

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Manuela Marques Lalane Nappi

**CORROSÃO DE ELEMENTOS METÁLICOS EMBUTIDOS EM  
DIFERENTES ESPÉCIES DE MADEIRA**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Ângela do Valle, Dr<sup>a</sup>.

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da  
Universidade Federal de Santa Catarina

N217c Nappi, Manuela Marques Lalane

Corrosão de elementos metálicos embutidos em diferentes espécies de madeira [dissertação] / Manuela Marques Lalane Nappi ; orientadora, Ângela do Valle. - Florianópolis, SC, 2012.

233 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Madeira - Estruturas. 3. Metais - Corrosão. I. Valle, Ângela do. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

Manuela Marques Lalane Nappi

**CORROSÃO DE ELEMENTOS METÁLICOS EMBUTIDOS EM  
DIFERENTES ESPÉCIES DE MADEIRA**

Dissertação julgada adequada para obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, 19 de Março de 2012.

---

Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ângela do Valle  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Poliana Dias de Moraes  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Augusto Camara Neiva  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

---

Prof. Dr. João Carlos Souza  
Universidade Federal de Santa Catarina



**Aos amores de minha vida:**

À minha doce e amorosa mãezinha

Ao meu pai, um bravo guerreiro

Ao meu irmão, saudoso protetor

Ao meu esposo e leal amigo



## AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma especial à minha orientadora, professora Ângela do Valle e ao professor Sérgio Castello Branco Nappi. Agradeço-lhes a dedicação e a inestimável colaboração na realização desta dissertação.

Em nome destes dois grandes mestres agradeço a todos os mestres desta e de outras jornadas, cujos ensinamentos permanecerão comigo, como se juntos continuássemos uma caminhada.

Agradeço aos meus pais, Emerenciana Souza Marques e Ruben Elbio Lalane Domini, por uma vida inteira de dedicação, incentivo e amor incondicional. Amor imensurável - sustento da alma - em todos os momentos de minha vida.

Ao meu querido irmão, Roger Marques e Marques, por suas sábias palavras, por seu dom de me entender, por seu amor.

Ao meu esposo, Sérgio Castello Branco Nappi, por sua presença confortante, por sua paciência e compreensão, por seu incentivo incansável e por seu amor.

Agradeço às amigas Fabíola Bistrot Serpa e Vanilde Rohling Ghizoni pelo apoio e bons momentos vividos nesta trajetória.

Ao CNPq, pela bolsa recebida, ao LabRestauro (Arquitetura e Urbanismo – UFSC), por ter financiado parte desta pesquisa. À CISER Parafusos e Porcas, por ter fornecido parte dos elementos metálicos ensaiados. À Central de Análises (Departamento de Química) da UFSC, por ter permitido a utilização de seus equipamentos na etapa de avaliação dos corpos de prova. Ao GIEM e ao LEE no Departamento de Engenharia Civil da UFSC, pelo apoio na etapa de confecção dos corpos de prova de madeira.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a concretização desta pesquisa.



Se depender de mim, nunca ficarei plenamente  
maduro, nem das idéias, nem do estilo, mas  
sempre verde, incompleto, experimental.

(Gilberto Freyre, 1975)



## RESUMO

A corrosão de elementos metálicos utilizados em conjunto com a madeira é uma questão importante no que diz respeito à garantia da vida útil de uma estrutura de madeira. Quando embutidos na madeira, os elementos metálicos ficam sujeitos à corrosão devido à presença de água e oxigênio na estrutura celular da madeira, assim como a reações químicas entre seus constituintes. Com o objetivo de comparar as taxas de corrosão de diferentes elementos metálicos embutidos em três espécies de madeira (*Hymenolobium petraeum*, *Eucaliptus grandis* e *Pinus elliotti*), foi desenvolvida uma pesquisa envolvendo o ensaio de corpos de prova submetidos a cento e vinte dias de exposição à atmosfera úmida saturada, conforme o método de ensaio descrito na Norma NBR8095:1983. Foram projetadas e executadas três câmaras de ensaio, de iguais dimensões e materiais, com controle de umidade e temperatura para a avaliação de parafusos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço inoxidável, além de pregos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço galvanizado a quente. Com exceção dos elementos de aço inoxidável, os demais elementos metálicos não demonstraram imunidade às diferenças atribuídas à composição química das diferentes espécies de madeira. A análise quantitativa – com base na estatística descritiva – e, principalmente, a análise qualitativa apontam a espécie *Eucalyptus grandis* como sendo a madeira na qual os elementos metálicos sofreram alterações mais significativas. Neste trabalho, apresenta-se a metodologia desenvolvida para os ensaios, assim como os resultados obtidos a partir de análises qualitativas e quantitativas do processo de corrosão.

**Palavras-chave:** interface metal-madeira, ensaio acelerado de corrosão, conectores metálicos.



## ABSTRACT

The corrosion of metallic elements embedded in wood is an important issue with regard to ensuring the life time of a wooden structure. Metal elements in contact with wood are subject to corrosion due to the presence of water and oxygen in the cellular structure of wood, as well as chemical reactions between their constituents. In order to compare the corrosion rates of different metallic elements embedded in three species of wood (*Hymenolobium petraeum*, *Eucalyptus grandis* and *Pinus elliotii*), there is a research developed involving the testing of specimens subjected to one hundred and twenty days exposure to humid atmosphere saturated, as the test method described in NBR8095:1983. Were designed and executed three test chambers of the same dimensions and materials, with controlled humidity and temperature for the evaluation of mild steel, electroplated galvanized steel, stainless steel bolts, and also mild steel, electroplated galvanized and hot-galvanized nails. Except for the elements of stainless steel, other metallic elements showed no immunity to the differences attributed to the chemical composition of different wood species. Quantitative analysis - based on descriptive statistics - and the qualitative analysis indicate the species *Eucalyptus grandis* as the wood in which the metal elements have suffered the most significant. This text presents the methodology for tests and the results obtained from qualitative and quantitative analysis of the corrosion process.

**Keywords:** wood-metal interface, accelerated corrosion test, metal connectors.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cordas feitas de raízes que costuram espessas tábuas de madeira em uma embarcação primitiva. ....	41
Figura 2 – Ponte sobre o rio Cismote.....	42
Figura 3 – Pavilhão da Checoslováquia na Expo 92 de Sevilha. Estado em que se apresentavam os elementos de aço galvanizado.....	44
Figura 4 – Pavilhão da Checoslováquia na Expo 92 de Sevilha. Substituição da madeira e dos elementos de fixação. ....	44
Figura 5 – Estrutura interna da madeira. ....	46
Figura 6 – Esquema resumo da química da madeira.....	52
Figura 7 – Ilustração esquemática da interação das moléculas de celulose. ....	54
Figura 8 – Esquema de posições onde podem se formar pontes de hidrogênio nas moléculas de celulose.....	54
Figura 9 – Hidrólise alcalina da celulose.....	55
Figura 10 – Ilustração egípcia de 1900a.C. - As diversas etapas do trabalho com o ouro. ....	66
Figura 11 – Esquema do fluxo de corrente nos defeitos de revestimento nobres e revestimentos de sacrifício. ....	69
Figura 12 – Seção esquemática de um revestimento galvanizado típico, mostrando as camadas de intermetálicos. ....	70
Figura 13 – Corrosão do metal por microorganismos, devido à formação de aeração diferencial em meio aquoso. ....	75
Figura 14 – Esquema representando as principais reações anódicas e catódicas de uma célula de corrosão. ....	76
Figura 15 – Produtos de corrosão formados sobre o zinco durante a exposição à atmosfera. ....	78
Figura 16 – Corrosão de pregos expostos nas proximidades de Madison, Wisconsin, durante cinco anos.....	86
Figura 17 – Profundidade de corrosão em elementos embutidos.....	93
Figura 18 – Conjuntos de parafusos após limpeza mecânica: aço carbono.....	98
Figura 19 – Limpeza dos elementos metálicos pré-ensaios .....	99
Figura 20 – Identificação individual de pregos.....	99

Figura 21 – Pregos inseridos e a inserir na madeira .....	100
Figura 22 – Elementos metálicos observados em lupa estereocópica..	100
Figura 23 – Peças de madeira utilizadas na confecção dos corpos de prova. ....	102
Figura 24 – Corpo de prova para determinação da umidade da madeira. ....	102
Figura 25 – Corpos de prova de madeira. ....	105
Figura 26 – Modelo dos corpos de prova.....	105
Figura 27 – Espaçamento em ligações com pinos (NBR 7190:1997) .	106
Figura 28 – Corpos de prova de madeira pré-furados.....	107
Figura 29 – Corpos de prova de controle.....	108
Figura 30 – Corpos de prova de controle contendo sílica gel.....	108
Figura 31 – Alteração de cor da sílica gel. ....	109
Figura 32 – Recipiente de imersão de elementos metálicos .....	109
Figura 33 – Câmara de controle de umidade e temperatura .....	109
Figura 34 – Desenho esquemático das câmaras de ensaio.....	110
Figura 35 – Câmaras de ensaio. ....	111
Figura 36 – Numeração dos corpos de prova (vista superior). ....	112
Figura 37 – Corpos de prova 1 e 4.....	113
Figura 38 – Remoção de pregos dos corpos de prova .....	115
Figura 39 – Recipiente de vidro para limpeza química .....	117
Figura 40 – Relação entre a massa do corpo de prova e o tempo acumulado na solução de limpeza .....	120
Figura 41 – Parafusos de aço galvanizado a frio embutidos nas três espécies de madeira aos 30 dias de ensaio. <i>Hymenolobium</i> (E), <i>Eucalyptus</i> (C) e <i>Pinus</i> (D).....	143
Figura 42 – Corrosão no parafuso de aço galvanizado a frio aos 30 dias de ensaio. ....	143
Figura 43 – Parafusos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de <i>Hymenolobium</i> aos 120 dias de ensaio. ....	144
Figura 44 – Pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de <i>Hymenolobium</i> , aos 60 (E) e 90 (D) dias de ensaio.....	147
Figura 45 – Pregos de aço galvanizado a frio embutido na madeira de <i>Eucalyptus</i> , aos 120 de ensaio. ....	147

Figura 46 – Pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de <i>Pinus</i> , aos 90 (E) e 120 (D) dias de ensaio. ....	148
Figura 47 – Pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de <i>Eucalyptus</i> , aos 30 (E) e 60 (D) dias de ensaio. ....	148
Figura 48 – Pregos de aço galvanizado a quente (E) e a frio (D) aos 120 dias de ensaio. ....	151
Figura 49 – Aspecto estético dos corpos de prova de <i>Eucalyptus</i> confeccionados com elementos de aço carbono. ....	186
Figura 50 – Aspecto interno dos corpos de prova, com pregos de aço carbono, embutidos nas três espécies de madeira. ....	187
Figura 51 – Acúmulo de material sólido nos elementos de aço carbono embutidos na madeira de <i>Eucalyptus</i> . (a), (b), (c) parafusos (d) pregos .....	188



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição Média de Madeiras de Coníferas e Folhosas .	52
Quadro 2 – Quantidade relativa das polioeses em coníferas e folhosas .	56
Quadro 3 – Diferenças entre a celulose e polioeses.....	57
Quadro 4 – Composição elementar percentual da lignina em coníferas e folhosas .....	58
Quadro 5 – Classificação dos aços quanto ao teor de carbono .....	68
Quadro 6 – Fator de conversão (k) para a expressão da taxa de corrosão .....	81
Quadro 7 – Densidade do material metálico .....	82
Quadro 8 – Classificação da acidez de acordo com o tipo de madeira .	94
Quadro 9 – Pregos e Parafusos Utilizados .....	98
Quadro 10 – Elementos metálicos .....	100
Quadro 11 – Espécies de madeira selecionadas .....	101
Quadro 12 – Teor de umidade das madeiras .....	103
Quadro 13 – Programação de ensaios .....	104
Quadro 14 – Programação das avaliações.....	114
Quadro 15 – Soluções para retirada dos produtos de corrosão após o ensaio. ....	116
Quadro 16 – Corpos de Prova que não conformaram o gráfico descrito na NBR6210:2008. ....	123
Quadro 17 – Taxas de corrosão médias, expressas em miligrama por dm <sup>2</sup> por dia (mdd) .....	131
Quadro 18 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 30 dias de ensaio .....	159
Quadro 19 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 60 dias de ensaio .....	159
Quadro 20 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 90 dias de ensaio .....	161
Quadro 21 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 120 dias de ensaio .....	161
Quadro 22 – Parafusos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço inoxidável antes da realização dos ensaios .....	163

Quadro 23 – Parafusos de aço carbono após ensaios .....	165
Quadro 24 – Parafusos de aço carbono: comparativo entre espécies...	167
Quadro 25 – Parafusos de aço galvanizado a frio após ensaios.....	169
Quadro 26 – Parafusos de aço galvanizado a frio: comparativo entre espécies.....	171
Quadro 27 – Parafusos de aço inoxidável após ensaios.....	172
Quadro 28 – Pregos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço galvanizado a quente, antes da realização dos ensaios. ....	173
Quadro 29 – Pregos de aço carbono após ensaio.....	175
Quadro 30 – Pregos de aço carbono: comparativo entre espécies .....	177
Quadro 31 – Pregos de aço galvanizado a quente após ensaios.....	179
Quadro 32 – Pregos de aço galvanizado a quente: comparativo entre espécies.....	181
Quadro 33 – Pregos de aço galvanizado a frio após ensaios .....	183
Quadro 34 – Pregos de aço galvanizado a frio: comparativo entre espécies.....	185
Quadro 35 – Parafusos de aço carbono: grau de agressividade das madeiras.....	191
Quadro 36 – Parafusos de aço galvanizado a frio: grau de agressividade das madeiras .....	193
Quadro 37 – Parafusos de aço inoxidável.....	195
Quadro 38 – Pregos de aço carbono: grau de agressividade das madeiras .....	197
Quadro 39 – Pregos de aço galvanizado a frio: grau de agressividade das madeiras.....	199
Quadro 40 – Pregos de aço galvanizado a quente: grau de agressividade das madeiras .....	201

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acidez, teor de taninos e taxa de corrosão das soluções testadas.....	64
Tabela 2 – Tempos de limpeza .....	119
Tabela 3 – Determinação de valores espúrios para o grupo de pregos de aço carbono analisados aos 30 dias de exposição e embutidos na madeira de <i>Eucalyptus</i> . .....	127
Tabela 4 – Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov realizado para o grupo de pregos galvanizados a quente com exposição de 60 dias e embutidos na madeira de <i>Pinus</i> .....	128
Tabela 5 – Variação das velocidades de corrosão nos parafusos de aço carbono.....	138
Tabela 6 – Variação das velocidades de corrosão dos pregos de aço carbono.....	140
Tabela 7 – Variação das velocidades de corrosão dos parafusos de aço galvanizado a frio.....	142
Tabela 8 – Variação das velocidades de corrosão dos pregos de aço galvanizado a frio.....	146
Tabela 9 – Variação das velocidades de corrosão dos pregos de aço galvanizado a quente.....	150



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Pregos de aço carbono aos 60 dias .....	124
Gráfico 2 – Pregos de aço galvanizado a frio de controle ( <i>Pinus</i> ).....	125
Gráfico 3 – Pregos de aço carbono embutidos na madeira de <i>Eucalyptus</i> .....	129
Gráfico 4 – Parafusos de aço carbono.....	133
Gráfico 5 – Parafusos de aço galvanizado a frio.....	134
Gráfico 6 – Pregos de aço carbono .....	135
Gráfico 7 – Pregos de aço galvanizado a frio .....	135
Gráfico 8 – Pregos de aço galvanizado a quente.....	136
Gráfico 9 – Parafusos de aço carbono: velocidade de corrosão.....	137
Gráfico 10 – Pregos de aço carbono: velocidade de corrosão.....	139
Gráfico 11 – Parafusos de aço galvanizado a frio: velocidade de corrosão.....	141
Gráfico 12 – Pregos de aço galvanizado a frio: velocidade de corrosão .....	145
Gráfico 13 – Pregos de aço galvanizado a quente: velocidade de corrosão.....	149
Gráfico 14 – Elementos de aço carbono x <i>Hymenolobium</i> .....	152
Gráfico 15 – Elementos de aço carbono x <i>Pinus</i> .....	153
Gráfico 16 – Elementos de aço carbono x <i>Eucalyptus</i> .....	153
Gráfico 17 – Elementos de aço galvanizado x <i>Hymenolobium</i> .....	155
Gráfico 18 – Elementos de aço galvanizado x <i>Pinus</i> .....	156
Gráfico 19 – Elementos de aço galvanizado x <i>Eucalyptus</i> .....	157



# SUMÁRIO

## – CAPÍTULO I –

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	31
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b> .....	31
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	32
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	33
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
<b>1.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL</b> .....	33
<b>1.4 LIMITAÇÕES</b> .....	34

## – CAPÍTULO II –

<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	39
<b>2.1 O USO DE ELEMENTO METÁLICOS EM CONSTRUÇÕES COM MADEIRA – BREVE HISTÓRICO</b> .....	39
<b>2.2 A MADEIRA: CONHECENDO O MATERIAL</b> .....	45
2.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	47
2.2.1.1 Higroscopicidade.....	47
2.2.1.2 Teor de Umidade.....	47
2.2.1.3 Densidade.....	48
2.2.1.4 Durabilidade Natural.....	49
2.2.1.5 Resistência Química.....	49
2.2.2 A QUÍMICA DA MADEIRA .....	49
2.2.2.1 Substâncias Macromoleculares .....	51
2.2.2.2 Celulose.....	53
2.2.2.3 Polioses (Hemiceluloses) .....	56
2.2.2.4 Lignina da Madeira .....	57
2.2.2.5 Reações Químicas da Madeira .....	58
2.2.2.6 Extrativos da Madeira .....	59
2.2.2.7 Compostos Inorgânicos.....	59
2.2.2.8 Problemas da Análise.....	60
2.2.3 MECANISMOS E CAUSAS DE DEGRADAÇÃO DA MADEIRA .....	61
2.2.4 O EFEITO DE TANINOS E DO PH NA CORROSÃO DO AÇO EMBUTIDO NA MADEIRA .....	62
<b>2.3 OS METAIS</b> .....	65
2.3.1 O AÇO.....	66
2.3.1.1 Aços Estruturais mais Comuns .....	67

2.3.1.2	Aços-Carbono .....	67
2.3.1.3	Aços Liga.....	68
2.3.1.4	Aço Inoxidável.....	68
2.3.2	GALVANIZAÇÃO.....	69
2.3.3	CORROSÃO: CONCEITOS E FORMAS .....	70
2.3.4	TIPOS DE CORROSÃO .....	73
2.3.4.1	Corrosão Uniforme .....	74
2.3.4.2	Corrosão por placas.....	74
2.3.5	BIODETERIORAÇÃO .....	74
2.3.6	COMPORTAMENTO DO AÇO CARBONO À CORROSÃO .....	75
2.3.7	COMPORTAMENTO DO AÇO GALVANIZADO À CORROSÃO .....	78
2.3.8	COMPORTAMENTO À CORROSÃO NO AÇO INOXIDÁVEL.....	80
<b>2.4</b>	<b>MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO .....</b>	<b>80</b>
2.4.1	TESTES DE EXPOSIÇÃO NATURAL.....	83
2.4.1.1	Exposição ao Ar Livre .....	84
2.4.1.2	Exposição Subterrânea.....	87
2.4.2	SIMULAÇÃO DE MÉTODOS DE EXPOSIÇÃO NATURAL.....	88
2.4.3	TESTES DE EXPOSIÇÃO ACELERADA .....	89
2.4.3.1	Índice de Umidade e Temperatura .....	90
2.4.3.2	Serragem Úmida .....	91
2.4.3.3	Aspersão de Sal.....	91
2.4.4	TESTES ELETROQUÍMICOS .....	92
2.4.5	MODELO DE PREVISÃO DA CORROSÃO DE ELEMENTOS METÁLICOS EMBUTIDOS NA MADEIRA .....	92
<b>2.5</b>	<b>NORMAS BRASILEIRA PARA QUANTIFICAÇÃO DA CORROSÃO ...</b>	<b>94</b>

### - CAPÍTULO III -

<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>97</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>97</b>
3.1.1	ELEMENTOS METÁLICOS .....	97
3.1.2	MADEIRAS.....	101
<b>3.2</b>	<b>PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>103</b>
3.2.1	CÂMARAS DE CONTROLE DE UMIDADE E TEMPERATURA .....	110
3.2.2	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....	112
3.2.3	REMOÇÃO DOS ELEMENTOS METÁLICOS DA MADEIRA.....	114
3.2.4	REMOÇÃO DE PRODUTOS DE CORROSÃO .....	116
3.2.5	MÉTODO DE DECAPAGENS SUCESSIVAS .....	118

## – CAPÍTULO IV –

<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	123
<b>4.1 DETERMINAÇÃO DA MASSA FINAL</b> .....	123
<b>4.2 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO</b> .....	126
<b>4.3 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORROSÃO NO TEMPO</b> .....	133
<b>4.4 INFLUÊNCIA DA ESPÉCIE DE MADEIRA NA VELOCIDADE DE CORROSÃO</b> .....	136
4.4.1 AÇO CARBONO .....	136
4.4.1.1 Parafusos de aço carbono .....	137
4.4.1.2 Pregos de aço carbono.....	138
4.4.2 AÇO GALVANIZADO A FRIO .....	140
4.4.2.1 Parafusos de aço galvanizado a frio .....	141
4.4.2.2 Pregos de aço galvanizado a frio.....	145
4.4.3 PREGOS DE AÇO GALVANIZADO A QUENTE .....	149
<b>4.5 INFLUÊNCIA DO TIPO DE AÇO NA VELOCIDADE DE CORROSÃO PARA UMA MESMA ESPÉCIE DE MADEIRA</b> .....	152
<b>4.6 ASPECTOS ESTÉTICOS DOS CORPOS DE PROVA</b> .....	158
<b>4.7 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS DO FENÔMENO DE CORROSÃO</b> .....	189
<b>4.8 OUTRAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O EXPERIMENTO</b> .....	203
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	205
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	209

## – APÊNDICE –

### DADOS GERAIS DO EXPERIMENTO EM ARQUIVO DIGITAL

## – ANEXOS –

<b>ANEXO A – INFORMAÇÕES SOBRE MADEIRAS: ANGELIM PEDRA</b> .....	223
<b>ANEXO B – INFORMAÇÕES SOBRE MADEIRAS: PINUS ELIOTE</b> .....	227
<b>ANEXO C – INFORMAÇÕES SOBRE MADEIRAS: EUCALIPTO GRANDIS</b> .....	231



## **CAPÍTULO I**

### **- INTRODUÇÃO -**



## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um dos recursos naturais de mais antiga utilização pelo homem, enquanto material de construção. No entanto, muitos fatores interferem no seu desempenho e durabilidade, fazendo com que a vida útil de uma estrutura de madeira se torne uma questão de grande relevância na construção civil.

Enquanto material de origem natural, após ter cumprido a sua função, a madeira encerra seu ciclo natural ao desagregar-se em seus elementos básicos. O que explica, segundo Klock et al (2005), o porquê de serem encontradas poucas evidências da utilização ancestral da madeira, embora, segundo os autores, “algumas pontas de lanças e flechas, utensílios e ferramentas de até 300.000 anos tenham sido preservados sob condições excepcionais de clima e sítio”.

De grande importância na carpintaria, os metais têm sido utilizados em construções, em maior ou menor escala, com ênfase na fabricação de ferramentas, utensílios e mecanismos, principalmente quando há necessidade de uma elevada resistência mecânica (especialmente resistência à tração).

Os elementos metálicos muito contribuem na solução de uniões, sendo que as ligações madeira-metal modernas englobam uma série de tecnologias bem diversificadas. Do ponto de vista construtivo, a combinação desses materiais possui desvantagens que podem ser traduzidas em um fenômeno associado, de prejuízo mútuo, dentre os quais se destaca a corrosão. A degradação dos materiais pela corrosão é um problema de real importância, com implicações que podem colocar em risco a estabilidade global da estrutura.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A corrosão de elementos metálicos utilizados em conjunto com a madeira é uma questão importante no que diz respeito a garantia da vida útil de uma estrutura de madeira. Utilizados em uma série de aplicações, devido a sua alta resistência e ductibilidade, a maioria dos metais são termodinamicamente instáveis. Quando embutidos na madeira, os elementos metálicos ficam sujeitos à corrosão devido à presença de água e oxigênio na estrutura celular da madeira, assim como a reações químicas entre seus constituintes. Essa corrosão traduz-se em um

fenômeno associado, cujo produto da corrosão do metal tende a acelerar a degradação da madeira na qual está embutido e, ao mesmo tempo, a decomposição da madeira tende a enfraquecer significativamente o poder de fixação do elemento metálico, podendo levar a falhas de serviço da estrutura. (RICHOLSON, 1959, BAKER, 1978, ZOLLO e HEYER, 1982, ROSSITER et al, 1992, BOHNHOFF, 2002, apud ZELINKA, 2005) A durabilidade desse tipo de estrutura, como um todo, está fundamentalmente associada à durabilidade da ligação entre a madeira e o metal. Pesquisas apontam para a umidade como o fator mais importante na determinação da incidência de corrosão. Para autores como Suchsland & Woodson (1991) e Giovanella [2000?], a água em excesso pode afetar a acidez da madeira, a partir da quebra da celulose e sua transformação em ácido acético (etanóico), através de processos naturais de envelhecimento. Desta forma, toda espécie de madeira pode causar esse fenômeno, sendo umas mais agressivas que outras. O ácido acético é volátil, podendo causar corrosão inclusive em locais distantes das principais zonas úmidas, especialmente em locais mal ventilados. De maneira geral, a probabilidade de corrosão de elementos metálicos na madeira pode ser influenciada por outros fatores além daqueles supracitados, tais como a água de precipitação e de condensação na superfície, os ciclos curtos de umidificação e secagem, expansão e retração, que tendem a gerar fissuras, permitindo o ingresso de umidade na madeira.

## 1.2 OBJETIVOS

A pesquisa desenvolvida envolve o ensaio de corpos de prova submetidos a cento e vinte dias de exposição à atmosfera úmida saturada, conforme o método de ensaio descrito na Norma NBR8095:1983. Foram avaliados parafusos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço inoxidável, além de pregos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço galvanizado a quente, embutidos em diferentes espécies de madeira, sendo duas folhosas (*Hymenolobium petraeum* e *Eucáliopto grandis*) e uma conífera (*Pinus elioti*).

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar de forma qualitativa e quantitativa o fenômeno da corrosão na interface metal/madeira, englobando diferentes elementos metálicos de ligação.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) avaliar as tendências das taxas de corrosão dos elementos metálicos embutidos em três espécies de madeira (*Hymenolobium petraeum*, *Eucaliptus grandis* e *Pinus elliotti*);
- b) verificar se as diferenças entre as espécies de madeira comportam-se como variáveis de interferência significativa nas taxas de corrosão de elementos metálicos;
- c) realizar uma análise comparativa das taxas de corrosão entre elementos metálicos de ligação – pregos e parafusos – embutidos na mesma madeira;
- d) determinar a eficácia dos diferentes tratamentos superficiais dos elementos metálicos ensaiados;
- e) avaliar se os métodos descritos nas Normas NBR8095:1983 e NBR6210:2008 conduzem a resultados satisfatórios para diferentes tipos de metais de elementos de ligação.

## 1.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

O trabalho está estruturado fundamentalmente em cinco itens. Na introdução justifica-se o tema escolhido e apontam-se os objetivos da pesquisa. O Capítulo II traz a fundamentação teórica sobre os materiais envolvidos – madeira e aço – e aborda o uso de elementos metálicos em construções com madeira, desde a sua evolução histórica, passando pelos mecanismos e causas de degradação. Ainda no mesmo item, é apresentada uma breve revisão dos métodos de quantificação, bem como as normas brasileiras disponíveis para avaliação da taxa de corrosão de metais. O Capítulo III traz os procedimentos metodológicos que foram adotados nos ensaios de exposição acelerada dos corpos de prova de

madeira e metal, assim como o processo de confecção desses conjuntos, as espécies de madeira e os tipos de elementos que foram ensaiados. No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos e as análises realizadas, sob o enfoque dos referenciais teóricos apresentados no Capítulo II. O presente estudo é encerrado com as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados dos ensaios realizados. São apresentadas, também, as sugestões para novas pesquisas.

#### 1.4 LIMITAÇÕES

Sabe-se que a estimativa de vida útil relacionada com a corrosão de metais em madeiras não é um problema de fácil compreensão ou estimativa e que a interpretação de resultados, mesmo aqueles eximamente executados, exige muito cuidado, principalmente pelo fato de a corrosão ser um processo dependente da ocorrência de diversos eventos aleatórios. Além disso, os resultados dos testes de exposição acelerada possuem a desvantagem de não poderem ser diretamente aplicáveis a estruturas em serviço, devido ao controle e manipulação de algumas variáveis que não ocorrem no fenômeno de longa duração.

Para ensaios de exposição acelerada, a NBR8095:1983, destinada à aplicação em material metálico revestido e não revestido, por exposição à atmosfera úmida saturada, sugere a utilização de uma câmara de controle de umidade e temperatura, onde seria possível o acompanhamento da evolução do aspecto dos corpos de prova com frequência adequada. Nesse sentido, outra limitação desta pesquisa reside na dificuldade de encontrar tal equipamento disponível. Sendo assim, a opção encontrada foi a construção de uma câmara com materiais de fácil aquisição, a exemplo das experiências já realizadas na França, em ateliês de conservação e restauração.<sup>1</sup>

Em virtude do tempo e dos recursos disponíveis, as amostras de madeira e dos elementos metálicos ensaiados foram adquiridos no comércio local, limitando os ensaios e impossibilitando que os resultados obtidos sejam aplicáveis a um universo maior.

---

<sup>1</sup> Apud CARRASCO (2009), p.37: “Conforme relatos da Sra. Annick Texier, pesquisadora do Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, alguns ateliês de conservação já haviam realizado esse tipo de envelhecimento para verificar o desempenho de camadas de proteção sobre objetos metálicos. Esses ateliês conseguiram resultados importantes para a tomada de decisão sobre qual produto utilizar nas suas intervenções”.

Quanto ao número de elementos ensaiados adverte-se que, devido a limitações de ordem prática, a representatividade estatística dos resultados pode estar comprometida.



## **CAPÍTULO II**

### **- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA -**



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A compreensão do comportamento dos materiais envolvidos nesta pesquisa constitui-se numa etapa essencial para o seu desenvolvimento. Neste item, portanto, faz-se conhecer a evolução histórica da utilização de elementos metálicos em construções com madeira e as principais características dos materiais ensaiados, as quais foram julgadas necessárias para o entendimento do fenômeno estudado.

### 2.1 O USO DE ELEMENTO METÁLICOS EM CONSTRUÇÕES COM MADEIRA – BREVE HISTÓRICO

A partir da evolução no domínio dos metais, o homem desenvolveu ferramentas que lhe permitiram trabalhar a madeira e descobrir que se tratava de um material que detinha direções preferenciais para ser trabalhado e que, após a sua secagem, desenvolviam-se fendas na sua direção radial, provocando o aparecimento de superfícies lisas, capazes de serem justapostas. Em seguida surge a possibilidade de realizar entalhes na madeira, sugerindo uma nova tecnologia de ligação. (JIMÉNEZ, 2005)

Os vários tipos de ligações, que podem ser traduzidos como dispositivos que permitem assegurar a ligação e a transmissão de esforços entre os elementos de uma estrutura, são classificados de acordo com diferentes aspectos. Quanto aos tipos de tecnologia empregados, podem diferenciar-se as ligações por entalhes (madeira sobre madeira); as ligações por justaposição (que recorrem ao uso de elementos de conexão); e as ligações coladas (através da utilização de compostos químicos). (CASTRO MENDES, 1994)

As ligações por entalhe inicialmente possuíam função de travamento da estrutura, sem resistirem a esforços significativos. Embora esse tipo de ligação tenha uma boa resposta aos esforços de compressão e corte, possui a desvantagem de concentrar tensões na zona do entalhe, fato que se deve à redução efetiva na seção da peça e exige a utilização de elementos com seção superdimensionada e extensa, uma vez que não são admissíveis emendas em zonas tracionadas sem a utilização de outros elementos. As ligações por entalhe, no entanto, desenvolveram-se significativamente no decorrer do tempo, permitindo a construção de estruturas mais arrojadas.

Na Idade Média, surgiram novas soluções baseadas no conhecimento empírico das características resistentes da madeira. E, diante do pouco conhecimento da resistência de materiais, outros fatores eram determinantes para o sucesso da tecnologia da madeira como, por exemplo, a escolha criteriosa e o tratamento cuidadoso da madeira, o recurso a carpinteiros especializados, detentores de um elevado conhecimento na matéria, a concepção e os detalhes estudados em pormenores, etc.

Após a fase da ligação por entalhes, a utilização de elementos metálicos permite um regresso ao recurso de elementos justapostos. Em substituição aos elementos primitivos e rudimentares, a fixação, transmissão de esforços e a garantia de estabilidade da estrutura são permitidas pela utilização de conectores metálicos, graças aos progressos no domínio das ligas metálicas.

De grande importância na carpintaria, o ferro tem sido utilizado em construções, em maior ou menor escala, desde tempos remotos, com ênfase na fabricação de ferramentas, utensílios e mecanismos, principalmente quando há necessidade de uma elevada resistência mecânica (especialmente resistência à tração). A sua utilização vem acompanhada da necessidade de uma resolução do ponto de vista técnico e arquitetônico. Preocupação esta, advinda tanto da fabricação, como da instalação na obra e da sua conservação no tempo, já que a degradação dos metais pela corrosão é um problema de real importância, com implicações que podem colocar em risco a estabilidade da estrutura à qual estão inseridos.

Numa breve revisão sobre o uso de elementos metálicos na construção em madeira ao longo da história, incluindo-se a construção naval, Jiménez (2005) afirma que, até etapas bastante avançadas, esses elementos não foram empregados de forma massiva. Segundo o autor, em 1954, com a descoberta da embarcação de Keops, um edifício flutuante encontrado dentro da grande pirâmide do Egito, foi possível observar a forma com que os barcos eram construídos, a partir de peças travadas e tensionadas por cordas amarradas de proa à popa, sem a utilização de ferragens na sua armação, conforme ilustrado pela Figura 1, revelando parte da tecnologia naval egípcia.

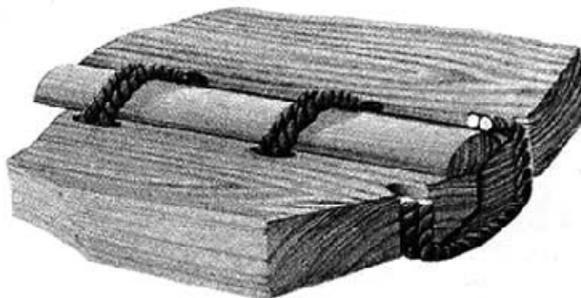


Figura 1 – Cordas feitas de raízes que costuram espessas tábuas de madeira em uma embarcação primitiva. (JOHNSON, 1978, apud JIMÉNEZ, 2005)

O reforço de uniões proposto pelos romanos era uma elementar ligação à base de cordas, conforme pode ser deduzido de um texto vitruviano, no qual o autor descreve a construção de falsas abóbodas à base de tirantes amarrados e suspensos a partir da estrutura através de ligações feitas com madeira flexível. Os romanos admitiam o uso do ferro em suas estruturas somente como algo excepcional e, segundo Jiménez (2005), a maioria delas desapareceu no decorrer do tempo, exceto aquelas encontradas em Herculano e Pompéia, de pequenas dimensões. Foram os romanos, no entanto, que deram início à utilização do ferro na união de estruturas de madeira e, ainda que tenham mantido a tipologia das antigas estruturas etruscas, quiseram substituir a madeira por um material mais estável, como o tijolo, na confecção de arcos, e o bronze, metal mais fácil de trabalhar e cujas uniões são mais simples de executar. Inicialmente empregaram o bronze em elementos principais e posteriormente, incluíram-no em revestimentos.

Na Idade Média, principalmente na Itália, as abóbodas passaram a ser reforçadas por meio de tirantes metálicos. No Renascimento, Leonardo da Vinci adverte que “o arco com corda (atirantado) dura pouco tempo”, e Alberti, em seu tratado, manifesta a necessidade de cautela no uso do ferro. Andrea Palladio [1572] (apud JIMÉNEZ, 2005) descreve em seus “*I Quattro Libri Dell’Architettura*”, publicados pela primeira vez em 1570, estruturas de aspecto moderno para uso em grandes vãos. A essas publicações pertencem a ilustração da ponte sobre o rio Cismote, na Itália, com um vão de 30 metros (Figura 2).

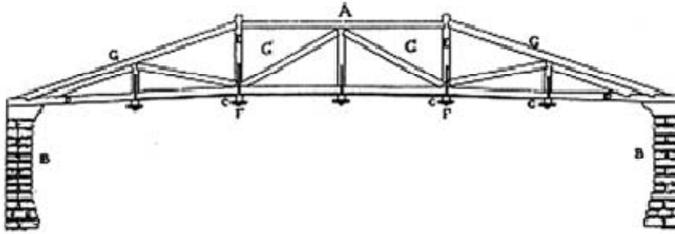


Figura 2 – Ponte sobre o rio Cismote. Ilustração de Palladio  
 Fonte: Gómez Acosta y López Martínez 2002, p.266, apud Jiménez, 2005.

Em 1561, Philibert de l'Orme publica, em Paris, o livro *Nouvelles inventions pour bien bastir et à petit fraiz*, aonde expõe sua invenção do sistema de carpintaria modular intertravado. Segundo Jiménez (2005), trata-se de uma obra técnica dedicada à prática da construção de telhados, abóbodas e coberturas de madeira, de um modo econômico e simples, no qual o autor propõe um sistema para a construção de formas arqueadas mediante a utilização de peças curvadas de pequenas dimensões que são ensambladas com tiras, também de madeira. No entanto, até o final do século XVII, as coberturas não refletiam a mudança do uso, quase universal, das juntas de madeira aos encaixes desenhados especificamente para uniões de metal, que usavam parafusos e abraçadeiras. (GÓMEZ ACOSTA y LÓPEZ MARTÍNEZ, 2002, apud JIMÉNEZ, 2005)

A posterior utilização de abraçadeiras, parafusos e pregos permitiu a construção de vigas curvas de madeira, constituídas por várias tábuas delgadas, precursoras da madeira laminada.

