sobre estas que são fixados conectores e equipamentos.

Segundo Wolfe (1999), a falha precoce ou prematura de postes podem ser geralmente atribuídas a um ou mais de três fatores:

- Pobre penetração e distribuição do preservativo;
- Inadequada retenção do preservativo;
- Uso de substâncias preservantes de baixa qualidade.

José Carlos et al. (1990) citam duas importantes características do gênero *Eucaliptus*, podendo afetar sua vida útil:

- **Fendilhamento:** a espécie que possui maior tendência a fendilhar que outras, agravando-se com velocidade de secagem;

- **Pequeno volume de alburno:** um maior volume de alburno imunizado envolvendo e protegendo o cerne leva a madeira tratada a apresentar uma vida útil mais longa, pois em regiões infestadas e cupins xilófagos, estes penetram pelas fendas desenvolvidas após o tratamento, destruindo o cerne.

A Figura 4.3 mostra a superfície de um poste de eucalitpo recém-tratado, o qual ainda está em estoque. Pode-se perceber a grande quantidade de fendas existentes

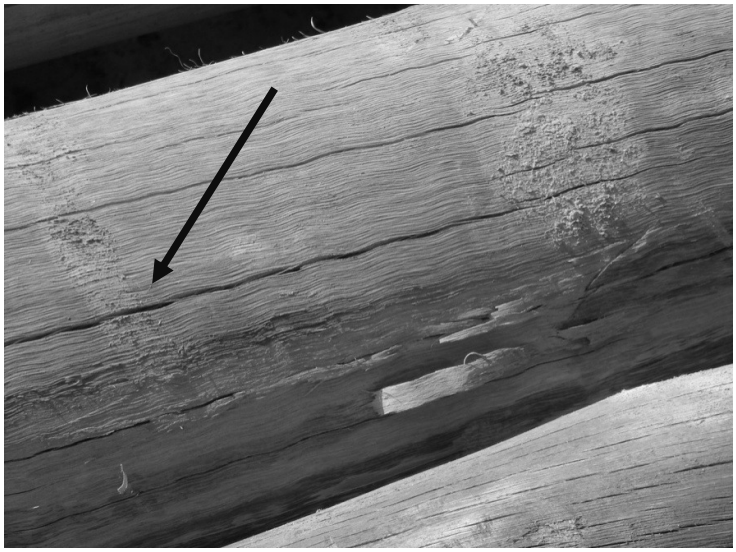

FIGURA 4.3 – Fendas na superfície de postes de eucalipto

Utilizando o sistema proposto[2], Castro Silva (2003) classifica algumas madeiras das espécies de *Eucaliptus* e *Pinus* em função da resistência natural a cupins e a tratabilidade em função de suas respectivas permeabilidades aos preservativos, Tabela 4.2.

[2] Tabelas 3.1 e 3.3, respectivamente.

TABELA 4.2 – Resistência natural ao ataque de cupins e permeabilidade das madeiras – (CASTRO SILVA, 2003)

Espécie de madeira	Resistência natural a cupins	Permeabilidade
Eucalyptus camaldulensis	3	3
Eucalyptus citriodora	2	3
Eucalyptus cloeziana	1	3
Eucalyptus grandis	3	3
Eucalyptus maculata	2	3
Eucalyptus maidenii	3	3
Eucalyptus microcorys	3	3
Eucalyptus paniculata	2	3
Eucalyptus propinqua	3	3
Eucalyptus saligna	3	3
Eucalyptus punctata	3	3
Eucalyptus tereticornis	4	3
Eucalyptus triantha	3	3
Eucalyptus umbra	3	3
Eucalyptus urophylla	3	3
Pinus caribaea	4	1
Pinus bahamensis	4	1
Pinus hondurensis	4	1
Pinus elliottii	4	1
Pinus oocarpa	3	1
Pinus taeda	4	1

Sales et al. (2003), por meio de inspeções realizadas em estaleiros de postes tratados, identificou situações nas quais, apesar do tratamento preservativo ter sido executado a contento, algumas peças necessitariam ser rejeitadas em função de valores medidos para os parâmetros estabelecidos. Dentre os defeitos de maior ocorrência identificados, destacavam-se a profundidade e magnitude de fendas com dimensões superiores aos limites estabelecidos pelo NBR 8456, sendo que estas podem expôr o interior dos postes aos agentes agressivos, de modo que o efeito do preservativo no alburno pouco contribuirá para a garantia da vida útil do poste em padrões aceitáveis.

Outros problemas, segundo Alawady; Avent; Mukai (1998), devido aos postes receberem tratamento preservativo sob pressão, o interior da peça recebe menor quantidade de preservante, podendo desenvolver regiões ocas em função do apodrecimento; assim, tal situação acarreta a diminuição da resistência à compressão e à flexão, significativamente. E

ao fato da menor concentração do produto preservante no interior da peça, soma-se também a ocorrência da lixiviação deste produto com o passar do tempo.

Sales et al. (2004), estudando a durabilidade de postes de eucalipto tratado, através de Espectroscopia de Absorção Atômica (AAS), avaliam os valores de retenção de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), às profundidades de 1, 2 e 3 cm, comparando os valores entre um poste retirado de serviço (PL1) o qual apresenta sinais de apodrecimento e um poste novo (PL2) de mesma espécie, ambos na região de afloramento, Tabela 4.3. Os resultados confirmam que, além da menor concentração do preservante no interior da peça, este produto é lixiviado com o decorrer do tempo. Assim, por este estudo, Sales et al. (2004) validaram as hipóteses de menor concentração e da lixiviação do produto preservativo, propostas por (ALAWADY; AVENT; MUKAI, 1998).

TABELA 4.3 - Valores de concentração de CCA - (SALES et al., 2004)

Amostra	CCA - (i.a.)* - (kg/m^3)
PL1 - 1 cm	5,06
PL1 - 2 cm	2,55
PL1 - 3 cm	0,07
PL2 - 1 cm	8,40
PL2 - 2 cm	5,35
PL2 - 3 cm	1,96

(i.a.) - Ingrediente ativo

Considerando quatro características das espécies de eucalipto (pequeno volume de alburno, tendência ao fendilhamento, cerne moderadamente durável e baixa permeabilidade para a realização de tratamento preservativo, Figura 4.4) e, além disso, somando-se também a lixiviação do produto preservativo ao longo do tempo, obtém-se uma grande possibilidade da ocorrência de problemas em poste em serviço desta espécie.

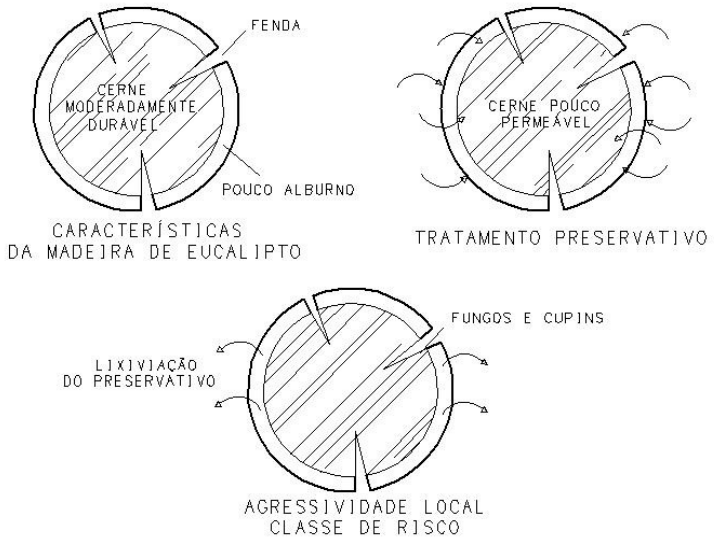

FIGURA 4.4 – Utilização da madeira de eucalipto como postes

Segundo Bueno (2001), as principais causas de substituições de postes de madeira são:

- Ataque por fungos apodrecedores na zona de afloramento do poste, região mais crítica, devido às condições favoráveis de desenvolvimento desse tipo de organismo;
- Ataque por cupins, com maior incidência de cupins subterrâneos. Esse tipo de ataque ocorre, com maior frequência, em regiões quentes, de solos arenosos, com predominância de vegetação.

A empresa LIGHT, ao desenvolver o programa de manutenção em postes de madeira no Estado do Rio de Janeiro, constatou que 90% da deterioração de seus postes são causadas por fungos apodrecedores, e 10% devido ao ataque de cupins, Light (1994).

Segundo Bottazzo et al. (1988), no período entre 1984 à 1987, na regional da CESP – Companhia Energética de São Paulo da cidade de Andradina, foram retirados 2748 postes, apurando-se a distribuição das causas, conforme a Figura 4.5.

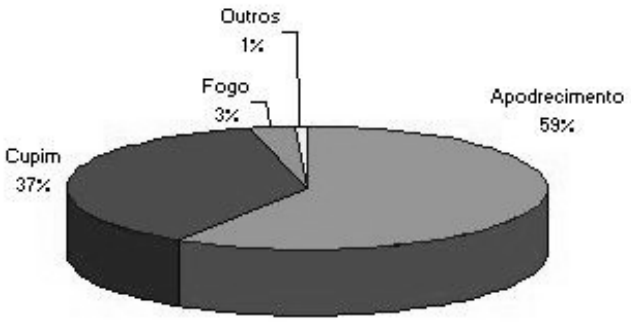

FIGURA 4.5 – Distribuição relativa das causas de retirada de postes – (BOTTAZZO et al., 1988)

Por este levantamento, verificou-se que mais da metade das causas de substituição dos postes de madeira é em função de apodrecimento que é dado através da atividade fungica.

Considerando as ações preventivas contra estes agentes, Botazzo et al. (1988) recomenda:

a) Contra cupins

- Construção de barreiras químicas no solo ao redor do poste com os produtos organoclorados, e com organofosforados de baixa toxidez;

b) Contra fungos

- Proteger a região do afloramento com pasta tixotrópica recoberta com bandagem;
- Procurar projetar os postes do lado mais alto da rua;
- Aplicação de manutenção preventiva em intervalos de menor periodicidade;

Os cupins vivendo em contado com o solo constroem galerias e penetram no poste através de fendas ou rachas, ou até mesmo pelo limite inferior da base engastada, sendo que muitas vezes, com o ataque em estágio avançado, não é evidente externamente. Um poste atacado por cupins pode apresentar ocos internos em maior ou menor grau, que devem se cuidadosamente avaliados para se detectar o nível de comprometimento do mesmo; sendo assim necessário, além do retratamento externo, um tratamento interno e do solo, (LIGHT, 1994).

Sales et al. (2003) relata que a durabilidade dos postes preservados não está somente relacionada ao processo de preservação na usina, mas deve prioritariamente atender a alguns parâmetros relacionados com cada uma das fases de produção do poste novo:

- Proposição de ações e procedimentos antes do tratamento (avaliação da qualidade da matéria-prima retirada da floresta).

– Espécie e propriedades;

- Idade de abate e efetivo cumprimento do período de sazonamento, sendo que o teor de umidade antes do tratamento não poderá ultrapassar 25% ou 30%, para preservação com produtos oleossolúveis ou hidrossolúveis, respectivamente;
- Dimensões e classificação do poste em função da aplicação requerida, NBR 8457;
- Existência de fendas, rachas e nós na base, corpo e topo do poste, com dimensões superiores aos limites recomendados pela NBR 8456;
- Utilização de dispositivos para minimizar o aparecimento de fendas nos topos e bases do poste.

• Proposição de ações e procedimentos depois do tratamento (avaliação da qualidade do processo de preservação na usina de tratamento).

- Níveis de retenção do produto preservativo;
- Penetração do produto preservativo;
- Resistência nominal e classificação conforme os valores obtidos em ensaios de flexão representativos dos lotes, NBR 6231[3];
- Condições gerais de preservação.

• Proposição de ações e procedimentos para armazenamento dos postes tratados (verificação da qualidade do poste armazenado).

- Cuidado no manuseio: carga e descarga;
- Separação por tipo e comprimento;
- Placa de identificação com dados que permita a rastreabilidade do lote recebido, nas inspeções e manutenção de rede.

4.1 A vida útil dos postes de madeira

Conforme Wolfe (1999), a vida útil dos postes pode variar dentro de um largo intervalo, dependendo de suas propriedades, tratamentos preservativos, condições de serviço e práticas de manutenção, e em muitas vezes a transmissão e distribuição de energia é limitada pela obsolescência da linha, em vez da vida física do poste.

A falha de um poste é considerada pela NBR 8456/1984, como o ataque de fungos (apodrecimento) ou térmitas no alburno ou cerne exigindo-se sua troca, impondo que a vida útil do poste de eucalipto deve ser de quinze anos, no mínimo, contados a partir da data de preservação, contra qualquer falha das unidades do lote de postes fornecidos, sendo que:

[3] NBR 6231/1980 – Postes de madeira – Resistência à flexão.

a) Admite-se, no decorrer dos primeiros cinco anos, uma falha total de 1% dos postes;
b) Do 6º ao 10º ano, admite-se 1% de falhas para cada período de 1 (um) ano, acumulando-se, no máximo, 6% das falhas permitidas no fim do 10º ano;
c) Do 11º ao 15º ano, admite-se 2 % de falhas para cada período de 1 ano, acumulando-se, no máximo, 16% de falhas permitidas, no fim do período de 15 anos.

A NBR 8456/1984, além de não indicar e não orientar a realização de manutenção periódica dos postes de madeira, desconsidera a variabilidade climática do território nacional, isto é, não leva em conta as diferenças de umidade, precipitação e temperatura existentes em nosso país de dimensões continentais e com grandes diferenças climáticas. Assim, esta norma considera que, independentemente da região onde estejam instalados os postes de eucalipto, terão um único valor para o período de vida útil.