A natureza dos materiais, utilizados na confecção de elementos metálicos de reforço, variou ao longo da história, acompanhando o avanço das técnicas de cada época, desde o tradicional ferro forjado até os inoxidáveis de cobre ou bronze. Até o final do século XVIII, a maior parte do ferro que se obtinha era o ferro forjado. Jiménez (2005) afirma que muitos desenhos das uniões de madeira foram concebidos para cumprir suas funções construtivas e estruturais sem a necessidade de pregos ou cravos, responsáveis por um significativo encarecimento na execução das estruturas realizadas na época medieval. Mais tarde, seriam então desenhadas as soluções de ligações em que a presença do ferro tornar-se-ia totalmente necessária para o funcionamento da união, configurando soluções construtivas com menor trabalho de carpintaria. Na Europa, a Revolução Industrial coincidiu com a diminuição dos recursos madeireiros e o sistema construtivo de madeira foi, então,

substituído pelo sistema de tijolos. Na América, onde o metal era abundante até princípios do século XIX, houve um domínio da fabricação mecanizada de pregos, até então fabricados de maneira artesanal. Nas últimas décadas do século XX, portanto, as uniões entre elementos de madeira sofreram uma intensa evolução, permitindo a otimização de sistemas construtivos tradicionais, como a execução de uma grande variedade de sistemas estruturais.

Embora acarrete um aumento de resistência dos sistemas estruturais, do ponto de vista construtivo, a combinação dos materiais (metal e madeira), possui as seguintes desvantagens levantadas por Jiménez (2005): apresenta desempenho inferior quando exposta ao fogo, devido à baixa resistência dos metais a altas temperaturas; pior comportamento em locais com importantes alterações térmicas entre o dia e a noite (coberturas), pela diferença de condutividade de ambos os materiais e as trocas dimensionais derivadas; vulnerabilidade da união por deterioração de ambos os materiais. Este último fator se deve a maior condutividade do aço que, com a diminuição da temperatura, permite a condensação da umidade na sua superfície. Sendo a madeira um material higroscópico, adsorverá essa umidade. Como consequência, o elemento metálico poderá corroer-se e a madeira umedecida favorecerá a colonização de fungos e outros agentes deterioradores. Trata-se, portanto, de uma debilidade combinada de uniões que, em longo prazo, poderá provocar sérios danos à estrutura como um todo.

Como exemplo dessa natureza, Jiménez (2005) cita o caso do Pavilhão da Checoslováquia na Expo 92 de Sevilha que, após cinco anos de construção, apresentou sérios problemas em seus elementos horizontais, constituídos por madeira de carvalho vermelho (*Quercus robur*) e fixados com parafusos galvanizados (Figura 3).



Figura 3 – Pavilhão da Checoslováquia na Expo 92 de Sevilha. Estado em que se apresentavam os elementos de aço galvanizado.

Fonte: E. Morales. AITIM 220, apud Jiménez, 2005.

A causa dessa deterioração foi atribuída à acidez da madeira e a consequente corrosão dos elementos metálicos, assim como a outros defeitos de construção. A intervenção consistiu na substituição da madeira de carvalho vermelho por iroko (*Chlorophora excelsa*) e o aço galvanizado por aço inoxidável (Figura 4).

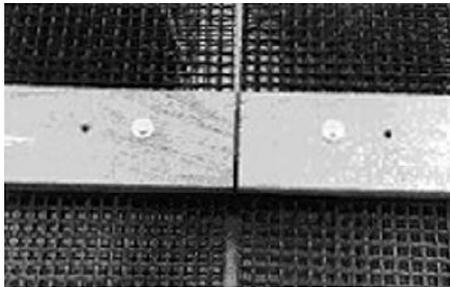


Figura 4 – Pavilhão da Checoslováquia na Expo 92 de Sevilha. Substituição da madeira e dos elementos de fixação.

Fonte: E. Morales. AITIM 220, apud Jiménez, 2005.

As ligações madeira-metal modernas englobam uma série de tecnologias bem diversificadas. Na grande maioria delas, trata-se de variações aprimoradas de tecnologias clássicas, como é o caso das ligações metálicas e das ligações por entalhes múltiplos.

## 2.2 A MADEIRA: CONHECENDO O MATERIAL

A madeira é um conjunto heterogêneo de diferentes tipos de células com propriedades específicas para desempenharem as funções vitais abaixo mencionadas (BURGER e RICHTER, 1991. p.13):

- a) condução de líquidos;
- b) transformação, armazenamento e transporte de substâncias nutritivas;
- c) sustentação do vegetal.

As células que dão origem aos tecidos dos quais se constituem a madeira possuem paredes celulares espessas, de formas e tamanhos variados de acordo com a sua espécie e, são compostas por três principais polímeros orgânicos: celulose, lignina e hemicelulose. Os polímeros que compõe a parede celular são muito semelhantes em todas as espécies de madeira, sendo que, a celulose, cujas ligações químicas são extremamente estáveis, representa cerca de 50% da massa da madeira. A lignina, um polímero amorfo associado à celulose na parede celular, constitui de 30 a 35% da massa da madeira e seu papel é conferir rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais. As hemiceluloses são polissacarídeos que auxiliam na formação de um vínculo, na célula crescente, entre a celulose e a lignina. Estas três substâncias químicas primárias oferecem a resistência e a rigidez característica da madeira. (LOFERSKI, 2001)

Sob o aspecto da preservação ambiental, Szücs (2002) afirma que,

o uso da madeira representa um balanço global de energia mais favorável do que aquele envolvido no emprego de outros materiais de construção. A fábrica que produz a madeira, a árvore, é movida a energia solar e se utiliza do carbono poluente da atmosfera, capturando-o na fotossíntese e depois o sequestrando nos polímeros que formam a estrutura interna da madeira (Figura 5). No final do seu ciclo de vida, a árvore devolve o carbono para o ambiente fechando assim, o mecanismo de desenvolvimento limpo do carbono.

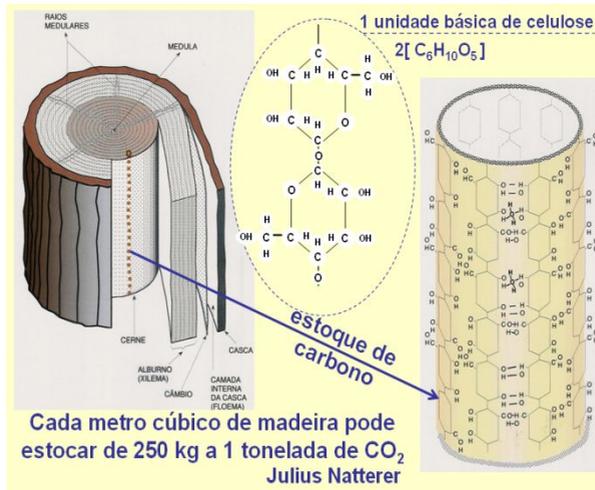


Figura 5 – Estrutura interna da madeira.  
Fonte: (SZÜCS, 2002)

Apesar de facilmente serem encontradas peças de madeira em serviço com algum grau de deterioração, são igualmente conhecidos inúmeros exemplos de estruturas em bom estado de conservação, mesmo com centenas de anos. A degradação de elementos de madeira surge, portanto, não como ação do tempo simplesmente, mas como resultado de agentes físicos, químicos, mecânicos ou biológicos aos quais as estruturas de madeira estão expostas ao longo de sua vida útil. Sendo assim, diversos são os fatores que interferem no seu desempenho e durabilidade que, por força de desconhecimento ou negligência, segundo aponta Maragno (2003), podem resultar em variados estágios de destruição e acidentes estruturais. A própria natureza oferece variadas espécies de madeira, com diferentes características de resistência à deterioração, as quais se constituem em uma condicionante para a sua utilização. Mas o fato é que, no geral, as mais disponíveis não são as mais resistentes. (MARAGNO, 2003)

A utilização de certas substâncias pode impedir ou tornar mais lenta a deterioração da madeira, como o uso de biocidas, substâncias químicas, tóxicas aos organismos xilófagos e que impedem o seu desenvolvimento.

Cabe salientar que, a escolha adequada da espécie de madeira a ser utilizada para um determinado fim, é a principal forma de prevenção de problemas patológicos nestas estruturas. Além do conhecimento das propriedades físicas e mecânicas inerentes a cada espécie, é necessária a

verificação de sua resistência aos organismos biodeterioradores e a sua permeabilidade às soluções preservativas. (VALLE, 2009)

### 2.2.1 Características Físicas

As propriedades físicas da madeira podem influenciar significativamente o desempenho e a resistência da madeira utilizada estruturalmente. Muitos fatores influem nas suas características físicas, entre eles a espécie da árvore, o solo e o clima, a fisiologia da árvore, a anatomia do tecido lenhoso e a variação da composição química. Dentre as características físicas da madeira destacam-se, aqui, as seguintes: higroscopicidade, teor de umidade, densidade, durabilidade natural e resistência química.

#### 2.2.1.1 Higroscopicidade

A madeira é capaz de absorver ou liberar umidade de acordo com o meio ambiente, dentro de um processo que altera suas condições de massa e volume. Decorrido um determinado período de tempo após o corte da madeira, a tendência é a de estabelecer-se um equilíbrio entre a umidade do ar e a umidade da madeira, denominado “equilíbrio higroscópico.”

#### 2.2.1.2 Teor de Umidade

Sendo a madeira um material higroscópico, o sistema água-madeira é muito importante em diversos campos da tecnologia, física e química da madeira. O teor de umidade que a madeira apresenta é o fator condicionante de todas as propriedades mecânicas e também da densidade aparente. O teor de umidade é igual ao peso de água dividido pelo peso da amostra seca em estufa.

$$U\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.1)$$

onde  $m_1$  é a massa úmida,  $m_2$  é a massa seca e  $w$  é a umidade (%).

A norma brasileira para estruturas de madeira (NBR 7190/1997), apresenta, em seu anexo B, um roteiro para a determinação da umidade de amostras de madeira.

A água é importante para o crescimento e desenvolvimento da árvore, constituindo uma grande porção da madeira verde. Na forma de água de constituição, adesão ou impregnação, ela faz parte da composição da estrutura química do próprio tecido e é muito difícil de ser eliminada. Já a água livre ou de capilaridade, presente nos canais de tecido lenhoso, pode ser eliminada facilmente, sem alterações de volume na madeira.

Denomina-se como sendo o ponto de saturação das fibras, o teor de umidade da madeira que corresponde ao conteúdo mínimo de água livre e ao máximo de água de impregnação. Para as madeiras brasileiras, esta umidade está próxima aos 25%. Nesse caso, a madeira é classificada como semi-seca. Para teor de umidade acima desse ponto, a perda de água pela madeira não implica variações de volume e de resistência para a sua estrutura. Para valores inferiores de umidade, a perda passa a ser acompanhada pela retração (redução de dimensões) e pelo aumento de sua resistência mecânica. Quando a umidade da madeira está em equilíbrio com as condições atmosféricas locais, o percentual de água impregnada nas fibras varia, aproximadamente, entre 12% e 18%, dependendo da espécie da madeira, do solo onde se desenvolveu e do clima onde se encontra, podendo chegar a 20% em regiões mais úmidas. Nesse caso, a madeira é classificada como sendo seca ao ar. Limites inferiores exigem um processo de secagem artificial ou forçado. (VALLE, 2009)

### 2.2.1.3 Densidade

Segundo a norma brasileira, há duas definições de densidade passíveis de serem utilizadas em estruturas de madeira: a densidade básica e a densidade aparente.

A densidade básica da madeira é a relação entre a sua massa seca e a unidade de volume saturado.

A densidade aparente é a relação entre a sua massa e a unidade de volume aparente, com referência à condição-padrão de umidade  $U=12\%$ .

Os índices da densidade variam conforme a espécie e o teor de umidade. No geral, quanto maior a densidade, maior é a retratibilidade,

dificuldade na trabalhabilidade e na secagem, maior resistência mecânica e durabilidade e menor permeabilidade às soluções de preservação. (MARAGNO, 2003)

#### 2.2.1.4 Durabilidade Natural

A durabilidade pode ser definida como a capacidade de um determinado material de resistir às mudanças em suas propriedades, isto é, resistir à degradação. (PADARATZ, 2009)

Para Maragno (2003, p.81), a durabilidade natural é a resistência da madeira, sem tratamento, ao ataque de agentes destruidores de suas propriedades. Esta característica depende da espécie, da densidade, dos componentes de impregnação natural, do teor de umidade, do desseivamento, entre outros fatores, que, conjugados às condições ambientais na qual a madeira está, influem na sua durabilidade natural. Esta característica pode ser alterada com o uso de tratamentos químicos ou físicos. Outro ponto importante, destacado por Valle, et al (2007, p. 26), é a diferença na durabilidade da madeira de acordo com a região da tora da qual a peça de madeira foi extraída, pois o cerne e o alborno apresentam características diferentes sendo, o alborno, muito mais vulnerável ao ataque biológico.

#### 2.2.1.5 Resistência Química

De forma geral, a madeira apresenta boa resistência a ataques químicos, podendo sofrer danos sob ataque de ácidos ou bases fortes. O ataque de bases pode provocar o aparecimento de manchas esbranquiçadas decorrentes da ação sobre a lignina e a hemicelulose da madeira. Já o ataque de ácidos pode causar uma redução na densidade e na resistência mecânica da madeira. (VALLE et al, 2007, p.26-27)

### 2.2.2 A Química da Madeira

As estruturas de madeira, em determinadas circunstâncias, podem apresentar problemas patológicos de origem física, química e biológica

(intrínsecas ou extrínsecas) ocasionadas por fatores humanos, naturais e/ou acidentais. As causas por falhas humanas podem ser geradas durante a concepção do projeto, durante a execução, ou durante a sua utilização. Já as causas naturais têm origens em fatores inerentes à própria matéria da madeira e à sua sensibilidade ao ambiente e aos esforços aplicados. Previsíveis ou não, não são provocadas diretamente pela ação humana. E as causas acidentais são as que, embora possíveis teoricamente, estatisticamente possuem menor probabilidade de ocorrer.

Dentre as falhas durante a concepção do projeto destaca-se a especificação inadequada de materiais, dentre eles, os produtos químicos, cuja inadequação pode afetar as condições de garantia de segurança do usuário ou do elemento estrutural. Elementos de ligação e fixação, por sua vez, devem ser corretamente especificados, de forma que não sejam suscetíveis à oxidação e ruptura, principalmente em ambientes sujeitos à constante umidade. No âmbito das falhas decorrentes do uso e manutenção, destaca-se o uso de técnicas, materiais e produtos, sem consultoria técnica, decorrente, principalmente, do desconhecimento dos critérios para a conservação e tratamento deste material. Maragno (2003), afirma que a umidade, enquanto causa de origem química extrínseca, age no sentido de que o processo contínuo de umidificação e secagem pode provocar oxidação em elementos de fixação e de ligação, cuja ruptura pode favorecer o desencaixe de peças. Além disso, a madeira sofre alterações em suas características físicas e químicas naturais quando em contato com agentes como ácidos e bases fortes, óxidos de ferro e enxofre, responsáveis pela sua decomposição. A área afetada torna-se amolecida e as fibras desagregadas.

O conhecimento da composição química da madeira adquire importância fundamental no entendimento do comportamento deste material heterogêneo, cuja variabilidade estrutural e química se reflete numa ampla gama de propriedades físicas como, por exemplo, a densidade, permeabilidade, condutividade térmica, etc. (KLOCK et al, 2005)

Considerando-se a composição química elementar da madeira, Klock et al (2005) afirmam que não há diferenças consideráveis entre as madeiras das diversas espécies. Sendo que, os principais componentes são o Carbono (C), o Hidrogênio (H), o Oxigênio (O) e pequena quantidade de Nitrogênio (N). Outros elementos, como o Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg), podem ser encontrados em pequenas quantidade, constituindo as substâncias minerais presentes na madeira.

A análise química da madeira requer procedimentos e métodos que diferem dos métodos clássicos da química analítica. Esse tipo de

análise compreende a determinação da composição da madeira e a extração, purificação e caracterização de seus constituintes. Klock et al (2005) apontam que a principal dificuldade encontrada para a realização da análise geral da madeira não é a quantidade de componentes, muito diferentes em composição química e comportamento, mas sim o “fato de que as macromoléculas da parede celular se encontram numa associação ultraestrutural e química muito íntima.” Os autores afirmam ainda que apenas análises muito detalhadas são capazes de fornecer a determinação de grupos funcionais, como o grupo acetil, por exemplo. Análises mais simplificadas podem determinar os principais componentes da parede celular, ou seja, os polissacarídeos (holocelulose) e lignina, além dos extrativos e cinzas.

### 2.2.2.1 Substâncias Macromoleculares

Presentes em todas as madeiras, as principais substâncias macromoleculares que constituem a parede celular são a celulose, as polioses (hemiceluloses) e a lignina. Há também substâncias minoritárias e de baixo peso molecular: os extrativos e substâncias minerais. Os componentes lignina e polioses diferem em proporção e composição química nas madeiras de coníferas e folhosas, enquanto a celulose, que pode ser caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular, constituído exclusivamente de  $\beta$ -D-glucose, se apresenta como um componente uniforme da madeira, sendo o principal componente da parede celular dos vegetais. As polioses (hemiceluloses) estão associadas à celulose na parede celular. Seus principais constituintes são cinco açúcares neutros: as hexoses – glucoses, manose e galactose – e as pentoses – xilose e arabinose. Algumas polioses contêm, ainda, ácidos urônicos. Segundo Klock et al (2005), “as folhosas, de maneira geral, contém maior teor de polioses que as coníferas, e a composição é diferenciada.” As moléculas de lignina são constituídas por um sistema aromático constituído de unidades de fenilpropano. As coníferas apresentam maior teor de lignina do que as folhosas, havendo diferenças estruturais entre a lignina encontrada nos dois grupos. Caracterizada como uma substância amorfa, a lignina é responsável pelo fortalecimento e enrijecimento das paredes celulares, sendo incorporada como o último componente durante o desenvolvimento das células.

O Quadro 1 e a Figura 6, extraídas de Klock et al (2005), apresentam de forma resumida a composição química da madeira.

Quadro 1 – Composição Média de Madeiras de Coníferas e Folhosas

<b>Constituinte</b>	<b>Coníferas</b>	<b>Folhosas</b>
Celulose	42 ± 2%	45 ± 2%
Polioses	27 ± 2%	30 ± 5%
Lignina	28 ± 2%	20 ± 4%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

Fonte: KLOCK et al (2005)

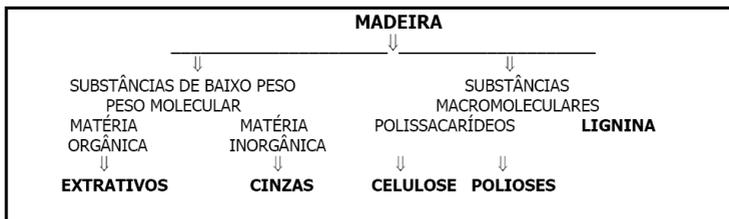


Figura 6 – Esquema resumo da química da madeira

Fonte: KLOCK et al (2005)

Também chamadas de materiais acidentais ou estranhos na madeira, as substâncias de baixo peso molecular se dividem em diferentes classes em termos de composição química. Essas substâncias são responsáveis por certas propriedades organolépticas da madeira, como o cheiro, o gosto e a cor. Ainda que representem uma pequena porcentagem da massa da madeira, podem influenciar significativamente as suas propriedades. As substâncias de baixo peso molecular podem ser divididas, simplificadamente, em dois grupos: material orgânico (extrativos) e inorgânico (cinzas). Segundo Klock et al (2005), “no que concerne a análise é mais útil a distinção entre as substâncias na base de suas solubilidades em água e solventes orgânicos.” Os autores apresentam os principais grupos químicos que compreendem as substâncias de baixo peso molecular como sendo:

- compostos aromáticos (fenólicos) – os compostos tanínicos são as substâncias mais importantes deste grupo e dividem-se em taninos hidrolisáveis e flobafenos tanínicos.
- Terpenos – englobam um grande número de substâncias naturais.
- Ácidos alifáticos – ácidos graxos saturados e insaturados são encontrados na madeira principalmente na forma dos seus

ésteres com glicerol (gordura e óleo) ou com alcoóis (ceras). O ácido acético se liga às polioses como um grupo éster.

- d. Alcoóis – a maior parte dos alcoóis alifáticos ocorre com componentes éster, enquanto os esteróis aromáticos são encontrados principalmente como glicosídeos.
- e. Substâncias inorgânicas – dentre os componentes minerais das madeiras predominam o cálcio (Ca), o potássio (K) e o magnésio (Mg).
- f. Outros componentes – mono e dissacarídeos são encontrados em pequenas quantidades na madeira, mas ocorrem em altas porcentagens no câmbio e na casca interna. Também podem ser encontradas, na madeira, pequenas quantidades de amins e eteno.

### 2.2.2.2 Celulose

O estudo da química da celulose teve início em 1838 e demonstrou por análise elementar, que o tecido de plantas contém um componente majoritário equivalente a uma fórmula empírica de  $C_6H_{10}O_5$ , com 44% de carbono, 6,2% de hidrogênio e 49,3% de oxigênio. Em 1930, evidências mostraram que a celulose é um polímero composto por um grande número de unidades repetidas que, posteriormente comprovou-se serem derivadas da condensação da D-glucose – um açúcar simples (monossacarídeo hexose  $C_6H_{12}O_6$ ). (KLOCK et al, 2005).

As moléculas de celulose são consideradas lineares e com forte tendência para formar pontes de hidrogênio inter e intramoleculares. Conforme citado por Klock et al (2005), os feixes de moléculas de celulose agregam-se na forma de microfibrilas, onde regiões altamente ordenadas, ou cristalinas, se alternam com regiões menos ordenadas, ou amorfas. Segundo os autores, as microfibrilas formam fibrilas que, por sua vez, constroem fibras celulósicas. A estrutura fibrosa resultante possui alta resistência à tração e é insolúvel à maior parte dos solventes. A Figura 7 ilustra a interação entre as moléculas de celulose formando microfibrilas.

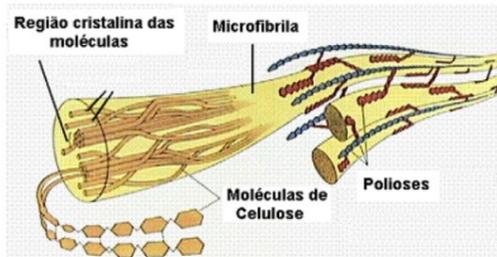


Figura 7 – Ilustração esquemática da interação das moléculas de celulose.

Fonte: KLOCK et al (2005)

Os feixes de cadeias moleculares são unidos por pontes de hidrogênio - forças de Van der Waals - intermoleculares. A Figura 8 apresenta os locais de formação das pontes de hidrogênio nas moléculas.

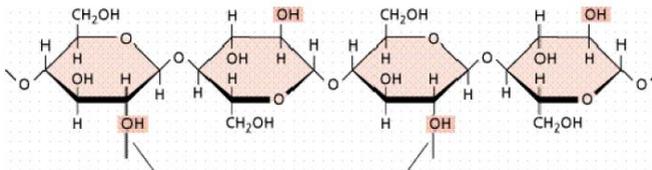


Figura 8 – Esquema de posições onde podem se formar pontes de hidrogênio nas moléculas de celulose.

Fonte: KLOCK et al (2005)

Ao mesmo tempo em que é considerada insolúvel em água, a celulose apresenta grande afinidade com ela, já que é capaz de adsorver a umidade do ar até alcançar um equilíbrio com a atmosfera, aumentando progressivamente a sua quantidade de água. Quando essa adsorção atinge o ponto de saturação e a umidade do ar é progressivamente diminuída, a quantidade de água adsorvida decresce sob novos valores de equilíbrio, ligeiramente mais altos que aqueles que formam a curva de adsorção. Este fenômeno é conhecido como *Histerese*, Klock et al (2005) explicam o fenômeno que,

baseia-se na interconversão da ponte de hidrogênio de celulose-água e celulose-celulose. Durante a dissorção, muitas pontes de hidrogênio entre a celulose e a água são convertidas em pontes de celulose-celulose, as quais somente podem ser desfeitas pela absorção de água à pressão de vapor elevada.

A celulose possui a característica de sofrer hidrólise – ruptura nas ligações hemiacetálicas entre as unidades de anidroglicose, sendo que, uma de suas principais reações químicas corresponde às reações das ligações glicosídicas (degradação da celulose). A reação das ligações glicosídicas pode ser definida como sendo o rompimento dessas ligações entre os monômeros glicose, podendo estender-se por toda a cadeia de celulose – reação conhecida como degradação da celulose. Conforme citado por Klock et al (2005), há diversos tipos de reações de rompimento da ligação glicosídica como, por exemplo a degradação hidrolítica, a degradação por compostos oxidantes e a degradação por microorganismos. A degradação hidrolítica é um tipo de reação relacionado com a cisão da ligação acetal da cadeia de celulose pela ação de um ácido ou base, sendo que a intensidade da degradação depende de uma série de fatores como a origem da celulose, a concentração do agente químico de degradação, temperatura, etc. A Figura 9 representa a hidrólise alcalina da celulose.

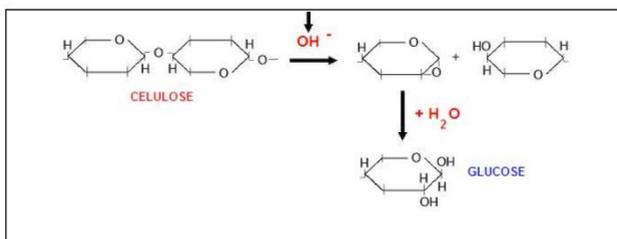


Figura 9 – Hidrólise alcalina da celulose.

Fonte: KLOCK et al (2005).

A degradação por agentes oxidantes geralmente ocorre ao acaso e levam à introdução de grupos carbonilas e carboxilas em diversas posições das glicoses da cadeia de celulose. As ligações glicosídicas ativadas por esses grupos podem sofrer degradação em meio ácido ou alcalino. Nesse sentido, a degradação por oxidação é procedida por uma degradação hidrolítica. A degradação biológica da celulose pode ser explicada como sendo uma hidrólise enzimática catalisada por uma enzima que ocorre em fungos e bactérias – a celulase. Trata-se de um tipo de degradação semelhante à degradação hidrolítica, com a particularidade de ser um ataque localizado, já que as moléculas da enzima são grandes e não podem se difundir rapidamente na celulose.

### 2.2.2.3 Polioses (Hemicelulosas)

Polioses são polissacarídeos presentes na madeira, intimamente associados à celulose e à lignina nos tecidos vegetais. Trata-se de uma mistura de polímeros de baixa massa molecular, cujo teor e proporção de seus diferentes componentes variam conforme a espécie de madeira e de árvore para árvore, afirmam Klock et al (2005). Os autores separam as polioses em grupos bem definidos:

- a) Glucouranoxilanas: componente majoritário encontradas nas madeiras de folhosas.
- b) Galactoglucomananas: podem ocorrer em proporções de até ~20% na madeira de coníferas.
- c) Glucomananas: formadas por unidades de manose e glucose. Juntamente com as galactoglucomananas são as principais polioses que ocorrem em madeira de coníferas.
- d) Arabinoglucouraxonilanas: estão presentes nas madeiras de coníferas, sendo considerado o polissacarídeo mais difícil de ser isolado puro, quantitativamente.
- e) Arabinogalactanas: são polioses extracelulares sintetizadas pelas células do raio do alburno que se transforma em cerne.

Há, ainda, outros polissacarídeos que podem ser importantes para a árvore viva, mas adquirem menor importância nas aplicações tecnológicas. O Quadro 2 apresenta as quantidades relativas das polioses em coníferas e folhosas.

Quadro 2 – Quantidade relativa das polioses em coníferas e folhosas

<b>Polioses</b>	<b>Folhosas</b>	<b>Coníferas</b>
Glucouranoxilana	Muito grande (20-35%)	Pequena (-)
Arabinoglucouraxilana	Traços (-)	Pequena a média (5~12%)
Glucomananas	Pequena (2~5%)	Grande (18~25%)
Galactoglucomanana	Muito pequena (1%)	Pequena a média (8~20%)
Arabinogalactana	Pequena (1~3%)	Muito pequena (1%)

Fonte: KLOCK et al (2005).

No Quadro 3 estão apresentadas as principais diferenças entre a celulose e as polioses.

Quadro 3 – Diferenças entre a celulose e polioses	
<b>Celulose</b>	<b>Polioses</b>
-Constituída por uma única unidade monomérica glucosídica.	-Constituída por várias unidades ligadas entre si, pentoses e hexoses.
-Grau de polimerização elevado.	-Grau de polimerização baixo.
-Forma fibras.	-Não forma fibras.
-Possui regiões cristalinas e amorfas em sua estrutura.	-Só possui regiões amorfas.
-É lentamente atacada por ácidos.	-Sofre ataque mais rápido por ácido.
-É insolúvel em álcali.	-É solúvel.

Fonte: KLOCK et al (2005).

#### 2.2.2.4 Lignina da Madeira

A lignina pode ser definida como um polímero aromático constituído de um sistema heterogêneo e ramificado sem nenhuma unidade repetidora definida. Possui um sistema amorfo e ligado quimicamente às polioses. As ligninas de madeiras de coníferas, folhosas e gramíneas possuem estruturas básicas muito diferentes entre si. Klock et al (2005), afirmam que “a lignina é o terceiro componente fundamental em importância da madeira, ocorrendo entre 15% e 35% do seu peso.”

Em contraste com a celulose, a lignina só ocorre em plantas vasculares, funcionando como um elemento de suporte para toda a árvore, concedendo à madeira propriedades de elasticidade e resistência. A lignificação é consequência do desenvolvimento do sistema de condução de soluções aquosas e suporte mecânico, reforçando as fibras celulósicas com um material capaz de absorver forças de compressão.

As ligninas são, portanto, constituintes da parede celular, de natureza polimérica e tridimensional, sendo que a sua estrutura química não é totalmente conhecida. Klock et al (2005) afirmam que na composição química elementar da lignina ocorrem exclusivamente os seguintes elementos: carbono, hidrogênio e oxigênio. Sendo que, a sua composição elementar percentual varia em coníferas e folhosas,

conforme pode ser visto no Quadro 4. Segundo os autores, o alto teor de carbono e uma indicação da natureza aromática da lignina.

Quadro 4 – Composição elementar percentual da lignina em coníferas e folhosas

<b>Elementos</b>	<b>Coníferas (%)</b>	<b>Folhosas (%)</b>
C	63 – 67	59 – 60
H	5 – 6	6 – 8
O	27 – 32	33 – 34

Fonte: KLOCK et al (2005)

As principais funções relacionadas à lignina são: o aumento de rigidez da parede celular, a união das células umas às outras, a redução da permeabilidade da parede celular à água e a proteção da madeira contra microorganismos – essencialmente fenólica, a lignina apresenta característica fungicida.

#### 2.2.2.5 Reações Químicas da Madeira

A madeira possui uma complexa estrutura química, responsável por sua considerável resistência à ação de solventes e de substâncias químicas que podem ter efeitos em alguns de seus componentes e não afetar seus demais constituintes.

A madeira, em temperatura ambiente, não é atacada por solventes neutros e água fria, que solubilizam apenas substâncias extrativas. A quantidade de substância extraída pela água aumenta com a elevação da temperatura. Conforme Klock et al (2005), esse fato decorre do aumento da acidez causada pela hidrólise dos grupos acetilas, formando ácido acético, quando o pH do extrato chega a 3,5 ~ 4,5. Na prática, o que ocorre é uma extração com ácido fraco, surgindo produtos de hidrólise de polissacarídeos e de lignina. Contrário ao que ocorre com a água fria, a quantidade de substâncias extraídas com a água a quente aumenta com o tempo de extração.

Os produtos químicos podem afetar a madeira de forma permanente, modificando suas paredes celulares e produzindo perdas na sua resistência mecânica. Segundo Loferski (2001), em geral, a madeira é resistente aos ácidos leves (pH acima de 3,0) em temperatura ambiente e é propensa à deterioração quando exposta a altas temperaturas (50°C) ou à ácidos com pH baixo (2 ou menos). Já as soluções básicas, ao reagirem com a hemicelulose, dissolvem a lignina, surgindo, como

consequência, manchas esbranquiçadas na madeira. O contato direto da madeira com soluções básicas fortes (pH 9,0 ou superior) pode acarretar, ainda, uma severa redução de massa e de resistência da peça estrutural. O autor cita, também, que um dos problemas associados com a exposição da madeira a substâncias químicas é a presença de conectores metálicos, pois os produtos químicos, ao reagirem com os metais, podem comprometer a sua integridade e, conseqüentemente, a integridade da estrutura. O sal pode ser citado, neste caso, como um produto químico capaz de reduzir a seção transversal de um elemento metálico sem, para isso, atacar a madeira.

#### 2.2.2.6 Extrativos da Madeira

Considerados como componentes acidentais, os extrativos não são integrantes da parte estrutural da parede celular. Facilmente solúveis em água, solventes orgânicos neutros ou volatilizados a vapor, os extrativos são frequentemente responsáveis por características da madeira como, por exemplo, a cor, o cheiro, a resistência natural ao apodrecimento, o gosto e propriedades abrasivas. Encontrados sob uma ampla diversidade de compostos, os extrativos apresentam proporções muito diferentes em algumas espécies ou gêneros. Desta forma, algumas madeiras podem ser caracterizadas pela natureza e quantidade de seus extrativos. Os componentes voláteis da madeira, por exemplo, estão presentes em grande quantidade nas gimnospermas, mas podem ser negligenciados nas angiospermas.

Os extrativos podem conter um grande número de compostos fenólicos, que se concentram principalmente no cerne da madeira, apresentando propriedades fungicidas e protegendo a madeira contra a biodeterioração. Grande parcela dessas substâncias são alcoóis, aldeídos, cetonas e ácidos, os quais ocorrem livres ou são produzidos na hidrólise da madeira.

#### 2.2.2.7 Compostos Inorgânicos

O crescimento das plantas exige um número de constituintes minerais que compreendem principalmente potássio e cálcio. Esses elementos constituem até 50% dos cátions na cinza da madeira. Mas

podem ser encontrados, também, magnésio, manganês, sódio, fósforo e cloro, além da sílica no caso de florestas tropicais. Os anions mais comuns são os carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos, conforme afirmam Klock et al (2005).

Nguyen et al (2008) define a acidez da madeira como sendo:  $7 - \text{pH}$ , onde o pH é a acidez da água livre em contato com a madeira. Ao introduzir esse novo conceito, os autores afirmam que o pH da água livre em contato com a madeira pode ser facilmente medido, embora possa apresentar uma grande variabilidade mesmo numa única peça de madeira, mas não descrevem o método utilizado para tal mensuração.

Sabe-se que o pH (concentração hidrogeniônica) é uma característica que somente pode ser mensurada através de um meio líquido. Considerando que a madeira é um sólido, com a presença de líquido no interior de suas fibras, surgem duas possibilidades: quando se menciona o Ph de uma madeira, está se referindo ao pH desse líquido, cuja verificação é trabalhosa, ou a um valor obtido do pH de uma mistura da madeira devidamente triturada com água com o pH neutro, cujo valor é 7. Se a primeira opção é a correta, há de se considerar que o valor do pH poderá variar em função do próprio teor de umidade da madeira no momento da avaliação. Então esse valor deveria ser identificado logo após a citação do pH. Se a resposta correta for a segunda opção, ao misturar-se água ao sólido, dever-se-ia indicar qual a proporção, em massa, da água que foi utilizada. Como pode se verificar então, o valor do pH não é um valor preciso ou de fácil obtenção.

Este fato, aliado à influência de outros componentes químicos presentes na madeira capazes de influenciar o processo corrosivo, fez com se optasse pela utilização de valores de pH encontrados na literatura. Ainda assim, salienta-se que apesar de várias buscas, não foi identificado um laboratório que pudesse fazer esta avaliação.

#### 2.2.2.8 Problemas da Análise

A análise química da madeira pode ser definida como sendo a determinação da composição da madeira, bem como a extração, purificação e caracterização de seus constituintes. Por ser um material natural, a madeira requer procedimentos próprio na sua análise, e também das substâncias a ela relacionadas. Esses procedimentos diferem dos métodos clássicos da química analítica, não são completamente normalizados e podem diferenciar no que se refere a

precisão requerida e no objetivo especial da análise. Exemplo disso é a distinção que pode ser feita entre métodos utilizados na pesquisa científica e aqueles aplicados na produção industrial e no controle de produtos derivados, como a polpa celulósica. Klock et al (2005), afirmam que a principal dificuldade na análise geral da madeira não é o número de componentes, os quais são muito diferentes na sua composição química e comportamento, mas antes no fato de que as macromoléculas da parede celular se encontram numa associação ultraestrutural e química muito íntima. Sendo assim, no que se refere à interação metal/madeira, com uma literatura escassa sobre o tema, o papel dos extrativos permanece controverso.

### **2.2.3 Mecanismos e Causas de Degradação da Madeira**

A durabilidade da ligação entre a madeira e o metal pode influenciar significativamente a durabilidade da estrutura como um todo. Segundo a maioria dos autores, o fator mais importante na determinação da incidência de corrosão é a umidade. Para autores como Suchsland & Woodson (1991) e Giovanella [2000?], a água em excesso pode afetar a acidez da madeira, a partir da quebra da celulose e sua transformação em ácido acético (etanóico). Considera-se, portanto, que o teor de umidade, abaixo do qual o risco de corrosão do metal incorporado na madeira diminui significativamente, é o mesmo que o limite de segurança para a ação de fungos apodrecedores na madeira. Teores maiores podem afetar a acidez da madeira, devido à quebra da celulose e conseqüente transformação em ácido acético (etanóico), através de processos naturais de envelhecimento. Nesse sentido, nenhuma espécie de madeira pode ser considerada como inócua, mas algumas delas são consideradas mais agressivas do que as outras. Klock et al (2005) afirmam que o aumento da acidez é causado pela hidrólise dos grupos acetilas, formando ácido acético, responsável por provocar alterações no pH do extrato, que pode chegar a valores entre 3,5 ~ 4,5.

O ácido acético é volátil e, em locais mal ventilados, pode causar corrosão inclusive em locais distantes das principais zonas úmidas. Quaisquer sais solúveis tendem a aumentar a condutividade da umidade na madeira e, conseqüentemente, o seu potencial de corrosão. A madeira contém, naturalmente, diferentes níveis de sais minerais como o sulfato e o cloreto, podendo aumentar o risco de corrosão do ácido acético.

De maneira geral, a probabilidade de corrosão de elementos metálicos na madeira pode ser influenciada por outros fatores além daqueles supracitados, tais como a água de precipitação e de condensação na superfície, os ciclos curtos de umidificação e secagem, expansão e retração, que tendem a gerar fissuras que permitem o ingresso de umidade na madeira.