A norma australiana e neozelandesa AS/NZS 4676:2000 é um exemplo de norma que adota critérios climáticos para a durabilidade e vida útil dos postes, Figura 4.6.

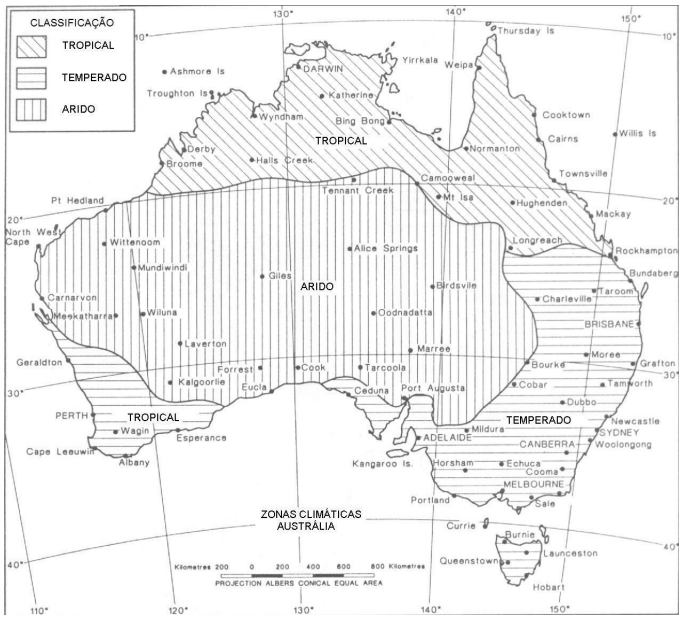

FIGURA 4.6 – Regiões climáticas da Austrália – (AS/NZS 4676:2000)

Em função desta variabilidade climática, o território australiano é dividido em zonas às quais correspondem as várias expectativas de vida útil, em função do tratamento preservante por este recebido, Figura 4.7. Sendo a Nova Zelândia um país de pequena extensão territorial, a AS/NZS 4676:2000, adota como este sendo um país de clima temperado em todo seu território.

FIGURA 4.7 – Regiões de vida útil nominal para postes de madeira – (AS/NZS 4676:2000)

A Tabela 4.4 mostra os valores nominais de vida útil para as classes de tratamento e regiões para o território australiano.

TABELA 4.4 – Classificação sugerida da vida útil nominal dos postes de madeira (AS/NZS 4676:2000)

Região (ver Figura 4.7)	Vida útil esperada (anos)					
	Classe de risco H5 Peça tratada conforme AS 1604.1:2005				Peça não tratada sem alburno	
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 1	Classe 2
1	45-55	35-45	25-35	40-50	25-35	15-25
2	50+	50+	30-40	50+	30-40	25-35
3	50+	50+	40-50	50+	50+	30-40

4.2 Dimensionamento

A CPFL, em sua Norma Técnica *3648 Projeto de Rede de Distribuição – Cálculo Mecânico*, impõe o dimensionamento mecânico dos postes de madeira apenas considerando os esforços solicitantes, e a tensão admissível da madeira à flexão, sendo

esta de 28,3 MPa, a qual é originária da relação entre a tensão de ruptura à flexão (σ_f) de 85 MPa, e o coeficiente de segurança mínimo (K) de 3,0, adotados pela NBR 8456/1984[4].

A *AS/NZS 4676:2000 Structural design requirements for utility services poles*, para o projeto de linhas de transmissão, impõe as condições expressas pelas Eq. 4.1 a 4.7:

Resistência à flexão

$$\Phi M \geq M^* \tag{4.1}$$

$$\Phi M = \Phi k_1 \cdot k_{20} \cdot k_{21} \cdot k_{22} \cdot k_d [f'_b \cdot Z] \tag{4.2}$$

Resistência ao cisalhamento

$$\Phi V \geq V^* \tag{4.3}$$

$$\Phi V = \Phi k_1 \cdot k_{20} \cdot k_{22} \cdot k_d [f'_s \cdot A_s] \tag{4.4}$$

Resistência à compressão

$$\Phi N_c \geq N^* \tag{4.5}$$

$$\Phi N_c = \Phi k_1 \cdot k_{12} \cdot k_{20} \cdot k_{21} \cdot k_{22} \cdot k_d [f'_c \cdot A_c] \tag{4.6}$$

$$\left(\frac{M^*}{\Phi M}\right) + \left(\frac{N_c^*}{\Phi N_c}\right) \leq 1 \tag{4.7}$$

Sendo

ΦM: Momento resistente;

M^*: Momento atuante de cálculo;

ΦV: Cisalhamento resistente;

V^*: Cisalhamento atuante de cálculo;

ΦN: Esforço resistente à compressão;

N_c^*: Esforço atuante de cálculo;

k_1: fator de duração da carga;

k_{12}: fator de estabilidade para compressão;

k_{20}: fator de imaturidade;

k_{22}: fator de processamento;

k_d: fator de degradação;

---

[4] Tanto na Norma Técnica CPFL, bem como na NBR 8456/1984, os valores de tensão são expressos em daN/cm^2.

f'_c: resistência característica à compressão paralela;
f'_b: resistência característica à flexão;
f'_s: resistência característica ao cisalhamento;
A_c: área da seção transversal crítica;
A_s: área de cisalhamento plano da seção crítica;
Z: módulo resistente da seção crítica.

O fator de degradação "k_d" é utilizado prevendo uma perda de capacidade resistente do poste em função do processo de degradação que ocorre ao longo dos anos em serviço. A Tabela 4.5 mostra os valores de "k_d" que variam em função da espécie de madeira, existência de tratamento preservativo, vida útil de projeto e diâmetro do poste. Ao adotar um determinado valor de k_d, assume-se que a perda da capacidade resistente é de "1 – k_d".

TABELA 4.5 – Fator de degradação – (AS/NZS 4676:2000)

Tipo de poste (*)	Vida de projeto (anos)	Diâmetro do poste		
		d < 250 mm	250 ≤ d ≤ 400	d > 400 mm
		k_d	k_d	k_d
Softwood preservado em todo o comprimento	20	1,00	1,00	1,00
	50	0,80	0,85	0,90
Hardwood preservado em todo o comprimento	20	1,00	1,00	1,00
	50	0,80	0,85	0,90
Hardwood não-tratada, Classe de Durabilidade 1	20	0,80	0,90	1,0
	50	0,50	0,55	0,60
Hardwood não-tratada, Classe de Durabilidade 2	20	0,70	0,80	0,90
	50	0,30	0,40	0,45

(*) – De acordo com a AS 2209

Verifica-se que, para os dois casos de postes tratados para uma vida útil de projeto de 20 anos, e até mesmo para poste não-tratado com diâmetro maior que 400 mm, durabilidade de 20 anos e Classe 1, não é considerado como existente a perda de capacidade resistente. (k_d=1,0). Porém, exceto para as situações já comentadas, o valor de k_d diminui com a diminuição do diâmetro e com o aumento da vida útil.

Este método contraria a NBR 8456/1984, que considera, como fim da vida útil de um poste tratado, quando neste se instala um processo de degradação. Além de não considerar como existente um processo de degradação significativo antes de 20 anos de vida útil, este também considera que, mesmo depois de instalado tal processo, o poste ainda possui capacidade resistente.

A principal diferença entre as normas australiana e brasileira é o entendimento de vida útil. Para a norma brasileira, a vida útil de um poste termina quando ocorre a instalação de um processo de degradação. Já, na norma australiana, a vida útil de um poste termina quando se perde a capacidade resistente considerada em projeto.

4.3 Ensaio de caracterização mecânica

A NBR 8456/1984 impõe duas condições aos postes de madeira, quanto ao ensaio de resistência à flexão:

- **Carga de ruptura**: a carga de ruptura não deve ser inferior a três vezes a resistência nominal do poste;
- **Elasticidade**: os postes submetidos a uma tração igual à resistência nominal não devem apresentar flechas, no plano de aplicação dos esforços, superior a 5% do comprimento nominal do poste.

A caracterização mecânica dos postes de eucalipto nacionalmente é realizada através do método da viga engastada em balanço, normatizado pela *NBR 6231/1980 – Postes de Madeira – Resistência à flexão – Método de Ensaio*, conforme Figura 4.8.

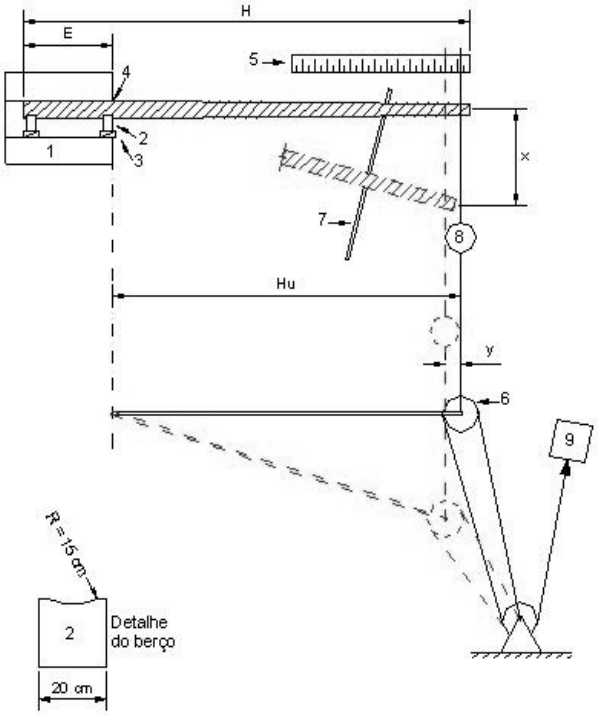

FIGURA 4.8 – Dispositivo para ensaio de resistência à flexão – (NBR 6231/1980)

1 - Dispositivo para engastamento do poste a ensaiar;
2 - Berço de madeira para acomodação do poste (ver detalhe);
3 - Cunhas de madeira;
4 - Seção de engastamento;
5 - Trena;
6 - Moitão;
7 - Suporte;
8 - Dinamômetro;
9 - Dispositivo para tração;
H - Comprimento total do poste;
E - Comprimento do engastamento;
H_u - Comprimento útil;
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;
X - Flecha.

Segundo a NBR 6231/1980, a aplicação da carga deve ser contínua e sua velocidade é dada pela Eq. 4.8, em função da flecha no ponto de aplicação da mesma.

$$V = k \cdot \frac{H_u}{C} \tag{4.8}$$

onde,
V: velocidade de deformação cm/mim;
H_u: braço de alavanca em cm;
C: Circunferência na seção de engastamento em cm;
k: 0,00146.

Para os cálculos do limite de resistência à flexão da madeira na seção do engastamento e do módulo de elasticidade, têm-se as Eq. 4.9 e 4.10.

$$\sigma_F = \frac{32 \cdot \pi^2 \cdot P \cdot L}{C^3} \tag{4.9}$$

sendo,
σ_F: limite de resistência 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" - (L = Hu - y) – (cm);
C: circunferência na seção do engastamento (cm).

$$E = \frac{64 \cdot \pi^3 \cdot L^2}{3 \cdot C^3 \cdot c} \times \frac{\Delta P}{\Delta y} \tag{4.10}$$

onde,
E: módulo de elasticidade da madeira (MPa);
C: circunferência na seção de engastamento (cm);
c: circunferência no ponto de aplicação da carga (cm).

O ensaio de resistência à flexão (elasticidade e carga de ruptura) deve ser feito a cada sub-lote de até 200 unidades. Caso o ensaio realizado não seja satisfatório, uma nova amostragem deve ser realizada, com o dobro de exemplares da primeira amostragem, e se for constatado qualquer falha, todo o lote sob inspeção deve ser rejeitado.

Entretanto, Miná et al. (2006) apresenta três graves erros na NBR 6231/1980, sendo um erro na equação da velocidade de carregamento, e outros dois erros na equação da determinação do módulo de elasticidade, no valor do comprimento "L" e no deslocamento a ser considerado. Para a correção do erro em função da velocidade de carregamento foi avaliada comparativamente com o método de ensaio prescrito pela ASTM D 1036/97, a qual adota o mesmo mecanismo de carregamento. Quanto aos erros na equação do módulo de elasticidade, estes foram avaliados pelo Processo dos Trabalhos Virtuais (PTV). Com as correções realizadas as equações para a determinação na velocidade de carregamento e na determinação do módulo de elasticidade são:

$$V = k \cdot \frac{{H_u}^2}{C} \tag{4.11}$$

$$E = \frac{64 \cdot \pi^3 \cdot L^3}{3 \cdot C^3 \cdot c} \times \frac{\Delta P}{\Delta x} \tag{4.12}$$

- Na Eq. 4.10, o comprimento "L" está elevado ao quadrado, enquanto que na Eq. 4.12 este valor está elevado à terceira potência;
- A Eq. 4.10 considera o deslocamento no sentido do eixo longitudinal; porém, não considera o valor do deslocamento perpendicular ao eixo, conforme a Eq. 4.12;

A NBR 6231 está publicada desde 1980, sendo, até o momento 29 anos de que ela está em vigor. Porém, até o presente momento, não foi publicada uma Errata para correção a mesma, concluindo-se que tais erros durante todos esses anos não foram percebidos e identificados. Para que tal fato tenha ocorrido podemos considerar três situações possíveis:

- Não foram produzidos postes de madeira durante tal período, não sendo assim possível e/ou necessário executar o ensaio conforme previsto por norma;
- Foram produzidos postes de madeira durante o período, mas não sendo executado o ensaio previsto pela norma;
- Foram produzidos postes de madeira durante o período, com a realização do ensaio previsto por norma, porém, este não sendo executado rigorosamente conforme a norma especifíca.

Considera-se que as duas últimas situações sejam as mais prováveis de terem ocorrido, sendo que quaisquer umas destas duas que tenha ocorrido na maioria das vezes, revelam um grave defeito do meio técnico nacional: a não execução de ensaios conforme previsto e especificado pelas normas. Qualquer engenheiro que realize o ensaio conforme o especificado pela norma é capaz de perceber inconsistência nos valores obtidos.

4.4 Inspeção dos postes de madeira em serviço

Devido à probabilidade de vida útil longa dos postes de madeira, oportunas inspeções de desempenho destes postes em campo são úteis, averiguando se as exigências mínimas de padrões de preservação de madeira existentes provêem adequada proteção. Isto é particularmente verdade para postes usados nos trópicos, onde o potencial para ataque biológico é maior que em climas temperados, DeGroot (1986), visto que estas regiões atendem às condições necessárias (umidade e temperatura) para o rápido ataque de organismos xilófagos.

Pertile et al. (1990) relatam que os postes de madeira da CEEE têm duração média estimada de 20 anos sem retratamento, estimando-se que a vida dos postes de madeira poderá atingir até 50 anos com a execução de tratamentos periódicos a cada 8 anos.

A AS/NZS 4676:2000 recomenda que as inspeções sejam realizadas periodicamente, conforme a Tabela 4.6.

TABELA 4.6 – Períodos recomendados para inspeção de postes de madeira – (AS/NZS 4676:2000)

Espécie e classe	Tratamento preservante	Inspeções periódicas recomendadas (anos)	
		Primeira	Subseqüentes
Hardwood (Euc. Spp) Durabilidade Classe 1*	Sem tratamento	10	Entre 3 a 6
Hardwood (Euc. Spp) Durabilidade Classe 1*	H5 para alburno	20	Entre 3 a 6
Hardwood (Euc. Spp) Durabilidade Classe 2*	Sem tratamento	10	Entre 3 a 6
Hardwood (Euc. Spp) Durabilidade Classe 2*	H5 para alburno	20	Entre 3 a 6
Radiata pine plantation softwood	H5	20	Entre 3 a 6

(*) Ver Tabelas 3.15 e 3.16

Morrel (1996) descreve que, diante de um poste biodeteriorado, um inspetor do Programa de Manutenção de Postes deve tomar 1 de 3 decisões:

- Aprovação do poste com tratamento corretivo;
- Aprovação do poste com tratamento corretivo e reforço;
- Reprovação do poste.

Na maioria dos casos de postes com apodrecimento interno, é requerido um mínimo de 5 cm (2 polegadas) de casca externa de madeira sã, embora possa variar as exigências considerando a carga do poste, configurações ou condições climáticas, Figura 4.9. Para postes com apodrecimento externo, o inspetor deve retirar toda a madeira apodrecida, e posteriormente, medir a circunferência de madeira sã, a qual é comparada com uma tabela para verificar se é permitida para tal classe de poste. Possuindo adequada quantidade de madeira na casca ou de circunferência (para apodrecimento interno ou externo, respectivamente), os postes são corretivamente tratados.

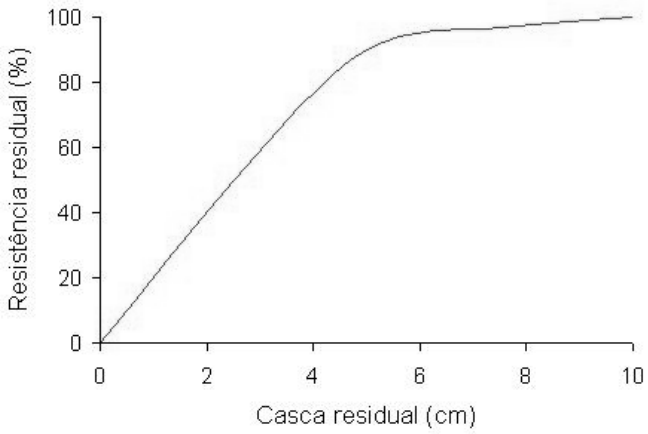

FIGURA 4.9 – Resistência pela espessura da casca residual do poste – (MORRELL, 1996)

4.4.1 Metodologia de inspeção M13-92

A norma "*M13-92 A guideline for the physical inspection of poles in servic*e", da "American Wood-Preservation Association – AWPA", é um guia feito exclusivamente para detectar defeitos que afetam a durabilidade de postes de madeira em serviço e para auxiliar projetos de especificações de sistemas particulares.

a) Inspeção preliminar

Os postes devem ser examinados preliminarmente por uma inspeção visual, em todos os lados, do topo para a base, em qualquer defeito. Deve ser direcionada uma atenção particular para notar ítens como: danos mecânicos, apodrecimento externo, ataque de insetos, furos de nós, furos de pica-paus, e fraturas na seção transversal. Qualquer poste não-aproveitável encontrado deve ser substituído sem adicionais inspeções. Postes aproveitáveis encontrados em inspeção visual devem ser percutidos com um martelo leve ao redor de sua circunferência a partir do afloramento até pelo menos 1,20 m acima. Qualquer região suspeita de defeitos internos deve ser examinada por adicional perfuração para o interior do poste a um ângulo íngreme com uma lâmina afiada ou com uma broca para avaliar qualquer dano. Todos os furos devem ser encharcados com um produto preservativo e fechados com ajustadas cavilhas tratadas. Qualquer poste não-aproveitável encontrado deve ser substituído sem adicionais inspeções.

b) Inspeção na zona de afloramento

Para postes com durabilidade, encontrados em complemento da inspeção, deve ser feita inspeção adicional abaixo da linha do afloramento. Deve ser direcionada uma atenção particular para a detecção de apodrecimento externo através de percussão e raspagem com escova de aço. Um ou mais furos devem ser realizados a partir da região conhecida em comum para mostrar a maior incidência de apodrecimento interno. Este pode variar a partir da imediata região de afloramento, para muitos centímetros abaixo do solo, dependendo da espécie, tratamento preservativo, tipo de solo e clima.

Em regiões onde a precipitação anual exceda 500 mm, os furos devem ser feitos no afloramento. Para precipitação anual inferior a 500 mm, o poste deve ser escavado até uma profundidade de 45 cm e os furos devem ser feitos neste nível.

Os postes devem ser furados onde a percussão indicar a possibilidade de um defeito ou próximo a uma fenda (se uma estiver presente). Se nenhum defeito está aparente, o furo deve ser feito apenas abaixo, no afloramento, a ângulo de 45° para o centro do poste. Os cavacos dos furos devem ser examinados para evidenciar apodrecimento ou umidade excessiva. Se apodrecimento interno é localizado, faz-se adicional furo para determinar o mínimo e a máxima dimensão da casca. Uma espessura da casca deve ser usada também para determinar a extensão do vazio. Postes com apodrecimento externo devem ser raspados para remover madeira suficiente para obter uma estimativa segura da profundidade da região afetada. Apodrecimentos ao redor e nas fendas também devem ser removidos para determinar a profundidade e largura do apodrecimento. Os furos da inspeção devem ser preenchidos com um preservativo e fechados com ajustadas cavilhas tratadas.

Vários dispositivos de testes não-destrutivos têm sido desenvolvidos para inspeção de postes. Tais dispositivos dão um valor de resistência residual, baseado em comparações com postes previamente inspecionados de algumas espécies, porém, não podem detectar apodrecimento e devem ser usados em conjunto com procedimentos normais de perfuração.

Um adicional tratamento preservativo no afloramento deve ser aplicado para qualquer poste não rejeitado que foi escavado para esta inspeção complementar. Postes com apodrecimento externo devem ter toda a madeira apodrecida removida a partir da superfície e exposto antes do tratamento. Postes com orifício de apodrecimento incluso ou interiores ocos devem ser inundados interiormente com um preservativo e também tratados externamente.

Quando o apodrecimento é detectado, é recomendada a aplicação de adicional preservativo. A superfície de apodrecimento é normalmente controlada por aplicação de pastas preservativas na superfície abaixo do afloramento. A madeira apodrecida é raspada antes da aplicação da pasta. Estas pastas são então cobertas com plástico ou papel de

embrulho. Preservativos de afloramento contêm combinações de soluções à base de óleo (para prover uma barreira contra novos danos) e à base hidrossolúvel (para deter os fungos do apodrecimento já presentes na madeira). O apodrecimento interno é detido por aplicação de fumegantes, os quais são aplicados como líquidos ou sólidos, mas movem-se através da madeira como gases. Estas substâncias químicas são pesticidas de uso restrito e devem ser aplicados com um aplicador licenciado. Os fumegantes são normalmente aplicados por furos de inspeção e então estes são tampados com cavilhas tratadas, para reter as substâncias químicas. A dosagem é dependente do diâmetro do poste. Vazios internos são geralmente tratados por inundação da cavidade com um preservativo oleossoluvel, os quais algumas vezes contém um inseticida.

c) Registros

Os longos intervalos entre inspeções da mesma estrutura fazem registros precisos que mantêm uma necessidade; esses registros devem ser incluídos em dados de inventário de poste, normalmente computadorizados, de modo que planejadores possam examinar estes registros para a atualização das linhas. Registros de computador podem também automaticamente identificar linhas para ser inspecionada, ou estruturas as quais devem ser inspecionadas mais frequentemente. Sobre um longo prazo, o desempenho de postes com específicos tratamentos podem ser desenvolvidos para melhorar a confiabilidade das especificações.

Os dados mínimos a serem coletados devem incluir:

- Espécie de madeira;
- Tratamento químico;
- Idade do poste;
- Tipo de defeito e localização;
- Defeito externo;
- Máxima profundidade e localização do defeito;
- Defeito interno;
- Posição do defeito;
- Espessura da casca residual;
- Carregamento do poste e configuração;
- Tratamento externo aplicado;
- Tratamento interno aplicado.

d) Avaliação dos Resultados

Os dados coletados devem ser aplicados para cada poste individualmente sendo examinados usando práticas reconhecidas de engenharia. As tensões desenvolvidas pelos momentos, determinadas para o carregamento do poste sob consideração, não devem exceder os valores permitidos por cada agência sob a qual um individual poste é requerida para operar.

Todos os defeitos (apodrecimento, danos mecânicos, ataque de insetos, etc) devem ser avaliados usando resistência ou tabela de redução de circunferência, e conferidas contra a resistência mínima, ou tabelas de circunferência preparadas ou aprovadas por engenheiros. Qualquer poste que não satisfaz as exigências mínimas deve ser avaliado como não aproveitável.

4.4.2 Metodologia de inspeção: a perfuração controlada

Segundo Lima et. al. (2006), o equipamento utilizado para a técnica de perfuração controlada, o Resistograph®, foi inicialmente desenvolvido na Alemanha, para a avaliação de postes e outras estruturas de madeira, para a prospecção interna de um caule, possibilitando a identificação de ocos, podridões, fendas, furos de insetos e outros eventos comuns em árvores, Figura 4.10.

O Resistograph mede a resistência à perfuração da madeira à penetração de uma broca de 3 milímetros de diâmetro aplicada a uma velocidade constante. A resistência à perfuração é captada por um dispositivo mecânico sensível que a transfere para uma unidade computadorizada. As diferenças no torque requerido para perfurar a madeira são registradas, sendo que um torque menor é requerido para perfurar através da madeira deteriorada, sendo caracterizada por uma queda abrupta na resistência à perfuração.

FIGURA 4.10 – Uso do Resistograph® na avaliação de postes de madeira

Avaliando caules de 23 espécies de árvores, Lima et al. (2006) relatam que o equipamento Resistograph®, modelo F400-S, mostrou-se um instrumento rápido, confiável e viável para avaliação da estrutura interna dos caules de árvores, identificando árvores com caules sadios e com caules estruturalmente comprometidos. Entretanto, Lima et al. (2006) afirmam que, devido ao Resistograph® ser um instrumento relativamente novo, são necessárias contínuas investigações para sua adequada utilização, sendo que as limitações da aplicação do equipamento estão na habilidade em interpretar as informações fornecidas.

Valle et al. (2006) utilizaram o método da perfuração controlada para avaliar quatro treliças de uma estrutura do telhado, identificando em cada uma delas o grau de deterioração das peças componentes (banzos, diagonais, pendurais), Figura 4.11.

FIGURA 4.11 – Uso de equipamento de perfuração controlada na avaliação de tesoura – (VALLE et al.; 2006)

Valle et al. (2006) concluiram em seu trabalho que o método de perfuração controlada é útil para avaliar o estado de integridade de seções transversais, quando esta

avaliação não é possível ser feita apenas com base na inspeção visual ou por percussão, podendo avaliar a extensão de uma podridão ou confirmar a ocorrência de galerias de insetos. A Figura 4.12 mostra o perfil da secção transversal em um elemento de tesoura obtido por Valle et al. (2006) na avaliação desta pela perfuração controlada.

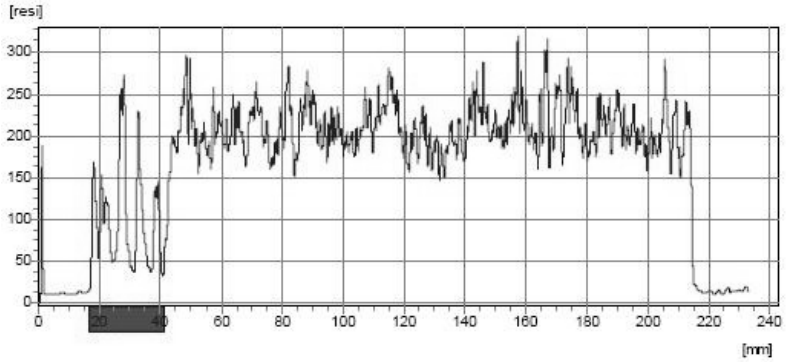

FIGURA 4.12 – Exemplo de perfil gerado por avaliação controlada em elemento de tesoura – (VALLE et al., 2006)

Entretanto, Valle et al. (2006), também relata que são necessários mais estudos para que se possam relacionar os resultados do Resistograph® aos valores de resistência ou densidade da madeira, sendo a posição dos anéis de crescimento, a variação de propriedades inerentes ao material madeira e a influência da umidade, fatores que influenciam os resultados dos testes.