Os produtos da corrosão de elementos metálicos podem estimular o desenvolvimento de fungos xilófagos através da liberação de nutrientes ou da alteração do pH da madeira. A hidrólise alcalina e a oxidação da madeira podem tornar a zona circundante dos elementos metálicos, macia e absorvente, fazendo com que a umidade retida seja absorvida mais facilmente.

Sempre que a estrutura de madeira estiver exposta a nevoa salina, o teor de cloretos, assim como os riscos de corrosão, pode ser significativamente aumentado.

A acidez própria da madeira varia de acordo com a sua espécie e porção do tronco (cerne e albúrnio possuem pH diferenciados). Embora o pH seja um fator importante, a presença de outros componentes, como fenóis aromáticos da madeira e a sua permeabilidade à umidade são igualmente relevantes na determinação do efeito corrosivo em elementos metálicos.

A grande maioria dos elementos de fixação é fabricada em aço carbono. Mas o aço inoxidável, o cobre e o ferro fundido também são utilizados. Embora possam ser utilizados sem nenhum tipo de revestimento, a maior parte desses elementos requer algum tipo de revestimento protetor, principalmente quando a durabilidade da estrutura é um fator importante a ser considerado.

#### **2.2.4 O Efeito de Taninos e do pH na Corrosão do Aço Embutido na Madeira**

Taninos e pH são citados como fatores que afetam a corrosividade da madeira, mas ainda há poucos dados para confirmar tais conclusões. Ou seja, com uma literatura escassa sobre o tema, o papel dos extrativos permanece controverso.

Conforme relatado por Zelinka e Stone (2010), uma única amostra de madeira pode conter mais de 700 extrativos diferentes. Dentre eles, os autores apontam três extrativos capazes de afetar a

corrosão de metais em contato com a madeira, são eles: pequenos ácidos orgânicos (acético e fórmico), taninos (ou polifenóis) e fenóis com dois ou três grupos de hidroxilas (por exemplo, catecol e pirogalol). Segundo os autores, diversas pesquisas na área têm demonstrado correlações entre a acidez da madeira e a sua corrosividade. Sendo que o pH do extrato da madeira é, em grande parte, controlado pela formação de ácido acético e fórmico. Bartel-Kornacka (1967), encontraram diferenças na corrosão entre espécies com o mesmo pH. Arni et al (1965), ao removerem todos os ácidos voláteis e fenólicos da madeira, chegaram a conclusão de que a madeira não foi corrosiva para o aço carbono.

Os taninos também são frequentemente mencionados na literatura como compostos que afetam a corrosão da madeira. Winkelmann et al (2009), apud Zelinka e Stone (2010) afirmam que os taninos tendem a acelerar o processo de corrosão, diminuindo o pH e formando complexos com o ferro que não aderem à superfície. Outras pesquisas, no entanto, apontam os taninos como inibidores de corrosão e, portanto, o efeito dos taninos sobre a corrosão de metais em madeira permanece incerto.

O catecol e o piragol têm sido estudados em pesquisas de papel e celulose e, segundo pesquisas na área, são quimicamente semelhantes aos taninos, interagindo com outros componentes do extrativo da madeira para aumentar a corrosão. (ZELINKA e STONE, 2010)

Buscando encontrar uma correlação entre seus efeitos, Zelinka e Stone (2010) investigaram sistematicamente os efeitos do pH e do teor de taninos em extrativos de quatro espécies de madeira. A madeira de *Quercus spp* foi selecionada por ser considerada muito ácida e rica em taninos. A madeira de *Ulmus sp.* foi selecionada por ser pobre em extrativos e pouco ácida. A madeira de *Robinia pseudoacacia* foi escolhida por ser uma das espécies com maior durabilidade natural. E a madeira de *Pinus spp* foi escolhida devido à existência de pesquisas anteriores utilizando essa espécie, relatada como uma madeira bastante agressiva. Em seguida, foram confeccionados extratos sintéticos que permitiram o isolamento das variáveis estudadas para fins comparativos. Esses extratos foram feitos por adição de ácido tânico à água destilada, sendo, o pH, ajustado pela adição de hidróxido de sódio.

A Tabela 1 apresenta a acidez, teor de taninos e a taxa de corrosão das soluções testadas.

Tabela 1 – Acidez, teor de taninos e taxa de corrosão das soluções testadas.

		pH	Taninos (mg/L)*	Taxa de Corrosão do aço ( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	
				Média	Desvio Padrão
Extrato	<i>Quercus spp</i>	4,3	1020	279	10
	<i>Pinus spp</i>	4,5	340	334	26
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	5,1	990	74	24
	<i>Ulmus sp.</i>	6,5	40	159	33
Extrato Sintético	<i>Quercus spp</i>	4,3	1000	49	2
	<i>Pinus spp</i>	4.5	350	31	3
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	5.1	1000	27	1
	<i>Ulmus sp.</i>	6.5	40	33	4
Extrato Modificado **	<i>Pinus spp</i>	4.2	1000	285	24
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	4.3	990	198	24

\* Valores expressos em equivalência com o ácido tânico.

\*\* O extrato modificado de *Pinus spp.* foi feito pela adição de ácido tânico até a concentração total de 1000 mg / L. O extrato de *Robinia pseudoacacia* modificado foi feito pela adição de ácido acético até atingir-se o pH de 4,3.

Como demonstrado na Tabela 1, o valor do pH encontrado para a madeira *Pinus spp.* e *Quercus spp.* foram semelhantes e as concentrações de taninos foram praticamente iguais para a madeira de *Robinia pseudoacacia* e de *Quercus spp.* Isso permitiu que fosse realizado um exame limitado ao efeito do pH e de taninos individualmente, mantendo a outra variável constante. As taxas de corrosão nos extratos sintéticos de madeira foram muito menores que nos extratos originais, apresentando diferentes respostas as mudanças no pH e taninos.

Segundo os autores da pesquisa, foi possível observar algumas tendência gerais, tais como: ao manter-se constante o valor do pH do extrato de *Pinus spp.* e *Quercus spp.*, observa-se que o aumento de taninos reduz a taxa de corrosão do aço, ou seja, os taninos atuam como inibidores. Já o extrato de *Pinus spp.* modificado e o extrato de *Quercus*

*spp.*, ambos com a mesma concentração de taninos, apresentam a mesma taxa de corrosão. Fato considerado notável tendo-se em vista a complexidade da química da madeira. Outra tendência observada foi aquela do efeito do pH na concentração de taninos, que pode ser observada ao comparar-se os extratos de *Robinia pseudoacacia* e *Quercus spp.* O extrato de *Quercus spp.*, com o pH mais baixo, apresentava maior taxa de corrosão. Ao adicionar-se ácido acético ao extrato de *Robinia pseudoacacia*, até que atingisse o pH do *Quercus spp.*, a taxa de corrosão aumentou pouco. Ou seja, apesar de ambos os extratos apresentarem o mesmo pH e concentração de taninos, o extrato de *Robinia pseudoacacia* não apresentou a mesma corrosividade do *Quercus spp.* Isto sugere que a madeira de *Robinia pseudoacacia* pode conter um ou mais composto que atuam como inibidores de corrosão e que não estão presentes no *Quercus spp.* ou *Pinus spp.*

### 2.3 OS METAIS

Uma parte considerável do ferro produzido nas siderúrgicas é perdida ao longo do tempo, porque o ferro, em determinadas condições, sofre corrosão. A ferrugem é constituída, entre outras substâncias, por óxido de ferro. Outros metais, como alumínio e zinco, também interagem com o oxigênio do ar. No entanto, os óxidos e outros materiais formados nesse processo, recobrem a superfície desses metais, impedindo que a corrosão se estenda.

Há, ainda, metais como o ouro e a platina, que não apresentam sinais de transformação, mesmo quando expostos ao ar e à umidade por longo período. Isso pode ser explicado pelo fato de esses metais serem encontrados na natureza como substâncias simples. (Interações e Transformações: Química, 2000, p.155)

As transformações químicas, nas quais se inclui a produção de metais como o ferro e de ligas metálicas como o bronze, só se tornaram possíveis com a energia calorífica do fogo. Existem evidências de que os metais já eram trabalhados pelo homem por volta de 5000 a.C. A Figura 10, uma ilustração egípcia de 1900a.C., mostra diversas etapas do trabalho com o ouro. A própria evolução da metalurgia é repleta de inovações técnicas que marcaram as grandes eras da evolução humana, como a idade do ouro, a idade do bronze e a idade do ferro que chega aos dias atuais. (Interações e Transformações: Química, 2000, p.193-194)



Figura 10 – Ilustração egípcia de 1900a.C. - As diversas etapas do trabalho com o ouro. Fonte: Interações e Transformações: Química, 2000, p.194

A metalurgia pré-industrial se mostra, até o século XIX, como prática empírica eficaz, mas feita sem o conhecimento profundo da matéria. Mohen (1991), p.29, apud Carrasco (2009), relata que apenas em 1722, Réaumur é o primeiro a discutir as propriedades do ferro em termos de estrutura metálica e a nomear cada pequena partícula da matéria de molécula. A tabela dos trinta primeiros elementos químicos conhecidos é apresentada, em 1786, por A. L. de Lavoisier em nome de um grupo de pesquisadores e industriais, na Academia de Ciências de Paris, o que marca o nascimento da Química Moderna. Essa tabela, apenas terá uma visão de conjunto com a apresentação, em 1869, da tabela periódica pelo russo Mendéleiev. Ainda segundo Mohen (1991), p.29, apud Carrasco (2009), do ponto de vista da física, o alemão Achard publica em 1788, em Berlim, os resultados das pesquisas sobre as propriedades dos metais, feitas a partir de 900 ligas. Mas foi preciso esperar por mais de meio século para que as estruturas cristalinas fossem conhecidas.

### 2.3.1 O Aço

O aço é uma liga composta, essencialmente, de ferro e pequenas quantidades de carbono, cujas proporções variam entre 0,002% e 2,0%. Após a retirada do ferro-gusa líquido do alto-forno, ele passa por uma estação de dessulfurização para redução da quantidade de enxofre e dosagem química de sua composição. Em seguida, é encaminhado até a

aciaria para de ser transformado em aço através do processo de refino. O objetivo desse processo é baixar a quantidade de elementos indesejáveis (excesso de carbono, silício e fósforo). Quando o aço atinge a composição desejada é vazado para fôrmas onde se solidifica na forma de blocos chamados lingotes. (MOHEN, 1991, p.19)

Os metais ferrosos, utilizados em larga escala na construção civil, embora possuam a desvantagem de serem suscetíveis à corrosão, são detentores de uma grande versatilidade, no sentido de se adaptarem a uma ampla variedade de propriedades mecânicas e físicas. O aço é, atualmente, a mais importante liga metálica existente, sendo empregado de forma intensiva em numerosas aplicações. Ele pode conter concentrações apreciáveis de outros elementos sendo, as suas propriedades mecânicas, sensíveis ao teor de carbono.

#### 2.3.1.1 Aços Estruturais mais Comuns

Os aços estruturais são assim denominados por apresentarem resistência, ductibilidade e outras propriedades mecânicas tais que o tornam adequados para suportar cargas. Podem ser classificados em três grupos com suas respectivas tensões mínimas de escoamento (adaptado de Pfeil & Pfeil, 2009):

- a) Aços carbono: 195 a 260 MPa;
- b) Aços de alta resistência e baixa liga: 290 a 345 MPa;
- c) Aços liga para construção, tratados termicamente: 630 a 700 MPa.

#### 2.3.1.2 Aços-Carbono

Com o refinamento do ferro gusa, rico em carbono, é obtido o aço em sua forma mais simples, com menos de 2% de carbono. A presença do carbono modifica as características do aço e define, de maneira geral, uma classificação dividida em três categorias, conforme o Quadro 5.

Quadro 5 – Classificação dos aços quanto ao teor de carbono

<b>Classificação</b>	<b>Teor de Carbono</b>
Baixo carbono	$\leq 0,30\%$
Moderado	$0,30 < \text{teor de carbono} > 0,50\%$
Alto carbono	$\geq 0,50\%$

Embora a resistência do aço aumente com a elevação das taxas de carbono na liga, o aço torna-se mais suscetível à fragilização e aos efeitos de tratamento térmico.

Além de ferro e carbono, esses aços podem conter pequenas quantidades de manganês, enxofre, fósforo, alumínio e silício. De acordo com a Norma NBR6215:2011 Produtos Siderúrgicos – Terminologia, o aço carbono pode possuir elementos de liga em teores residuais máximos de Cr =0,20%, Ni =0,25%, Al 0,10%, B = 0,0030%, Cu = 0,35%.

### 2.3.1.3 Aços Liga

A Norma NBR6215:2011 Produtos Siderúrgicos – Terminologia, define o aço liga como sendo um aço que contém elementos de liga, adicionados com a finalidade de conferir-lhe as propriedades desejadas, em teores superiores àqueles estabelecidos para o aço carbono.

### 2.3.1.4 Aço Inoxidável

Aço inoxidável é uma liga de ferro-cromo-carbono com teor mínimo de 10,5% de cromo em massa, cuja característica predominante é a elevada resistência à corrosão. Pode conter outros elementos adicionais, com o objetivo de adequar o aço à aplicação, conferindo-lhe propriedades e características específicas.

### 2.3.2 Galvanização

A NBR7414:2009 define galvanização como sendo uma aplicação de revestimento de zinco, visando proteger materiais metálicos da corrosão.

Quanto à resistência à corrosão, os revestimentos metálicos podem ser divididos em duas categorias: revestimentos nobres como, por exemplo, o níquel e a prata e revestimentos de sacrifício, como o zinco e o cádmio. Os revestimentos de zinco são ditos galvanizados.

Ao contrário do que acontece no caso dos revestimentos nobres, nos revestimentos de sacrifício o metal base é catodicamente protegido e, enquanto o revestimento estiver em contato elétrico com o substrato, a corrosão do aço não ocorrerá. A Figura 11 ilustra este comportamento.

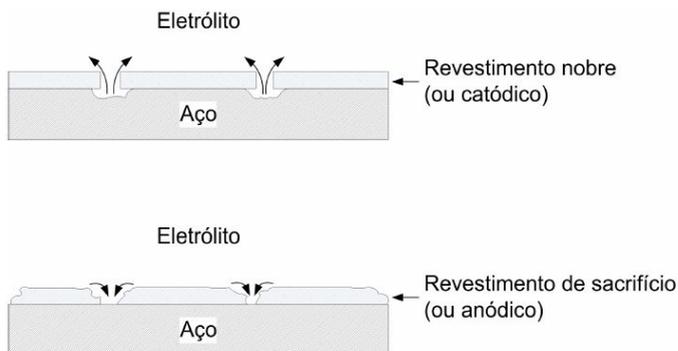


Figura 11 – Esquema do fluxo de corrente nos defeitos de revestimento nobres e revestimentos de sacrifício.

Fonte: PANNONI [19--].

O processo de galvanização resulta na formação de uma barreira isolante das superfícies internas e externas do aço do meio ambiente. O zinco, ao reagir com o oxigênio e o gás carbônico da atmosfera, forma uma camada protetora de óxidos e carbonatos básicos de zinco, reduzindo a progressão da corrosão ao longo do tempo. Dentre os processos de fabricação mais comuns estão: a galvanização por imersão em banho de zinco quente e a eletrodeposição. Em menor extensão, revestimentos metálicos podem ser aplicados por outros métodos, como a metalização por projeção térmica.

Como protetor do aço, o zinco pode reduzir a velocidade de corrosão, conferir proteção catódica (corroer-se preferencialmente ao

aço) e gerar produtos volumosos de corrosão para suprir defeitos. Apesar de ocorrer a velocidades relativamente baixas, a corrosão do zinco dificilmente é inibida. Os diferentes tipos de revestimentos em zinco variam em espessura e, portanto, em expectativa de vida útil. Sendo assim, a aplicação de revestimentos de zinco no aço deve ser considerada como um meio temporário de proteção do metal subjacente contra a corrosão.

Também chamada de galvanização a fogo, a galvanização por imersão a quente, segundo a NBR7414:2009, é um processo de galvanização em que o revestimento de zinco é aplicado mediante imersão do produto, previamente preparado, em banho de zinco fundido.

Na galvanização a quente não é possível se estabelecer uma demarcação clara entre o aço e o zinco, mas sim uma transição gradual através de uma série de camadas de liga. A Figura 12 ilustra, esquematicamente, a composição do revestimento.

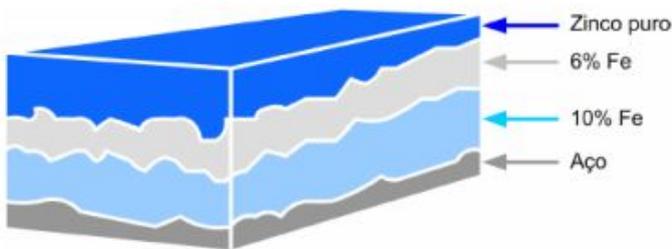


Figura 12 – Seção esquemática de um revestimento galvanizado típico, mostrando as camadas de intermetálicos.

Fonte: PANNONI, [19--]

### 2.3.3 Corrosão: Conceitos e Formas

O termo corrosão tem origem no latim “*corrodere*” que significa destruir gradativamente. (MELLO, 2008, p.19). Gentil (2003), apud Mello (2008) define a corrosão como sendo:

a deterioração de um material, geralmente metálico, se dá por ação química ou eletroquímica do meio em que interage, aliada, ou não, a esforços mecânicos. A corrosão está relacionada

com a oxidação de um metal para a formação de um composto mais estável termodinamicamente nas condições a que está submetido. A deterioração representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais.

Quando de natureza eletroquímica, a corrosão é um fenômeno análogo àquele que se dá nas pilhas, em que dois metais em contato elétrico e inseridos num meio condutor iônico (eletrólito), criam uma diferença de potencial elétrico, gerando um fluxo de corrente elétrica com a transferência de elétrons de um metal para o outro. A maior parte dos processos de corrosão ocorre tendo como conexão iônica a água (condensação de umidade do ar, chuva ou água do mar). O metal que libera os elétrons (o ânodo) sofre corrosão, ocasionando a oxidação de seus átomos que se transferem para o eletrólito na forma de íons metálicos (reação anódica). Esses íons são consumidos nas reações catódicas que ocorrem no outro metal (o cátodo), que não se corrói. Este fenômeno pode ser decorrente da existência de dois metais diferentes que estejam em contato ou pode ocorrer no mesmo metal. No primeiro caso, o metal menos nobre sofre corrosão acelerada na zona de contato (corrosão bimetálica) e, no segundo caso, a corrosão resulta da existência de heterogeneidades da microestrutura do próprio metal ou, ainda, quando há zonas em contato simultâneo com meios de diferentes características (pH, umidade, temperatura, teor de oxigênio, entre outros).

Como exemplo, cita-se a corrosão por arejamento diferencial, onde a zona da superfície do metal com menor acesso ao oxigênio adquire caráter anódico, enquanto que na zona com maior acesso do oxigênio, zona de caráter catódico, ocorre a reação de redução do oxigênio, deixando o metal intacto. Situação típica de fendas, recantos, depósitos ou junto à água. (FONTINHA, 2009)

Segundo Carrasco (2009), as principais causas da corrosão dos artefatos metálicos estão vinculadas às condições ambientais, tais como o oxigênio do ar, a água ou a umidade. O mecanismo que desencadeia a corrosão é acelerado pelo calor e pela presença de poluentes atmosféricos tais como o dióxido de enxofre, o dióxido de carbono e, também, a presença de sais, sendo o mais agressivo os sais de cloreto. Teores elevados de cloretos podem atingir a ordem dos 1000 a 2000 mg/m<sup>2</sup>/dia junto ao mar. Estima-se que mesmo em pontos mais

afastados, devido à ação dos ventos, esse índice possa chegar aos 200 mg/m<sup>2</sup>/dia. (FONTINHA, 2009)

Quando o metal é exposto a essas condições, ele tende a se transformar em óxidos, ou seja, retorna ao seu estado de origem. (CARRASCO, 2009, p.46)

Segundo Ferreira [2000?], a corrosão metálica é um processo espontâneo que resulta sempre na liberação de energia como, por exemplo, a exposição do aço a uma atmosfera poluída. Fornecendo-se energia ao sistema metal/meio, no entanto, pode-se obter uma corrosão forçada, como é o caso dos processos de eletrodeposição. Segundo a autora, se os produtos da corrosão forem solúveis no meio ou não compactos e não aderentes ao metal, a corrosão continuará indefinidamente. Ao contrário, se os produtos da corrosão formarem uma camada compacta, uniforme e aderente ao metal, a velocidade de reação deve decrescer a valores muito baixos. A autora cita, ainda, quatro formas de combate à corrosão no caso em que se tem deterioração do metal, sendo elas: substituir o metal (ou liga) por outro que não reaja com o meio, ou que reaja com uma velocidade desprezível; modificar o meio, a partir do controle de pH, gases dissolvidos e adição de inibidores; interpor uma barreira entre o metal e o meio; e fornecer energia através de proteção catódica ou anódica.

A corrosão pode provocar deteriorações em algumas propriedades dos metais, conforme explica Ferreira [2000?]:

- a) Resistência mecânica: a resistência à tração é reduzida na proporção da maior área corroída das seções perpendiculares aos esforços aplicados. Isso se deve ao fato de os produtos da corrosão não possuírem resistência mecânica apreciável.
- b) Condutividade térmica e elétrica: os produtos da corrosão são maus condutores de calor e corrente elétrica, o que reduz as condutividades.

Enquanto processo destrutivo, a corrosão causa danos a diversos setores da atividade humana, incluindo danos irreversíveis ao meio ambiente e ao homem. Sendo assim, o processo de corrosão adquire grande importância do ponto de vista tecnológico e social, tornando-se objeto de muitos estudos. Estima-se que cerca de 3,5% do PNB dos países são desperdiçados devido a problemas de corrosão. (FERREIRA, 2000?)

São muitas as condições microscópicas que contribuem para o desenvolvimento de áreas anódicas e áreas catódicas na superfície de um mesmo metal. As irregularidades microscópicas são formadas devido à presença de impurezas no metal e podem estar presentes em ligas com

duas ou mais fases, no caso de uma fase ser mais anódica do que as outras, ou elas podem estar em áreas que sofreram mais distorções e fadiga quando o metal foi trabalhado. Pregos, por exemplo, enferrujam mais rápido nas cabeças e nas pontas do que nas superfícies cilíndricas pela tensão introduzida no metal durante a fabricação. (FERREIRA, 2000?)

A velocidade com que se processa a corrosão é dada pela taxa de corrosão, que pode ser representada pela perda de massa por unidade de área na unidade de tempo. A velocidade de corrosão pode ser afetada, pelos seguintes fatores, entre outros fatores levantados por Mello, (2008):

- a) aeração do meio corrosivo: a velocidade de corrosão aumenta com o acréscimo da taxa de oxigênio dissolvido (oxigênio funciona como controlador do processo corrosivo);
- b) pH do eletrólito: a taxa de corrosão normalmente aumenta com a diminuição do pH;
- c) temperatura: o aumento da temperatura, geralmente, acelera as reações químicas;
- d) efeito de sais dissolvidos: os sais podem acelerar (ação despolarizante, aumento da condutividade) ou retardar (precipitação de produtos de corrosão, ação inibidora ou passivadora) a velocidade de corrosão.

Segundo o autor, o método da perda de massa é válido apenas para corrosão uniforme.

### **2.3.4 Tipos de corrosão**

Quando submetido a um ambiente corrosivo, o metal pode apresentar três tipos de comportamento: imune, ativo ou passivo. Os metais nobres, como o ouro e a platina, são imunes à corrosão nos mais diversos meios. Ao reagir com o ambiente, o metal é considerado em estado ativo, podendo haver a formação de produtos de corrosão solúveis o bastante para se soltar da superfície do metal. Ao deixarem a superfície do metal, ele segue o seu processo de reação, formando sucessivas camadas de oxidação que ocasionarão perdas substanciais do material. No caso do metal encontrar-se em estado passivo, significa que ele já reagiu com o meio ambiente ao qual está inserido, resultando na formação de produtos de corrosão relativamente insolúveis, que formam um filme aderente sobre a superfície do metal, diminuindo a sua

suscetibilidade de corrosão. Na seqüência são descritas as formas de corrosão cujas definições foram baseadas em Carrasco (2009).

#### 2.3.4.1 Corrosão Uniforme

A corrosão uniforme consiste no ataque de toda a superfície metálica em contato com o meio corrosivo, tendo como consequência uma perda uniforme de espessura. Trata-se de um tipo de corrosão importante, podendo levar a falhas significativas, limitadoras da vida útil do elemento metálico. Exemplos bastante comuns são os filmes escurecidos que se formam sobre objetos de ligas de prata e a camada de ferrugem formada sobre o ferro ou ligas de ferro ao ar livre. (OLIVEIRA, 2006; SELWYN, 2004 apud CARRASCO, 2009, p.48-50).

Segundo Mello (2008), a corrosão uniforme é comum em metais que não formam películas protetoras como resultado do ataque.

#### 2.3.4.2 Corrosão por placas

Mello (2008), afirma que a corrosão por placas é comum em metais que formam película inicialmente protetora, mas que, ao se tornarem espessas, podem fraturar e perder sua aderência, expondo o metal a novo ataque. Ou seja, os produtos de corrosão formam-se em placas que se desprendem progressivamente.

### 2.3.5 Biodeterioração

Os metais são materiais inorgânicos que, a exemplo de outros materiais, podem ser deteriorados por agentes biológicos. A poluição atmosférica, a vegetação e as camadas superficiais como ceras e resinas, podem favorecer o desenvolvimento de microorganismos capazes de afetar os metais, já que a presença de matéria orgânica na superfície desse tipo de substrato inorgânico é muito comum. Segundo Caneva et al (1991), apud Carrasco (2009), a corrosão provocada por agentes microbiológicos pode ocorrer por meio de diferentes fatores como, por

exemplo, pela liberação de produtos metabólicos dos microorganismos que produzem ácidos capazes de corroer os metais; pela formação de áreas com aeração diferencial, porque a concentração de oxigênio no centro de uma colônia é baixa (área anódica) e nas bordas é alta (área catódica), conforme está ilustrado na Figura 13, e pelo rompimento da camada de proteção, quando os microorganismos se alimentam de substâncias como os vernizes, as ceras e, até mesmo, dos produtos de corrosão, interrompendo o filme formado e facilitando a ação de radicais livres presentes no ambiente.

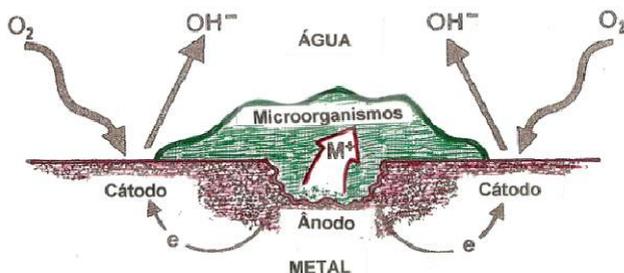


Figura 13 – Corrosão do metal por microorganismos, devido à formação de aeração diferencial em meio aquoso.

Fonte: Caneva et al (1991), apud Carrasco (2009)

### 2.3.6 Comportamento do Aço Carbono à Corrosão

A não uniformidade microscópica da superfície do aço carbono dá origem ao aparecimento de uma grande quantidade de pequenos pontos com diferentes potenciais eletroquímicos. (MELLO, 2008)

Na Figura 14, observa-se um esquema simplificado das principais reações anódicas e catódicas em um processo de corrosão, em que não há a ação de contaminantes atmosféricos:

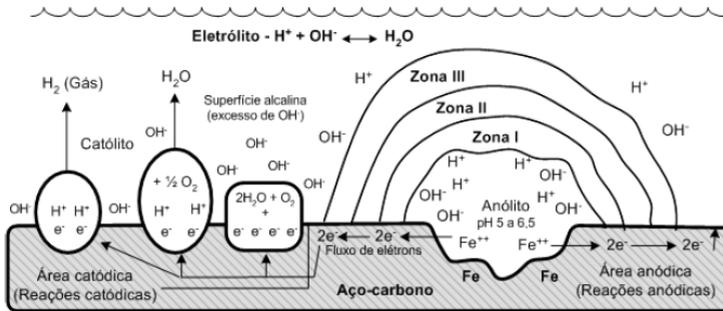


Figura 14 – Esquema representando as principais reações anódicas e catódicas de uma célula de corrosão.

Fonte: SICA, 2006

Uma célula de corrosão é formada de quatro elementos essenciais: o ânodo, o cátodo, o eletrólito e o circuito externo, conforme descritos por Sica (2006), p.12-15:

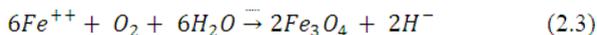
O *ânodo* ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$ ) é a área onde ocorre a ionização do metal (oxidação), isto é, o átomo metálico (Fe) deixa o metal para formar íons ferro ( $\text{Fe}^{++}$ ) na solução (eletrólito) liberando dois elétrons. Esta é a primeira reação anódica que ocorre no anólito (solução adjacente ao ânodo).

Na *Zona I*, que compreende a área anódica limite do ferro com a solução, os íons ferro reagem com íons hidróxidos para formar o hidróxido de ferro,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , conforme reação expressa em (6).



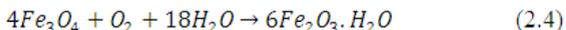
Esta reação é importante, pois remove o íon ferro da solução e gera o hidróxido de ferro solúvel. Isto altera o equilíbrio na célula de corrosão e permite que mais ferro se ionize passando assim para o eletrólito. O hidróxido de ferro é um precipitado branco transitório, que se forma na superfície do metal corroído.

Na *Zona II*, ocorre a formação do óxido de ferro magnético ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), de coloração preta, conforme reação expressa em (2.3).



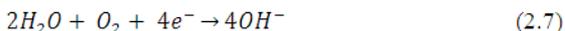
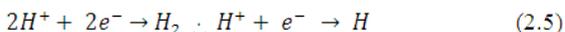
Para formação de tal óxido os íons ferro reagem com oxigênio e água, liberando íons hidrogênio. O hidróxido de ferro da Zona I pode reagir com oxigênio adicional para formar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ou com qualquer íon carbonato disponível no anólito para formar carbonato ferroso. A última reação

anódica ocorre na *Zona III*, onde o  $Fe_3O_4$  reage diretamente com o oxigênio para dar origem a conhecida “ferrugem”, que é a formação do óxido de ferro hidratado ( $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ) de coloração característica amarelo-avermelhada, conforme representado pela reação (2.4).



Os íons negativos no eletrólito, como carbonatos, cloretos, sulfatos e hidroxilas, são atraídos para a área anódica por causa dos íons ferro positivos disponíveis neste ponto. Como as hidroxilas reagem com os íons ferro para formar hidróxidos de ferro, um excesso de íons hidrogênio permanece na solução, criando uma condição levemente ácida. (VERGÉS, 2005, apud SICA, 2006, p.14)

O *cátodo* ( $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ ) é a região onde se tem a recepção de elétrons pelos íons ou moléculas existentes na solução através do cátodo, que é o eletrólito adjacente ao cátodo em uma célula de corrosão. As reações catódicas são extremamente importantes para determinação da taxa de corrosão e/ou cinética do processo corrosivo, pois estas administram a velocidade da reação anódica em que é dissociado o ferro metálico. A reação que ocorre no cátodo é a de neutralização dos elétrons que são gerados quando o ferro passa a solução, estes elétrons podem ser neutralizados por uma das três reações catódicas apresentadas a seguir:



A equação (2.5) demonstra o primeiro passo no processo corrosivo do ferro, a neutralização dos íons hidrogênio com elétrons para formar hidrogênio gasoso.

A segunda reação demonstrada na equação (2.6), também remove hidrogênio da superfície metálica da área catódica, este é o hidrogênio atômico com oxigênio formando água.

Na terceira e última reação catódica, equação (2.7), o oxigênio reage com a água e elétrons para formar hidroxilas. Que por serem fortemente alcalinas, elevam o pH da área catódica do metal (cátodo), e por consequência, qualquer revestimento sobre o metal, deverá ser fortemente resistente aos álcalis ou tenderá a saponificação e degradação.

O *circuito externo* pode ser áreas superficiais do mesmo metal, ou dois metais diferentes que possuem um meio

condutor. No exemplo citado, o aço carbono é o condutor externo, em que os elétrons deixados no metal devido à reação de dissolução movem-se para área catódica para serem consumidos por outra reação superficial.

Pesquisadores como Melchers e Jeffrey (2005) e Resende et al. [2010?] observaram em ensaios realizados, que a taxa de corrosão inicial do aço carbono é muito elevada. Conforme citado por Resende [2010?] o período inicial de elevada taxa de corrosão é seguido por um declínio constante dessa mesma taxa. Estudos realizados por Melchers e Jeffrey (2005) corroboram esse resultado e acrescentam que a velocidade de corrosão do aço carbono nos primeiros dias de ensaio, além de ser muito alta, não apresenta um comportamento linear até a formação de produtos da corrosão. Informações mais completas sobre as pesquisas citadas podem ser obtidas no texto original.

### 2.3.7 Comportamento do Aço Galvanizado à Corrosão

A Figura 15 representa esquematicamente o mecanismo de corrosão atmosférica do zinco.



Figura 15 – Produtos de corrosão formados sobre o zinco durante a exposição à atmosfera. Fonte: Pannoni [19--]

Conforme descrito por Pannoni [19--], em atmosferas úmidas, o zinco é oxidado, com a formação de hidróxido de zinco:



Trata-se de uma reação de natureza eletroquímica e envolve a redução catódica do oxigênio e a oxidação anódica do zinco.

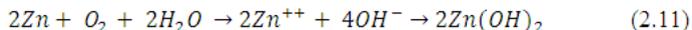
Regiões anódicas:



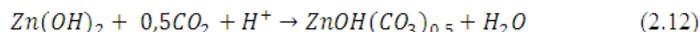
Regiões catódicas



Reação global



No hidróxido de zinco formado em atmosferas limpas, onde estão presentes o oxigênio, a água e o gás carbônico, existe a formação do carbonato básico de zinco sobre o hidróxido de zinco formado:



O hidróxido de zinco, assim como os sais básicos formados, também conhecidos como pátina do zinco, promovem a proteção da superfície contra a corrosão.

Pannoni [19--] aponta para o fato de que se a umidade superficial atingir, ocasionalmente ou permanentemente um pH baixo, não haverá formação de hidróxido de zinco ou sais básicos. Segundo o autor, mesmo os depósitos formados durante os primeiros estágio de exposição, em pH's altos, serão dissolvidos.

A dependência da velocidade de corrosão do zinco com o tempo de exposição é função do ambiente e das condições de exposição.

O aço galvanizado pode sofrer um tipo de corrosão denominada corrosão branca. O termo se refere a um determinado tipo de produto de corrosão que afeta superfícies galvanizadas e se caracteriza como um acúmulo de produto de corrosão branco e não protetor. Ao aderir-se ao zinco, esse produto de reação poroso impede a sua passivação, permitindo que a corrosão avance rapidamente.

A Norma NBR10476:1998 – Revestimentos de Zinco Eletrodepositado sobre Ferro ou Aço, faz a seguinte distinção entre corrosão branca e corrosão vermelha:

- a) corrosão branca: corrosão do zinco manifestada pelo aparecimento de produtos brancos em relevo na superfície zincada;
- b) corrosão vermelha: corrosão do metal base manifestada pelo aparecimento de produtos avermelhados da superfície zincada.

A permanência prolongada de água na superfície do zinco em condições de arejamento deficiente impede o acesso ao dióxido de

carbono do ar. Nesse caso, forma-se apenas o hidróxido de zinco, solúvel, que não é protetor. Ou seja, em zonas onde a água não se evapora facilmente, a superfície do zinco não se passiva.

Tempos de umedecimento elevados são especialmente prejudiciais ao zinco, pois podem determinar a formação da corrosão branca. Ao contrário, tempos de secagem longos favorecem a formação de uma camada protetora mais efetiva, diminuindo, ou mesmo parando o processo corrosivo. [PANNONI, 19--]

### **2.3.8 Comportamento à Corrosão no Aço Inoxidável**

O Aço inoxidável geralmente apresenta uma maior resistência à corrosão, quando submetido a um determinado meio ou agente agressivo.

Devido ao seu teor de cromo e em contato com o oxigênio, o aço inoxidável forma em sua superfície uma película fina de óxidos, constituída essencialmente por óxidos de cromo hidratados, estável, aderente, impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais, proporcionando uma barreira protetora contra a corrosão. Quando essa barreira é danificada por ações mecânicas, a sua reconstituição é rápida, quando da presença de oxigênio.

A estabilidade da película de óxido e a resistência à corrosão são influenciadas pelos elementos que constituem a liga, mais precisamente pelo teor de cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e nitrogênio (N). (FONTINHA, 2007)

## **2.4 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO**

Utilizados em uma série de aplicações devido a sua alta resistência e ductibilidade, a maioria dos metais são termodinamicamente instáveis. Quando embutidos na madeira, os elementos metálicos ficam sujeitos à corrosão devido à presença de água e oxigênio na estrutura celular da madeira. Essa corrosão traduz-se em um fenômeno associado, cujo produto da corrosão do metal tende a acelerar a degradação da madeira na qual está embutido e, ao mesmo tempo, a decomposição da madeira tende a enfraquecer

significativamente o poder de fixação do elemento metálico, podendo levar a falhas de serviço da estrutura. (RICHOLSON, 1959, BAKER, 1978, ZOLLO e HEYER, 1982, ROSSITER et al, 1992, BOHNHOFF, 2002, apud ZELINKA, 2005)

A taxa de corrosão em metais é definida pela perda de massa (perda de metal em óxido) por unidade de tempo. No entanto, medidas simples de perda de massa não são capazes de descrever os danos provocados pelo processo de corrosão. Segundo Zelinka e Rammer (2005), a corrosão pode ser mensurada em profundidade de penetração por unidade de tempo, calculada a partir da perda de massa dividida pelo produto da densidade e a área de superfície do metal corroído. A unidade mais comum de corrosão é *mils* de penetração por ano (mpy), onde um *mil* é um milésimo de uma polegada. (JONES, 1996, apud ZELINKA, 2005). No entanto, milímetros por ano (mm/y) e micrômetros por ano ( $\mu\text{m}/\text{y}$ ) também podem ser utilizados, sendo que um mpy equivale a 0,0254 milímetro/y ou 25,4  $\mu\text{m}/\text{y}$ . A taxa de corrosão, segundo a NBR 6210:2008, é determinada através da seguinte equação:

$$r_{\text{corr}} = \frac{k \cdot W}{A \cdot t \cdot d} \quad (2.13)$$

$r_{\text{corr}}$  é a taxa de corrosão expressa na unidade desejada; (ver Quadro 6)

$k$  é a constante que depende da unidade desejada; (ver Quadro 6)

$W$  é a perda de massa, expressa em gramas ( $g$ ) –  $m_i - m_f$ ;

$A$  é a área do corpo de prova em centímetros quadrados ( $\text{cm}^2$ );

$t$  é o tempo de exposição expresso em horas (h);

$d$  é a densidade. (ver Quadro 7)

Quadro 6 – Fator de conversão (k) para a expressão da taxa de corrosão

<b>Expressão</b>	<b>Fator de conversão (k)</b>
Milésimo de polegada por ano (mpy)	$3,45 \cdot 10^6$
Milímetro por ano (mm/ano)	$8,76 \cdot 10^4$
Micrômetro por ano ( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	$8,76 \cdot 10^7$
Gramas por $\text{m}^2$ por hora ( $\text{g}/(\text{m}^2/\text{h})$ )	$1,00 \cdot 10^4 \cdot d$
Miligramas por $\text{dm}^2$ por dia (mdd)	$2,4 \cdot 10^6 \cdot d$
Micrograma por $\text{m}^2$ por segundo ( $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )	$2,78 \cdot 10^6 \cdot d$
NOTA d-densidade	

Fonte: NBR 6210:2008

Quadro 7 – Densidade do material metálico

<b>Material metálico</b>	<b>Densidade</b>
Aço carbono	7,87
Alumínio	2,72
Cobre	8,92
Zinco	7,14
Aço Inoxidável	7,95*

\* Nota: Consultado em MELLO (2008)

Fonte: Adaptado da NBR 6210:2008

Como a corrosão é um processo eletroquímico, a perda de massa está diretamente relacionada com a perda de elétrons. O movimento de partículas carregadas, como os elétrons, por unidade de tempo, traduz-se na definição de corrente elétrica, medida em ampères. Neste caso, a corrente elétrica produzida a partir da reação de corrosão, quando mensurada, pode ser relacionada com a perda de massa por unidade de tempo.

Os testes de exposição natural possuem a vantagem de gerar resultados efetivos e diretamente aplicáveis. No entanto, podem levar muito tempo para serem concluídos, tornando-se um processo de cara execução. Possuem, também, a desvantagem de não serem fielmente reproduzidos, já que tempo e clima são fatores mutáveis. Nesse sentido, os ensaios acelerados têm a vantagem de poderem ser repetidos inúmeras vezes em laboratório, gerando resultados em um curto prazo de tempo. Esse tipo de teste, no entanto, pode implicar alterações no mecanismo de reação da corrosão, impossibilitando o desenvolvimento de modelos que permitam relacionar os resultados de testes acelerados com as taxas de corrosão de estruturas em serviço.

Sabe-se que a vida de serviço relacionada com a corrosão de metais em madeira não é um problema de fácil compreensão ou estimativa. A interpretação de resultados exige muito cuidado, já que o processo de corrosão depende da ocorrência de diversos eventos aleatórios. E, embora seja possível classificar muitas das variáveis que afetam a corrosão e evitar esses desvios, numa estrutura em serviço, essas variáveis não podem ser controladas. Tratamentos preservantes, por exemplo, podem prolongar a vida útil ou a manutenção da madeira tratada e, ao mesmo tempo, acelerar a corrosão de parafusos. Tendo como foco os métodos de ensaio, Zelinka (2005) faz a revisão de vinte diferentes publicações para comparar a eficácia desses métodos na determinação da taxa de corrosão de metais em contato com a madeira. Segundo o autor, cronologicamente, a primeira revisão de literatura foi

publicada por Graham (1976), na qual são resumidas mais de 125 experiências. Em seguida, Bailey e Schofield (1984), em sua revisão de literatura, discutem os efeitos dos metais em contato com a madeira tratada com CCA. Os autores dividem a pesquisa em três grupos com base nas condições de exposição do metal em contato com a madeira: condições exteriores, subterrâneas e de laboratório. A revisão mais completa teria sido publicada por Ruddick (1987), cujo objetivo era resumir os dados até então disponíveis sobre a corrosão de metais em contato com a madeira tratada com preservativos. Essa revisão está centrada na comparação de 34 fontes pesquisadas. Outras revisões adicionais citadas por Zelinka (2005) têm caráter qualitativo, sem críticas a métodos de ensaios ou resultados numéricos (CAMPBELL e PACKMAN 1944, FARMER 1962, SMITH 1982, BRE DIGEST 1985, DUNCAN 1988, KUBLER 1992, FALK e BAKER, 1993).

O objetivo da revisão, segundo o autor, é fazer um resumo abrangente de todos os métodos de ensaio utilizados anteriormente para a avaliação da corrosão de metais em contato com a madeira, de modo a possibilitar, entre outras coisas, uma comparação de sua eficácia. Para tanto, os experimentos foram divididos em três grupos: testes de exposição natural, teste de exposição acelerado e ensaios eletroquímicos. Os testes de exposição natural incluem testes de exposição ao ar livre, testes de exposição subterrânea e testes que simulam a exposição natural, executados em câmara com controle de temperatura e umidade. Os testes de exposição acelerada incluem testes onde houve controle de umidade e/ou temperatura da madeira, testes com serragem úmida para acelerar a corrosão e testes de névoa salina. Os ensaios eletroquímicos dizem respeito à aceleração do mecanismo de corrosão a partir do envio de uma corrente elétrica através da madeira. Segundo o autor, há apenas um padrão para avaliação da corrosão de metais na madeira - AWWA E-12, desenvolvido pela American Wood Preservers Association (AWPA 2004a).

As análises de ensaios que seguem, portanto, fazem parte da revisão de métodos de quantificação publicada por Zelinka (2005).

#### **2.4.1 Testes de Exposição Natural**

A forma mais simples de se mensurar a corrosão de metais em contato com a madeira, segundo Zelinka (2005), é expor o conjunto ao

ambiente de interesse e, após um tempo pré-determinado, remover o metal da madeira examinando-o visualmente. Além do exame visual, o metal pode ser limpo e pesado em balança de precisão com o intuito de quantificar a corrosão. Além de simples, esse método permite uma quantificação real da corrosão. Uma escolha cuidadosa dos materiais e meio ambiente, permite ao pesquisador a reprodução exata de determinadas condições encontradas nas estruturas em serviço. Esse tipo de exposição apresenta como desvantagens, o fato de estar sujeito às variações climáticas e ambientais, além do tempo necessário para a sua realização, significativamente maior que os testes de exposição acelerada.

#### 2.4.1.1 Exposição ao Ar Livre

Em 1949, R.H. Baechler, apud Zelinka (2005), pertencente ao USDA Forest Service, Forest Products Laboratory (FPL), publicou os resultados de vinte anos de investigação acerca da corrosão de elementos metálicos afetados por tratamentos da madeira à base de cloreto de zinco. Sua pesquisa envolveu três diferentes metais em contato com uma espécie de madeira tratada com cinco níveis de cloreto de zinco. Os elementos metálicos foram examinados após a retirada da madeira ao redor da fixação, sendo que a remoção dos produtos da corrosão foi realizada com o auxílio de uma borracha e, quando necessário, de uma lixa. A diferença das massas inicial e final foi registrada e relatada como perda de massa. Uma vez que a perda de massa está relacionada com o tamanho e densidade da amostra, os dados obtidos apenas servem de comparação entre os elementos metálicos analisados, que apresentavam forma e tamanho semelhante. Outra desvantagem da pesquisa pode ser atribuída a não utilização do procedimento padrão (ASTM 2003d, NACE 2000) na remoção dos produtos da corrosão, invalidando a possibilidade de comparação com outros dados. Além disso, Baechler (1949) ignora a possibilidade de ocorrência da corrosão galvânica, que poderia existir entre os diferentes tipos de metal inseridos na mesma peça de madeira. Vale ressaltar que, durante vinte anos de exposição, há uma enorme chance de os metais terem sido conectados eletricamente, mascarando os resultados.

Farmer e Porter (1962) conduziram uma investigação de dez anos, cujo propósito era o de avaliar a corrosão do alumínio em contato com dez diferentes espécies de madeira. Neste caso, blocos de madeira

foram unidos a folhas de alumínio com parafusos de aço inoxidável, isolados do alumínio através de anilhas de borracha. Esses conjuntos foram expostos em um ambiente rural e outro marinho, ambos no Reino Unido. Os testes foram realizados em diferentes idades (um, dois, cinco e dez anos). Após a remoção e limpeza do alumínio (feita com um banho ultra-sônico de ácido nítrico com 5% de ácido crômico), registrou-se a perda de massa e a profundidade de corrosão, com o auxílio de um micrômetro. Zelinka (2005) relata como problema no procedimento do ensaio, a possibilidade de uma parte da perda de massa ser devida ao contato do alumínio com a atmosfera, especialmente nos conjuntos expostos em ambiente marinho, tornando-se impossível a distinção entre a perda causada pela atmosfera e aquela causada pelo contato com a madeira.

Scholten (1965), apud Zelinka (2005), também pertencente à FPL, examinou como os diferentes preservativos da madeira afetam a resistência à extração de pregos. Sua pesquisa envolveu dezessete tratamentos preservativos durante um período de cinco anos. A retirada dos pregos seguiu a norma ASTM D 1761-88 (ASTM, 2003b), exceto no prazo de tempo até o arrancamento. Segundo a norma, os testes de arrancamento devem ser realizados imediatamente após a fixação dos pregos, o que tornaria inviável este tipo de ensaio. Em seu artigo, Scholten (1965) apresenta uma imagem (Figura 16) que evidencia, segundo Zelinka (2005), que a corrosão do prego configura-se num fator importante na resistência ao seu arrancamento. Scholten (1965) não quantifica a corrosão dos pregos, mas seu método de ensaio permite que sejam tiradas algumas conclusões no que diz respeito à corrosão de metais em contato com a madeira, quando expostos às condições exteriores, devido à relação da corrosão com as propriedades mecânicas dos metais.

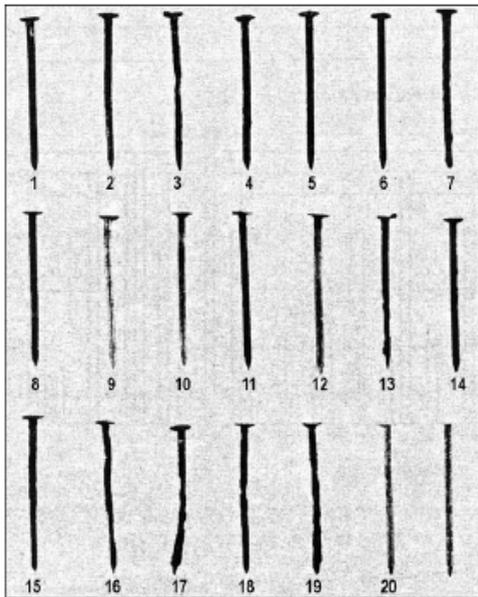


Figura 16 – Corrosão de pregos expostos nas proximidades de Madison, Wisconsin, durante cinco anos.

Fonte: Scholten, 1965, apud Zelinka (2005).

A pesquisa realizada por Wallin (1971), pertencente à Scandinavian Lead Zinc Association, teve como objetivo a determinação do efeito corrosivo de tratamentos preservativos da madeira em elementos metálicos nela embutidos, a partir da realização de testes em parafusos galvanizados eletroliticamente. Um aspecto singular nos ensaios realizados por Wallin é a conclusão de que os revestimentos não conferiam a proteção adequada devido à sua espessura muito fina, em alguns casos menores do que  $5\mu\text{m}$ . Os fixadores que passaram por processo de galvanização a quente, apresentaram revestimentos com espessuras entre  $40$  e  $80\mu\text{m}$ , possibilitando um melhor desempenho de sua camada de proteção, superando os resultados obtidos para os parafusos galvanizados eletroliticamente.

### 2.4.1.2 Exposição Subterrânea

Baker e Gjovik (1977), apud Zelinka (2005), tinham como objetivo principal de sua pesquisa a observação do comportamento de parafusos de aço galvanizado em madeiras quimicamente tratadas utilizadas em fundações residenciais e, ao mesmo tempo, o registro de dados referentes ao teor de umidade. O objetivo secundário era a avaliação da eficácia da radiografia de raios-X como método não destrutivo na análise da corrosão de parafusos. Para tanto, foram analisadas as fundações de residências construídas com madeira tratada de idades entre 9 e 50 meses. Para a realização dos testes eram removidos cerca de 60 cm de material em torno da fundação, de modo que os fixadores pudessem ser retirados e o teor de umidade na madeira pudesse ser registrado eletronicamente. Os fixadores eram extraídos juntamente com o entorno da madeira na qual estavam embutidos, a fim de que ambos pudessem ser examinados visualmente. As radiografias foram executadas em diversos locais. Nenhuma medida quantitativa da corrosão de parafusos foi realizada, mas os autores relataram que o teor de umidade variou de 10% a 30% e que diversos parafusos apresentaram ferrugem vermelha (formação de óxido de ferro, indicando a oxidação e a deterioração do metal).

Baker (1992) publicou os resultados de um estudo de dezessete anos, cujo objetivo assemelhava-se ao de Baker e Gjovik (1977). Baker (1992), realizou testes a partir da madeira de alburno do *Pinus ssp.* tratada. Segundo Zelinka (2005), todos os preservativos foram aplicados na razão de 9,5kg/m<sup>3</sup>. Após o tratamento químico, mas antes da inserção dos fixadores metálicos, a madeira foi seca em estufa, mantida uma umidade máxima de 19%. Foram testados onze tipos diferentes de prego, incluindo pregos de aço inoxidável e aço galvanizado, embutidos em duas peças de madeira espaçadas de 0,8 mm, na tentativa de simular situações reais e, ao mesmo tempo, garantir que todos os conjuntos tivessem a mesma disponibilidade de água e oxigênio. Em seguida, os corpos de prova foram enterrados e removidos após períodos de tempo variados (um, três e dezessete anos). Após a remoção, os fixadores foram lavados com água, solvente e, quando necessário, limpos com o auxílio de uma borracha. Baker (1992) relata a taxa de corrosão como uma relação com a perda de massa dos elementos metálicos. Os resultados dessa pesquisa, assim como outros casos, são específicos para o ambiente e o clima aos quais os corpos de prova foram expostos. Segundo Zelinka (2005), eles demonstram que o mecanismo de corrosão

não se altera significativamente entre o subsolo e a exposição na superfície.

#### **2.4.2 Simulação de Métodos de Exposição Natural**

Análises experimentais realizadas ao ar livre possuem a desvantagem de não poderem ser repetidas ou confirmadas por outro pesquisador, já que o ambiente externo está mudando constantemente. Zelinka (2005), em sua revisão de bibliografia, cita autores como Baechler (1949) e Simm Button (1985a) que tentaram eliminar a variabilidade do meio a partir de experimentos realizados sob condições controladas. Segundo o autor, no entanto, há uma linha muito tênue que separa os testes de simulação de condições naturais e os testes acelerados de corrosão. Embora alguns experimentos de exposição controlada, de duração maior que um ano, tenham sido agrupados nos testes de simulação de exposição natural, é possível que certas condições tenham acelerado ligeiramente o processo de corrosão de elementos metálicos.

Baechler (1939, 1949) além de realizar experimentos de exposição ao ar livre, também realizou teste de simulação, durante vinte anos, para diferentes condições de umidade e temperatura do ar. Corpos de prova de materiais similares foram expostos a uma temperatura constante de 27°C e umidade relativa constante de 30%, 60% ou 90%. A umidade de equilíbrio estava associada a valores de 6,1%, 11,7% e 20,2% (Forest Products Laboratory 1999). (FARMER e PORTER, 1962, apud ZELINKA, 2005). As condições de temperatura de 27 °C e umidade relativa de 90% representam uma condição de exposição severa. Já as condições de temperatura de 27°C e umidade relativa de 30%, representam o limite inferior para o processo de corrosão em estruturas de madeira. Baechler (1939, 1949) conclui, com base nos dados obtidos, que a taxa de corrosão em parafusos exposto ao ar livre era a mesma que aquela obtida em testes de temperatura constante de 27 °C e umidade relativa de 65%.

Simm e Button (1985a) classificaram a corrosividade dos tratamentos preservantes da madeira à base de CCA. Os autores questionam a validade dos testes de exposição ao ar livre, alegando que as mudanças de temperatura e umidade do ar degradam a madeira e podem ocasionar a separação de suas fibras, expondo os elementos metálicos a condições corrosivas que podem ser completamente

diferentes daquelas produzidas pela própria madeira. Embora essas fissuras sejam usualmente encontradas em madeiras em serviço, durante a realização dos ensaios elas acrescentam uma variável a mais, dificultando a interpretação dos resultados. Para testar a corrosividade do CCA, Simm e Button (1985a) submeteram blocos de *Pinus sylvestris* em câmara úmida por um período de trinta meses. A câmara foi mantida a  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  com uma umidade relativa variando entre 95% e 100%. Foram testados quatro diferentes metais, incluindo o aço galvanizado e o aço inoxidável. Terminado o período de exposição, os fixadores passaram por um banho à vapor, foram escovados e, em seguida, colocados em banho químico para a remoção dos produtos da corrosão. Simm e Button (1985a) registraram a corrosão como alteração na massa dos elementos metálicos. Conforme citado por Zelinka (2005), Simm e Button (1985a) foram os primeiros pesquisadores a aplicar técnicas específicas da análise da corrosão, na determinação da corrosão de metais em contato com a madeira. Os autores utilizaram, ainda, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X para analisar a interface entre metal e madeira, o que tornou possível determinar a composição dos produtos da corrosão, monitorar a profundidade que atingiram na madeira e, principalmente, prever o comportamento desses fixadores metálicos quando em contato com a madeira tratada com CCA, inclusive em outros ambientes.

### **2.4.3 Testes de Exposição Acelerada**

Os testes de exposição acelerada envolvem a manipulação das condições ambientais em torno da madeira, a fim de torná-lo mais propício à corrosão e acelerar esse processo. Zelinka (2005) cita três diferentes métodos que têm sido utilizados para aumentar a corrosividade do meio. O primeiro deles diz respeito ao aumento do teor de umidade e temperatura da madeira. O segundo exige o contato da madeira com a serragem úmida e o terceiro envolve a criação de uma atmosfera salina (névoa salina), comumente utilizada para a mensuração de taxas de corrosão em ambientes marinhos.

### 2.4.3.1 Índice de Umidade e Temperatura

Sabe-se que quanto maior o teor de umidade, maior a capacidade de condução elétrica da madeira e, portanto, a reação de corrosão ocorre num ritmo mais rápido. A umidade de equilíbrio da madeira está relacionada com a temperatura e a umidade relativa, exigindo que estas duas variáveis sejam analisadas em conjunto. Para Zelinka (2005), a cinética da corrosão (oxidação) ocorre mais rapidamente sob temperaturas mais elevadas porque a difusão e outros processos de corrosão estão termicamente ativados. Dentre os testes deste tipo de exposição acelerada, estão os testes realizados por Doyle (1964) e Wallin (1971), citados em Zelinka (2005).

Doyle (1964) investigou acerca da corrosão de pregos e parafusos em madeira laminada colada tratada com retardadores de fogo. As amostras foram mantidas sob temperatura de 27 °C, umidade relativa de 97% e verificadas em intervalos de tempo de três, seis, doze, vinte e quatro e quarenta e oito semanas. Após esses intervalos, registrou-se a carga de arrancamento dos pregos, de acordo com a D1761-88 (ASTM, 2003b). Doyle também registrou a perda de massa dos elementos metálicos, sendo que o método de remoção dos produtos da corrosão não foi especificado pelo autor. Os resultados obtidos com esta pesquisa não podem ser relacionados com outros resultados devido à técnica de aceleração utilizada que, provavelmente, alterou o mecanismo de reação da corrosão, conforme afirma Zelinka (2005).

Wallin (1971) também recorreu a ensaios acelerados, utilizando-se de temperatura e umidade elevadas. Foram testados sete tipos de fixadores metálicos em madeira tratada. Os corpos de prova foram introduzidos em estufa a 20 °C e 100% UR durante o período de um ano.

Os testes que variam a umidade ou a temperatura a fim de acelerar o processo de corrosão, não devem ser utilizados como resposta definitiva à quantificação das taxas de corrosão, principalmente quando se tratar de estruturas em serviço. Na melhor das hipóteses, ressalta Zelinka (2005), esses testes podem apresentar resultados próximos da realidade, mas corre-se o risco de que sejam mal interpretados, podendo ocasionar projeções equivocadas ou uma seleção inadequada de materiais.

### 2.4.3.2 Serragem Úmida

O aumento no teor de umidade da madeira tem como limite a capacidade física da madeira de reter a água. Devido a essa limitação, alguns pesquisadores recorreram à utilização de serragem úmida em contato com o metal para acelerar ainda mais os testes de corrosão.

Bengelsdorf (1983), apud Zelinka, (2005), realizou testes para determinar a corrosividade de parafusos em contato com madeira tratada. Um aspecto singular de sua pesquisa, quando comparado com outros autores que se utilizaram do método da serragem úmida, é o fato de também ter sido aumentada a temperatura a fim de aumentar a velocidade da reação. De acordo com o autor, com base na aceitação da teoria de duplicação da velocidade de uma reação química, a cada 10 °C de aumento na temperatura, a taxa de corrosão aumentaria muitas vezes. Embora essa relação possa ser válida para processos biológicos, ela não pode ser assumida no processo de corrosão, já que a influência da temperatura na taxa de corrosão se traduz num processo muito mais complexo. Bengelsdorf (1983) concluiu que seus resultados iniciais para a corrosão de parafusos em contato com madeira tratada eram diferentes dos resultados esperados. Para Zelinka (2005), não está claro o quanto os métodos que se utilizam de serragem úmida podem acelerar o processo de corrosão de metais em contato com a madeira, não havendo meios físicos de extrapolar esses dados de volta às condições normais de serviço.

### 2.4.3.3 Aspersão de Sal

Os ensaios de exposição acelerada envolvendo aspersão de sal são comumente utilizados para testar elementos metálicos que serão expostos à ambientes marítimos. Cita-se como sendo a única pesquisa da área, o trabalho de Richolson (1959). O autor aplicou esse tipo de teste para medir a corrosão dos metais em contato com cinco espécies de madeira utilizadas na construção naval. Para tanto, utilizou-se de uma câmara de névoa salina, de acordo com a norma ASTM (2003a) tipo B-117. Antes da introdução na câmara de névoa salina, as cabeças dos parafusos foram cobertas com um bloco de madeira. Os conjuntos de metal e madeira ficaram sob temperatura constante de 35°C ± 1°C e 95% ± 2% UR. Após o período de exposição, os produtos da corrosão

foram limpos e os valores de perda de massa medidos e registrados. Segundo Zelinka (2005), o método de aspersão de sal não deve ser utilizado para avaliar o processo de corrosão para madeiras que não estão em contato com a água salgada.

#### **2.4.4 Testes Eletroquímicos**

Os métodos eletroquímicos representam um importante passo na capacidade de se avaliar rapidamente a corrosão de metais em contato com a madeira, detendo inúmeras vantagens quando comparados com os métodos de perda de massa, por exemplo. Sendo a corrosão um processo eletroquímico, ao aplicar-se uma corrente elétrica na célula de corrosão, pode-se acelerar ou retardar a reação de corrosão. E é através dessa aceleração e desaceleração que, em condições específicas, a taxa de corrosão pode ser determinada. O objetivo do método de ensaio eletroquímico é medir a densidade da corrente em que a corrosão ocorre, convertendo-a em perda de massa ou profundidade de penetração. Os métodos eletroquímicos podem ser executados *in loco*, sob quaisquer condições de umidade e temperatura, e em qualquer geometria desejada. Embora os ensaios eletroquímicos pareçam ser a melhor maneira de se mensurar a taxa de corrosão nos metais em contato com a madeira, exigem, para tanto, equipamentos caros e conhecimento específico e detalhado da eletroquímica. Mais explicações da ciência e da teoria dos testes de corrosão eletroquímicos podem ser encontradas no terceiro capítulo de Jones (1996), apud Zelinka (2005).

#### **2.4.5 Modelo de Previsão da Corrosão de Elementos Metálicos Embutidos na Madeira**

No ano de 1998, o Forestry and Wood Products Research and Development Corporation (FWPRDC), agora Forest & Wood Products Australia (FWPA), deu início a um grande projeto nacional para a avaliação da vida útil de estruturas de madeira. Uma parte importante deste projeto foi o desenvolvimento de modelos de previsão do ataque, na madeira, por fungos apodrecedores, cupins, brocas marinhas e corrosão de elementos de fixação. A parte dedicada à descrição do desenvolvimento do modelo de previsão da corrosão de parafusos

embutidos na madeira, apresentada no Manual n.º 6, tem base nos pareceres de peritos e nos dados obtidos a partir de um extenso programa de ensaios, envolvendo cerca de setenta elementos metálicos embutidos em quinze espécies de madeira e/ou tratamentos preservativos, por um período de cento e vinte dias. O modelo desenvolvido tem como premissa a possibilidade de aplicação em qualquer região da Austrália e engloba as principais espécies de madeira utilizadas no país. A checagem e calibração do modelo foram realizadas a partir de cento e cinquenta dados de corrosão de pregos, em testes de exposição de dois anos, em oito residências localizadas em diversos locais da Austrália. Foram analisados, também, os resultados laboratoriais com respeito à corrosão de materiais metálicos embutidos em madeira de *Pinus radiata* tratada com CCA. (KEAR, G. et al, 2006 apud NGUYEN et al, 2008)

Segundo Nguyen et al (2008), com base na previsão da profundidade de corrosão de fixadores metálicos, é possível estimar-se as seções transversais residuais desses elementos de fixação e, com isso, torna-se viável a gestão de riscos, a otimização de custos, assim como a realização de manuais de boa prática. Os autores fornecem os procedimentos de cálculo para previsão da profundidade de corrosão de elementos metálicos em estruturas de madeira (Figura 17), assim como, os procedimentos para a obtenção de dados essenciais como a classe de acidez da madeira, as zonas climáticas de risco e o teor de umidade da madeira.

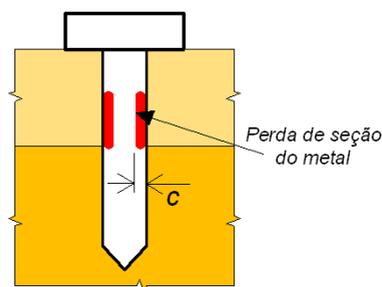


Figura 17 – Profundidade de corrosão em elementos embutidos.

Fonte: Adaptado de Nguyen et al (2008)

Para as madeiras não testadas, os autores assumem que a classe de acidez natural pode ser obtida em função da densidade das madeiras, que foram divididas, no Quadro 8, em três grupos: eucaliptos, madeiras moles e madeiras duras.

Quadro 8 – Classificação da acidez de acordo com o tipo de madeira

<b>Tipo de Madeira</b>	<b>Classe de Acidez</b>	<b>pH Representativo</b>
Eucaliptos	3	3.5
Madeiras Duras	2	4.5
Madeiras Moles	2	4.5

Fonte: NGUYEN et al, 2008.

## 2.5 NORMAS BRASILEIRA PARA QUANTIFICAÇÃO DA CORROSÃO

Dentre as Normas brasileiras que estabelecem parâmetros de avaliação da corrosão de elementos metálicos, as Normas citadas neste item contêm disposições que constituem prescrições para esta pesquisa.

O método para a execução de ensaios de exposição à atmosfera úmida saturada utilizado no desenvolvimento desta pesquisa, obedece à Norma NBR8095:1983 “Material Metálico Revestido e Não-Revestido, Corrosão por Exposição à Atmosfera Úmida Saturada (Método de Ensaio)”.

Os requisitos para o preparo de corpos de prova metálicos antes do ensaio, remoção dos produtos de corrosão após o ensaio e determinação da taxa de corrosão, estão de acordo com a Norma NBR6210:2008 “Corrosão Atmosférica – Materiais Metálicos – Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos de prova em ensaios de corrosão.”

A Norma NBR6209:2007 “Corrosão atmosférica – Materiais Metálicos – Ensaio não-acelerado” contém a padronização dos corpos de prova metálicos, que devem ser constituídos de chapas com dimensões padronizadas de 100 mm x 150 mm, sendo a espessura limitada pela capacidade e precisão da balança a ser utilizada. Em casos especiais, a Norma permite a utilização de corpos de prova com outras dimensões, desde que a área de exposição seja no mínimo de 100 cm<sup>2</sup>.

## CAPÍTULO III

- MÉTODO DE PESQUISA -



### 3 MÉTODO DE PESQUISA

O método para a execução de ensaios de exposição à atmosfera úmida saturada utilizado no desenvolvimento desta pesquisa, obedece à Norma NBR8095:1983. Esta norma não especifica o tipo de corpo de prova a ser utilizado e o critério de avaliação dos resultados obtidos. Os requisitos para o preparo de corpos de prova metálicos antes do ensaio, remoção dos produtos de corrosão após o ensaio e determinação da taxa de corrosão, estão de acordo com a Norma NBR6210:2008.

#### 3.1 MATERIAIS

Este item foi subdividido em dois subitens: elementos metálicos e espécies de madeira, ambos utilizados para a confecção dos corpos de prova ensaiados.

##### 3.1.1 Elementos Metálicos

Nesta pesquisa foram utilizados parafusos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço inoxidável, todos da marca CISER<sup>2</sup>, pregos de aço carbono e aço galvanizado da marca GERDAU<sup>3</sup> e pregos de aço galvanizado a quente da marca PREGAL.<sup>4</sup> O Quadro 9 apresenta a designação e quantidade de pregos e parafusos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

---

<sup>2</sup> Material doado pela empresa CISER Parafusos e Porcas.

<sup>3</sup> Material adquirido no comércio local de Florianópolis.

<sup>4</sup> Material .adquirido no comércio local de Florianópolis.

Quadro 9 – Pregos e Parafusos Utilizados

	<b>Tipo de aço</b>	<b>Designação</b>	<b>d*</b>	<b>Quantidade</b>
Parafusos	Aço carbono	3/8" x 2.1/2"	7,87	120
	Aço galvanizado a frio	3/8" x 2.1/2"	7,14	120
	Aço inoxidável	3/8" x 2.1/2"	7,95**	30
Pregos	Aço carbono	15 x 21	7,87	195
	Aço galvanizado a quente	15 x 21	7,14	195
	Aço galvanizado a frio	15 x 21		195

\* d (densidade) valores consultados na NBR 6210:2008

\*\*consultado em MELLO (2008)

A limpeza dos elementos metálicos, antes da confecção dos corpos de prova madeira/metal, foi feita segundo a Norma NBR6210:2008. Na ausência de corrosão, em se tratando de metais ferrosos, foi empregada a limpeza mecânica que consiste no desengraxe com papel absorvente, seguido de lavagem em água corrente. Na Figura 18, são apresentados os três conjuntos de parafusos após a realização da limpeza mecânica.



Figura 18 – Conjuntos de parafusos após limpeza mecânica: aço carbono. (E), aço galvanizado a frio (C) e aço inoxidável (D)

Após o desengraxe, os elementos metálicos foram mergulhados em solvente (acetona) e secos ao ar (Figura 19).



Figura 19 – Limpeza dos elementos metálicos pré-ensaios

Em seguida, determinou-se a massa de cada corpo de prova utilizando-se uma balança com resolução de 1 mg. Os três conjuntos de elementos metálicos compostos por pregos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço galvanizado a quente foram identificados com etiquetas, conforme ilustrado na Figura 20, para depois serem introduzidos, com o auxílio de um martelo, nos corpos de prova de madeira (Figura 21). Já os conjuntos de elementos metálicos compostos por parafusos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço inoxidável, após a determinação de sua massa, foram imediatamente introduzidos nos corpos de prova de madeira, em sequência pré-determinada.



Figura 20 – Identificação individual de pregos



Figura 21 – Pregos inseridos e a inserir na madeira

A área da superfície lateral dos elementos metálicos foi estimada e as suas médias estão apresentadas no Quadro 10. O registro do aspecto da superfície dos corpos de prova foi feito por meio de fotografias, utilizando uma lupa estereoscópica com ampliação de 10 vezes, conforme ilustrado na Figura 22.

Quadro 10 – Elementos metálicos

<b>Elemento</b>	<b>Metal</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>
	Aço carbono	25,93
Parafuso	Aço galvanizado a frio	25,93
	Aço inoxidável	24,53
Prego	Aço carbono	4,24
	Aço galvanizado a quente	4,97
	Aço galvanizado a frio	4,29

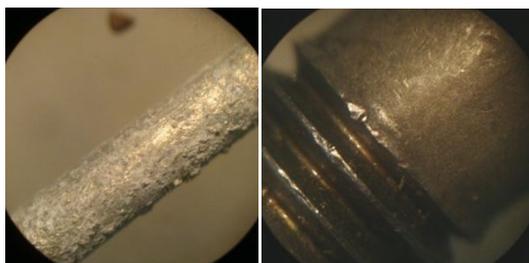


Figura 22 – Elementos metálicos observados em lupa estereoscópica. Prego de aço galvanizado a quente (E) e parafuso de aço carbono (D). (Aumento de 10x)

### 3.1.2 Madeiras

Para a confecção dos corpos de prova foram selecionadas três espécies de madeira, sendo duas oriundas de florestas plantadas (*Pinus elliotti* e *Eucalyptus grandis*). A seleção dessas espécies foi realizada a partir de dados referentes à sua disponibilidade comercial na cidade de Florianópolis. Os dados foram extraídos de uma pesquisa desenvolvida em 2007-2008 pelo Grupo Interdisciplinar de Estudos de Madeira (GIEM) da UFSC. (SERPA, 2009)

As principais espécies de madeira levantadas na pesquisa são: Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*); *Pinus elliotti*; Cedrinho (*Erismia uncinatum*), Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*); Itaúba (*Mezilaurus lauraceae* Warm); Cambará (*Gochnatia polymorpha*); *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden; Garapeira (*Apuleia leiocarpa*); Freijó (*Cordia goeldiana*); Peroba (*Aspidosperma parvifolium*); Jatobá (*Hymenaea courbaril*); Cedro (*Cedrela fissilis*); Ipê Champagne (*Coumarouna odorata*).

Dentre as espécies listadas, foram selecionadas três espécies de madeira para a confecção dos corpos de prova, sendo duas folhosas (*Hymenolobium petraeum* e *Eucalyptus grandis*) e uma conífera (*Pinus elliotti*), conforme pode ser observado no Quadro 11. As espécies folhosas selecionadas, segundo pesquisa realizada por Nguyen et al (2008), pertencem a dois grupos diferentes no que se refere à acidez da água livre. Segundo os autores, a madeira de *Hymenolobium* pertence à classe de acidez 2, cujo valor representativo de pH é considerado 4,5, assim como a madeira de *Pinus*. Já o *Eucalyptus* encontra-se na classe de acidez 3, cujo valor representativo de pH é igual a 3,5. Com a escolha destas três espécies, buscou-se induzir a criação de situações com diferentes condições de agressividade aos metais.

Quadro 11 – Espécies de madeira selecionadas

Nome popular	Nome Científico	Classe de Acidez*	pH*
Angelim Pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	2	4,5
Pinus Eliote	<i>Pinus elliotti</i>	2	4,5
Eucalipto Grandis	<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	3	3,5

\*Fonte: NGUYEN et al, 2008.

As três espécies de madeira utilizadas para a confecção dos corpos de prova foram adquiridas no comércio local de Florianópolis, nas dimensões de 5 cm x 10 cm x 150 cm (Figura 23).



Figura 23 – Peças de madeira utilizadas na confecção dos corpos de prova.

O teor de umidade da madeira foi determinado com base nas recomendações da Norma NBR7170:1997 Projetos de Estruturas de Madeira. Foram confeccionados seis corpos de prova de cada espécie de madeira analisada, com seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0 cm, como indicadas na Figura 24.

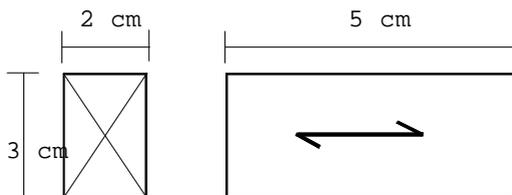


Figura 24 – Corpo de prova para determinação da umidade da madeira.

Fonte: NBR7190:1997

A massa inicial ( $m_i$ ) de cada corpo de prova foi determinada com exatidão de 0,01g. Após a determinação da massa inicial, os corpos de prova foram colocados em uma câmara de secagem, com temperatura máxima de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Durante o processo de secagem, a massa do corpo de prova foi medida a cada 6 horas, até que atingisse variação igual ou menor a 0,5% da última massa medida. Essa massa foi considerada como sendo a massa seca ( $m_s$ ). Conhecida a massa seca do corpo de prova, determinou-se o teor de umidade pela equação (2.1).

Os resultados obtidos estão apresentados na forma de seu valor médio e podem ser observados no Quadro 12:

Madeira	Teor de Umidade
<i>Hymenolobium</i>	25,64%
<i>Pinus</i>	19,37%
<i>Eucalyptus</i>	19,52%

### 3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a realização deste experimento, foram confeccionados 75 corpos de prova, sendo 25 para cada espécie de madeira analisada. Com a finalidade de acompanhar a evolução da corrosão nos elementos metálicos ao longo do tempo de exposição à atmosfera úmida saturada, foram previstas três avaliações parciais, aos 30 dias, 60 dias e 90 dias de exposição, além da avaliação final aos 120 dias, conforme apresentado no Quadro 13.

Quadro 13 – Programação de ensaios

Tempo de Exposição	Tipo de elemento e de aço	Espécie de madeira	Número de elementos
		<i>Hymenolobium</i> (A), <i>Pinus</i> (P), <i>Eucalyptus</i> (E)	
30 dias	Parafuso aço carbono	(A)+(P)+(E)	06+06+06
	Parafuso aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	06+06+06
	Prego aço carbono	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a quente	(A)+(P)+(E)	15+15+15
60 dias	Parafuso aço carbono	(A)+(P)+(E)	12+12+12
	Parafuso aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	12+12+12
	Prego aço carbono	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a quente	(A)+(P)+(E)	15+15+15
90 dias	Parafuso aço carbono	(A)+(P)+(E)	06+06+06
	Parafuso aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	06+06+06
	Prego aço carbono	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a quente	(A)+(P)+(E)	15+15+15
120 dias	Parafuso aço carbono	(A)+(P)+(E)	12+12+12
	Parafuso aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	12+12+12
	Parafuso aço inox	(A)+(P)+(E)	12+12+12
	Prego aço carbono	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	15+15+15
	Prego aço galvanizado a quente	(A)+(P)+(E)	15+15+15
controle	Parafuso aço carbono	(A)+(P)+(E)	04+04+04
	Parafuso aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	04+04+04
	Parafuso aço inox	(A)+(P)+(E)	04+04+04
	Prego aço carbono	(A)+(P)+(E)	05+05+05
	Prego aço galvanizado a frio	(A)+(P)+(E)	05+05+05
	Prego aço galvanizado a quente	(A)+(P)+(E)	05+05+05

Os corpos de prova foram confeccionados em tamanhos padronizados e divididos em três conjuntos, de acordo com as espécies de madeira (Figura 25).