Por estes relatos, verifica-se que o novo método pode ser utilizado tanto em árvores como em peças de madeiras, serradas ou roliças. Entretanto, ambos afirmam que, apesar desta técnica apresentar boa eficiência, ela deve continuar sendo pesquisada devido ao pouco conhecimento acumulado sobre tal.

4.5 Inspeção empírica de postes

Utilizou-se o trado de amostragem de madeira, para avaliação superficial da sanidade de um poste de aroeira, o qual está em serviço na cidade de São José do Rio Preto-SP, na Rua Luiz Figueiredo Filho nº 1660. Apesar de não haver placa de identificação neste poste, bem como em outros do mesmo tipo, relatos de moradores das cercanias, indicam que tal poste está em uso neste local desde a formação do bairro, algo em torno de 40 anos.

Mainieri; Chimelo (1989) descrevem as características da madeira de AROIRA-DO-SERTÃO ou URUNDEÚVA como segue abaixo:

Características gerais

Madeira muito pesada; cerne bege-rosado ou castanho claro, quando recém-cortado, escurecendo para castanho ou castanho-avermelhado-escuro; alburno direfenciado, branco levemente rosado; textura média, uniforme; grã irregular e reversa; superfície um tanto lustrosa e lisa ao tato; cheiro e gosto imperceptíveis.

Durabilidade natural

É tida na prática como a de mais alta resistência ao apodrecimento e ao ataque de cupins de madeira seca.

Tratamento preservante

Tendo seus vasos excessivamente obstruídos por tilos e óleo-resina e fibras de lume extremamente reduzido, em tratamentos severos sob pressão, demonstrou ter permeabilidade extremamente baixa às soluções preservantes.

Principais aplicações

Por ser muito pesada, de resistência mecânica alta, e por ter alta durabilidade natural, é indicada para construções externas, como vigamentos de pontes, estacas, postes, esteios, mourões, dormentes; em construção civil, como vigas, caibros, ripas, tacos para assoalho, peças torneadas etc.

Pelas Figuras 4.13 e 4.14, pode-se verificar o quão ainda tal poste está são superficialmente. A coloração escura é apenas superficial.

FIGURA 4.13 – Utilização do trado de amostragem para verificação superficial da sanidade de poste de aroeira

FIGURA 4.14 – Material superficial retirado de poste de aroeira

4.6 Proposta para aumento da durabilidade dos postes

Para o aumento da vida útil dos postes de madeira, pequenas ações podem ser realizadas.

A Figura 4.15 mostra um poste em que, na região do afloramento, existe uma pintura asfalto diluído e uma fita metálica. A pintura contribui com a diminuição da permeabilidade da superfície, enquanto a fita metálica diminui a abertura de fenda no poste próximo ao afloramento.

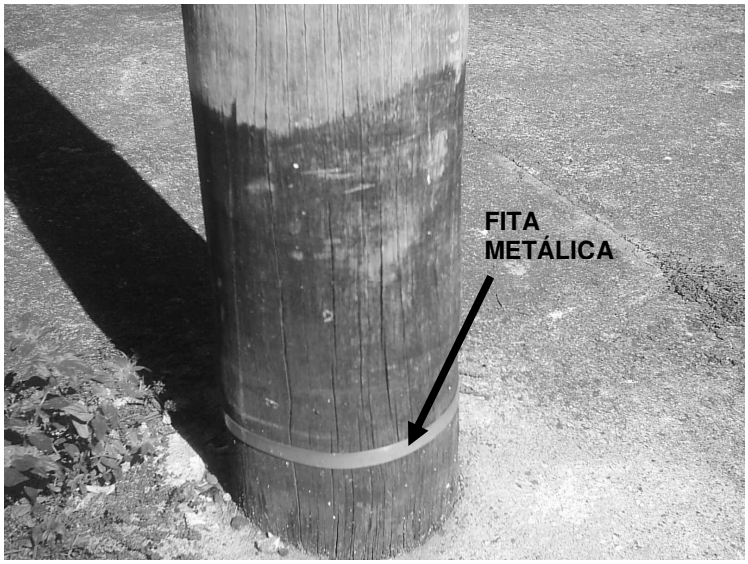

FIGURA 4.15 – Poste com pintura impermeabilizante e fita metálica no afloramento

A Figura 4.16 mostra a região do afloramento do poste, onde, após escavado, apresenta pintura impermeabilizante, apenas abaixo do nível do solo, diferentemente do poste mostrado pela Figura 4.15.

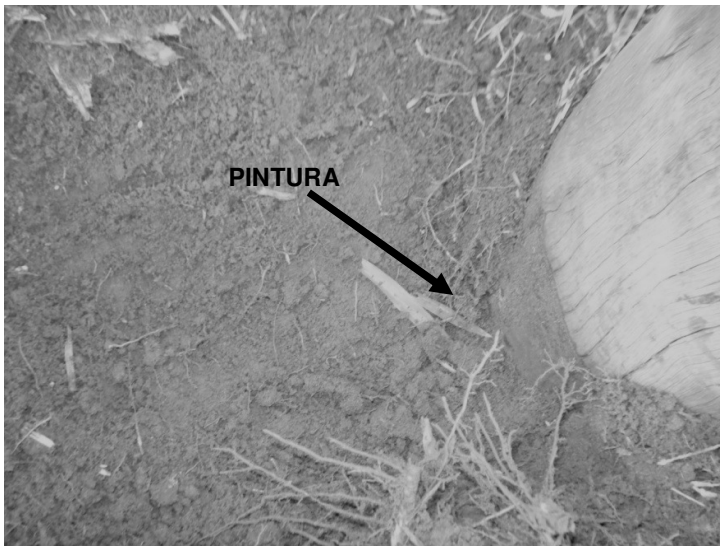

FIGURA 4.16 – Poste com pintura impermeabilizante somente abaixo do nível do solo

Outra ação que vem contribuir como o aumento da vida útil é a utilização de chapas de dente estampado do tipo GANG NAIL no topo, bem como na base do poste, Figuras 4.17 e 4.18; ambas as chapas com a finalidade de diminuir o fendillhamento do poste na extremidade.

FIGURA 4.17 – Chapa de dente estampado no topo do poste

FIGURA 4.18 – Chapa de dente estampado na base do poste

A atual norma nacional de postes de madeira (NBR 8456/1984) não indica a obrigatoriedade de tais ações. Nessa norma, o item 4.7.7 indica:

> **Tratamento adicional da base**
>
> A critério do usuário, **pode** ser exigido, em casos específicos de postes destinados a áreas de alta incidência de ataque por térmitas, que o fornecedor faça um tratamento adicional da base, com produto de comprovada eficiência, como proteção extra à parte inferior do poste.

Entende-se que tais ações devem ser impostas pela norma, não apenas sendo uma questão de acordo entre fabricantes e compradores. Deve-se lembrar que os postes para

eletrificação servem para distribuir energia em regiões rurais e urbanas onde vive a sociedade brasileira, que é a verdadeira usuária de postes tanto de madeira bem como de concreto. Assim, a ABNT – Associação de Normas Técnicas, deveria impor as condições em que um produto ou serviço deve ser fornecido.

Duas ações que aumentariam a durabilidade dos postes são propostas:

1. Utilizando um produto adequado, a pintura na região do afloramento pode contribuir minimizando o efeito do *weathering* nesta região, não havendo a necessidade desta pintura ser realizada em toda a região de engaste do poste. Abaixo do nível do afloramento realizar-se-ia uma pintura tendo apenas o intuído de diminuição da permeabilidade da madeira.
2. Além da chapa de dente estampado, tanto no topo como na base poder-se-ia pintar ambas com material impermeabilizante para a diminuição da permeabilidade nestas superfícies, as quais são mais susceptíveis à absorção de água devido à anatomia da madeira.

Pesquisando materiais que possuem características de flexibilidade, impermeabilidade, e resistência aos raios ultravioletas, o autor encontrou em Bauer et al. (2007), a citação das membranas acrílicas[5].

As membranas acrílicas são polímeros resultantes da polimerização dos monômeros do ácido acrílico ou metacrílico. Possuem boa elasticidade, aderência e boa resistência aos raios UV, sendo largamente utilizados no Brasil, principalmente pelo custo reduzido, (BAUER et al, 2007).

Entretanto, não apenas ações no momento da produção podem aumentar a vida útil dos postes. A Figura 4.19 mostra uma inadequada instalação de um poste de madeira, onde este está fixado entre a calçada e a sarjeta de escoamento de água.

[5]Como referência de membrana acrílica largamente utilizada na construção civil como impermeabilizante, tem-se o produto IGOLFLEX, da empresa SIKA.

FIGURA 4.19 – Poste de madeira instalado inadequadamente

Desta forma, tal poste devido ao permanente contato com água, está sujeito à lixiviação do produto preservativo, e a ciclos de molhagem e secagem. Com toda certeza, este poste terá sua vida útil diminuída.

Caso a instalação de um poste seja inevitável em local onde ocorra a situação mostrada pela Figura 4.20, seria adequado e recomendável que o afloramento fosse protegido por um "colarinho" de concreto de baixa permeabilidade, que dificultaria o contado da água com a madeira, conforme Figura 4.20.

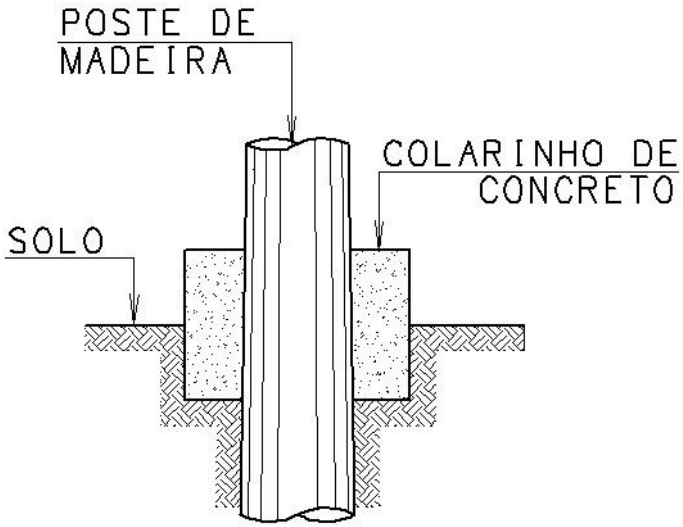

FIGURA 4.20 – Colarinho de concreto para proteção do afloramento

5 MANUTENÇÃO E REFORÇO DE POSTES DE MADEIRA

Os programas de inspeções, conduzidos pelas concessionárias, têm por objetivo, localizar os postes deteriorados, afim de substituí-los. Entretanto, por falta de treinamento e de ferramental adequado, pode não se avaliar a correta extensão de um apodrecimento ou de um oco interno e, consequentemente, destinado a substituição dos postes com condições de recuperação. Em muitos casos, tendo-se em vista que a inspeção somente voltará a ser feita um ou dois anos depois, postes recuperáveis são por precaução, substituídos prematuramente, (BOTTAZZO et al., 1988).

Alawady; Avent; Mukai (1998) comentam que durante 10 anos foram vários os artigos tratando sobre gestão de postes; entretanto, realizando uma pesquisa sobre reparo de postes deteriorados em uma base de dados, apenas 1 artigo foi encontrado considerando o mesmo período. Relata que o reparo envolve frequentemente o reforço de uma seção utilizando dispositivos mecânicos; porém, este processo não reestabelece a resistência original do poste.

Segundo Bottazzo et al. (1988), a empresa CESP – Companhia Energética de São Paulo executa apenas três tipos básicos de manutenção, podendo ser executadas separadamente ou combinadas entre si:

- Manutenção externa;
- Manutenção interna;
- Manutenção do solo.

Tanto a manutenção externa bem como a interna apenas prevê a aplicação de soluções de preservativos.

Ibach (1999) mostra um sistema de tratamento de postes em serviço, envolvendo o processo de difusão**,** Figura 5.1. Na região do afloramento, o preservativo pode ser injetado com uma ferramenta especial, sendo aplicada na superfície do poste como uma pasta ou bandagem, ou derramado nos furos feitos na região do afloramento. Tais tratamentos estabelecem valores para aplicação em postes não-tratados, mas em serviço.

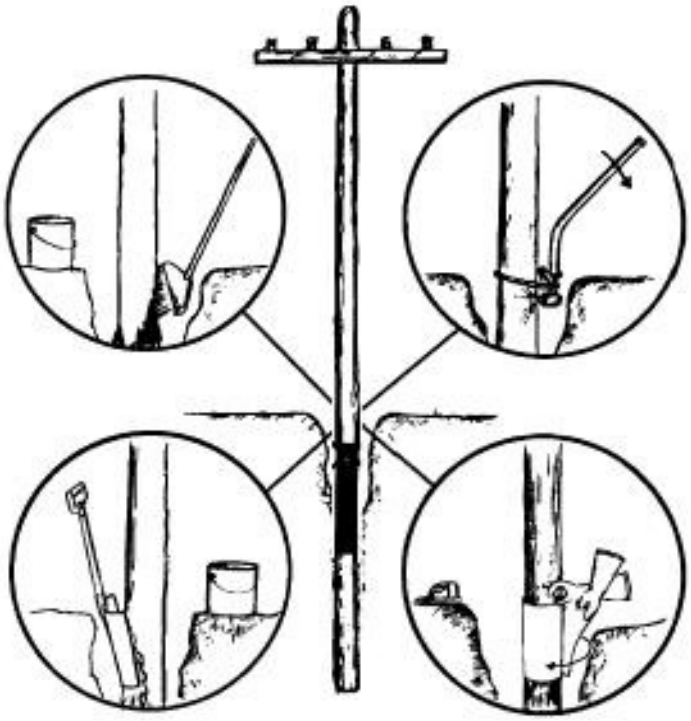

FIGURA 5.1 – Método de aplicação de tratamento no afloramento de poste em serviço – (IBACH, 1999)

Fazendo uma adaptação do conceito de manutenção corretiva ou preventiva mostrado na Figura 5.1, a realização de manutenção com apenas a aplicação de solução preservativa não restabelece as capacidades resistentes do poste, podendo ser idealizado um diagrama *Tempo x Desempenho*, segundo a Figura 5.2.

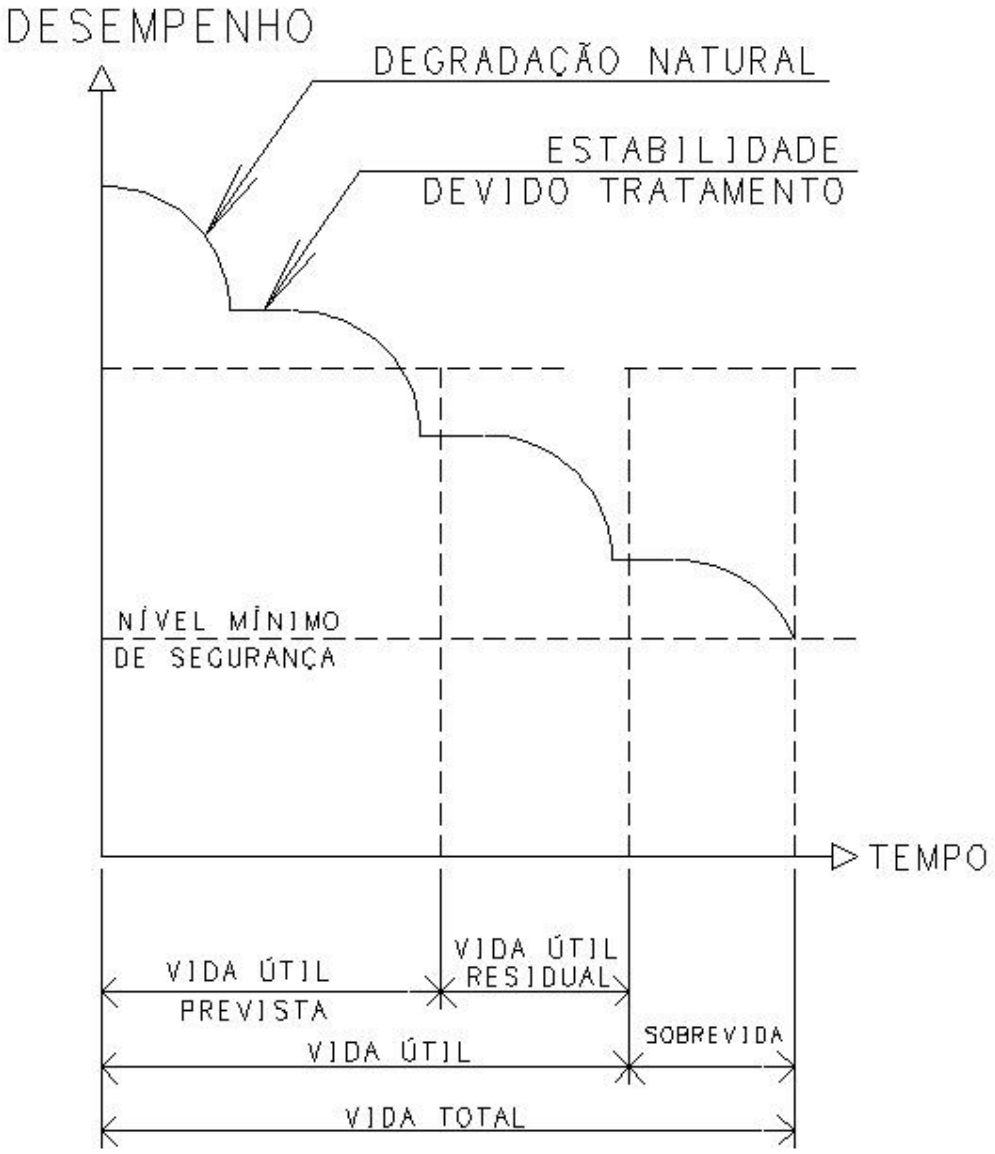

FIGURA 5.2 – Desempenho ao longo do tempo para poste em serviço

Campos (1982) cita alguns tipos de sistemas de reforço utilizados para a reabilitação de postes de eletrificação deteriorados na região do afloramento.

a) "Sistema OSMO-C-TRUSS: reforço de aço de perfil semicircular, cravado por um martelo a ar comprimido, a uma profundidade de 6" (15 cm) abaixo da base do poste, ficando 4" (10 cm) acima do solo e amarrado ao mesmo por 3 cintas de aço, permitindo estender a vida útil do poste afetado por mais 20 anos. Tal método estava sendo utilizado pelas empresas KANSAS P & L. CO., TEXAS P & L. CO. E VIRGNIA E & P. CO., entre outras.

b) Sistema INERT POLE GUARD: desenvolvido pela MONOLIGHT, INC., New Britain, C.T., e utilizado pela A UNITED ILLUMINATING CO., protegendo-os contra posterior apodrecimento e permitindo a continuidade do serviço durante a sua aplicação. Este método é descrito abaixo:

- Abertura de vala de 60 cm ao redor da base do poste, aplicando ao seu redor 10 barras de aço de 1,20 m;
- Colocação de um colar de 1,20 m, descendo 60 cm abaixo do nível do solo e colocada ao redor do poste;
- Aplicação de composto de resina epóxi e areia misturado à mão ou mecanicamente;

c) Sistema MOD-POLE: utilizado pela INTERPACE CO., compõe-se de um módulo de concreto protendido fabricado em 2 comprimentos de 18 ft (5,486 m) ou 9 ft (2,743 m) e um cilindro de aço galvanizado. O procedimento consta de

- Segurar o poste de madeira com guindaste;
- Serrar a base, e retirá-la do chão;
- Colocação do módulo MOD-POLE com a luva de aço;
- Fixação do poste de madeira na luva de aço.

DeGroot (1981) relata que em 1957 foram aplicados 12 tipos de tratamentos de afloramento em postes de Southern Pine não tratados, na tentativa de caracterizar o desempenho relativo de tratamentos disponíveis daquela época. Com exceção de um tratamento suplementar aplicado ao topo de cada poste, nenhum outro preservativo foi usado. Neste estudo, os postes foram monitorados anualmente através da aplicação de carga lateral, do segundo ao nono ano, e após isto sendo monitorados em intervalos bienais.

Vinte e dois anos após a instalação, vários desses postes ainda resistiram à ruptura no afloramento, embora estivessem, nas partes superiores, em fases avançadas de deterioração. Todos os tratamentos realizados aumentaram à resistência à deterioração no afloramento, tendo como referência a amostra CONTROLE, porém, obtendo diferenças entre os diversos tratamentos, Tabela 5.1, (DeGROOT, 1981).

TABELA 5.1 – Número de anos após instalação em que os postes não romperam no afloramento quando submetidos à aplicação de força[1,2] – (DeGROOT, 1981)

Tratamento	Bandagem[3]		Ingrediente ativo[4] (%)					Número de anos após instalação	
			C	P	D	FL	B	Todos os postes resistiram no afloramento ao ensaio	≥50% de postes resistiram no afloramento ao ensaio[5]
Androc	+	+	15	10		10		11	21
Barret		+		5				7	11
Mycotox	+	+	45	5		38		11	21
Osmoplastic	+	+	34		3	46		13	19
Cobra					23			11	21
Preserva Life	+	+			13	21		7	11
Special dust				17		26	52	[7]-	15
NaFl + Penta				5				6	11
Penta solution				5				4	5
Pentaplastic				11				4	6
Pol Nu	+	+		10				[6]21	[6]21
Woodtreat A				10				5	11
CONTROLE				10				-	2

[1] Todos os postes neste ensaio não foram carregados como viga.
[2] O último ensaio foi realizado em 1978, após 21 anos de instalação.
[3] Aplicação de bandagem de filme de polietileno e/ou papel kraft ao redor do poste depois de tratamento e antes da instalação sendo indicado por um +. Foram injetados tratamentos de "Cobra" em postes. Postes tratados com pentaplastic foram envolvidos com 37,5 cm de manta saturada com asfalto.
[4] Ingredientes ativos são: C-carvão de alcatrão e/ou creosoto, P-pentaclorofenol, D-dinitrofenol, Fl-floureto de sódio, B-bórax e/ou ácido bórico. Algumas formulações contêm ingredientes ativos em adição a estes mostrados. São arredondadas porcentagens para o mais próximo número inteiro.
[5] Os postes foram monitorados anualmente do segundo ao nono ano, e em seguida bienalmente.
[6] Removido um poste para análise em 1972.
[7] Nenhuma observação no fim do primeiro ano.

Verifica-se que o tratamento que melhor apresentou resultado foi o Pul Nu, o qual possui diferença em relação à amostra CONTROLE apenas da aplicação de bandagem de filme de polietileno e de papel kraft, tendo sido aplicado o mesmo ingrediente ativo, na mesma concentração.

Alawady; Avent; Mukai (1998) estudaram a utilização da injeção de graute cimentício para a reabilitação dos postes, concluindo que este é um sistema que possui potencial econômico e estrutural para a madeira, porém, com alguns aspectos adicionais a serem estudados antes de sua implementação.

A utilização de grautes e outros produtos à base de cimento Portland deve ser cuidadosamente avaliada, visto que estes possuem incompatibilidades com a madeira tanto no estado fresco, bem como no estado endurecido, quando diretamente ligados.

Helene (1992) define o graute à base de cimento Portland como um material fluido e auto-adensável no estado recém misturado, para preencher cavidades e subsequentemente tornar-se aderente, resistente e sem retração no estado endurecido, sendo constituído por cimento portland, composto ou de alta resistência inicial, agregados, aditivos expansores e aditivos superplastificantes.

No estado fresco, os materiais à base de cimento em contato com a madeira podem perder quantidade significativa de água afetando o processo de hidratação e ocasionando retrações do graute, e consequentemente as propriedades mecânicas e a aderência ao substrato de madeira.

Quanto ao estado endurecido, dos vários grautes cimentícios disponíveis no mercado, são poucos os apresentados com os valores de módulo de deformação, nos catálogos técnicos de seus respectivos fabricantes (FOSROC, MBT, OTTO BAUNGART, SIKA). A Tabela 5.2 descreve os valores de módulo de deformação, dos grautes produzidos pela FOSROC.

TABELA 5.2 - Grautes produzidos pela FOSROC REAX (2002)

Produto	Utilização	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de Deformação (MPa)
Conbextra SR	Área de difícil acesso	70	29.000
Conbextra LA	Rápida resistência	50	33.100
Conbextra MCAD	Rápida liberação de fôrma	74	33.100
Conbextra UW	Estruturas submersas	44	20.000
Valor médio		**59,5**	**28.800**

Considerando a utilização de postes do gênero *Eucaliptus spp.*, os valores da resistência à compressão (f_{c0}) e módulo de elasticidade paralelo às fibras (E_{c0}), propostos pela NBR 7190/1997, são mostradas pela Tabela 5.3.

TABELA 5.3 - Valores médios de f_{c0} e E_{c0} para o gênero Eucaliptus spp. - (NBR 7190/1997)

Espécie	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
Eucalipto Alba	47,3	13.409
Eucalipto Camuldulensis	48,8	13.286
Eucalipto Citriodora	62,0	18.421
Eucalipto Cloeziana	51,8	13.963
Eucalipto Dunnii	48,9	18.029
Eucalipto Grandis	40,3	12.813
Eucalipto Maculata	63,5	18.099
Eucalipto Maidene	48,3	14.431
Eucalipto Microcorys	54,9	16.782
Eucalipto Paniculata	72,7	19.881
Eucalipto Propinqua	51,6	15.561
Eucalipto Punctata	78,5	19.360
Valor médio	**55,7**	**16170**

Os valores do módulo de deformação dos grautes, indicados pelo fabricante FOSROC REAX (2002), são bem superiores aos das espécies de eucalipto, sendo quase duas vezes maior. Assim, a execução de reparos em postes de madeira ou até mesmo em estruturas de madeira, através de grautes cimentícios, em primeira análise não seria adequada, pois é inserido no local de reparo um novo material com uma rigidez muito superior ao da madeira. Com o preenchimento de um vazio interno sem uma forma e volume conhecidos, a compatibilização das deformações não é possível.

Desta forma, a incompatibilidade da madeira e do concreto tanto no estado fresco, bem como endurecido, não favorece que a união entre estes dois materiais seja adequada, para que tal elemento em madeira a ser reparado (poste ou estrutura) seja considerado como adequadamente recuperado após o reparo ter sido executado.