Figura 25 – Corpos de prova de madeira. *Hymenolobium* (E), *Eucalyptus* (C) e *Pinus* (D)

A Figura 26 (a) ilustra os corpos de prova para análise de parafusos de aço carbono e aço galvanizado a frio, totalizando 12 elementos em cada corpo de prova. A Figura 26 (b), representa os corpos de prova para a análise de parafusos de aço inoxidável, totalizando 6 elementos por corpo de prova que foram analisados ao final dos 120 dias de exposição à atmosfera úmida saturada. A Figura 26 (c) ilustra os corpos de prova para análise de pregos, totalizando 15 elementos em cada corpo de prova.

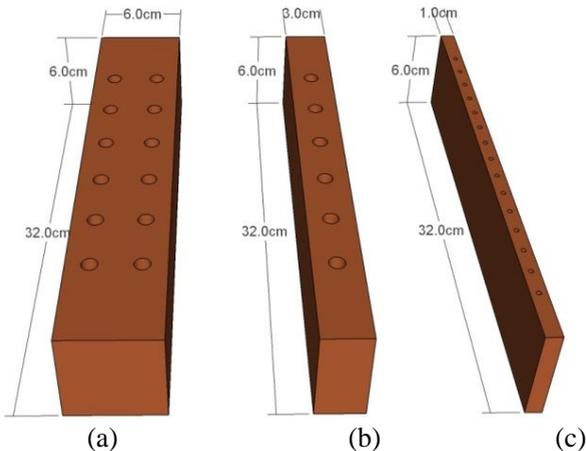


Figura 26 – Modelo dos corpos de prova

Uma vez que a NBR8095:1983 não estabelece as dimensões dos corpos de prova para ensaios de corrosão, a definição das

dimensões dos corpos de prova de madeira foi feita a partir das prescrições da NBR7190:1997 para diâmetros de pré-furações e de afastamento mínimo entre os elementos metálicos do tipo pino (prego ou parafuso).

A NBR7190:1997 estabelece que as ligações pregadas devem ser, obrigatoriamente, pré-furadas, com um diâmetro  $d_f$  inferior ao diâmetro  $d$  do prego, atendendo aos valores:

$$d_f = 0,85d \quad \text{para as coníferas}$$

$$d_f = 0,98d \quad \text{para as dicotiledôneas}$$

Já as ligações parafusadas são consideradas rígidas quando o diâmetro de pré-furação não ultrapassar o limite:

$$d_f \leq d + 0,5 \text{ mm}$$

Nas ligações parafusadas, o diâmetro dos parafusos deve ser menor que  $\frac{t}{e}$ , nas pregadas,  $\frac{t}{e}$ . Onde  $t$  é a espessura da peça de madeira. No caso de duas peças de madeira,  $t$  será a menor das espessuras  $t_1$  e  $t_2$  das peças a serem unidas.

O espaçamento mínimo entre pinos deve ser observado segundo a descrição mostrada na Figura 27. Onde,  $d$  é o diâmetro do prego, cavilha ou parafuso.

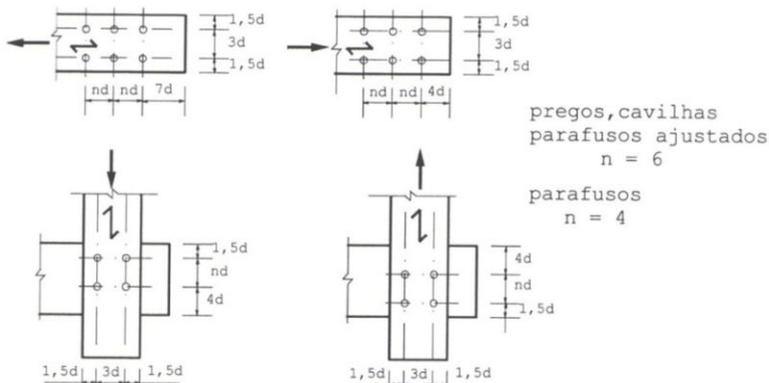
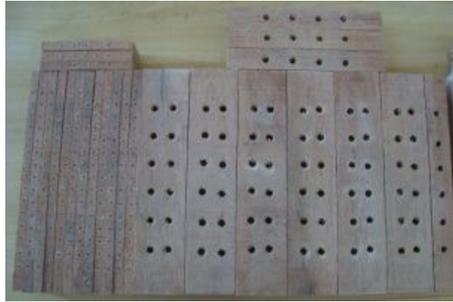


Figura 27 – Espaçamento em ligações com pinos (NBR 7190:1997)

Os corpos de prova contêm uma ou duas linhas de pregos ou parafusos, espaçados conforme as exigências da Norma NBR7190:1997, tendo sido pré-furados para, posteriormente, receberem os conectores metálicos (Figura 28).



(a)



(b)



(c)

Figura 28 – Corpos de prova de madeira pré-furados.  
(a) *Hymenolobium* (b) *Eucalyptus* (c) *Pinus*

Foram confeccionados, também, três conjuntos de corpos de prova de controle, contendo, cada um deles, 3 parafusos ou 5 pregos para cada tipo de metal em análise (Figura 29).

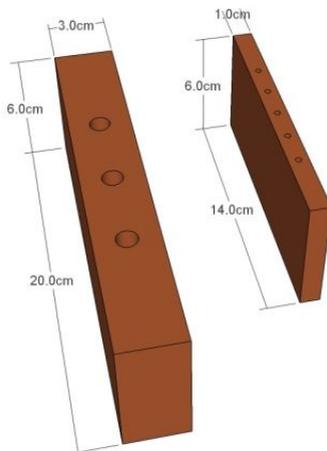


Figura 29 – Corpos de prova de controle.  
(à esq. parafusos; à dir. pregos)

Esses conjuntos foram separados e armazenados em sacos de polietileno contendo sílica gel, durante todo o período de ensaios, a fim de manter a umidade relativa inferior a 50%, evitando-se assim, o início de corrosão ou seu posterior desenvolvimento (Figura 30).



Figura 30 – Corpos de prova de controle contendo sílica gel  
(a) pesagem da sílica (b) corpos de prova embalados.

Sempre que necessário, havendo alteração de cor, a sílica gel foi substituída (Figura 31).



Figura 31 – Alteração de cor da sílica gel.  
 (a) sílica sem umidade (b) sílica com umidade

Os equipamentos necessários à fabricação e preparo dos corpos de prova, nos ensaios de corrosão acelerada e nas análises após o fim do período de corrosão foram: serra circular destopadeira, furadeira de eixo fixo, serra fita, paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, estufa, termostato digital, aquecedor (200 W), termômetro de mercúrio, balança digital com precisão de 0,01 g, lupa estereoscópica (10x), capela de exaustão de gases, recipiente de imersão de elementos metálicos (Figura 32) e câmaras de controle de umidade e temperatura (Figura 33).

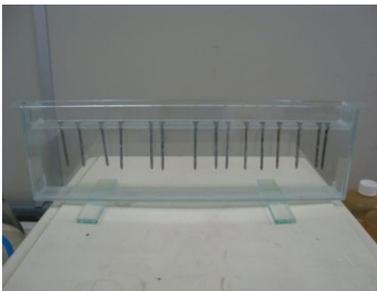


Figura 32 – Recipiente de imersão de elementos metálicos



Figura 33 – Câmara de controle de umidade e temperatura

### 3.2.1 Câmaras de Controle de Umidade e Temperatura

Para a realização dos ensaios de corrosão acelerada, foram projetadas e executadas três câmaras de ensaio, de iguais dimensões e materiais (Figura 34), com tamanho e detalhes projetuais que satisfazem às condições estabelecidas na Norma NBR8095:1983 “Material Metálico Revestido e Não-Revestido: Corrosão por exposição à Atmosfera Úmida Saturada – Método de Ensaio.

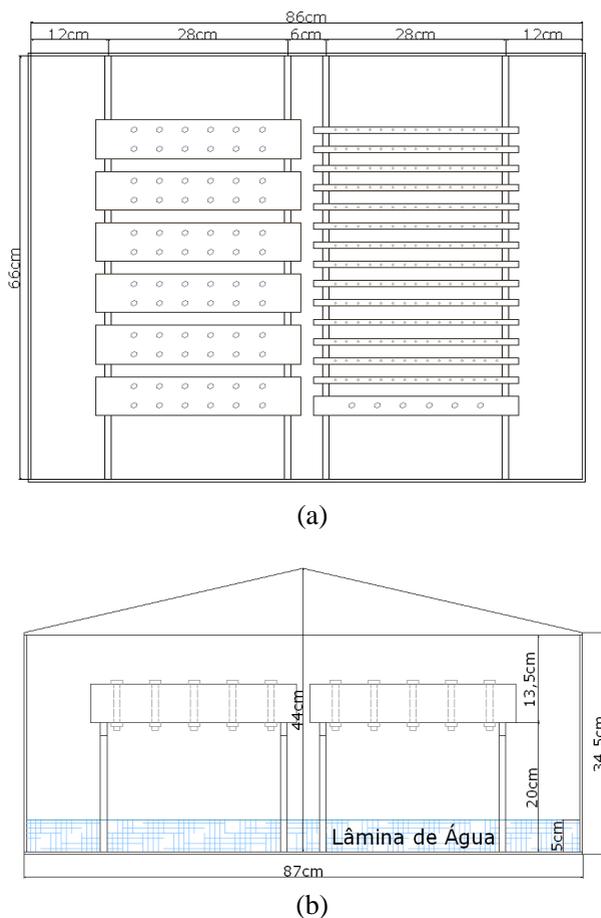


Figura 34 – Desenho esquemático das câmaras de ensaio.  
(a) planta baixa (b) corte longitudinal

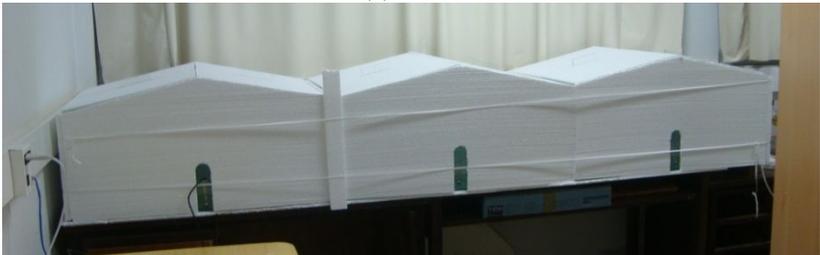
Cada câmara contou com suportes de corpos de prova e dispositivos para aquecimento e controle da temperatura durante o período total de ensaio e foi fabricadas com vidros de 4 mm de espessura.

A tampa das câmaras era de formato inclinado ( $i = 25\%$ ), de modo a não permitir que a água condensada recaísse sobre os corpos de prova. Já a parte inferior das câmaras, permitia o armazenamento de água, mantendo o interior das câmaras em condições de saturação, depois de aquecida a água.

As câmaras de ensaios foram revestidas com placas de poliestireno expandido (isopor), de forma a evitar perdas de calor. Toda a aparelhagem foi mantida protegida de correntes de ar e de radiação solar direta (Figura 35).



(a)



(b)

Figura 35 – Câmaras de ensaio.

(a) sem revestimento (b) revestidas com poliestireno expandido

### 3.2.2 Procedimentos de Ensaio

Os corpos de prova foram posicionados em três câmaras com controle de umidade e temperatura, conforme a espécie de madeira. A sua disposição obedeceu a distância mínima de 100 mm das paredes e do teto, 200 mm do fundo e 20 mm entre si. Foi previsto em projeto, uma área de contato mínima entre o corpo de prova e seu suporte.

Em cada câmara de ensaio foram armazenados 12 corpos de prova para análise de pregos e 7 corpos de prova para análise de parafusos. O critério de identificação dos corpos de prova obedece a sua posição nas câmaras de ensaio. A numeração atribuída a cada um deles está de acordo com a Figura 36.

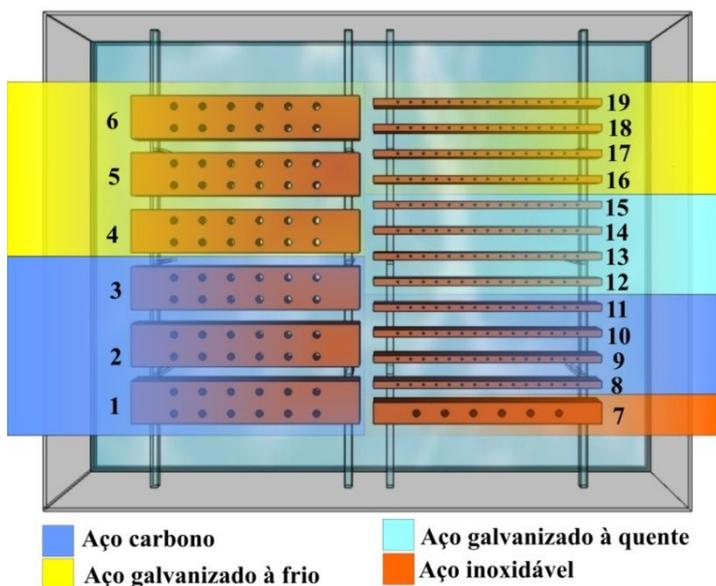


Figura 36 – Numeração dos corpos de prova (vista superior).

Os parafusos de aço carbono e aço galvanizado a frio, embutidos nos corpos de prova número 1 e 4, respectivamente, foram retirados das câmaras de ensaio em duas etapas: aos 30 e aos

90 dias de exposição à atmosfera úmida saturada. A numeração desses elementos foi feita como mostra a Figura 37.

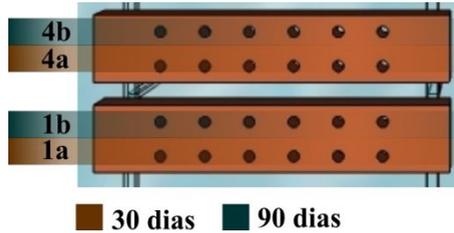


Figura 37 – Corpos de prova 1 e 4

Durante o período de permanência dos corpos de prova nas câmaras de ensaio, a temperatura do ar saturado foi mantida a  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ . Utilizou-se, para tanto, um termostato digital, ao qual estavam conectados três aquecedores de 200 W de potência. Como controle adicional, instalou-se um termômetro simples em cada uma das câmaras, os quais foram controlados frequentemente, a fim de que possíveis oscilações pudessem ser observadas e controladas. A atmosfera no interior das câmaras foi mantida saturada, com contínua condensação de água sobre os corpos de prova.

O volume de água deionizada no interior das câmaras era de aproximadamente 30 litros, sendo substituído semanalmente. Cada troca de água limitou-se a um tempo de 30 minutos, caracterizando um ensaio contínuo, cujas condições supracitadas foram mantidas durante todo o período de ensaio, salvo interrupções necessárias à inspeção e manutenção.

Após a colocação dos corpos de prova no interior das câmaras e após cada troca semanal de água deionizada, recorreu-se ao auxílio de aquecedores de maior potência para atingir a temperatura de  $40^\circ\text{C}$  mais rapidamente. Em seguida, eram acionados os aquecedores de 200 W, de modo a manter a temperatura de  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Na oportunidade da troca de água, eram realizados registros fotográficos dos corpos de prova, para fins de comparação do estado de conservação ao longo dos 120 dias de exposição à atmosfera úmida saturada.

### 3.2.3 Remoção dos elementos metálicos da madeira

Foram previstas, além da avaliação final aos 120 dias de exposição, 3 avaliações parciais para acompanhamento da evolução da taxa de corrosão dos elementos metálicos. No Quadro 14 pode ser observada a programação das avaliações e os respectivos corpos de prova retirados a cada etapa.

Quadro 14 – Programação das avaliações

<b>Tempo de Exposição</b>	<b>Corpo de Prova Retirado para Avaliação</b>	<b>Elementos Avaliados</b>
30 dias	A1 – P1 – E1	06
	A4 – P4 – E4	06
	A8 – P8 – E8	15
	A12 – P12 – E12	15
	A16 – P16 – E16	15
60 dias	A2 – P2 – E2	12
	A5 – P5 – E5	12
	A9 – P9 – E9	15
	A13 – P13 – E13	15
	A17 – P17 – E17	15
90 dias	A1 – P1 – E1	06
	A4 – P4 – E4	06
	A10 – P10 – E10	15
	A14 – P14 – E14	15
	A18 – P18 – E18	15
120 dias	A3 – P3 – E3	12
	A6 – P6 – E6	12
	A7 – P7 – E7	06
	A11 – P11 – E11	15
	A15 – P15 – E15	15
	A19 – P19 – E19	15
Controle 120 dias	TA1 – TP1 – TE1	04
	TA2 – TP2 – TE2	04
	TA3 – TP3 – TE3	04
	TA4 – TP4 – TE4	05
	TA5 – TP5 – TE5	05
	TA6 – TP6 – TE6	05

Nos corpos de prova de pregos fez-se necessário o rompimento da madeira para retirada, sem prejuízo, dos elementos metálicos. Na Figura 38, pode-se observar um corpo de prova de madeira (*Hymenolobium* com pregos de aço galvanizado a quente) sendo serrado até a proximidade do prego, com o auxílio de uma serra fita (Figura 38a). Posteriormente, a madeira foi quebrada com o auxílio de um martelo (Figura 38b). Na sequência, pode-se observar o prego pronto para ser removido e armazenado em sacos de polietileno, devidamente identificado (Figura 38 c e d), para posterior remoção de produtos de corrosão através do método de decapagens sucessivas.



(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 38 – Remoção de pregos dos corpos de prova  
(a) corte com serra fita (b) quebra com martelo (c) retirada do prego (d)  
armazenamento

### 3.2.4 Remoção de Produtos de Corrosão

Antecedendo a limpeza química, que consiste na dissolução dos produtos de corrosão, foram realizados exames visuais da superfície dos elementos metálicos, incluindo registros fotográficos. A limpeza química foi, invariavelmente, precedida de limpeza mecânica dos corpos de prova, de modo a retirar os produtos de corrosão não-aderentes. Para tanto, utilizou-se escovamento, com escovas de cerdas macias (náilon), da superfície dos elementos metálicos.

A limpeza química foi realizada com base no procedimento indicado na NBR 6210:2008. Utilizaram-se para tal procedimento, soluções apropriadas, cuja relação entre o volume da solução e a área da superfície lateral do corpo de prova foi, no mínimo, de 10 mL/cm<sup>2</sup> (Quadro 15).

Quadro 15 – Soluções para retirada dos produtos de corrosão após o ensaio.

Material	Solução	Temperatura	Tempo
	Ácido clorídrico P.A. (HCl, d=1,19). 500 mL		
Aço carbono	Hexametileno de tetramina 3,5 g Água deionizada 1 L	Ambiente	Até 10 min
	Hidróxido de amônio P.A. (NH <sub>4</sub> OH d=0,90) 150 mL Água deionizada 1 L		
Aço galvanizado		Ambiente	Até 10 min
	HNO <sub>3</sub> 30% P.A. Água deionizada 1 L*		
Aço inoxidável		Ambiente	Até 10 min**

\* Nota: Consultado em MELLO (2008).

\*\* Valor arbitrado, pois não há indicação de tempo para o método de decapagens sucessivas.

Fonte: Adaptado da NBR 6210:2008.

Por se tratar de soluções à base de produtos altamente tóxicos, foi projetado um recipiente de vidro apropriado, evitando

o contato direto do operador com a solução, como pode ser visto na Figura 39. O recipiente contém duas bases de apoio, uma para o encaixe de pregos e outra para o encaixe de parafusos e uma tampa de vidro, para evitar a evaporação dos produtos voláteis envolvidos na operação.

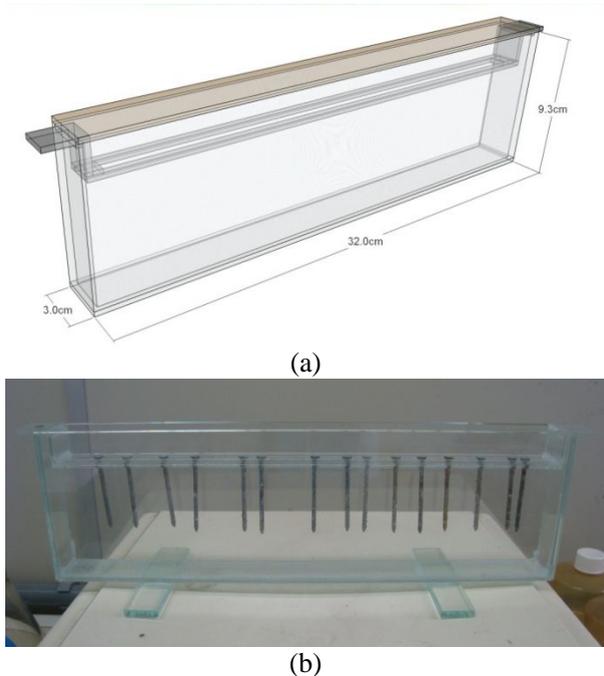


Figura 39 – Recipiente de vidro para limpeza química  
(a) projeto (b) recipiente

A etapa de limpeza química foi realizada sob Capela de Exaustão de Gases na Central de Análise – Departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Após cada imersão na solução de limpeza, os corpos de prova foram lavados e escovados com escova de cerdas macias (náilon), em água corrente. Em seguida foram secados com ar limpo e quente. Posteriormente, foi determinada a massa dos corpos de prova com precisão de 0,01 g. Esse procedimento foi realizado repetidas vezes, de acordo com as recomendações da Norma NBR6210:2008.

### 3.2.5 Método de Decapagens Sucessivas

O método de decapagens sucessivas descrito na NBR6210:2008, segue as seguintes etapas:

1. preparo da solução de limpeza adequada para cada material;
2. limpeza da superfície do corpo de prova correspondente com escovas de cerdas macias, de modo a retirar os produtos de corrosão não aderentes;
3. determinação da massa do corpo de prova correspondente ao tempo inicial;
4. introdução do corpo de prova na solução de decapagem durante o tempo  $t_1$ ;
5. decorrido o tempo  $t_1$ , o corpo de prova deve ser retirado e lavado com água corrente para, posteriormente, ser escovado com escova de cerdas macias. Em seguida, deve-se secar e pesar o corpo de prova, registrando-se o resultado;
6. concluída a etapa correspondente à primeira imersão em solução de limpeza, deve-se mergulhar novamente o corpo de prova na solução, durante o tempo  $t_2$ , procedendo-se à retirada, lavagem, secagem e pesagem do corpo de prova. Após o registro da massa correspondente ao tempo de limpeza  $t_2$ , deve-se continuar o procedimento de limpeza, usando os tempos indicados na Tabela 2, até completar o tempo total indicado;
7. a etapa seguinte consiste na elaboração de um gráfico que relacione o tempo acumulado de imersão na solução de limpeza, com a massa do corpo de prova;
8. deve-se traçar as retas mais representativas, correspondentes à remoção dos produtos de corrosão ao ataque de metal-base;
9. a massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, pode ser determinada pela interseção das retas correspondentes à remoção dos produtos de corrosão e ao ataque ao metal-base.

Tabela 2 – Tempos de limpeza

<b>Tempo de limpeza por ciclo (s)</b>	<b>Tempo acumulado de limpeza (s)</b>	<b>Massa do corpo de prova (g)</b>
$t_0 = \text{zero}$	0	$m_0$
$t_1 = 20$	20	$m_1$
$t_2 = 20$	40	$m_2$
$t_3 = 20$	60	$m_3$
$t_4 = 20$	120	$m_4$
$t_5 = 60$	180	$m_5$
$t_6 = 60$	240	$m_6$
$t_7 = 60$	300	$m_7$
$t_8 = 300$	600	$m_8$
$t_9 = 300$	900	$m_9$
$t_{10} = 300$	1200	$m_{10}$
$t_{11} = 300$	1500 (25 min)	$m_{11}$

Fonte: NBR 6210:2008

A massa final ( $m_f$ ) de cada elemento metálico (parafuso ou prego) foi determinada a partir da construção do gráfico apresentado no Anexo A da Norma brasileira NBR6210:2008, que pode ser observado na Figura 40.

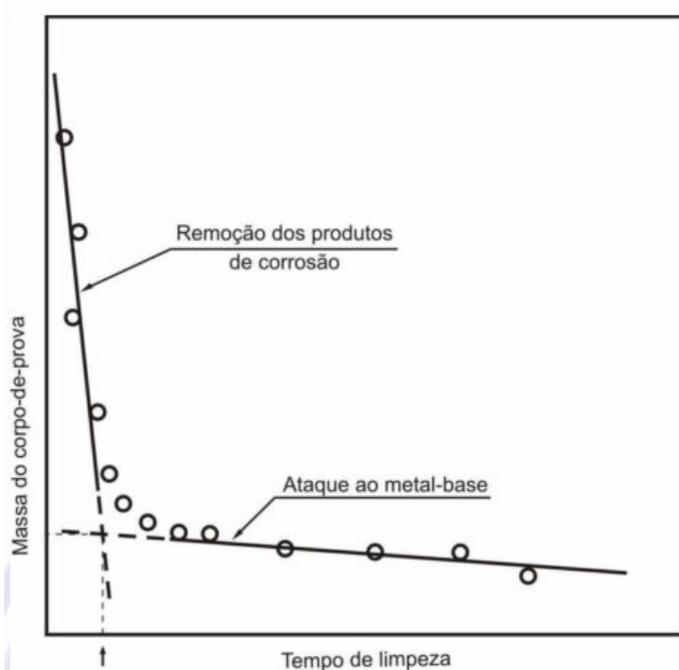


Figura 40 – Relação entre a massa do corpo de prova e o tempo acumulado na solução de limpeza

Fonte: NBR6210:2008

## CAPÍTULO IV

- RESULTADOS E ANÁLISES -



## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste Capítulo estão apresentados os valores de taxa de corrosão médios, obtidos de acordo com a NBR6210:2008, para cada um dos tipos de elementos metálicos ensaiados nas diferentes espécies de madeira. São abordados ainda, a influência da espécie de madeira na velocidade de corrosão, a influência do tipo de aço na velocidade de corrosão para uma mesma espécie de madeira, assim como a comparação entre resultados quantitativos e qualitativos do fenômeno da corrosão.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DA MASSA FINAL

Na maior parte dos elementos testados, foi possível encontrar a massa final através do método de decapagens sucessivas. Nos corpos de prova indicados no Quadro 16, a massa final dos elementos metálicos, após a remoção dos produtos de corrosão, não pode ser determinada pela interseção das retas correspondentes. Nestas situações, os valores registrados após cada imersão na solução de limpeza correspondente foram considerados constantes, já que não conformaram o gráfico descrito na Norma NBR6210:2008, conforme pode ser observado por meio dos exemplos apresentados nos Gráfico 1 e Gráfico 2.

Quadro 16 – Corpos de Prova que não conformaram o gráfico descrito na NBR6210:2008.

Elemento	Aço	<i>Hymenolobium</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>
Parafusos	Inoxidável	A7	P7	E7
	Carbono	TA1	TP1	TE1
	Galvanizado a frio	TA2	TP2	TE2
	Inoxidável	TA3	TP3	TE3
Pregos	Galvanizado a frio	A18	P18	E18
	Galvanizado a frio	A19	P19	E19
	Carbono	TA4	TP4	
	Galvanizado a quente	TA5	TP5	TE5
	Galvanizado a frio	TA6	TP6	TE6

No Gráfico 1, é apresentada a perda de massa para um prego de aço carbono, para o qual foi possível encontrar a massa final pelo método descrito na Norma NBR6210:2008. No Gráfico 2, é apresentada a perda de massa para um prego de aço galvanizado a frio pertencente a um corpo de prova de controle, para o qual não houve a formação de uma curva como prescrito pelo método. Nos casos do Quadro 16, a média dos valores encontrados nas decapagens sucessivas foi considerada como sendo o valor de massa final ( $m_f$ ) do elemento metálico.

Gráfico 1 – Pregos de aço carbono aos 60 dias

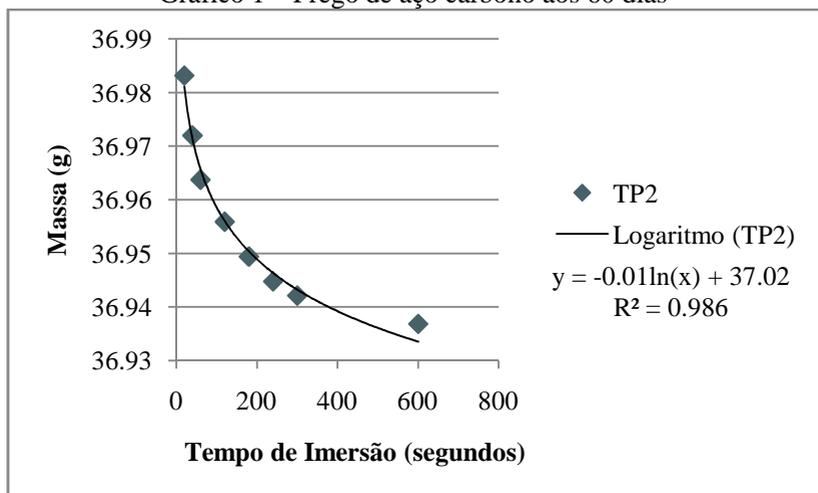
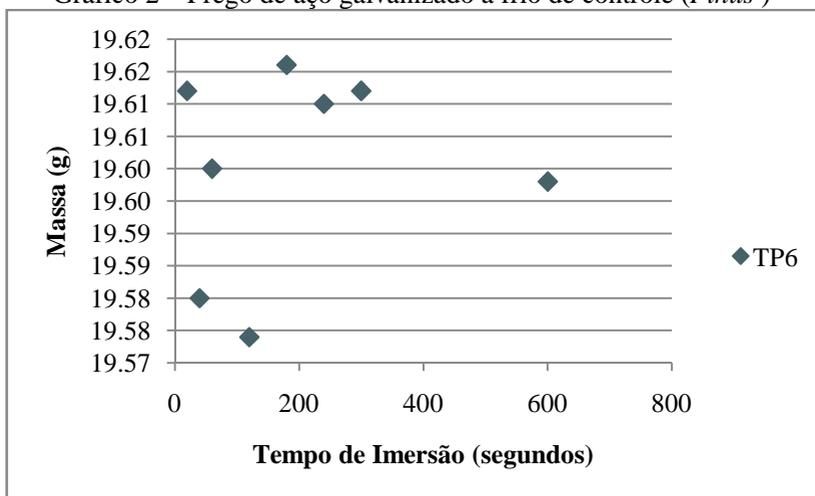


Gráfico 2 – Pregos de aço galvanizado a frio de controle (*Pinus*)

No caso dos corpos de prova de aço inoxidável (A7, P7 e E7) e dos corpos de prova de controle (T1 a T6), apresentados no Quadro 16, a hipótese mais provável para explicar a dificuldade em determinar a massa final é a possibilidade de apresentarem produto de corrosão insuficiente para ser detectado no método de decapagens sucessivas. Fato que se justifica por não terem apresentado, visualmente, um processo corrosivo significativo nas condições testadas nesta pesquisa.

No caso dos elementos de aço galvanizado a frio (A18, P18, E18 e A19, P19, E19), nos testes de 90 e 120 dias, a hipótese mais provável para explicar a dificuldade em determinar a massa final é a possibilidade de que, a partir de 90 dias de exposição à atmosfera úmida saturada, os produtos de corrosão do zinco – hidróxidos e sais básicos de zinco – tenham sido dissolvidos, inviabilizando a sua detecção no método de decapagens sucessivas. Esse processo de dissolução, citado no item 2.3.7, pode estar associado ao processo de envelhecimento acelerado da madeira (item 2.2.3), com a consequente hidrólise dos grupos acetilas, formando ácido acético, responsável por alterações no pH do extrato, possivelmente chegando a valores entre 3,5 ~ 4,5. No caso da umidade da madeira, que estava em contato com a superfície dos elementos metálicos embutidos, ter atingido, ocasionalmente ou permanentemente, um pH baixo, isso pode haver impedido a formação de hidróxido de zinco ou sais básicos sobre os elementos de aço galvanizado.

A tabulação dos dados experimentais foi realizada com o auxílio de uma planilha eletrônica, onde tabelas e gráficos dos dados obtidos nos testes e na análise numérica foram avaliados. Os dados foram discutidos com base na estatística descritiva e estão disponíveis em formato digital.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO

Após a determinação da massa final ( $m_f$ ) de cada elemento metálico (parafuso ou prego), segundo a NBR6210:2008, foram calculados os valores médios das taxas de corrosão por grupos classificados segundo os tipos de elementos metálicos, o tempo de exposição e a espécie de madeira na qual estavam embutidos. O cálculo das médias não considerou os valores espúrios, sendo que os procedimentos de exclusão levaram em conta o tamanho da amostra. Como exemplo, apresenta-se a Tabela 3 que demonstra não haver valores espúrios no grupo de pregos de aço carbono analisados aos 30 dias de exposição à atmosfera úmida saturada e embutidos na madeira de *Eucalyptus*.

Tabela 3 – Determinação de valores espúrios para o grupo de pregos de aço carbono analisados aos 30 dias de exposição e embutidos na madeira de *Eucalyptus*.

<b>i</b>	<b>Taxa de corrosão</b>	<b>T</b> ABS (dado-desvio)/média)	<b>Espúrio</b>
<b>1</b>	40,70	1,645	Não
<b>2</b>	46,73	0,356	Não
<b>3</b>	43,82	0,978	Não
<b>4</b>	46,25	0,458	Não
<b>5</b>	50,77	0,508	Não
<b>6</b>	48,19	0,044	Não
<b>7</b>	49,19	0,170	Não
<b>8</b>	46,59	0,387	Não
<b>9</b>	57,59	1,966	Não
<b>10</b>	52,55	0,888	Não
<b>11</b>	47,77	0,135	Não
<b>12</b>	55,33	1,484	Não
<b>13</b>	48,36	0,007	Não
<b>14</b>	50,92	0,541	Não
<b>15</b>	41,16	1,547	Não
<b>Média</b>	48,39		
<b>Desvio padrão</b>	4,68		
<b>T<sub>máx</sub>*</b>	2,41		
<b>N</b>	15		

\* Tabela de valores críticos para T (teste unilateral), quando desvio padrão é calculado a partir da mesma amostra.

Para as análises da influência dos diversos parâmetros na velocidade de corrosão – espécie de madeira e tipo de metal – cada grupo de elementos metálicos foi submetido ao teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov. Com 95% de confiabilidade, todos os grupos satisfizeram a condição de normalidade, exceto o grupo de pregos galvanizados a quente com exposição de 60 dias e embutidos na madeira

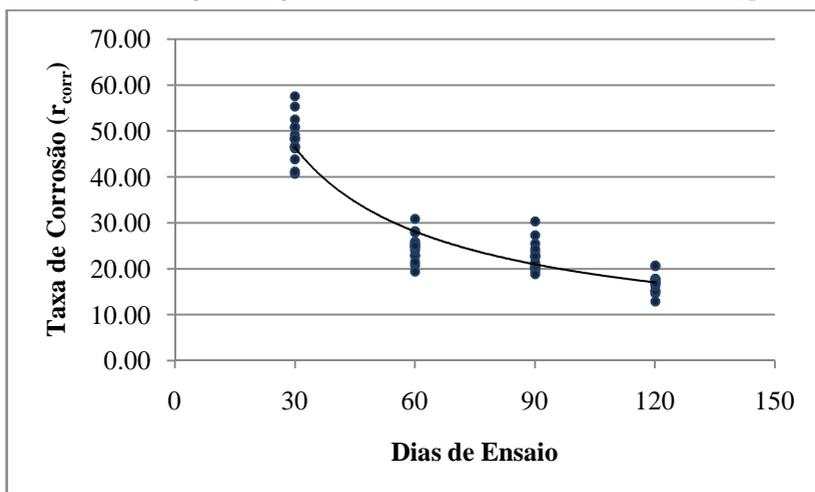
de *Pinus*, que satisfizeram a condição de normalidade com 90% de confiabilidade. Como exemplo, apresenta-se a Tabela 4, com os resultados do teste de normalidade aplicado ao grupo de pregos de aço carbono com 30 dias de exposição e embutidos na madeira de *Eucalyptus*.

Tabela 4 – Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov realizado para o grupo de pregos galvanizados a quente com exposição de 60 dias e embutidos na madeira de *Pinus*

i	Taxa de corrosão	Zi ( $\frac{\text{dado}-\text{média}}{\text{desvio padrão}}$ )	Freq. acum. teórica	Freq. acum. relativa observada	Diferença
1	40,70	-1,65	0,050	0,07	0,02
2	41,16	-1,55	0,061	0,13	0,07
3	43,82	-0,98	0,164	0,20	0,04
4	46,25	-0,46	0,324	0,27	0,06
5	46,59	-0,39	0,349	0,33	0,02
6	46,73	-0,36	0,361	0,40	0,04
7	47,77	-0,13	0,447	0,47	0,02
8	48,19	-0,04	0,483	0,53	0,05
9	48,36	-0,01	0,497	0,60	0,10
10	49,19	0,17	0,567	0,67	0,10
11	50,77	0,51	0,694	0,73	0,04
12	50,92	0,54	0,706	0,80	0,09
13	52,55	0,89	0,813	0,87	0,05
14	55,33	1,48	0,931	0,93	0,00
15	57,59	1,97	0,975	1,00	0,02
<b>Média</b>		48,39			
<b>Desvio Padrão</b>		4,68			
<b>N</b>		15,00			
<b>DDmáx</b>			0,10		
<b>DDLímite</b>			0,22		
<b>Verificação</b>					
<i>Aceita-se a hipótese de distribuição normal dos resíduos</i>					

A partir do resultados obtidos, foram elaborados gráficos que relacionam a taxa de corrosão de cada grupo de corpos de prova, com o tempo de exposição à atmosfera úmida saturada. Para efeitos de exemplificação, o Gráfico 3 foi elaborado com todos os resultados obtidos para o grupo de pregos de aço carbono embutidos na madeira de *Eucalyptus*. O Gráfico apresenta nuvens de pontos aos 30, 60, 90 e 120 dias de exposição à atmosfera úmida saturada. Os demais gráficos foram elaborados apenas com os valores médios.