6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DO PÍNUS

A lei de incentivos fiscais, criada em 1966, permitiu que as empresas do setor madeireiro, aplicassem parte de seus impostos devidos em reflorestamentos, tendo como resultado a imediata ampliação da área de floresta plantada no país, especialmente com espécies exóticas como o eucalipto e pínus, sendo que estes primeiros reflorestamentos incentivados foram feitos com o objetivo de produzir matéria-prima para a indústria de celulose e papel e a produção de energia sob a forma de carvão vegetal para a metalurgia, (MATOS, 2003). No início da década de 1980, a madeira de pínus passou a ser utilizada na fabricação de móveis, tendo hoje boa aceitação por parte do público, (WATAI, 1991).

Segundo Tomaselli, Tuoto (2003), em 1990 o consumo de toras de Pinus no Brasil alcançava apenas 19 milhões de metros cúbicos, saltando para 42 milhões de metros cúbicos em 2001, tendo como crescimento médio na ordem de 7% a.a. neste período. Em 2003, a indústria de serrados foi o principal consumidor de pinus no país, 20 milhões de metros cúbicos (48%), seguido pelo setor de celulose e papel, 12 milhões de metros cúbicos, e pelo setor de painéis de madeira[1], este consumindo cerca de 8 milhões de metros cúbicos ao ano.

Matos (2002) relata que o uso da madeira de pínus na forma maciça tem como principal problema herdar os defeitos inerentes da madeira que foi obtida em programas de manejo voltados eminentemente para a produção de celulose, sendo que programas de poda e desbastes visando a produção de “madeira limpa” foram desconsiderados nestes projetos, com raras exceções.

A Tabela 6.1 demonstra os valores das características para algumas espécies, segundo Calil Júnior (2002).

[1] Compensado, aglomerado, chapa dura, MDF, OSB.

TABELA 6.1 – Valores médios e madeiras coníferas de florestamento, ensaios de amostras isentas de defeito – (CALIL JÚNIOR. - 2002)

Nome Comum	Nome Científico	$\rho_{ap(12\%)}$ (kg/m^3)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)	N
Pínus caribea	*Pinus caribea var. Caribea*	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8431	28
Pínus bahamensis	*Pínus caribea var. Bahamensis*	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7110	32
Pínus hondurensis	*Pinus carivea var. hondurensis*	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9868	99
Pínus elliottii	*Pinus var. elliottii*	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11889	21
Pínus oocarpa	*Pinus oocarpa shiede*	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10904	71
Pínus taeda	*Pinus taeda L.*	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304	15

As espécies de *Pinus elliottii, oocarpa* e *taeda* possuem módulo de elasticidade à compressão paralela de mesma ordem apresentada pelas espécies de Eucalipto Alba, Rostrata e Tereticornis conforme a NBR 8456/1984, apresentadas no Anexo 2. Entretanto, o módulo de elasticidade à flexão é um pouco menor que o valor do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (E_{c0}).

Bortoletto Júnior (1993), ao estudar a utilização de seis espécies do gênero *Pinus* na construção civil, resume seu trabalho, Tabela 6.2. Nota-se, que das seis espécies apresentadas, e dos cinco grupos de utilização da madeira citados, apenas o *Pinus bahamensis*, não apresenta ser adequado ao grupo da construção civil leve externa. Este fato se deve a sua baixa resistência à flexão, bem como para todas as outras espécies, porém não possuindo outras propriedades de resistência que melhorem este baixo desempenho.

TABELA 6.2 – Indicações de uso para o gênero *Pínus* - (BORTOLETTO JÚNIOR, 1993)

Grupos	Aplicações	Variedades					
		BAHAMENSIS	CARIBAEA	HONDURENSIS	ELLIOTTII	OOCARPA	TAEDA
Construção civil leve externa	Moirões		X	X	X	X	X
	Pontaletes		X	X	X	X	X
	Porteiras		X	X	X	X	X
	Andaimes		X	X	X	X	X
	Longarinas		X	X	X	X	X
	Calhas		X	X	X	X	X
	Elementos de cobertura		X	X	X	X	X
	ESQUADRIAS EM GERAL: portas, venezianas, caixilhos, batentes		X	X	X	X	X
	Tabuado em geral, vigas		X	X	X	X	X
Construção civil leve interna	DECORATIVA: lambris, painéis molduras, perfilados, guarnições	X	X	X	X	X	X
	UTILIDADE GERAL: cordões, forros, guarnições, rodapé	X	X	X	X	X	X
	ESTRUTURAL: vigas, caibros, ripas	X	X	X	X	X	X
Chapas Compensadas	UTILIDADE GERAL: partes internas de móveis, armários, forros, divisórias, usos generalizados	X	X	X	X	X	X
	PARA CONSTRUÇÃO: fôrmas para concreto, coberturas, anteparos, divisórias, usos generalizados	X	X	X	X	X	X
Lâminas	DECORATIVA: Lâminas para face de compensado decorativo; face de móveis, caixas de aparelhos de som	X	X	X	X	X	X
	UTILIDADE GERAL: Miolo de chapas compensadas, portas; outros usos	X	X	X	X	X	X
Chapas Aglomeradas	UTILIDADE GERAL: Divisórias, painéis de fechamento de móveis, usos generalizados	X	X	X	X	X	X

Considerando a classificação adotada por Bortoletto Júnior (1993), os postes de eletrificação e telefonia podem ser classificados na classe “Construção Civil Leve Externa”, tendo em vista as baixas solicitações às quais estes estão submetidos.

Porém, como desvantagem, o gênero *Pinus* possui baixa resistência natural ao ataque de organismos xilófagos, Watai (1991). Segundo Barillari, Jankowsky, Freitas (2002) ao utilizar madeira em contato com o solo, é necessário o uso de espécies de alta durabilidade natural ou de baixa durabilidade, submetidas a tratamento preservativo, sendo

considerada por diversos autores como inferior a dois anos quando em contato direto com o solo.

Entretanto, a alta permeabilidade da madeira de pínus proporciona que toda a seção transversal seja tratada por processos de impregnação sob pressão, o que já não ocorre com as espécies de eucalipto.

A Tabela 6.3 mostra os índices de durabilidade de algumas espécies de *Pinus* pela AS 5604-2005 e indicadas para o uso nacional, pelas normas NBR 7190/1997 *Projeto de estruturas de madeira*.

TABELA 6.3 – Índices de durabilidade natural de Pinus – (AS 5604-2005)

Nome vulgar *Nome científico*	Susceptibilidade do alburno a Lictídeos	Resistência de térmitas pelo cerne	Classe de durabilidade natural do cerne		Resistência do cerne à brocas marinhas
			Em contato com o solo	Externo, acima do solo	
pine, Caribbean *Pinus caribaea*	NS	R	4	4	4
pine, loblolly *Pinus taeda*	NS	NR	4	4	4
pine, radiata *Pinus radiata*	NS	NR	4	4	4
pine, slash *Pinus elliottii*	NS	R	4	4	4

A *AS 2209-1994 Timber – Poles for overhead lines* normatiza várias espécies para o uso de peças roliças, como postes, tanto *Hardwood* bem como *Softwood*, conforme descritas no ANEXO C, dentre as quais as espécies indicadas na Tabela 6.3 fazem parte.

Para a caracterização de peças roliças, a norma ANSI 05.1 - *Wood poles, specifications and dimensions*[2] fornece critérios de aceitação em quatro categorias básicas: forma, características de crescimento, defeitos de processamentos e características mecânicas, (WOLFE; MOODY, 1997).

Segundo Wolfe; Moody (1997), esta norma lista 25 espécies nativas dos Estados Unidos que são consideradas por exibirem as propriedades físicas e mecânicas apropriadas para uso como postes. Valores de tensão de ruptura, tamanho de poste e forma são dados para cada uma destas espécies. Porém, foram retiradas quatro espécies da norma AWPA C4 para tratamento preservativo de postes, devido elas raramente serem usadas; seis outras espécies são indicadas pela ANSI 05.1 como geralmente não usadas. Seis das outras 15 espécies respondem por 90% de postes produzidos e usados nos Estados Unidos Estados. As seis espécies incluem quatro espécies de Southern Pine, agrupadas e comercializadas juntas, Douglas-fir e Western red cedar, Figura 6.1.

[2] American National Standards Institute, 1992. Wood poles, specifications and dimensions. ANSI 05.1, New York.

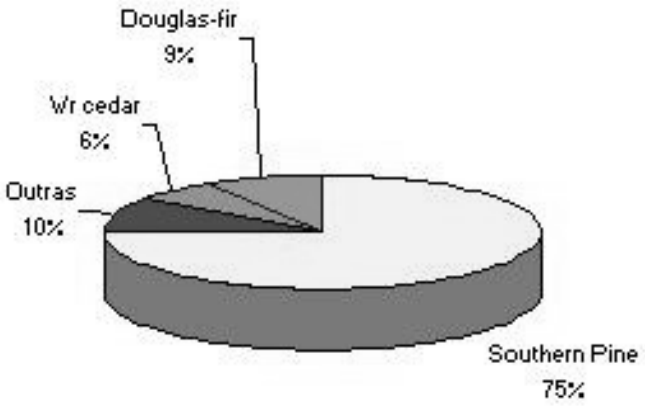

FIGURA 6.1 – Produção de postes por espécies nos Estados Unidos – (WOLFE; MOODY, 1997)

Wolfe; Moody (1997) relatam que a ANSI 05.1 adota para a classificação mecânica a capacidade de carga do poste, tratando todos os postes que reúnem os critérios de aceitação como uma única classe, na qual a resistência varia somente entre espécies, Tabela 6.4.

TABELA 6.4 – Espécies de postes por tensão de ruptura pela ANSI 05.1 – (WOLFE; MOODY, 1997)

Grupo	Tensão de ruptura (psi)	Tensão de ruptura (MPa)
Grupo A		
Cedar, western red	6,000	41,4
Cedar, yellow	7,400	51,0
Pine, ponderosa	6,000	41,4
Pine, jack	6,600	45,5
Pine, lodgepole	6,600	45,5
Pine, red	6,600	45,5
Douglas-fir (interior north)	8,000	55,2
Grupo B		
Douglas-fir, coast	8,000	55,2
larch, western	8,400	57,9
Grupo C		
Southern Pine	8,000	55,2

A Tabela 6.5, lista 15 classes de postes e suas capacidades de carga requerida, comprimento e circunferência mínima na ponta, (WOLFE; MOODY, 1997).

TABELA 6.5 – Classificação dos postes de madeira pela ANSI 05.1 - (WOLFE, MOODY, 1997)

Classe	Carga horizontal		Comprimento		Circunferência mínima da ponta	
	(lb.)	(kgf)	(ft)	(m)	(in.)	(cm)
H5	10,000	22.026	45-125	13,7-38,1	37	94,0
H4	8,700	19.163	40-125	12,2-38,1	35	88,9
H3	7,500	16.520	40-125	12,2-38,1	33	83,8
H2	6,400	14.097	35-125	10,7-38,1	31	78,7
H1	5,400	11.894	35-125	10,7-38,1	29	73,7
1	4,500	9.912	35-125	10,7-38,1	27	68,6
2	3,700	8.150	20-125	6,1-38,1	25	63,5
3	3,000	6.607	20-90	6,1-27,4	23	58,4
4	2,400	5.286	20-70	6,1-21,3	21	53,3
5	1,900	4.185	20-50	6,1-15,2	19	48,3
6	1,500	3.304	20-45	6,1-13,7	17	43,2
7	1,200	2.643	20-35	6,1-10,7	15	38,1
9	740	1.630	20-30	6,1-9,1	15	38,1
10	370	815	20-25	6,1-7,6	12	30,4

Em 1972, seis novas classes foram adicionadas à ANSI O5.1, sendo estas designadas como classes-H, usadas para suportar linhas de transmissão de alta voltagem. Divido à natureza geral das cargas e localização requeridas, os postes de transmissão devem ser mais rigorosos que os de distribuição, (WOLFE, 2005).

Verifica-se, através destes relatos, a possibilidade de inclusão de outras espécies na atual norma de especificações de postes de madeira, visto que esta até o momento apenas contempla o gênero *Eucaliptus*.

Não se deseja, através destas considerações a inclusão e a adoção imediata do gênero *Pínus* ou de qualquer outro gênero no corpo da norma de especificações de postes de madeira. O que se deseja é apenas ressaltar a possibilidade da utilização de novas espécies, vislumbrando a realização de um estudo mais detalhado, sendo que tal deveria até mesmo avaliar as necessidades reais de um poste de madeira, não tendo apenas como referência os parâmetros adotados através do gênero *Eucaliptus.*

7 MODELOS DE ATAQUE E APODRECIMENTO

Para se evitar a subjetividade na avaliação das condições climáticas (umidade e temperatura) de uma dada região ou entre regiões distintas, alguns modelos foram propostos considerando variáveis.

Scheffer (1971) propõe o *Climate Index CI* - (Índice Climático) para o estimativo potencial de apodrecimento em estruturas de madeira acima do solo, sendo:

$$\mathrm{CI} = \frac{\sum_{\mathrm{jan}}^{\mathrm{dez}}[(\mathrm{T}-35)\cdot(\mathrm{D}-3)]}{30} \tag{7.1}$$

onde,

T: temperatura média mensal (ºF);

D: número médio de dias do mês com precipitação maior que 0,25 mm;

Valores de *CI* menores que 35 indicam condições menos favoráveis ao apodrecimento, Figura 7.1. Valores entre 35 e 65 indicam condições intermediárias, e *CI* maiores que 65 indicam condições mais propícias ao apodrecimento.