Gráfico 3 – Pregos de aço carbono embutidos na madeira de *Eucalyptus*



Cabe ressaltar que, aos 60 e 90 dias, a quantidade de elementos da amostra de parafusos de aço carbono e aço galvanizado a frio pode não haver sido suficiente para que fossem tiradas conclusões a partir dos valores obtidos nestes períodos de tempo de exposição.

No Quadro 17 é possível observar as taxas médias de corrosão, expressas em miligrama por dm<sup>2</sup> por dia (mdd), de cada conjunto de elementos metálicos, após 30, 60, 90 e 120 dias de exposição à atmosfera úmida saturada e dos corpos de prova de controle, que não foram expostos à umidade. Estão apresentados ainda, os seus respectivos coeficientes de variação (CV), desvio padrão (DP) e número de elementos analisados (N). Os resultados estão agrupados de acordo com o tipo de aço e de espécie de madeira analisada.

Conforme citado no item 2.3.6, ensaios realizados por Melchers, R. E; Jeffrey, R. (2005) e Resende, et al. [2010?] constataram que a taxa

de corrosão inicial do aço carbono é muito elevada, apresentando um declínio constante após esse período. No Quadro 17, de maneira geral, esta tendência também pode ser observada nos ensaios realizados para o aço galvanizado a frio e a quente.

Quadro 17 – Taxas de corrosão médias, expressas em miligrama por dm<sup>2</sup> por dia (mdd)

CP	Metal	Dias de Exposição	<i>Hymenolobium</i>				<i>Pinus</i>				<i>Eucalyptus</i>				
			Média (mdd)	N**	DP	CV (%)	Média (mdd)	N**	DP	CV	Média (mdd)	N**	DP	CV	
Parafusos	1a	Aço carbono	30	16,61	6	4,25	25,6	20,32	5	3,72	18,3	30,92	5	1,49	4,8
	2	Aço carbono	60	6,05	12	0,64	10,6	8,64	12	1,46	16,9	10,21	12	2,28	22,3
	1b	Aço carbono	90	5,76	5	1,35	23,4	8,73	6	1,27	14,5	12,70	6	1,67	13,1
	3	Aço carbono	120	2,18	10	0,51	23,4	4,52	12	1,64	36,3	10,71	12	2,99	27,9
	4a	Aço galvanizado a frio	30	5,43	6	0,30	5,5	5,28	5	0,20	3,8	4,85	5	0,38	7,8
	5	Aço galvanizado a frio	60	3,45	12	0,69	20,0	3,38	11	0,50	14,8	2,11	12	1,21	57,3
	4b	Aço galvanizado a frio	90	1,03	6	0,08	7,8	1,16	6	0,37	31,9	0,63	6	0,40	63,5
	6	Aço galvanizado a frio	120	1,69	12	0,30	17,8	1,58	12	0,55	34,8	1,61	12	0,52	32,3
	7	Aço Inoxidável	120	0,34*	6	0,06	17,7	0,40*	6	0,10	25,0	0,42*	6	0,10	23,8
	T1	Aço carbono	120	0,81*	4	2,31	285,2	1,14*	4	8,02	703,5	0,96*	4	4,68	487,5
	T2	Aço galvanizado a frio	120	0,37*	4	1,60	432,4	0,28*	3	5,21	1860,7	0,70*	4	3,30	471,4
	T3	Aço inoxidável	120	0,24*	5	0,73	304,2	0,40*	5	5,10	1275,0	0,35*	5	3,16	902,9
	Pregos	8	Aço carbono	30	12,36	14	1,52	12,3	39,40	15	6,32	16,0	48,39	15	2,19
9		Aço carbono	60	10,86	15	1,59	14,6	29,05	15	2,17	7,5	24,97	15	4,44	17,8
10		Aço carbono	90	7,90	15	1,26	16,0	16,78	15	1,79	10,7	22,72	15	3,84	16,9
11		Aço carbono	120	7,73	15	1,35	17,5	13,20	15	0,98	7,4	16,90	13	3,29	19,5
12		Gavanizado a quente	30	6,53	14	0,78	11,9	7,15	14	3,14	43,9	13,83	15	4,40	31,8
13		Gavanizado a quente	60	3,24	15	0,96	29,6	2,98	15	1,47	49,3	12,38	14	1,97	15,9
14		Gavanizado a quente	90	1,87	15	1,02	54,6	1,10	15	0,41	37,3	9,90	15	0,55	5,6
15		Gavanizado a quente	120	1,08	14	1,03	95,4	3,58	15	0,50	14,0	9,00	15	0,97	10,8
16		Galvanizado a frio	30	2,73	15	0,87	31,9	3,20	15	0,14	4,4	8,33	15	0,47	5,6
17		Galvanizado a frio	60	1,41	14	0,16	11,4	1,71	14	0,32	18,7	3,67	14	0,13	3,5
18		Galvanizado a frio	90	2,80*	15	0,03	1,1	0,07*	15	0,06	85,7	2,67*	15	0,02	0,7
19		Galvanizado a frio	120	1,77*	15	0,06	3,4	0,21*	12	0,07	33,3	1,85*	15	0,11	5,9
T4		Aço carbono	120	-0,96*	5	0,20	20,8	-0,53*	4	0,11	20,8	0,23	5	0,43	187,0
T5	Gavanizado a quente	120	1,82*	5	2,27	124,7	0,77*	5	0,44	57,1	2,04*	5	1,34	65,7	
T6	Galvanizado a frio	120	-0,75*	5	0,53	70,7	-0,24*	5	0,28	116,7	0,03*	5	0,48	1600,0	

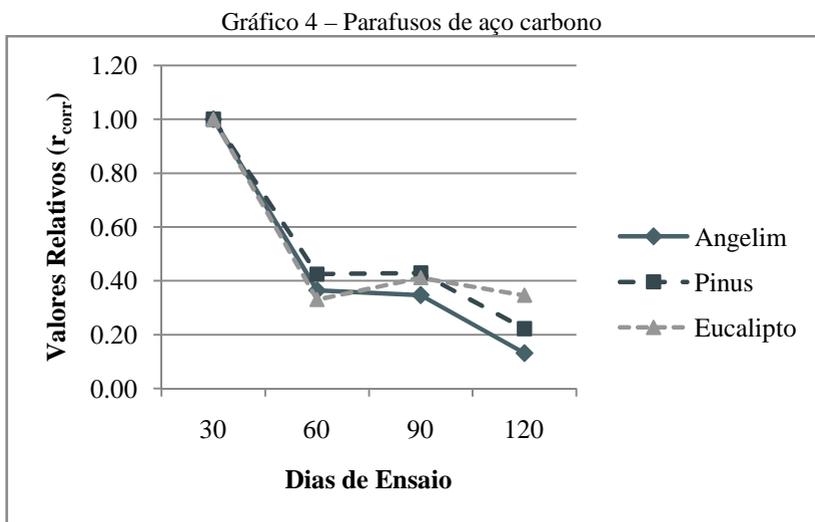
\* A massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, não pôde ser determinada graficamente.\*\*O número de elementos a que se refere nesta Tabela, não leva em consideração os valores considerados espúrios.



### 4.3 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORROSÃO NO TEMPO

As combinações de espécie de madeira e tipo de elemento metálico, excluindo os corpos de prova de controle, totalizaram 75 tipos de ensaios com parâmetros diferentes, a saber: tipo de aço, tipo de elemento, tempo de exposição à umidade e espécie de madeira. Os resultados estão apresentados em gráficos que relacionam o tempo de exposição e os valores relativos de velocidades de corrosão médios, calculados a partir da redução de massa, agrupados por tipo de elemento e tipo de aço. Conforme pode ser observado nos Gráficos de 4 a 18, que correlacionam a taxa de corrosão com o tempo de ensaio, grande parte das combinações apresentou diminuição da velocidade de corrosão ao longo do tempo.

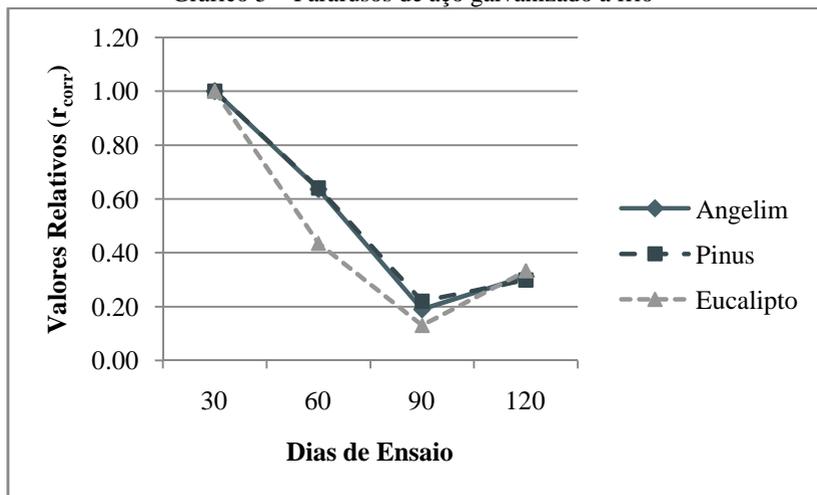
No Gráfico 4, que apresenta as taxas de corrosão para os parafusos de aço carbono embutidos na madeira, na curva do *Eucalyptus* é possível identificar uma tendência à estabilização na velocidade do processo corrosivo após 90 dias. Já para as espécies de *Hymenobium* e *Pinus*, as taxas de corrosão seguem com declínio nos valores médios.



No Gráfico 5, as taxas de corrosão relativas para os parafusos de aço galvanizado a frio nas três espécies de madeira apresentam comportamentos semelhantes de diminuição da velocidade de corrosão

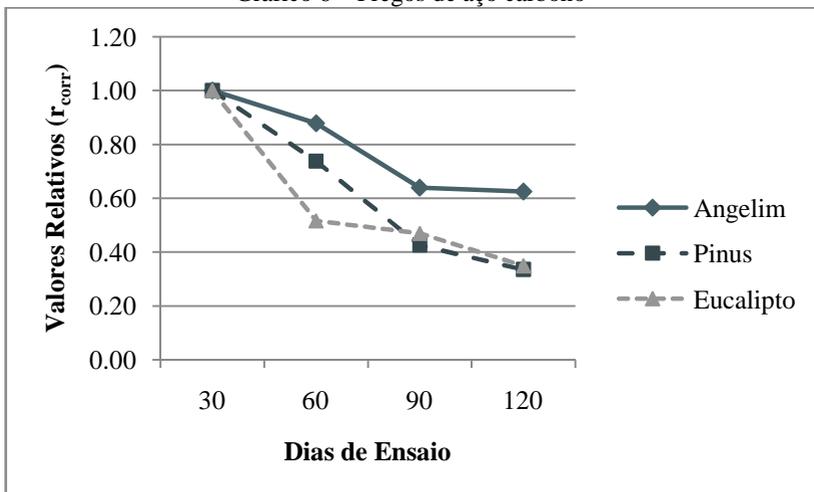
até completados 90 dias de ensaio. Após 120 dias, todas as espécies apresentaram um aumento das taxas médias de corrosão.

Gráfico 5 – Parafusos de aço galvanizado a frio



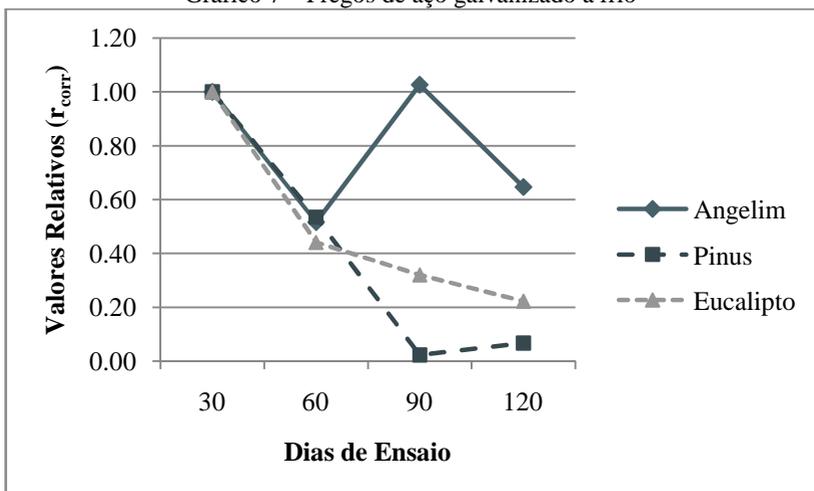
No Gráfico 6, o comportamento apresentado pelos pregos de aço carbono embutidos nas madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*, a partir de 90 dias de ensaio, sugerem uma tendência semelhante na diminuição da velocidade de corrosão quando comparados à madeira de *Hymenolobium*.

Gráfico 6 – Pregos de aço carbono



No Gráfico 7, as velocidades de corrosão dos pregos de aço galvanizado a frio apresentam comportamentos diferenciados para as três espécies de madeira analisadas a partir de 60 dias de ensaio.

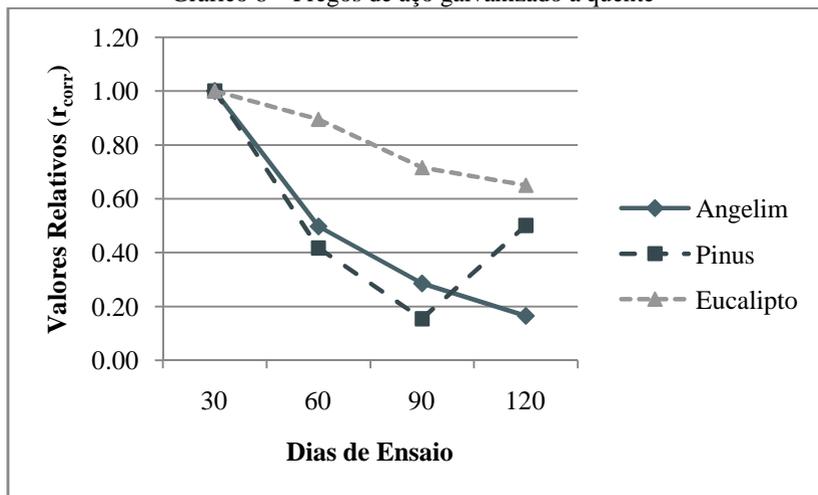
Gráfico 7 – Pregos de aço galvanizado a frio



No Gráfico 8, para os pregos de aço galvanizado a quente, é possível observar que os pregos embutidos na madeira de *Eucalyptus*

apresentam velocidade de corrosão mais alta que nas demais espécies após 30 dias de exposição. Também se observa, para a mesma espécie, que há uma tendência mais expressiva à estabilização da velocidade de corrosão ao final do tempo, em comparação às demais espécies. O aumento da taxa de corrosão dos elementos metálicos embutidos na madeira de *Pinus*, aos 120 dias de exposição à atmosfera úmida saturada, visualizado no Gráfico 8, não foi verificado na análise visual dos elementos.

Gráfico 8 – Pregos de aço galvanizado a quente



#### 4.4 INFLUÊNCIA DA ESPÉCIE DE MADEIRA NA VELOCIDADE DE CORROSÃO

Neste item são comparados os comportamentos das taxas médias de corrosão para cada um dos tipos de aço testados.

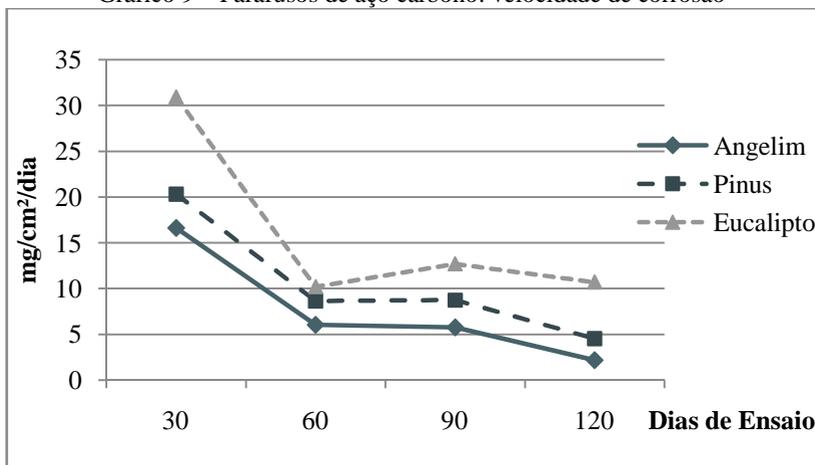
##### 4.4.1 Aço carbono

Para fins de análise, os elementos de metálicos de aço carbono foram divididos em dois grupos: parafusos de aço carbono e pregos de aço carbono.

#### 4.4.1.1 Parafusos de aço carbono

O Gráfico 9 apresenta um comparativo entre a variação das velocidades médias de corrosão de parafusos de aço carbono embutidos nas três espécies de madeira analisadas.

Gráfico 9 – Parafusos de aço carbono: velocidade de corrosão



A diminuição da velocidade de corrosão com o aumento do tempo de exposição à condição saturada, apresentada no Gráfico 9, está em concordância com o que foi visto na fundamentação teórica para o processo corrosivo do aço carbono. Conforme citado por Resende [2010?] no item 2.3.6, o período inicial de elevada taxa de corrosão é seguido por um declínio constante dessa mesma taxa. Na referência em questão não há indicação dos autores sobre qual seria o período de tempo considerado inicial. No caso dos ensaios realizados neste trabalho, o período inicial com elevada taxa foi de 30 dias.

A variação da velocidade de corrosão nos parafusos de aço carbono embutidos no *Hymenolobium*, ao fim dos 120 dias, apresentou uma redução de 86,88%, enquanto no *Pinus* foi de 77,75% e no *Eucalyptus* foi de 65,37%, conforme apresentado na Tabela 5. Com base nestes valores, aparentemente, para as espécies de madeira de *Hymenolobium* e de *Pinus*, a velocidade de corrosão diminuiu mais ao longo do tempo do que na espécie de *Eucalyptus*. Os valores absolutos da velocidade de corrosão no *Eucalyptus* (vide Gráfico 9) são superiores

às demais espécies, indicando que o *Eucalyptus* foi a espécie mais agressiva para os parafusos de aço carbono, nas condições testadas neste trabalho.

Tabela 5 – Variação das velocidades de corrosão nos parafusos de aço carbono

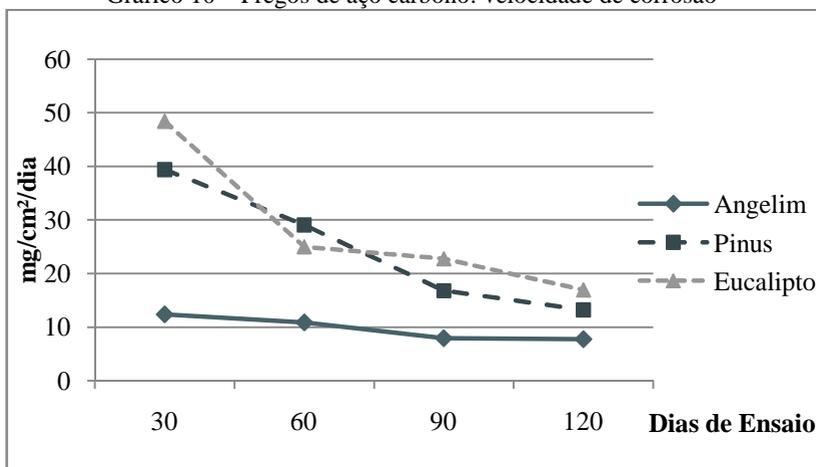
CP		1a	2	1b	3	
<b>Dias de exposição</b>		30	60	90	120	
(mdd)		16,61	6,05	5,76	2,18	
<i>Hymenolobium</i>	N**	6	12	5	10	
	Variação da taxa%	-	-63,57	-4,81	-62,18	<b>-86,88↓</b>
(mdd)		20,32	8,64	8,73	4,52	
<i>Pinus</i>	N**	5	12	6	12	
	Variação da taxa%	-	-57,48	+1,05	-48,22	<b>-77,75↓</b>
(mdd)		30,92	10,21	12,70	10,71	
<i>Eucalyptus</i>	N**	5	12	6	12	
	Variação da taxa%	-	-66,98	+24,44	-15,72	<b>-65,37↓</b>

\*\* O número de elementos a que se refere nesta Tabela, não leva em consideração os valores considerados espúrios.

#### 4.4.1.2 Pregos de aço carbono

O Gráfico 10 apresenta um comparativo entre a variação da taxa média de corrosão de pregos de aço carbono, embutidos nas três espécies de madeira analisadas.

Gráfico 10 – Pregos de aço carbono: velocidade de corrosão



Desconsiderando-se as pequenas variações no processo de diminuição da velocidade de corrosão, o Gráfico 10 representa resultados para o processo corrosivo do aço carbono coerentes ao visto no item 2.3.6 do Capítulo de Fundamentação Teórica. A variação da velocidade de corrosão nos pregos de aço carbono imersos no *Hymenolobium*, ao fim dos 120 dias, apresentou uma redução de 37,51%, enquanto no *Pinus* foi de 66,50% e no *Eucalyptus* foi de 65,08% (vide Tabela 6). Com base nestes valores, pode observar-se que a velocidade de corrosão diminuiu menos ao longo do tempo no *Hymenolobium* e mais para as espécies de madeira de *Eucalyptus* e de *Pinus*. Além disso, os valores absolutos de velocidade de corrosão foram maiores para as espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*, com algumas oscilações. Com base nestas observações, há indicações que o processo de corrosão foi mais agressivo nas espécies de *Eucalyptus* e de *Pinus* para os pregos de aço carbono, nas condições testadas neste trabalho.

Tabela 6 – Variação das velocidades de corrosão dos pregos de aço carbono.

CP		8	9	10	11	
<b>Dias de exposição</b>		30	60	90	120	
<i>Hymenobium</i>	(mdd)	12,36	10,86	7,90	7,73	
	N**	14	15	15	15	
	Variação da taxa%	-	-12,18	-27,24	-2,21	-37,51↓
<i>Pinus</i>	(mdd)	39,40	29,05	16,78	13,20	
	N**	15	15	15	15	
	Variação da taxa%		-26,26	-42,25	-21,32	-66,50↓
<i>Eucalyptus</i>	(mdd)	48,39	24,97	22,72	16,90	
	N**	15	15	15	13	
	Variação da taxa%		-48,40	-9,02	-25,62	-65,08↓

\*\* O número de elementos a que se refere nesta Tabela, não leva em consideração os valores considerados espúrios.

Comparando-se os Gráficos 9 e 10 e os valores absolutos de variações nas velocidades de corrosão para parafusos e pregos de aço carbono, é possível perceber que a diminuição da velocidade de corrosão aos 120 dias é maior nos parafusos do que nos pregos de aço carbono. Essa diferença pode ser atribuída à geometria da superfície lateral exposta entre pregos e parafusos. Nos parafusos há maior folga em relação à madeira, pois a pré-furação é maior, enquanto nos pregos, como a pré-furação é menor que o diâmetro do elemento, há menor volume a ser ocupado pela umidade do ambiente, o que causa efeitos diferenciados nos dois tipos de elementos.

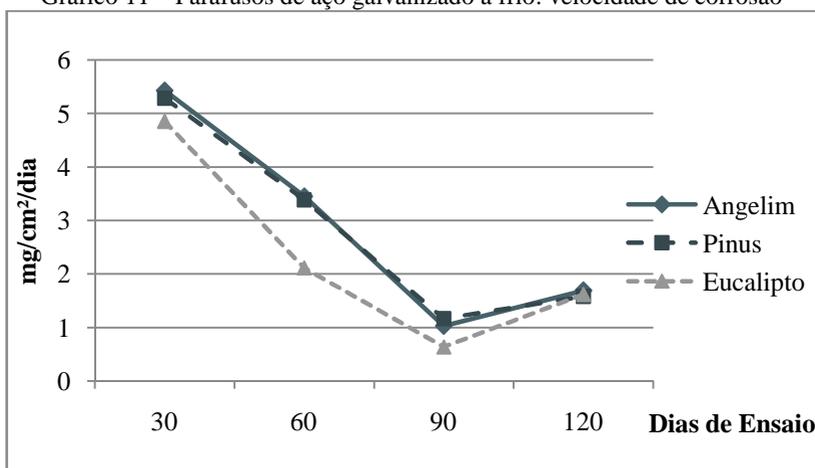
#### 4.4.2 Aço galvanizado a frio

A análise das velocidades de corrosão nos elementos metálicos de aço galvanizado a frio foram divididos em dois grupos. São eles: parafusos de aço galvanizado a frio e pregos de aço galvanizado a frio.

#### 4.4.2.1 Parafusos de aço galvanizado a frio

O Gráfico 11 apresenta um comparativo entre a variação das velocidades médias absolutas de corrosão de parafusos de aço galvanizado a frio, embutidos nas três espécies de madeira analisadas.

Gráfico 11 – Parafusos de aço galvanizado a frio: velocidade de corrosão



O comportamento da velocidade de corrosão com o aumento do tempo de exposição à condição saturada, apresentada no Gráfico 11, para os parafusos de aço galvanizado a frio é semelhante para as três espécies de madeira analisadas. Ao final dos 120 dias, todas as espécies apresentaram valores muito próximos de velocidade de corrosão. O *Eucalyptus* apresentou uma diminuição de 66,72%, o *Pinus* de 70,14% e o *Hymenolobium* de 68,82% (vide Tabela 7)

Com base nestes valores, pode-se observar que a velocidade de corrosão diminuiu menos ao longo do tempo no *Eucalyptus* e mais para as espécies de madeira de *Hymenolobium* e de *Pinus*. Além disso, os valores absolutos de velocidade de corrosão foram maiores para as espécies de *Hymenolobium* e *Pinus*, com algumas oscilações.

Tabela 7 – Variação das velocidades de corrosão dos parafusos de aço galvanizado a frio

CP		4a	5	4b	6	
<b>Dias de exposição</b>		30	60	90	120	
<i>Hymenolobium</i>	(mdd)	5,43	3,45	1,03	1,69	
	N**	6	12	6	12	
	Variação da taxa%	-	-36,45	-70,19	+64,59	-68,82↓
<i>Pinus</i>	(mdd)	5,28	3,38	1,16	1,58	
	N**	5	11	6	12	
	Variação da taxa%		-36,00	-65,63	+35,74	-70,14↓
<i>Eucalyptus</i>	(mdd)	4,85	2,11	0,63	1,61	
	N**	5	12	6	12	
	Variação da taxa%		-56,51	-70,03	+155,33	-66,72↓

\*\* O número de elementos a que se refere nesta Tabela, não leva em consideração os valores considerados espúrios.

Embora, no Gráfico 11, o comportamento dos elementos metálicos galvanizados a frio embutidos no *Eucalyptus* demonstre valores absolutos de velocidade de corrosão menores em comparação aos elementos embutidos nas espécies de *Pinus* e de *Hymenolobium*, a análise visual indica que o *Eucalyptus* está associado à maior corrosão dos elementos (Figura 41).



Figura 41 – Parafusos de aço galvanizado a frio embutidos nas três espécies de madeira aos 30 dias de ensaio. *Hymenolobium* (E), *Eucalyptus* (C) e *Pinus* (D)

Conforme mostrado na Figura 42, desde a primeira etapa de análise aos 30 dias de exposição, o *Eucalyptus* apresentava, visualmente, um estágio de corrosão mais avançado que as demais espécies de madeiras.

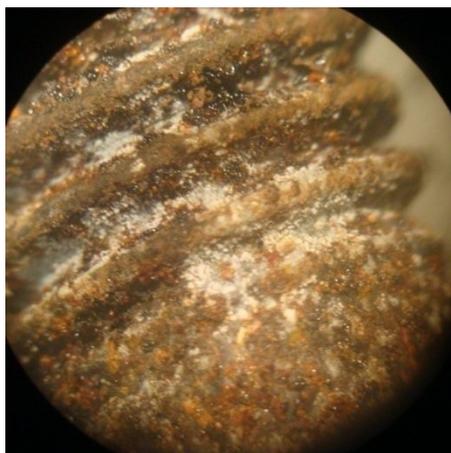


Figura 42 – Corrosão no parafuso de aço galvanizado a frio aos 30 dias de ensaio.

Desde o início do processo corrosivo, observou-se junto à corrosão branca, a presença de corrosão vermelha. Essa corrosão, atribuída ao metal base, pode haver formado produtos de corrosão aderentes, responsáveis por mascarar os resultados, ao não serem eliminados pela solução utilizada no processo de decapagem. Conforme descrito no item 2.3.7, a corrosão branca é consequência da formação de apenas hidróxido de zinco, solúvel e não protetor, que ao aderir-se ao zinco, impede a sua passivação permitindo a corrosão do metal base.

No caso dos parafusos embutidos em madeira de *Hymenolobium*, também é possível observar a presença de corrosão branca e, aos 120 dias de exposição já podem ser visualizados produtos de corrosão vermelha. (Figura 43)

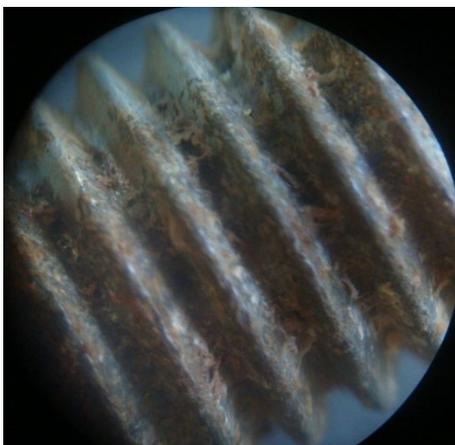


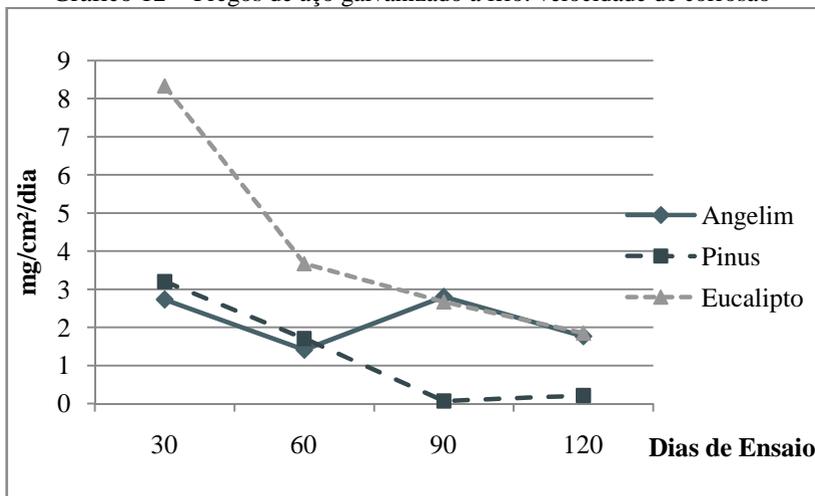
Figura 43 – Parafusos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Hymenolobium* aos 120 dias de ensaio.

Os valores de velocidade de corrosão nos parafusos de aço galvanizado para as três espécies de madeira, pela dificuldade apresentada na determinação da massa final em todas etapas, não podem ser considerados válidos para conclusões mais amplas, sendo confiáveis apenas os resultados da análise visual para elaboração das conclusões sobre estes elementos.

#### 4.4.2.2 Pregos de aço galvanizado a frio

O gráfico 12 apresenta um comparativo entre a diminuição das velocidades médias absolutas de corrosão de parafusos de aço galvanizado a frio, embutidos nas três espécies de madeira analisadas.

Gráfico 12 – Pregos de aço galvanizado a frio: velocidade de corrosão



O comportamento da velocidade de corrosão com o aumento do tempo de exposição à condição saturada, apresentada no Gráfico 12, para os pregos de aço galvanizado a frio, difere quando comparadas as três espécies de madeira analisadas. Ao final dos 120 dias as espécies de *Hymenolobium* e *Eucalyptus* apresentaram valores muito próximos de velocidade de corrosão. O *Eucalyptus* apresentou uma diminuição de 77,75%, o *Pinus* de 93,35% e o *Hymenolobium* de 35,36% (vide Tabela 8)

Com base nestes valores, pode-se observar que a velocidade de corrosão diminuiu menos ao longo do tempo no *Hymenolobium*, seguido do *Eucalyptus* e do *Pinus*. Além disso, os valores absolutos de velocidade de corrosão foram maiores para as espécies de *Eucalyptus* e *Hymenolobium*, com algumas oscilações.

Tabela 8 – Variação das velocidades de corrosão dos pregos de aço galvanizado a frio

CP		16	17	18	19	
<b>Dias de exposição</b>		30	60	90	120	
<i>Hymenolobium</i>	(mdd)	2,73	1,41	2,80	1,77	
	N**	15	14	15	15	
	Variação da taxa%	-	-48,39	+98,88	-37,02	-35,36↓
<i>Pinus</i>	(mdd)	3,20	1,71	0,07	0,21	
	N**	15	14	15	12	
	Variação da taxa%		-46,56	-95,83	+198,30	-93,35↓
<i>Eucalyptus</i>	(mdd)	8,33	3,67	2,67	1,85	
	N**	15	14	15	15	
	Variação da taxa%		-55,93	-27,27	-30,58	-77,75↓

\*\* O número de elementos a que se refere nesta Tabela, não leva em consideração os valores considerados espúrios.

No Gráfico 12, entre 30 e 60 dias de ensaio, os elementos embutidos na madeira de *Hymenolobium* apresentam menor diminuição da velocidade de corrosão, com valores próximos ao da madeira de *Pinus*. A hipótese levantada para justificar tal comportamento seria a formação de depósitos de hidróxidos e sais básicos de zinco que, a partir dos 60 dias de ensaio, devido às alterações do pH da madeira, pelo acréscimo de umidade, passaram a ser dissolvidos. Essas alterações são causadas pela hidrólise dos grupos acetilas, devido ao alto teor de umidade, conforme citado no item 2.2.3. Para autores como Suchsland & Woodson (1991) e Giovanella [2000?] a quebra da celulose e consequente transformação em ácido acético (etanóico) pode afetar a acidez da madeira, de forma semelhante àquela que ocorre através de processos naturais de envelhecimento. Analisando as curvas para as três espécies, é possível que, no caso do *Eucalyptus*, esse comportamento tenha ocorrido antes dos 30 dias de exposição e, no *Pinus*, após os 90 dias.

Na Figura 44, observa-se que, aos 60 dias de ensaio, os pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Hymenolobium* ainda

apresentavam camada de zinco (com brilho), ao contrário daqueles analisados aos 90 dias de exposição. Esta observação visual contribui para comprovar a justificativa que explica o comportamento apresentado no Gráfico 12 dos pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Hymenolobium*.

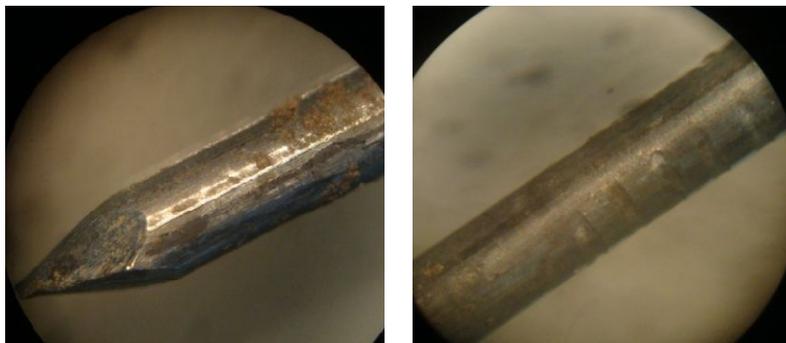


Figura 44 – Pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Hymenolobium*, aos 60 (E) e 90 (D) dias de ensaio.

Nos ensaios realizados aos 120 dias, já era possível observar a corrosão do metal base nos pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Eucalyptus*, conforme pode ser visto na Figura 45.



Figura 45 – Prego de aço galvanizado a frio embutido na madeira de *Eucalyptus*, aos 120 de ensaio.

Na Figura 46, observa-se que, aos 90 dias de ensaio, os pregos galvanizados a frio, embutidos na madeira de *Pinus*, ainda apresentavam

camada protetora de zinco, ao contrário daqueles analisados aos 120 dias de exposição.

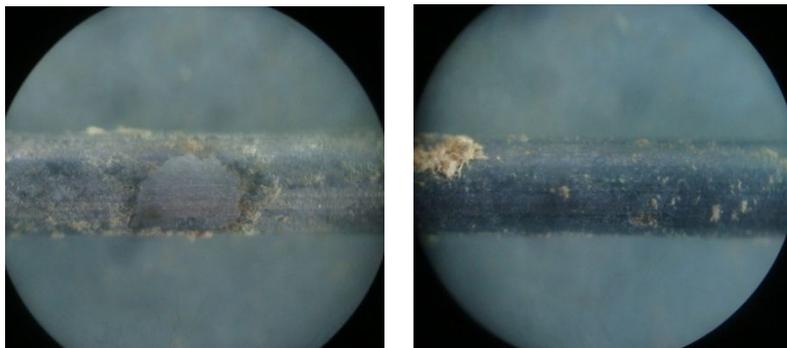


Figura 46 – Pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Pinus*, aos 90 (E) e 120 (D) dias de ensaio.

Na Figura 47 observa-se que, aos 30 e 60 dias de ensaio, os pregos de aço galvanizado a frio, embutidos na madeira de *Eucalyptus*, não mais apresentavam camada protetora de zinco.

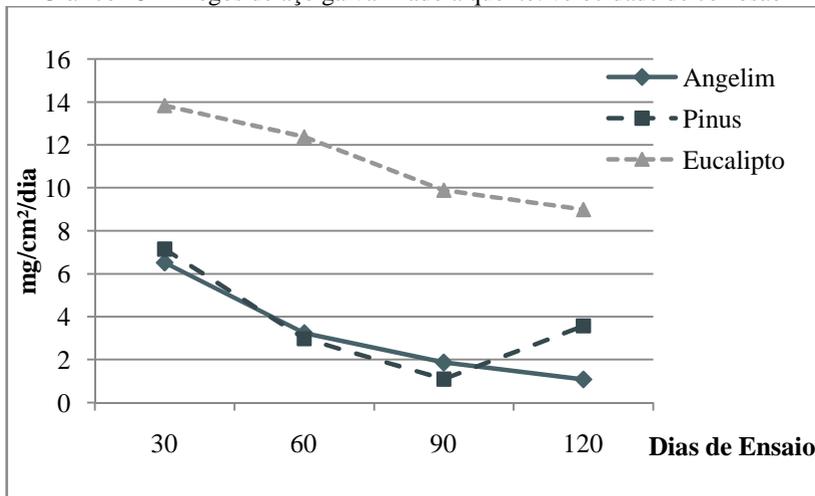


Figura 47 – Pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Eucalyptus*, aos 30 (E) e 60 (D) dias de ensaio.

#### 4.4.3 Pregos de aço galvanizado a quente

O Gráfico 13 apresenta um comparativo entre as velocidades médias absolutas de corrosão de pregos de aço galvanizado a quente, embutidos nas três espécies de madeira analisadas.

Gráfico 13 – Pregos de aço galvanizado a quente: velocidade de corrosão



O comportamento da velocidade de corrosão com o aumento do tempo de exposição à condição saturada, apresentada no Gráfico 13, para os pregos de aço galvanizado a quente, é semelhante para as espécies de *Hymenolobium* e de *Pinus* durante os 90 dias iniciais de ensaios. No entanto, para os elementos embutidos no *Eucalyptus*, observa-se que a velocidade de corrosão aos 30 dias é bem mais elevada, aproximadamente o dobro, do que nas demais espécies. Este comportamento pode indicar que o *Eucalyptus* apresentou comportamento inicial mais agressivo que as demais madeiras. Ao final dos 120 dias o *Eucalyptus* apresentou uma diminuição na velocidade de corrosão de 34.97%, o *Pinus* de 49.99% e o *Hymenolobium* de 83.50% (vide Tabela 9).

Tabela 9 – Variação das velocidades de corrosão dos pregos de aço galvanizado a quente

CP		12	13	14	15	
<b>Dias de exposição</b>		30	60	90	120	
<b><i>Hymenolobium</i></b>	(mdd)	6,53	3,24	1,87	1,08	
	N**	15	15	15	14	
	Variação da taxa%	-	-50,30	-42,48	-42,28	-
<b><i>Pinus</i></b>	(mdd)	7,15	2,98	1,10	3,58	
	N**	14	15	15	15	
	Variação da taxa%		-58,34	-63,14	+225,71	-
<b><i>Eucalyptus</i></b>	(mdd)	13,83	12,38	9,90	9,00	
	N**	15	14	15	15	
	Variação da taxa%		-10,48	-20,05	-9,14	-

\*\* O número de elementos a que se refere nesta Tabela, não leva em consideração os valores considerados espúrios.

O aumento na velocidade de corrosão apresentado pelos elementos embutidos na madeira da *Pinus* aos 120 dias de ensaio, isoladamente, poderia representar uma possível dissolução da camada passivadora, formada por hidróxidos e sais de zinco. Mas, se esta justificativa fosse verdadeira, este comportamento também deveria aparecer nos resultados apresentados pelas demais espécies, principalmente no *Eucalyptus*, que se mostrou mais agressivo em grande parte das situações analisadas. Logo esta hipótese foi descartada.

A partir do cruzamento da análise quantitativa com a análise qualitativa de pregos de aço galvanizado a frio e pregos de aço galvanizados a quente, pode-se dizer que a galvanização a quente apresentou um melhor desempenho, já que os pregos galvanizados a quente, aos 120 dias de ensaio, ainda apresentavam material de sacrifício, enquanto os pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Eucalyptus*, por exemplo, já apresentavam corrosão do metal base.

Como pode ser visto na Figura 48, os dois tipos de tratamento apresentavam corrosão vermelha ao final dos 120 dias de ensaio. Sendo

que a corrosão vermelha apresentada pelos elementos de aço galvanizado a quente pode ser atribuída à camada intermediária entre o zinco e aço carbono, na qual não é possível estabelecer-se uma demarcação clara entre o aço e o zinco, mas sim uma transição gradual através de uma série de camadas de liga, com proporções de ferro que variam de 6 a 10%, conforme descrito no item 2.3.2.

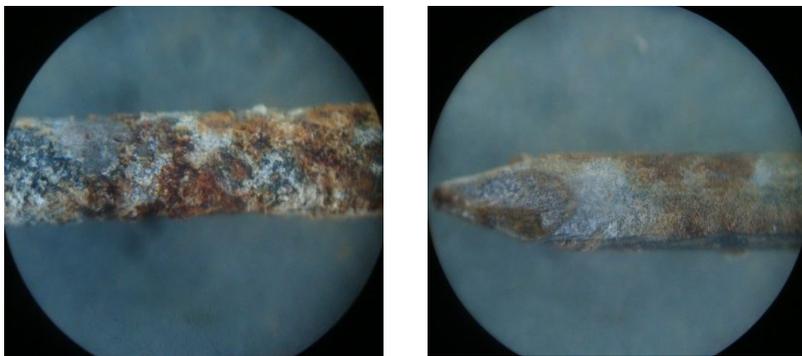


Figura 48 – Pregos de aço galvanizado a quente (E) e a frio (D) aos 120 dias de ensaio.

Como conclusão parcial deste item pode-se dizer que o *Eucalyptus* demonstrou ser a espécie de madeira mais agressiva para a maior parte dos elementos metálicos testados. Com exceção dos parafusos de aço galvanizado a frio, que apresentaram resultados controversos pelos motivos já elucidados, os demais elementos, invariavelmente, apresentaram-se mais suscetíveis à madeira de *Eucalyptus*. Por vezes, o *Hymenolobium* e *Pinus* alternaram-se atrás do *Eucalyptus* em ordem de agressividade. Os resultados obtidos nesta análise coincidem, com pequenas oscilações, com as informações fornecidas por Nguyen et al, 2008, no item 2.4.5, no que diz respeito à classe de acidez das madeiras analisadas, onde o pH representativo do *Eucalyptus* é citado como sendo 3,5, seguido do *Hymenolobium* e do *Pinus* com pH representativo igual a 4,5. No modelo desenvolvido pelos autores, presume-se que a corrosão de madeira não tratada está relacionada com a acidez da madeira (definida como sendo: 7 – pH), onde o pH é a acidez da água livre em contato com a madeira.

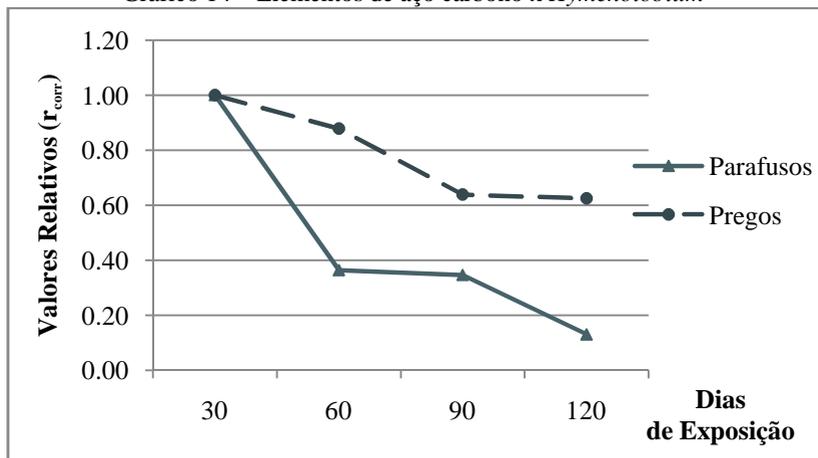
#### 4.5 INFLUÊNCIA DO TIPO DE AÇO NA VELOCIDADE DE CORROSÃO PARA UMA MESMA ESPÉCIE DE MADEIRA

Neste item são comparados os comportamentos das taxas médias de corrosão para cada um dos tipos de aço testados em cada uma das espécies de madeiras.

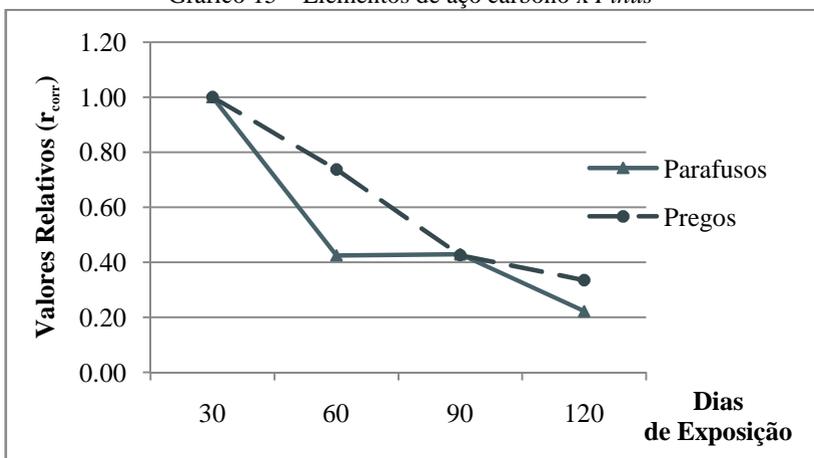
Destaca-se inicialmente que os parafusos de aço inoxidável não apresentaram perda de massa suficiente para caracterizar um processo de corrosão, então neste item não serão abordados.

Os Gráficos 14 a 16 apresentam comparativos da diminuição da velocidade de corrosão para os tipos de elemento (prego ou parafuso) de aço carbono e as diferentes espécies de madeira.

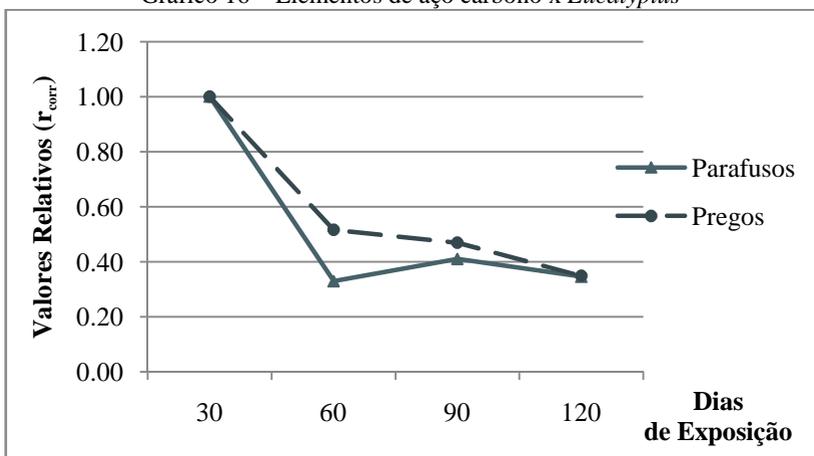
Gráfico 14 – Elementos de aço carbono x *Hymenolobium*



O Gráfico 14 mostra que os pregos de aço carbono apresentam velocidades relativas de corrosão superiores (477% maior nos pregos que nos parafusos aos 120 dias) em comparação com a velocidade nos parafusos de mesmo aço para a madeira de *Hymenolobium*.

Gráfico 15 – Elementos de aço carbono x *Pinus*

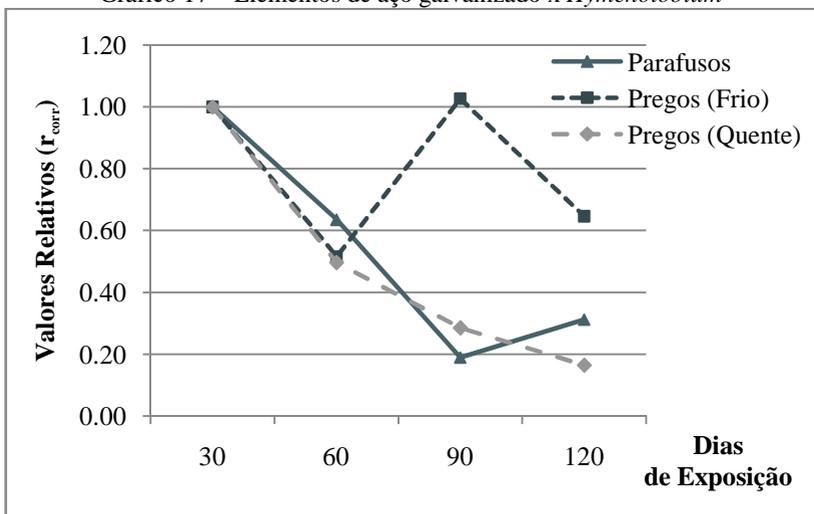
O Gráfico 15 mostra que os pregos de aço carbono apresentam velocidades relativas de corrosão superiores (106% maior nos pregos que nos parafusos aos 120 dias) em comparação com a velocidade nos parafusos de mesmo aço para a madeira de *Hymenolobium*. Ao comparar a diferença da diminuição da velocidade entre pregos e parafusos no *Pinus* e no *Hymenolobium*, observa-se que nos pregos a diminuição da velocidade foi maior no *Pinus* e nos parafusos a redução da velocidade foi maior no *Hymenolobium*.

Gráfico 16 – Elementos de aço carbono x *Eucalyptus*

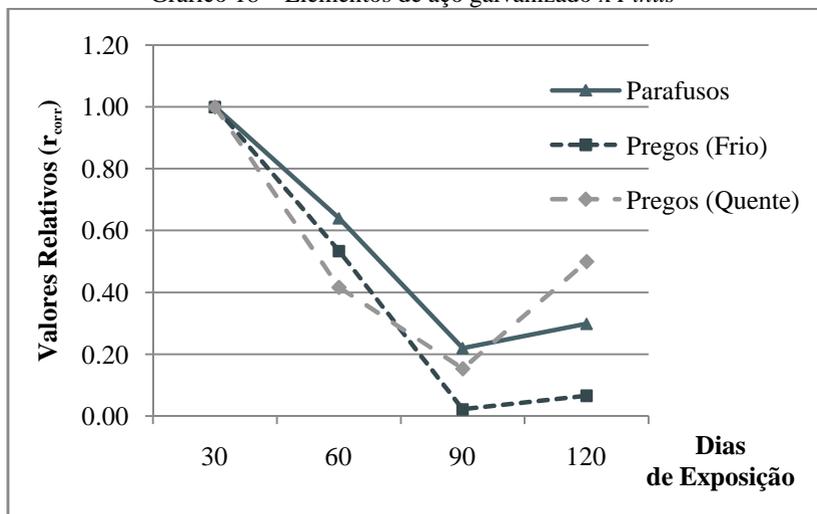
No Gráfico 16 observa-se que, para o *Eucalyptus*, a diminuição da velocidade relativa de corrosão nos parafusos e nos pregos de aço carbono foi semelhante, coincidindo com o valor para 120 dias de exposição. Em comparação com a diminuição de velocidade constatada no *Hymenolobium* e no *Pinus*, pode-se observar a tendência de diminuição mais acentuada nos primeiros dias para o *Eucalyptus*.

Estes resultados demonstram a existência de diferenças entre os comportamentos de pregos e parafusos de mesmo aço, apontando para a existência de condições diferenciadas de exposição ao meio agressivo, já que as juntas aparafusadas podem constituir um caso especial de embutimento na madeira quando os parafusos são introduzidos em orifícios pré-furados, com folgas que permitem maior entrada de água e oxigênio.

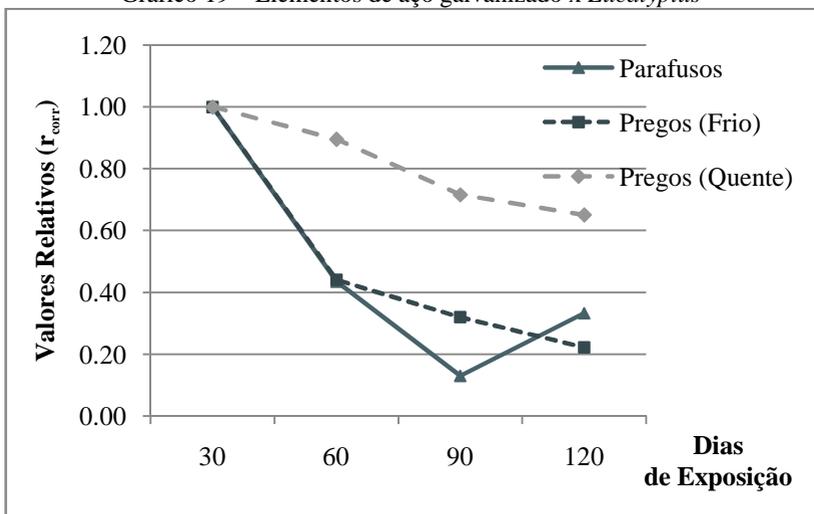
Os Gráficos 17 a 19 apresentam comparativos da diminuição da velocidade de corrosão para os tipos de elemento (prego ou parafuso) de aço galvanizado a frio e a quente e as diferentes espécies de madeira. No Gráfico 17, observa-se que no *Hymenolobium*, a diminuição da velocidade relativa de corrosão nos parafusos galvanizados a frio e nos pregos de aço galvanizados a quente foram semelhantes, sendo a diminuição da velocidade nos parafusos um pouco menor (69%) do que nos pregos (83%) aos 120 dias de exposição. A diminuição da velocidade de corrosão nos pregos galvanizados a frio foi idêntica aos pregos galvanizados a quente nos 30 dias e após este período sofreu um aumento e depois diminuiu, alcançando uma redução de 35% aos 120 dias, valor superior ao apresentado pelos demais elementos galvanizados no embutidos no *Hymenolobium*.

Gráfico 17 – Elementos de aço galvanizado x *Hymenolobium*

No Gráfico 18, observa-se para o *Pinus* um comportamento com tendência semelhante para a diminuição da velocidade relativa de corrosão nos parafusos galvanizados a frio e os pregos de aço galvanizados a frio e a quente. Os parafusos galvanizados a frio apresentaram uma diminuição um pouco menor que os pregos galvanizados a frio. Os pregos galvanizados a quente apresentaram comportamento diferenciado nos últimos dias de exposição, com um acréscimo na velocidade, atingindo o valor de diminuição da velocidade de 70% aos 120 dias, superior aos demais elementos. Ao compararem-se os parafusos de aço galvanizado embutidos no *Hymenolobium* e no *Eucalyptus*, as duas curvas mostram-se bastante semelhantes. Já nos pregos de aço galvanizado, não é evidente uma conclusão entre *Hymenolobium* e *Pinus*, com comportamentos diversos.

Gráfico 18 – Elementos de aço galvanizado x *Pinus*

No Gráfico 19, observa-se no *Eucalyptus* um comportamento semelhante entre os parafusos e os pregos galvanizados a frio até os 60 dias de exposição. Entretanto, os pregos galvanizados a quente apresentam-se com diminuição da velocidade bem menor em comparação com os demais elementos galvanizados. Aos 60 dias a diminuição da velocidade de corrosão no prego galvanizado a quente é de 10% enquanto nos demais elementos é de 56%, aproximadamente. A redução da velocidade de corrosão ao final dos testes (120 dias) é semelhante aos parafusos e pregos galvanizados a frio, que por sua vez é maior que nos pregos galvanizados a quente. A análise deste Gráfico 19 pode sugerir que o *Eucalyptus*, sendo a espécie aparentemente mais ácida e agressiva entre as três testadas, permitiu uma maior diferenciação no comportamento dos elementos galvanizados a quente em relação aos demais galvanizados a frio, com melhor desempenho para o tratamento a quente.

Gráfico 19 – Elementos de aço galvanizado x *Eucalyptus*

Para que se possa avaliar as diferenças de comportamento entre os elementos galvanizados a quente ou a frio, deve-se recordar as diferenças que foram observadas visualmente durante os ensaios, já relatados anteriormente. Após os ensaios, as imagens dos elementos indicaram que os pregos de aço galvanizado a frio não apresentavam mais a camada de proteção do zinco ao fim dos testes, ao contrário dos pregos de aço galvanizado a quente que ainda a apresentavam. Este fator aponta para a existência de uma proteção residual maior nos aços galvanizados a quente. Este mesmo comportamento é visto nos Gráfico 19, para o *Eucalyptus*, mas não é perceptível nos Gráficos 17 e 18, do *Hymenolobium* e do *Pinus*.

O método de decapagens sucessivas pressupõe que todo produto da corrosão é retirado ao fim do tempo previsto para a limpeza e para a determinação da massa final. As análises visuais mostram que a solução de limpeza utilizada não é capaz de remover os produtos de corrosão do metal base nestes elementos, tornando inconclusivos os valores de velocidade de corrosão calculados neste trabalho para parafusos e pregos galvanizados.

Como conclusão parcial deste item, observa-se que os pregos de aço carbono apresentaram velocidades relativas de corrosão superiores aos parafusos, quando embutidos nas madeiras de *Pinus* e de *Hymenolobium*. Estes mesmos elementos embutidos na madeira de *Eucalyptus* apresentaram resultados semelhantes, coincidindo com o

mesmo valor para 120 dias de exposição. Os elementos de aço galvanizado demonstraram comportamentos bastante diferenciados, indicando uma possível inadequação do método de ensaio proposto pela Norma NBR6210:2008 no casos de pregos e parafusos de aço galvanizado.

#### 4.6 ASPECTOS ESTÉTICOS DOS CORPOS DE PROVA

Os Quadros 18 a 21 apresentam imagens registradas a cada 30 dias de ensaio na ocasião da retirada dos corpos de prova das respectivas câmaras de controle de umidade e temperatura, de acordo com a espécie de madeira.

De maneira geral, um efeito diferenciado que chamou atenção ocorreu para os parafusos de aço galvanizado a frio. Nestes elementos não foi possível observar indícios de processo corrosivo na porção exposta ao ar, apenas na região que permaneceu embutida na madeira.

Quadro 18 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 30 dias de ensaio

30 dias

*Hymenolobium**Pinus**Eucalyptus*

Aço galvanizado a frio (acima); aço carbono (abaixo)



Aço galvanizado a frio (acima); aço galvanizado a quente (ao centro); aço carbono (abaixo)

Quadro 19 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 60 dias de ensaio

60 dias

*Hymenolobium**Pinus**Eucalyptus*

Aço galvanizado a frio (acima); aço carbono (abaixo)



Aço galvanizado a frio (acima); aço galvanizado a quente (ao centro); aço carbono (abaixo)



Quadro 20 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 90 dias de ensaio

90 dias

*Hymenolobium**Pinus**Eucalyptus*

Aço galvanizado a frio (acima); aço carbono (abaixo)



Aço galvanizado a frio (acima); aço galvanizado a quente (ao centro); aço carbono (abaixo)

Quadro 21 – Corpos de prova retirados das câmaras aos 120 dias de ensaio

120 dias

*Hymenolobium**Pinus**Eucalyptus*

Aço inoxidável (acima); aço galvanizado a frio (ao centro); aço carbono (abaixo)



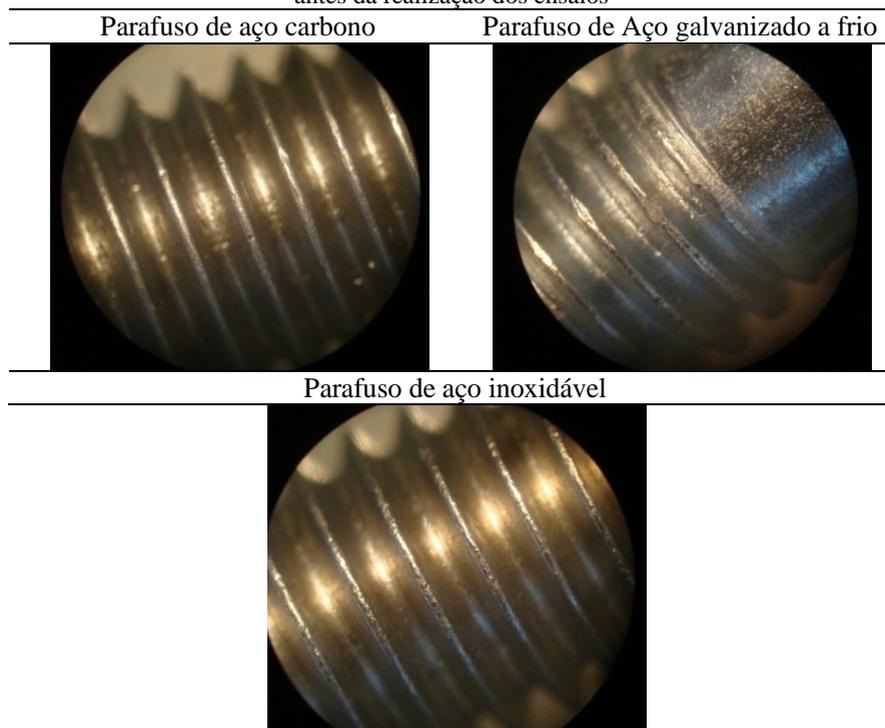
Aço galvanizado a frio (acima); aço galvanizado a quente (ao centro); aço carbono (abaixo)



Nos Quadros 22 a 29 estão apresentadas as imagens obtidas com a lupa estereoscópica de uma amostra de cada um dos grupos de elementos testados, agrupados por tipo de aço e por espécie de madeira, após cada uma das etapas de teste (início, 30, 60, 90, 120 dias e de controle).

No Quadro 22 estão apresentadas as fotos ampliadas dos parafusos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço inoxidável, antes da realização dos ensaios.

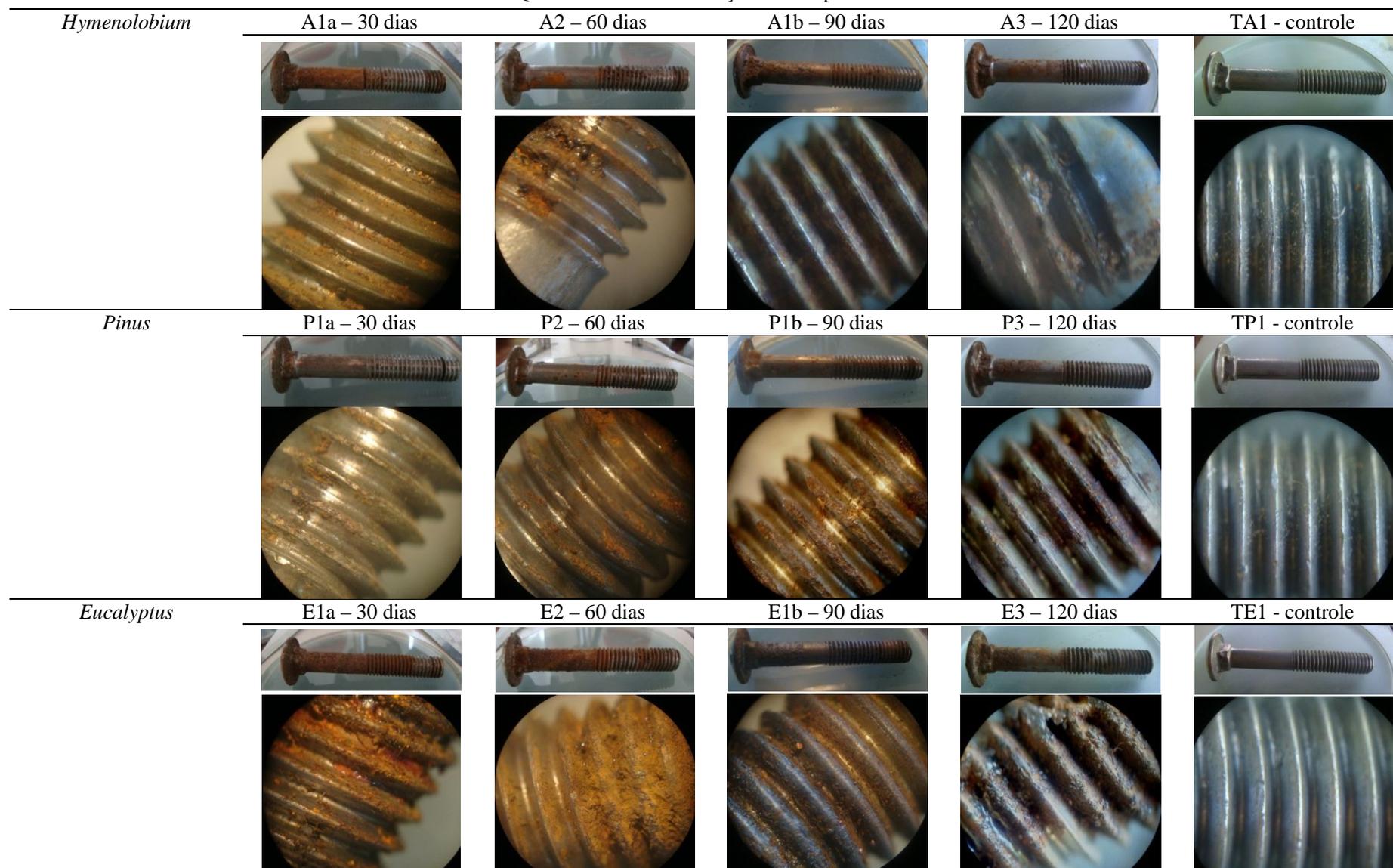
Quadro 22 – Parafusos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço inoxidável antes da realização dos ensaios



O Quadro 23 apresenta um comparativo do aspecto dos parafusos de aço carbono, nas três espécies de madeira analisadas, aos 30, 60, 90 e 120 dias e de controle (não exposto à umidade).



Quadro 23 – Parafusos de aço carbono após ensaios





No Quadro 24 estão apresentados as imagens comparativas dos parafusos de aço carbono testados com diferentes espécies, seguindo a ordem *Hymenolobium* à esquerda, *Eucalyptus* ao centro e *Pinus* à direita, em todas as fotos. Visualmente, os parafusos de aço carbono que estiveram em contato com o *Eucalyptus* parecem ter sofrido uma agressão mais evidente.

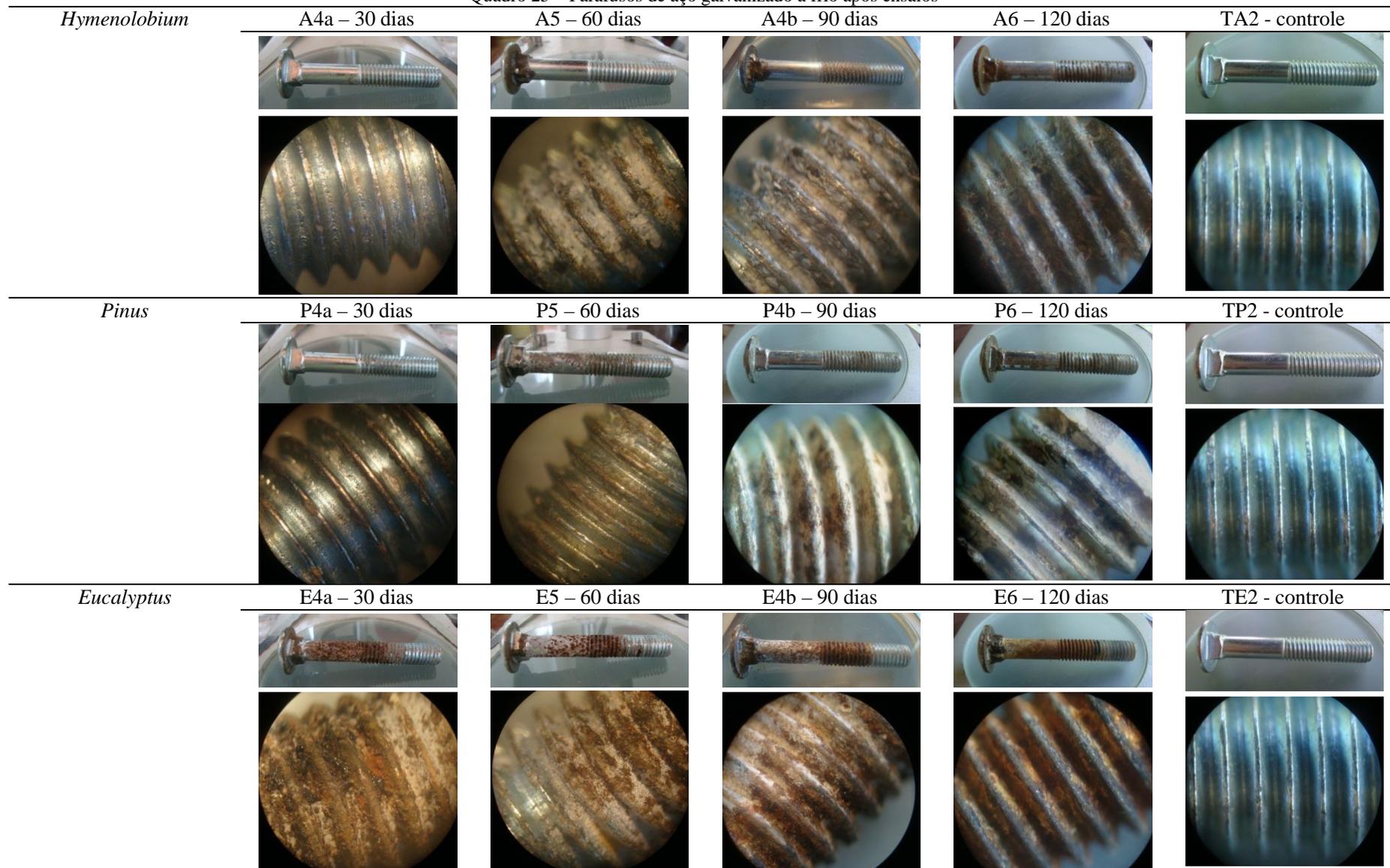


A – *Hymenolobium*; E – *Eucalyptus*; P – *Pinus*. Cada imagem apresenta um elemento metálico embutido em cada espécie de madeira, sendo o *Hymenolobium* à esquerda, *Eucalyptus* no centro e *Pinus* à direita, em todas as fotos.

O Quadro 25 apresenta um comparativo dos parafusos de aço galvanizado a frio nas três espécies de madeira analisadas.



Quadro 25 – Parafusos de aço galvanizado a frio após ensaios

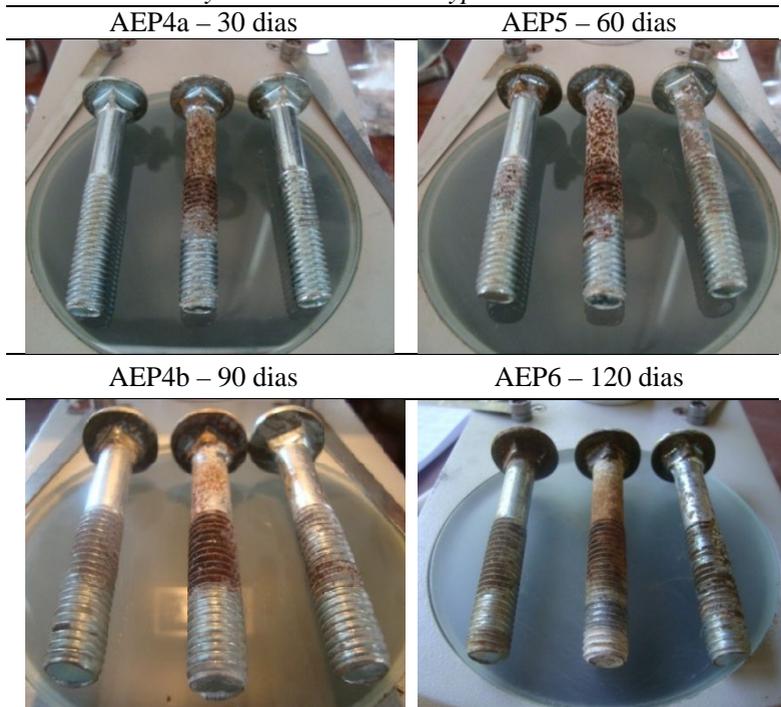




No Quadro 26 estão apresentadas as imagens comparativas dos parafusos de aço galvanizado a frio testados com diferentes espécies, seguindo a ordem *Hymenolobium* à esquerda, *Eucalyptus* ao centro e *Pinus* à direita, em todas as fotos. Visualmente, os parafusos de aço galvanizado a frio que estiveram em contato com o *Eucalyptus* parecem ter sofrido uma agressão mais evidente.

Quadro 26 – Parafusos de aço galvanizado a frio: comparativo entre espécies

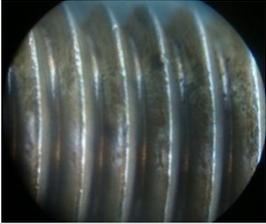
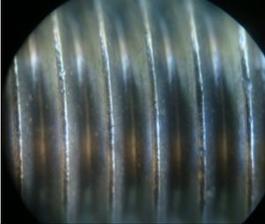
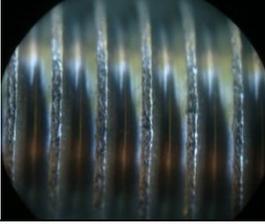
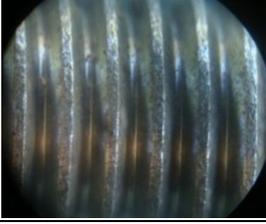
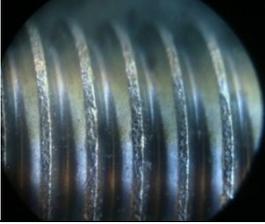
*Hymenolobium* – *Eucalyptus* – *Pinus*



A – *Hymenolobium*; E – *Eucalyptus*; P – *Pinus*. Cada imagem apresenta um elemento metálico embutido em cada espécie de madeira, sendo o *Hymenolobium* à esquerda, *Eucalyptus* no centro e *Pinus* à direita, em todas as fotos.

No Quadro 27, ao compararem-se os parafusos de aço inoxidável expostos durante 120 dias e de controle, com diferentes espécies de madeira, constata-se que visualmente não há diferenças superficiais entre eles.

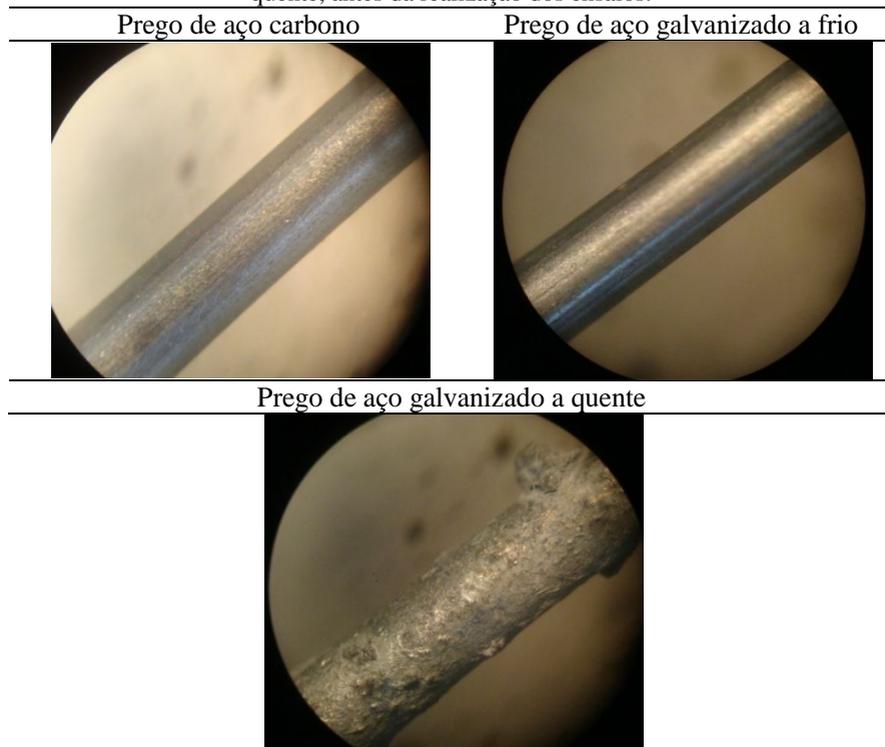
Quadro 27 – Parafusos de aço inoxidável após ensaios

<i>Hymenolobium</i>	A7 – 120 dias	TA3 – controle
		
		
<i>Pinus</i>	P7 – 120 dias	TP3 – controle
		
		
<i>Eucalyptus</i>	E7 – 120 dias	TE3 – controle
		
		

No Quadro 28 estão apresentadas as fotos ampliadas dos pregos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço galvanizado a quente, antes da realização dos ensaios. Observa-se que a superfície do prego galvanizado a

quente não é tão polida e é mais rugosa do que a superfície do prego galvanizado a frio, consequência do tratamento realizado no aço.