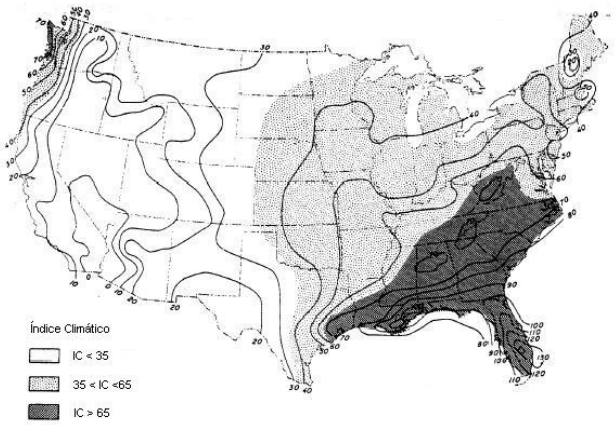

FIGURA 7.1 – Mapa do Índice Climático dos EUA – (SCHEFFER, 1971)

O mapa é utilizado como guia geral, e a fórmula como um guia específico para precauções no projeto ou para o tratamento preservativo necessário de estruturas de madeira acima do solo exposta ao tempo, (SCHEFFER, 1971).

Utilizando-se os dados de temperatura (T) em graus Celsius (ºC), a Eq. 7.1 é modificada para:

$$\mathrm{CI} = \frac{\sum_{\mathrm{jan}}^{\mathrm{dez}}[(\mathrm{T}-2)\cdot(\mathrm{D}-3)]}{16{,}7} \tag{7.2}$$

Alterando o nome de “CI” para “PAF” – Potencial de Ataque Fúngico, Silva et al. (2001) utilizaram os dados de normais climatológicas, do período entre 1961 e 1990, e elaboraram um mapa para o Brasil, Figura 7.2.

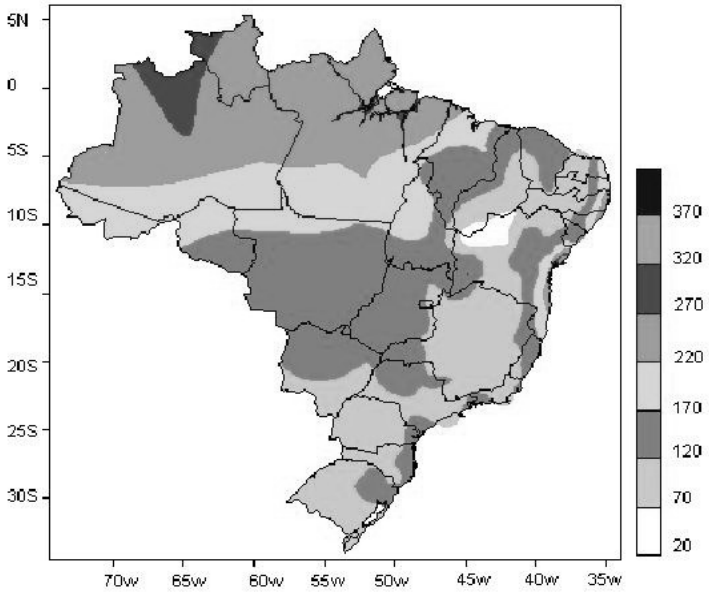

FIGURA 7.2 – Potencial de Ataque Fúngico – (SILVA et al., 2001)

Pelo mapa elaborado por Silva et al. (2001), verifica-se que a região de maior agressividade à madeira, em função de ataque fúngico, é a região norte amazônica, com valores de PAF entre 220 e 320. Esta região concentra-se entre as latitudes[1] aproximadas 5º N e 10º S, e as longitudes[2] 45º W e 70º W. Além desta região, existe uma estreita faixa do litoral nordestino há com grande agressividade à madeira.

Para valores de PAF entre 120 a 170, existe uma grande área concentrada no centro-oeste, entre as latitudes aproximadas 10º S e 20º S, e as longitudes 45º W e 65ºW, abrangendo a região do triângulo mineiro (Uberaba e Uberlândia) e o noroeste paulista (Catanduva, São José do Rio Preto, Votuporanga e Araçatuba).

[1] Latitude: A latitude mede-se para norte e para sul do equador, entre 90º sul, no Pólo Sul (latitude negativa), e 90º norte, no Pólo Norte (latitude positiva);
[2] Longitude: descreve a localização de um lugar na Terra medido em graus de 0º a 180º para leste ou para oeste a partir do primeiro meridiano: *Greenwich.*

Para valores de PAF entre 70 e 120, estende-se uma longa faixa não muito definida, desde o Estado do Rio Grande do Sul até ao Rio Grande do Norte.

Segundo o estudo de Silva et al. (2001), a região de menor agressividade à madeira por ataque fúngico é a divisa entre os Estados da Bahia e Piauí, com valores de PAF entre 20 a 70.

Pode-se avaliar que a escala utilizada por Silva et al. (2001) tem seu limite em aproximadamente PAF 370. Entretanto, os índices apresentados para o território brasileiro estão abaixo de PF igual a 320. E, além disso, a maior parte do território possui um PAF inferior a 170, valor um pouco acima da metade do PAF máximo no Brasil.

Fica visível que dentro do território nacional existem três grandes regiões de agressividade à madeira: a região amazônica, a região centro-oeste e a faixa que se estende irregularmente entre os Estados do Sul, Sudeste e Nordeste.

Além disso, pode-se verificar pelo estudo que, dentro do Estado de São Paulo, existem duas faixas de agressividade fúngica para PAF: valores entre 70 a 120, e de 120 a 170. Esta segunda, concentrando-se no noroeste paulista.

Leicester et al. (2003) propõem um modelo para o apodrecimento de peças em contato com o solo, baseado em pequenas estacas monitoradas por mais de 30 anos na Austrália, Figura 7.3.

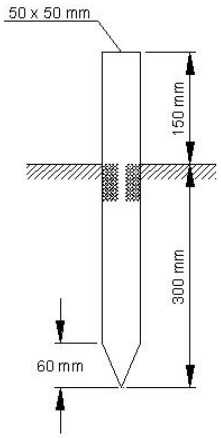

FIGURA 7.3 – Estacas em contato com o solo – (Leicester et al., 2003)

Tal modelo considera que existe um tempo (*Lag*[3]) para o início do processo de apodrecimento, o qual após o início evolui em uma velocidade de apodrecimento (razão "r") constante, podendo ocorrer um novo tempo inicial e estacionamento do apodrecimento com a realização de manutenção, Figura 7.4.

[3] *Lag*: defasagem, tempo inicial.

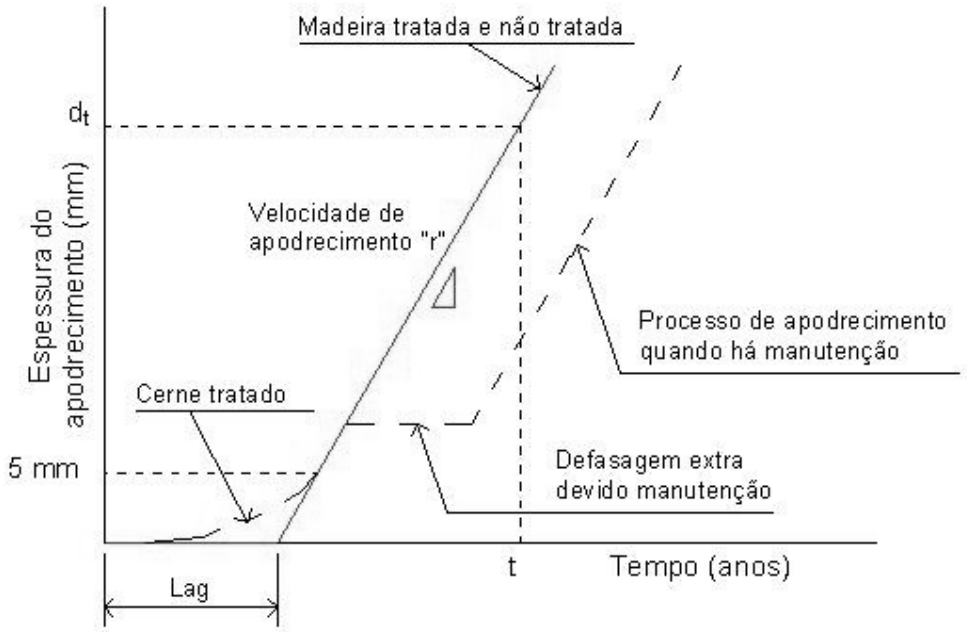

FIGURA 7.4 - Relação de apodrecimento idealizada – (LEICESTER et al., 2003)

A partir dos dados obtidos no estudo, foi desenvolvido um modelo matemático para o apodrecimento de madeiras em contato com o solo, determinando o Índice Climático I_{ig}, através das funções $f(R_{média})$ e $g(T_{média})$, as quais são dependentes da Precipitação Média Anual - $R_{média}$ e da Temperatura Média Anual - $T_{média}$, respectivamente.

$$I_{ig} = f(R_{média})^{0,3} \times g(T_{média})^{0,2} \tag{7.3}$$

$$f(R_{média}) = \begin{cases} 0\,, & Se\ R_{média} \leq 250\ \text{mm}\ \text{ ou }\ N_{dm} > 6 \\ f_0(R_{média}) \cdot \left(1 - \frac{N_{dm}}{6}\right), & Se\ R_{média} > 250\ \text{mm}\ \ e\ \ 0 \leq N_{dm} \leq 6 \end{cases} \tag{7.4}$$

$$f_0(R_{média}) = 10 \times \left[1 - e^{-0,001(R_{média} - 250)}\right] \tag{7.5}$$

$$g(T_{média}) = \begin{cases} 0, & Se\ T_{média} \leq 5°C \\ -1 + 0,2 \times T_{média}, & Se\ 5°C < T_{média} \leq 20°C \\ -25 + 1,4 \times T_{média}, & Se\ T_{média} > 20°C \end{cases} \tag{7.6}$$

sendo N_{dm} o número de meses secos por ano, definido como mês seco aquele no qual a precipitação média é menor ou igual a 5 mm.

Para o agrupamento e representação dos valores do Índice Climático, Leicester et. al. (2003) adota a classificação conforme a Tabela 7.1. Tais classes visam agrupar regiões

geográficas em função dos valores de I_{ig}, sendo estas classificadas segundo os valores limites de I_{ig} , e representados pelos valores representativos de I_{ig} da respectiva classe.

TABELA 7.1 – Índice Climático representativo para quatro classes de agressividade

Região de geográfica	I_{ig} Representativo	I_{ig} Limite
A	0,5	1,0
B	1,5	2,0
C	2,5	2,5
D	3,0	

A Figura 7.5 mostra a variação de $f_0(R_{média})$ e $g(T_{média})$ em função de suas respectivas variáveis, Precipitação Média Anual ($R_{média}$) e Temperatura Média Anual ($T_{média}$).

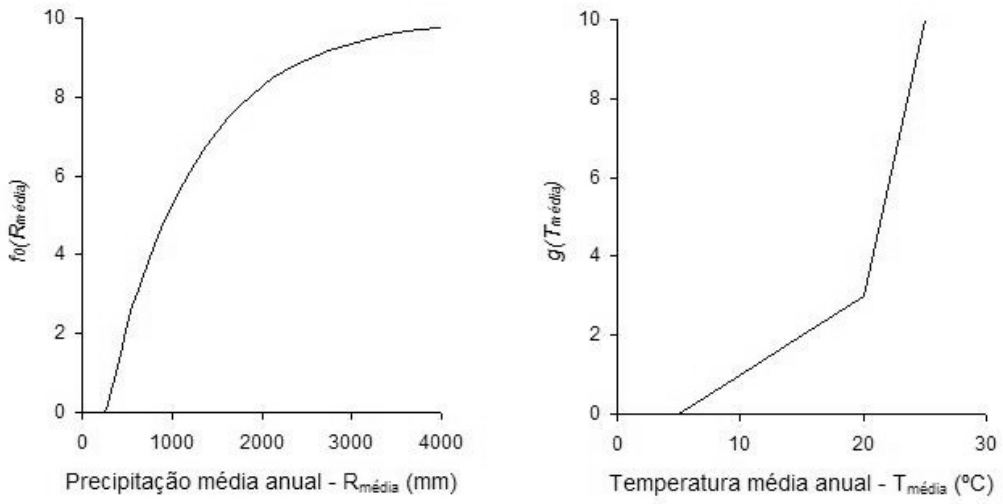

FIGURA 7.5 – Funções $f_0(R_{média})$ e $g(T_{média})$ – (LEICESTER et al., 2003)

Quanto à influência dos tipos de madeira presentes em um peça, Leicester et al. (2003) assumem o esquema proposto pela Figura 7.6, onde são mostrados esquematicamente as velocidades de apodrecimento para os tipos de madeira.

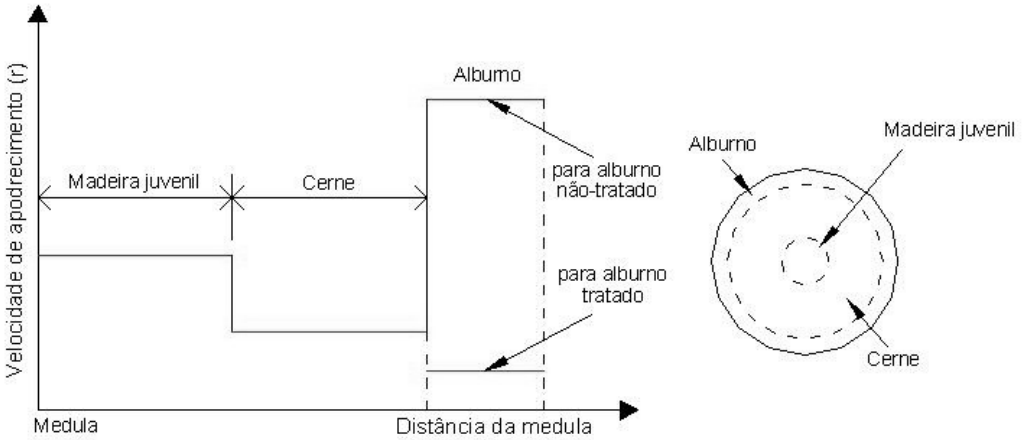

FIGURA 7.6 – Esquema ilustrativo da razão de apodrecimento relativo de diferentes tipos de madeira – Adaptado de (LEICESTER et al., 2003)

Para a determinação do tempo inicial de instalação do processo de apodrecimento (*Lag*) e da Velocidade de apodrecimento (*r*), são adotadas as seguintes Equações:

- **Cerne**

$$r_{nt,cer,estaca} = A \cdot I_{ig} \tag{7.7}$$

onde "A" é obtido na Tabela 7.2, a seguir

TABELA 7.2 – Parâmetros de apodrecimento para cerne não tratado – (LEICESTER et al., 2003)

Classe de durabilidade*	A	Tempo inicial $Lag_{nt,cerne,estaca}$ (anos)
Classe 1	0,20	6
Classe 2	0,55	4
Classe 3	0,80	2
Classe 4	1,85	1

(*) Ver Tabela 3.18

- **Madeira juvenil**

$$Lag_{nt,juv,estaca} = 0{,}3 \cdot Lag_{nt,cer,estaca} \tag{7.8}$$

$$r_{nt,juv,estaca} = 3 \cdot r_{nt,cer,estaca} \tag{7.9}$$

- **Alburno**

$$Lag_{nt,alb,estaca} = 0{,}5 \cdot Lag_{nt,cer,c4,estaca} \tag{7.10}$$

$$r_{nt,alb,estaca} = 2 \cdot r_{nt,cer,c4,estaca} \tag{7.11}$$

sendo

$Lag_{nt,cerne,c4,estaca}$: tempo inicial de apodrecimento para cerne de espécie de durabilidade classe 4;

$r_{nt,cerne,c4,estaca}$: razão de apodrecimento para cerne de espécie de durabilidade classe 4.

- **Madeira tratada**

Considerando a preservação em CCA, utiliza-se a concentração deste em percentual de massa (kg/kg)

$$\mathrm{Lag_{tr,alb,estaca}} = \mathrm{Max}\{\mathrm{Lag_{nt,alb,estaca}} \;\; ; \;\; 8 \cdot \mathrm{C_{CCA}}\} \tag{7.12}$$

$$\mathrm{r_{tr,alb,estaca}} = \frac{\mathrm{r_{nt,alb,estaca}}}{1 + \mathrm{B} \cdot \mathrm{C_{CCA}}}\,, \qquad \mathrm{B} = \begin{cases} 80 \text{ para } softwoods \\ 15 \text{ para } hardwoods \end{cases} \tag{7.13}$$

Caso o produto preservativo seja o creosoto, adota-se a Eq.7.15, sendo $C_{creosoto}$ a retenção de creosoto (em % kg/kg) e $C_{CCA\text{-}equiv}$ a concentração equivalente de creosoto em CCA.

$$\mathrm{C_{CCA-equiv}} = 0{,}018 \cdot \mathrm{C_{creosoto}} \tag{7.14}$$

Considerando os postes de madeira, Leicester et al. (2003) assumem que apenas o alburno pode ser tratado com preservativos, enquanto que o cerne permanece não tratado, e, através de observações de campo, consideram que o apodrecimento pode iniciar tanto do perímetro para o centro e vice-versa. Assim são propostos dois modelos para o apodrecimento:

a) Apodrecimento em direção ao interior

Para alburno de postes tratados de *softwoods* e *hardwoods,* com um acréscimo de 15 anos no tempo para inicio do apodrecimento:

$$\mathrm{Lag_{tr,alb,poste}} = \mathrm{Lag_{tr,alb,estaca}} + 15 \tag{7.15}$$

$$\mathrm{r_{tr,alb,poste}} = \mathrm{r_{tr,alb,estaca}} \tag{7.16}$$

Para alburno não-tratado:

$$\mathrm{Lag_{nt,alb,poste}} = \mathrm{Lag_{nt,alb,estaca}} \tag{7.17}$$

$$\mathrm{r_{nt,alb,poste}} = \mathrm{r_{nt,alb,estaca}} \tag{7.18}$$

Para o cerne:

$$\mathrm{Lag}_{\mathrm{nt,cer,poste}} = \mathrm{Lag}_{\mathrm{nt,cer,estaca}} \tag{7.19}$$

$$\mathrm{r}_{\mathrm{nt,cer,poste}} = \mathrm{r}_{\mathrm{tr,cer,estaca}} \tag{7.20}$$

b) Apodrecimento em direção ao exterior

O tempo de início do apodrecimento, Eq. 7.21, é admitido ser quatro vezes maior do que as estacas, devido à madeira juvenil não estar em contato direto com o solo, e a velocidade de apodrecimento ser maior para postes não tratados, Eq. 7.22.

$$\mathrm{Lag}_{\mathrm{nt,juv,poste}} = \begin{cases} 4 \cdot \mathrm{Lag}_{\mathrm{nt,juv,estaca}}\,, & postes\ não - tratados; \\ 4 \cdot \mathrm{Lag}_{\mathrm{nt,juv,estaca}} + 10 \cdot \mathrm{C}_{\mathrm{CCA}}\,, & postes\ hardwoods\ tratados; \\ 4 \cdot \mathrm{Lag}_{\mathrm{nt,juv,estaca}} + 25 \cdot \mathrm{C}_{\mathrm{CCA}}\,, & postes\ softwoods\ tratados; \end{cases} \tag{7.21}$$

$$\mathrm{r}_{\mathrm{nt,juv,poste}} = \begin{cases} 1{,}5 \cdot \mathrm{r}_{\mathrm{nt,jv,estaca}}, & postes\ não - tratados; \\ \mathrm{r}_{\mathrm{nt,juv,estaca}}\,, & postes\ tratados; \end{cases} \tag{7.22}$$

7.1 O progresso da deterioração

Através do modelo proposto, Leicester et al. (2003) indicam a existência de sete formas de progresso de apodrecimento de postes, em função do tipo de madeira (*hardwood* ou *softwood*), poste tratado ou não-tratado, e inicio do apodrecimento (interno ou externo). As Figuras 7.7 a 7.13 mostram esquemas de progresso do apodrecimento em função do tempo.

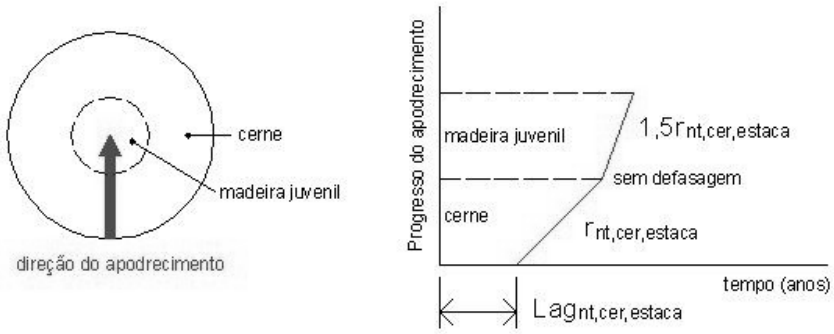

FIGURA 7.7 – Progresso do apodrecimento externo para postes não-tratados sem albuno – (LEICESTER et al.,2003)

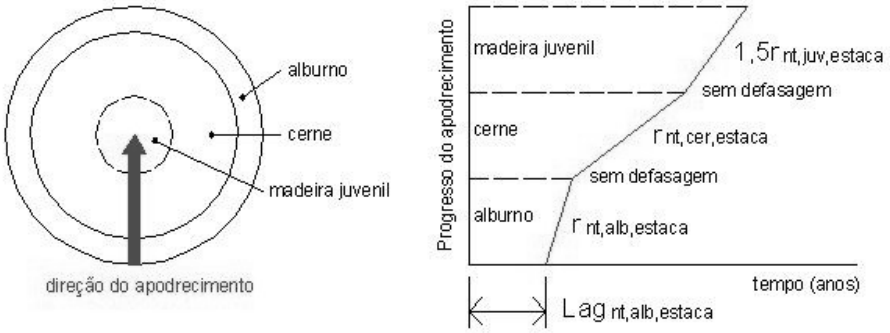

FIGURA 7.8 – Progresso do apodrecimento externo para postes não-tratados com albuno – (LEICESTER et al.,2003)

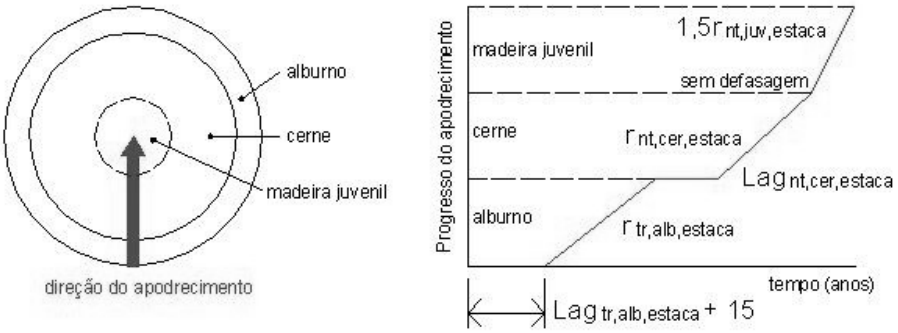

FIGURA 7.9 – Progresso do apodrecimento externo para postes tratados com albuno – (LEICESTER et al.,2003)

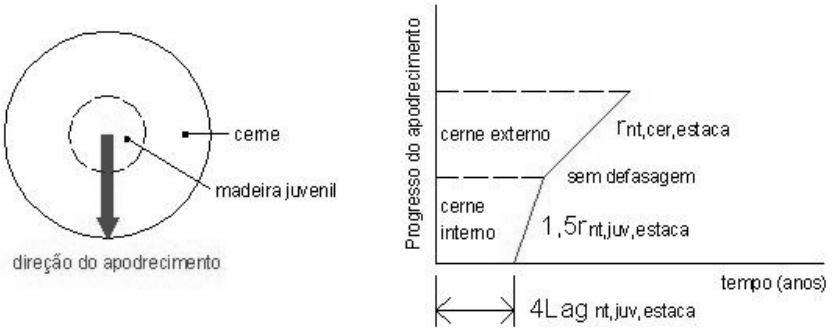

FIGURA 7.10 – Progresso do apodrecimento interno para postes não-tratados sem albuno – (LEICESTER et al.,2003)

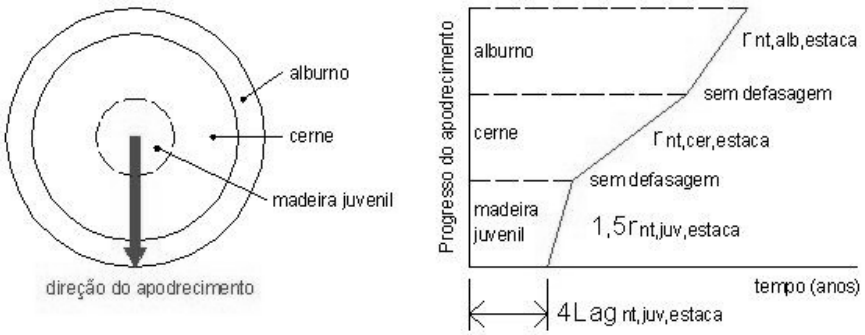

FIGURA 7.11 – Progresso do apodrecimento externo para postes tratados com alburno – (LEICESTER et al.,2003)

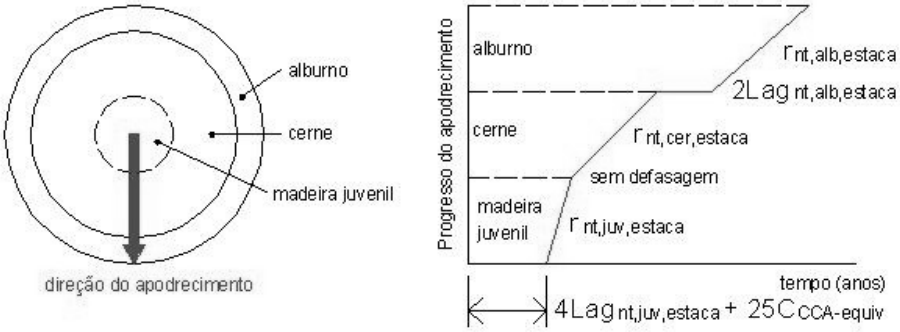

FIGURA 7.12 – Progresso do apodrecimento externo para postes tratados de *softwood* – (LEICESTER et al.,2003)

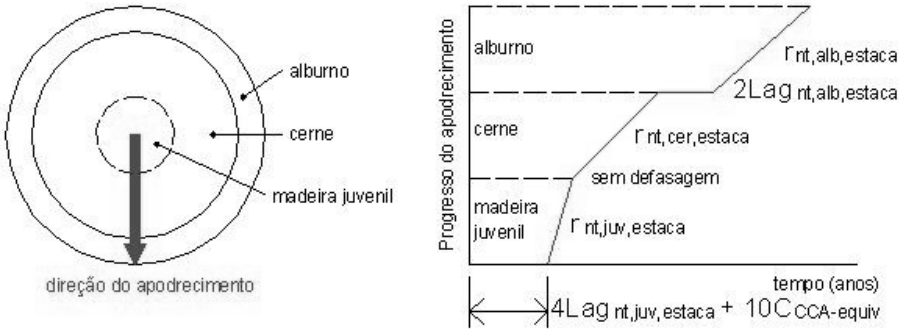

FIGURA 7.13 – Progresso do apodrecimento externo para postes tratados de *hardwood* – (LEICESTER et al.,2003