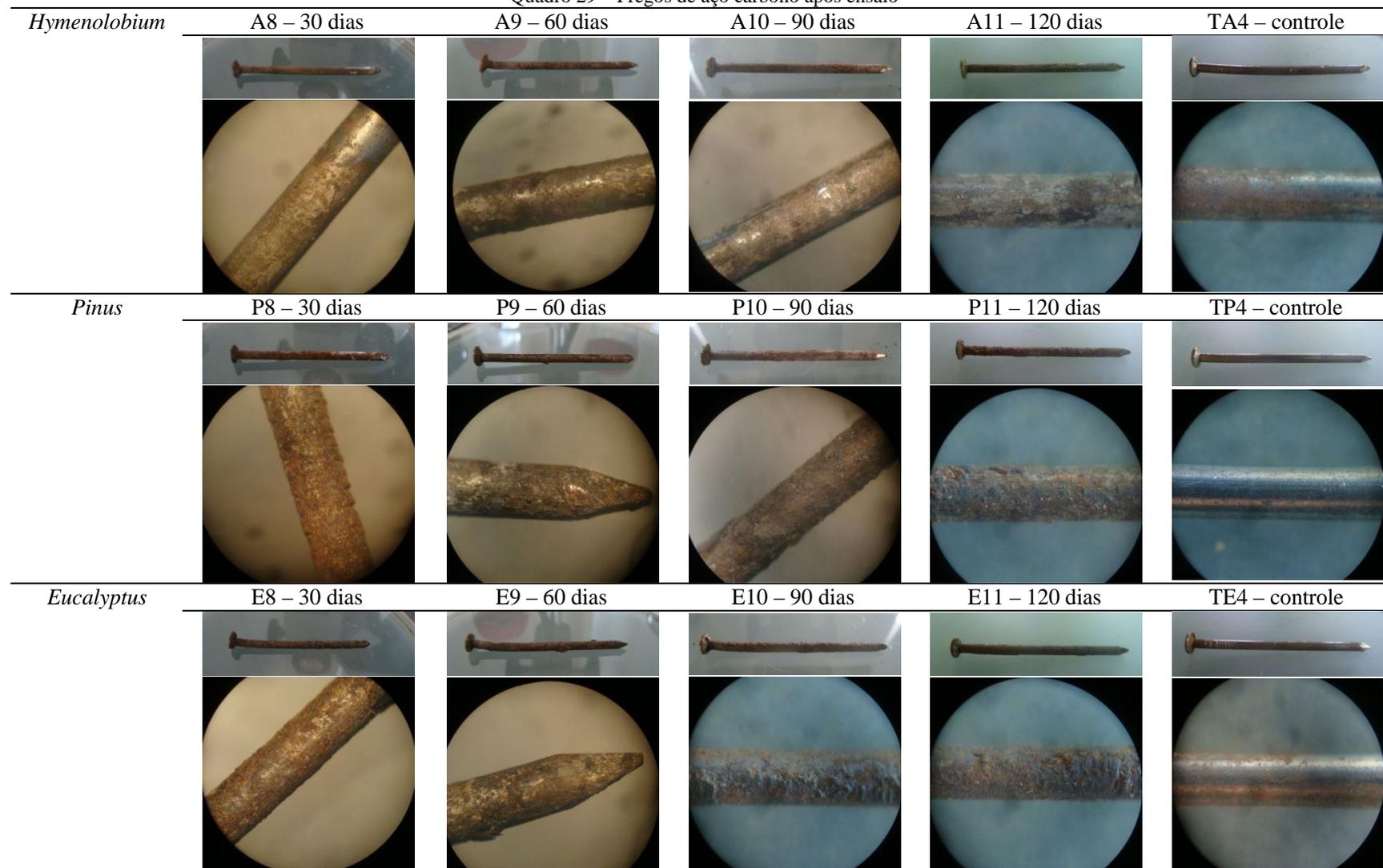
Quadro 28 – Pregos de aço carbono, aço galvanizado a frio e aço galvanizado a quente, antes da realização dos ensaios.



O Quadro 29 apresenta um comparativo visual dos pregos de aço carbono nas três espécies de madeira analisadas, com e sem exposição à atmosfera úmida saturada.



Quadro 29 – Pregos de aço carbono após ensaio

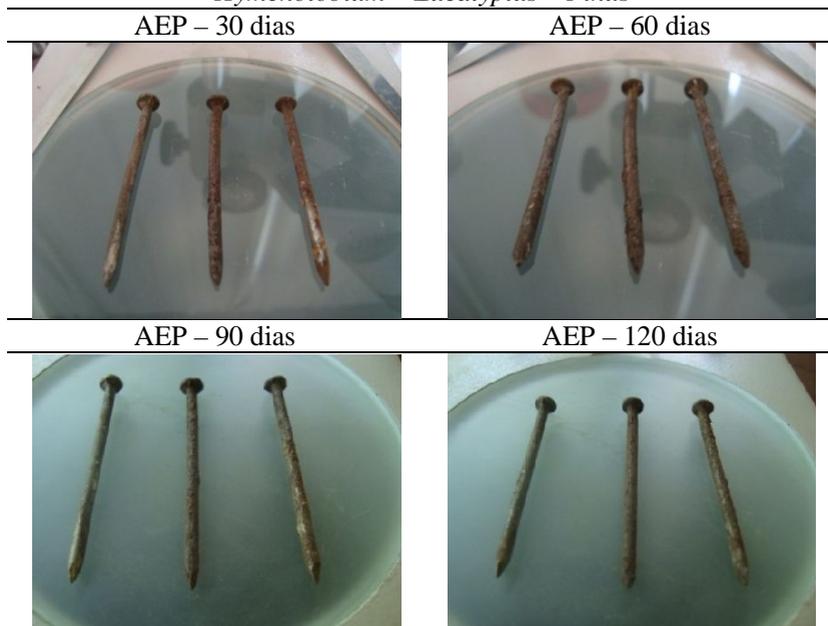




Na observação visual nas imagens ampliadas no Quadro 29, observa-se que a corrosão nos pregos de aço carbono embutidos no *Eucalyptus* é maior do que nos pregos de aço carbono embutidos no *Pinus*, que por sua vez é maior do que nos pregos embutidos no *Hymenolobium*. No entanto, no Quadro 30, que apresenta imagens não tão ampliadas quanto no Quadro 29, a comparação visual dos pregos de aço carbono nas três espécies de madeira não permite constatar a evidência de uma corrosão maior associada a uma das madeiras testadas.

Quadro 30 – Pregos de aço carbono: comparativo entre espécies

*Hymenolobium* – *Eucalyptus* – *Pinus*

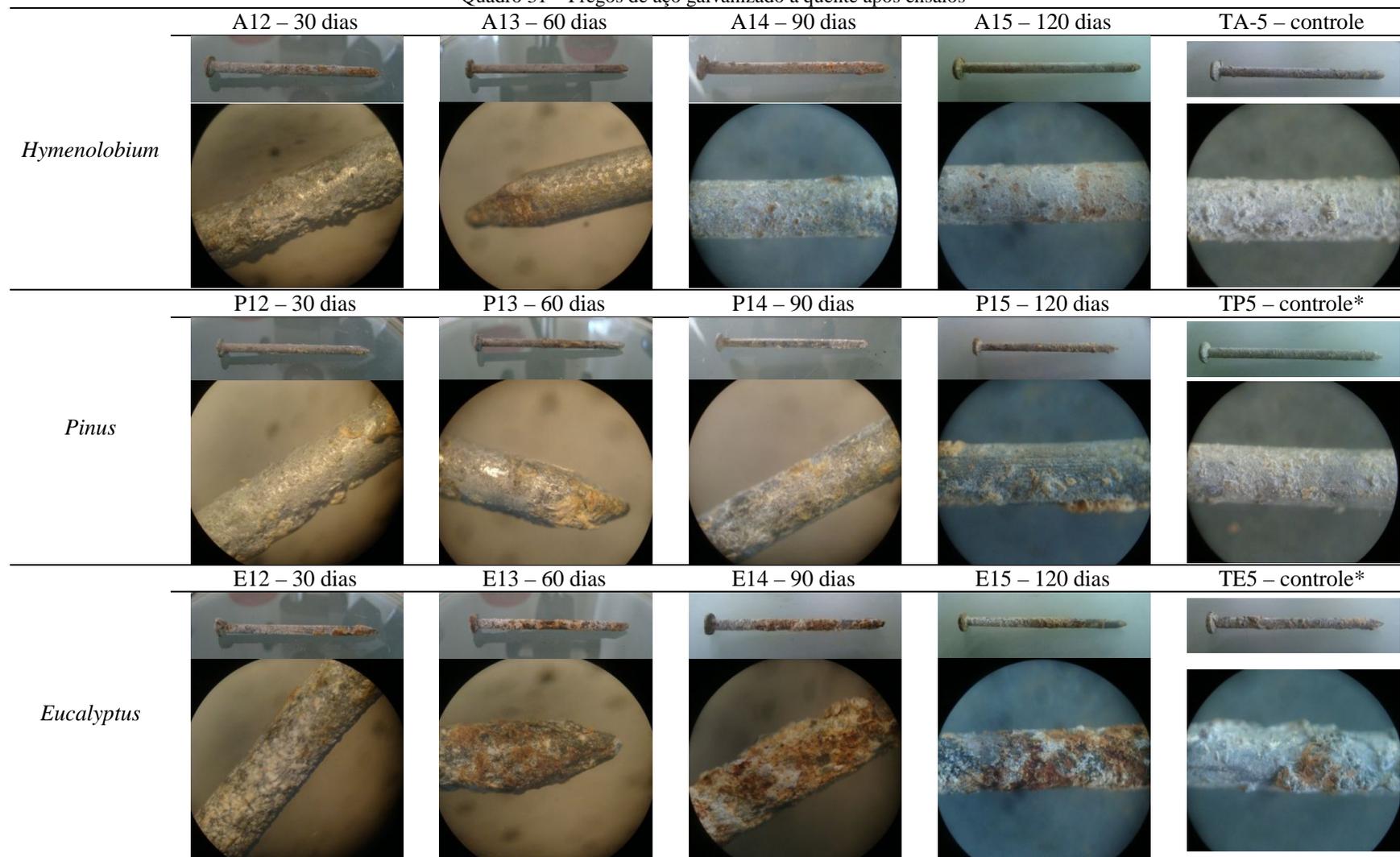


A – *Hymenolobium*; E – *Eucalyptus*; P – *Pinus*. Cada imagem apresenta um elemento metálico embutido em cada espécie de madeira, sendo o *Hymenolobium* à esquerda, *Eucalyptus* no centro e *Pinus* à direita, em todas as fotos.

O Quadro 31 apresenta um comparativo dos pregos de aço galvanizado a quente nas três espécies de madeira analisadas.



Quadro 31 – Pregos de aço galvanizado a quente após ensaios



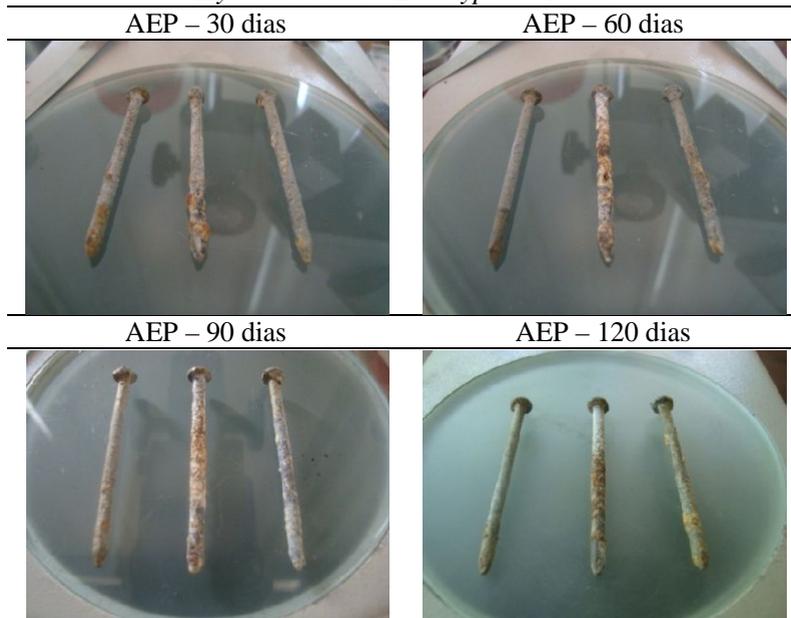
\*As manchas pardas nas fotos dos corpos de prova de controle de prego de aço galvanizado a quente que permaneceram em contato com o *Pinus* e o *Eucalyptus* são resíduos de madeira e não efeito do processo corrosivo.



Percebe-se, visualmente, no Quadro 31, que a agressão dos pregos de aço galvanizado a quente embutidos no *Eucalyptus* é maior do que nos pregos de aço galvanizado a quente embutidos no *Pinus*, que por sua vez é maior do que nos pregos embutidos no *Hymenolobium*. No Quadro 32, que apresenta as imagens de comparação dos pregos de aço galvanizado a quente nas três espécies de madeira, visualmente é possível constatar apenas a evidência de uma corrosão maior associada ao *Eucalyptus*, mas não há diferença significativa entre o *Hymenolobium* e o *Pinus*.

Quadro 32 – Pregos de aço galvanizado a quente: comparativo entre espécies

*Hymenolobium – Eucalyptus – Pinus*

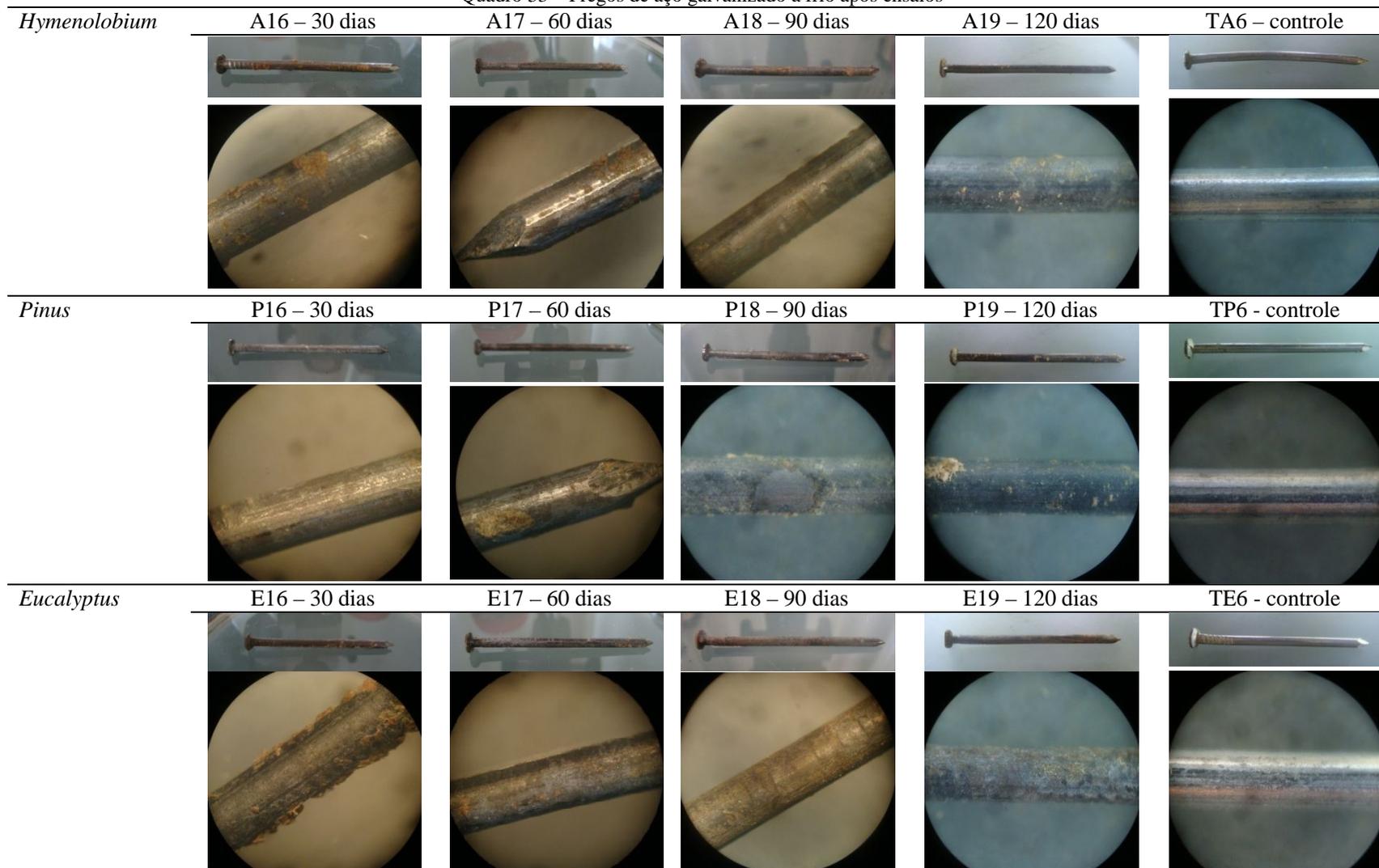


A – *Hymenolobium*; E – *Eucalyptus*; P – *Pinus*. Cada imagem apresenta um elemento metálico embutido em cada espécie de madeira, sendo o *Hymenolobium* à esquerda, *Eucalyptus* no centro e *Pinus* à direita em todas as fotos.

O Quadro 33 apresenta um comparativo dos pregos de aço galvanizado a frio nas três espécies de madeira analisadas.



Quadro 33 – Pregos de aço galvanizado a frio após ensaios

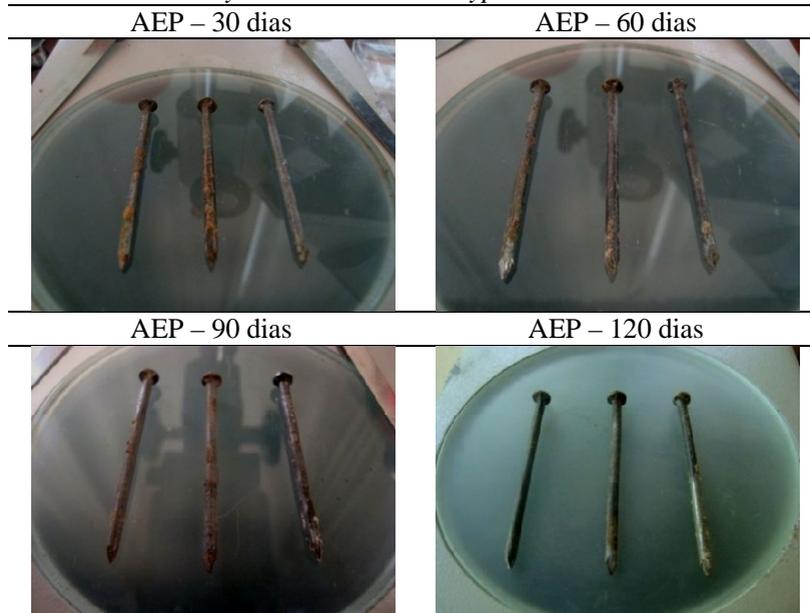




No Quadro 33 observa-se que até os 90 dias de ensaio, os pregos galvanizados a frio embutidos no *Hymenolobium* apresentavam um processo corrosivo mais avançado do que aqueles embutidos na madeira de *Pinus*. A análise visual também aponta para o fato de que o processo no *Eucalyptus* pode haver sido mais agressivo do que nas demais espécies de madeira.

As imagens contidas no Quadro 34 indicam que, aos 30 dias de ensaio, os elementos metálicos embutidos na madeira de *Eucalyptus* apresentaram um estado mais avançado de corrosão, quando comparado às demais espécies ensaiadas. Após esse período, visualmente não é mais possível perceber tal diferença entre as espécies de *Eucalyptus* e *Hymenolobium*.

Quadro 34 – Pregos de aço galvanizado a frio: comparativo entre espécies  
*Hymenolobium* – *Eucalyptus* – *Pinus*



A – *Hymenolobium*; E – *Eucalyptus*; P – *Pinus*. Cada imagem apresenta um elemento metálico embutido em cada espécie de madeira, sendo o *Hymenolobium* à esquerda, *Eucalyptus* no centro e *Pinus* à direita

Na Figura 49, verifica-se que os corpos de prova de *Eucalyptus* confeccionados com elementos de aço carbono apresentaram manchas escuras no entorno dos elementos metálicos, após 30 dias de exposição, comprometendo o aspecto estético da madeira. As manchas formadas na madeira de *Eucalyptus* possuem aspecto diferenciado daquelas formadas no *Hymenolobium* e *Pinus*. Estas últimas apresentam aspecto característico da ação de microorganismos, possivelmente fungos, cuja identificação não foi efetuada nesta pesquisa.

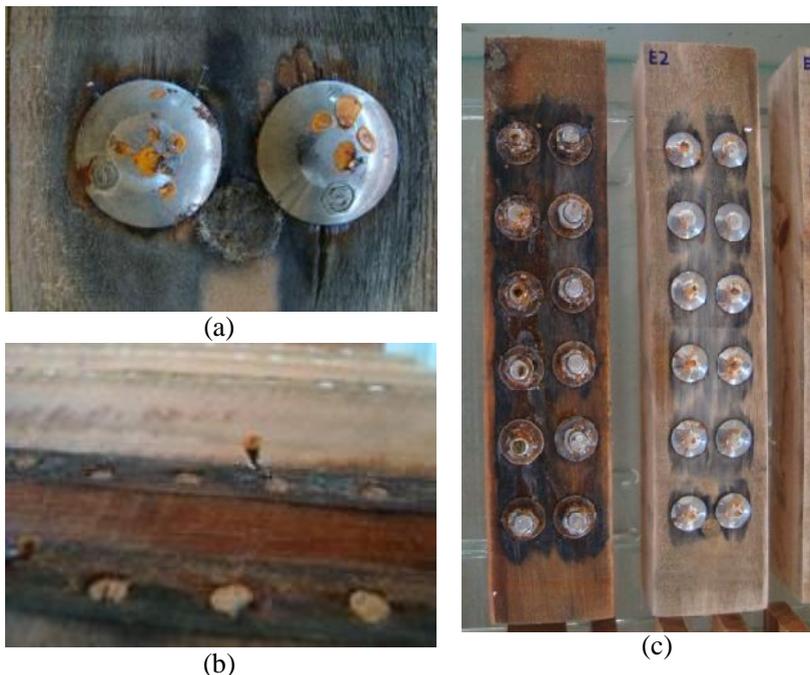


Figura 49 – Aspecto estético dos corpos de prova de *Eucalyptus* confeccionados com elementos de aço carbono.

- (a) detalhe dos parafusos (b) detalhe dos pregos (c) corpos de prova com parafusos

Essas manchas foram percebidas de forma mais evidente também no interior dos corpos de prova com pregos de aço carbono apenas para a madeira de *Eucalyptus*, como demonstra a Figura 50b.



(a)



(b)



(c)

Figura 50 – Aspecto interno dos corpos de prova, com pregos de aço carbono, embutidos nas três espécies de madeira.  
(a) *Hymenolobium* (b) *Eucalyptus* (c) *Pinus*

Os corpos de prova confeccionados com aço carbono e madeira de *Eucalyptus* apresentaram também, acúmulo de material sólido, provavelmente produtos de corrosão, semelhante à forma de estalactites, como demonstra a Figura 51.

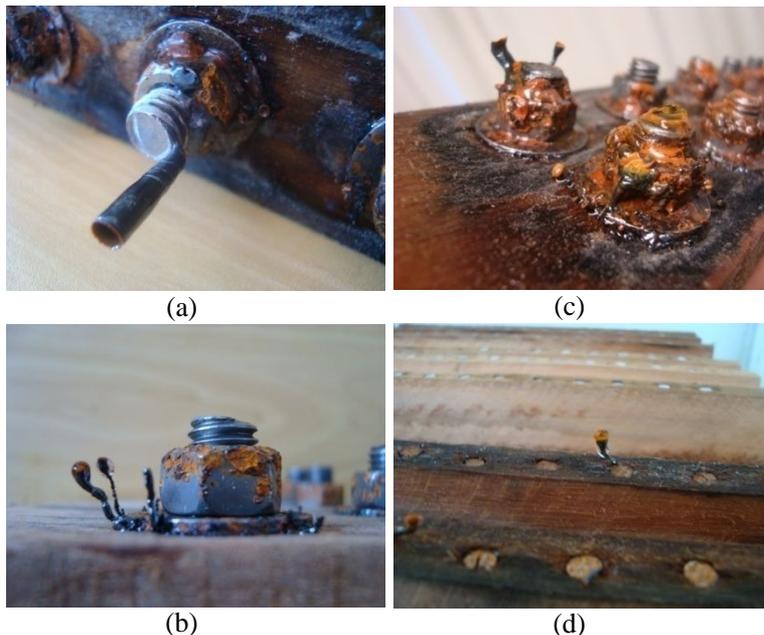


Figura 51 – Acúmulo de material sólido nos elementos de aço carbono embutidos na madeira de *Eucalyptus*. (a), (b), (c) parafusos (d) pregos

Estas manchas e formações diferenciadas não foram constatadas nos corpos de prova de *Eucalyptus* confeccionados com elementos de outro tipo de aço.

#### 4.7 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS DO FENÔMENO DE CORROSÃO

Os corpos de prova podem ser avaliados de duas formas: uma qualitativa, visual, e outra quantitativa, a partir das taxas de corrosão, por meio da medição da perda de massa. O método da perda de massa, conforme citado por Mello (2008), é válido para a corrosão uniforme e consiste na observação do comportamento de um corpo de prova metálico em função do tempo, pela determinação da perda de massa por unidade de superfície. Para fins de comparação, a corrosão foi considerada uniforme ao longo da superfície exposta ao ambiente saturado em todas as situações analisadas.

Os Quadros 35 a 40 apresentam comparativos entre as análises quantitativa e qualitativa realizadas.



Quadro 35 – Parafusos de aço carbono: grau de agressividade das madeiras

		<b>Análise Quantitativa</b>	<b>30 dias</b>	<b>60 dias</b>	<b>90 dias</b>	<b>120 dias</b>	<b>Controle</b>
Ordem de agressividade das espécies de madeira (Gráfico 9)	1°		<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus*</i>
	2°		<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus*</i>
	3°		<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium*</i>
	<b>Observações</b>		Há diferença significativa entre todas as médias	Não há diferença significativa entre as médias			
		<b>Análise Qualitativa</b>	<b>30 dias</b>	<b>60 dias</b>	<b>90 dias</b>	<b>120 dias</b>	<b>Controle</b>
Ordem de agressividade das espécies de madeira	1°		<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	-
	2°		-	-	-	-	-
	3°		-	-	-	-	-
	<b>Observações</b>		Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de madeira

\* A massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, não pôde ser determinada graficamente.

Com base na diferença significativa entre as médias de cada espécie, é possível afirmar que há uma diferenciação entre os comportamentos das três espécies analisadas. A ordem de agressividade indica a espécie de *Eucalyptus* como a que mais afetou o processo de corrosão de forma acelerada, tanto com base nos valores de perda de massa quanto na análise visual. Este resultado coincide com o previsto a partir dos valores estimados de classe de acidez das espécies estudadas sendo o *Eucalyptus* estimado com maior acidez e pH representativo de 3,5 e as madeiras duras e moles com pH representativo de 4,5 (NGUYEN et al, 2008).



Quadro 36 - Parafusos de aço galvanizado a frio: grau de agressividade das madeiras

	Análise Quantitativa	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle
Ordem de agressividade das espécies de madeira (Gráfico 11)	1°	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Pinus</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium*</i>
	2°	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus*</i>
	3°	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus*</i>
	<b>Observações</b>	Não há diferença significativa entre as espécies	Não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Não há diferença significativa entre as espécies	Não há diferença significativa entre as espécies	Não há diferença significativa entre as espécies
	Análise Qualitativa	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle
Ordem de agressividade das espécies de madeira	1°	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	-
	2°	-	-	-	-	-
	3°	-	-	-	-	-
	<b>Observações</b>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Hymenolobium</i> e o <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies

\* A massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, não pôde ser determinada graficamente.

O comportamento observado nos parafusos de aço galvanizado a frio, com base na diferença significativa entre as velocidades médias para cada espécie, não permite avaliar qual a madeira que maior agressividade apresenta nos ensaios realizados. A partir da análise visual dos elementos expostos, o *Eucalyptus* parece ser a espécie mais agressiva. Se considerarmos as dificuldades de remoção do produto de corrosão pelo método de decapagens sucessivas nos elementos de aço galvanizado, os valores de velocidade de corrosão podem não representar a realidade da perda de massa. Esse comportamento pode ser explicado pela presença de corrosão branca, que inferiu erros na determinação da taxa de corrosão. Com base nestas informações, a análise visual pode apresentar maior representatividade do fenômeno transcorrido nos parafusos de aço galvanizado a frio, indicando o *Eucalyptus* como a espécie mais agressiva.



Quadro 37 – Parafusos de aço inoxidável

	<b>Análise Quantitativa</b>	<b>120 dias</b>	<b>Controle</b>	<b>Análise Qualitativa</b>	<b>120 dias</b>	<b>Controle*</b>
Ordem de	1°	<i>Eucalyptus*</i>	<i>Pinus</i>	1°	-	-
agressividade	2°	<i>Pinus*</i>	<i>Eucalyptus</i>	2°	-	-
das espécies	3°	<i>Hymenolobium*</i>	<i>Hymenolobium</i>	3°	-	-
de madeira						
	<b>Observações</b>	Não há diferença significativa entre as médias	Não há diferença significativa entre as médias	<b>Observações</b>	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de madeira	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de madeira

\* A massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, não pôde ser determinada graficamente.

Os parafusos de aço inoxidável não apresentaram corrosão nos ensaios de exposição realizados neste trabalho. Sob o ponto de vista da análise quantitativa, não houve produto de corrosão suficiente para determinação da velocidade de corrosão ao fim dos 120 dias de exposição. Com base na análise visual, não se constatou processo de corrosão ao fim da exposição à atmosfera úmida saturada.

Logo, tanto a análise quantitativa quanto a análise visual convergem para os mesmos resultados, sendo que os parafusos de aço inoxidável apresentaram melhor durabilidade em relação a todos os outros tipos de aço testados neste trabalho.



Quadro 38 – Pregos de aço carbono: grau de agressividade das madeiras

		Análise Quantitativa	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle
Ordem de agressividade das espécies de madeira (Gráfico 10)	1°		<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>
	2°		<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus*</i>
	3°		<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium*</i>
	<b>Observações</b>		Há diferença significativa entre todas as médias	Não há diferença significativa entre as médias**			
		Análise Qualitativa	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle
Ordem de agressividade das espécies de madeira	1°		<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>
	2°		<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	-
	3°		<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	-
	<b>Observações</b>		Visualmente há diferença significativa entre todas as espécies de madeira	Visualmente há diferença significativa entre todas as espécies de madeira	Visualmente há diferença significativa entre todas as espécies de madeira	Visualmente há diferença significativa entre todas as espécies de madeira	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Eucalyptus</i>

\* A massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, não pôde ser determinada graficamente.

\*\* Os pregos de aço carbono embutidos nas madeiras de *Hymenolobium* e *Pinus* apresentaram ganho de massa, fato que pode ser atribuído ao início do processo corrosivo.

Nos pregos de aço carbono, a partir da análise quantitativa, observa-se que há diferença significativa entre todas as espécies de madeira para os elementos expostos à atmosfera saturada, com valores de velocidade de corrosão mais elevados predominantes no *Eucalyptus*. Esse fato pode ser atribuído à hidrólise da celulose e consequentes alterações no pH das madeiras. Destaca-se que, mesmo para os pregos do corpo de prova de controle, nos quais a madeira não se encontrava com alto teor de umidade, houve diferença significativa entre a perda de massa no *Eucalyptus* em relação às demais espécies, indicando uma maior agressividade do

*Eucalyptus*. Na análise visual, foi possível constatar diferença para todos os tempos de exposição entre todas as espécies de madeira testadas, exceto nos corpos de prova de controle. Em todas as imagens analisadas, o *Eucalyptus* apresentou maiores efeitos do processo de corrosão, seguido do *Pinus* e do *Hymenolobium*. Com base nos resultados da análise quantitativa e visual, é possível concluir que a madeira de *Eucalyptus* é a de maior agressividade para os pregos de aço carbono, seguida pela madeira de *Pinus* e, de menor agressividade, a madeira de *Hymenolobium*.



Quadro 39 – Pregos de aço galvanizado a frio: grau de agressividade das madeiras

		Análise Quantitativa	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle
Ordem de agressividade das espécies de madeira (Gráfico 12)	1°		<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Hymenolobium</i> *	<i>Eucalyptus</i> *	<i>Eucalyptus</i> *
	2°		<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i> *	<i>Hymenolobium</i> *	<i>Pinus</i> *
	3°		<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Pinus</i> *	<i>Pinus</i> *	<i>Hymenolobium</i> *
	<b>Observações</b>		Não há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Não há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Não há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Eucalyptus</i>	Não há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Eucalyptus</i>	Não há diferença significativa entre as médias**
		Análise Qualitativa	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle
Ordem de agressividade das espécies de madeira	1°		<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	-
	2°		<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	-
	3°		<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	-
	<b>Observações</b>		Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Eucalyptus</i> e o <i>Hymenolobium</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Eucalyptus</i> e o <i>Hymenolobium</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Eucalyptus</i> e o <i>Hymenolobium</i>	Visualmente não há diferença significativa entre o <i>Eucalyptus</i> e o <i>Hymenolobium</i>	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de madeira

\* A massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, não pôde ser determinada graficamente.

\*\* Os pregos de aço galvanizado embutidos nas madeiras de *Hymenolobium* e *Pinus* apresentaram ganho de massa, fato que pode ser atribuído à formação de depósito de hidróxidos e sais básicos de zinco.

O comportamento observado nos pregos de aço galvanizado a frio nos corpos de prova de controle não apresentou diferença significativa entre as diferentes espécies de madeira. O comportamento verificado nos pregos expostos à atmosfera úmida saturada apresentou maiores valores de velocidade de corrosão para o *Eucalyptus* aos 30 e 60 dias. No entanto, nas etapas de 90 e 120 dias, houve problemas na determinação da massa final. Estes problemas podem ter resultado em valores de velocidade irrealistas. A justificativa para tal comportamento pode haver sido a formação de depósitos de

hidróxidos e sais básicos de zinco que, a partir dos 60 dias de ensaio, devido às alterações do pH da madeira, pelo acréscimo de umidade, passaram a ser dissolvidos. Na análise visual, tanto os pregos embutidos no *Eucalyptus* quanto no *Hymenolobium* não apresentaram diferenças entre si, sendo constatada maior agressividade nestes do que naqueles embutidos no *Pinus*. Cruzando os resultados quantitativos e os da análise visual, suspeita-se de uma maior agressividade da espécie de *Eucalyptus* em relação às demais.



Quadro 40 – Pregos de aço galvanizado a quente: grau de agressividade das madeiras

		<b>Análise Quantitativa</b>	<b>30 dias</b>	<b>60 dias</b>	<b>90 dias</b>	<b>120 dias</b>	<b>Controle</b>
Ordem de agressividade das espécies de madeira (Gráfico 13)		1°	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus*</i>
		2°	<i>Pinus</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus*</i>
		3°	<i>Hymenolobium</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Hymenolobium</i>	<i>Hymenolobium*</i>
	<b>Observações</b>		Não há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Não há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Não há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Há diferença significativa entre todas as médias	Há diferença significativa entre as médias das espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Eucalyptus</i>
		<b>Análise Qualitativa</b>	<b>30 dias</b>	<b>60 dias</b>	<b>90 dias</b>	<b>120 dias</b>	<b>Controle</b>
Ordem de agressividade das espécies de madeira		1°	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus</i>
		2°	-	-	<i>Hymenolobium</i>	-	-
		3°	-	-	<i>Pinus</i>	-	-
	<b>Observações</b>		Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Visualmente há diferença significativa entre as espécies de madeira.	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>	Visualmente não há diferença significativa entre as espécies de <i>Hymenolobium</i> e <i>Pinus</i>

\* A massa final do corpo de prova, após a remoção dos produtos de corrosão, não pôde ser determinada graficamente.

O comportamento dos pregos galvanizados a quente nos corpos de prova de controle não apresentou diferença significativa entre as diferentes espécies de madeira. Na análise quantitativa, os pregos expostos à atmosfera úmida saturada embutidos no *Eucalyptus* apresentaram valores de velocidade mais elevados em comparação às demais espécies, sendo que o *Hymenolobium* e o *Pinus* tiveram comportamentos semelhantes entre si. Na análise visual dos pregos, foi constatado um processo de corrosão maior no *Eucalyptus* do que nas espécies de *Pinus* e de *Hymenolobium*, na maior parte das etapas (30, 60 e 120 dias). Aos 90 dias de exposição, os pregos embutidos na madeira de *Pinus*, visualmente apresentavam diferença significativa quando comparados à madeira de *Hymenolobium*. Nessa ocasião, os elementos embutidos no *Pinus* apresentavam o início da dissolução da camada de hidróxidos e sais básicos de zinco, que já não apareciam mais nos elementos embutidos no *Hymenolobium*.



#### 4.8 OUTRAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O EXPERIMENTO

Quanto ao método de ensaio utilizado na realização desta pesquisa, baseado na Norma NBR8095:1983, destacam-se as seguintes considerações:

a) as câmaras projetadas, assim como o sistema de aquecimento e controle de temperatura apresentaram bom desempenho, sem maiores dificuldades de manutenção;

b) nas quatro primeiras trocas semanais de água, foi possível perceber diferenças sensoriais entre o odor exalado pela água proveniente de cada uma das três câmaras, influência das diferentes espécies de madeiras em análise. A partir da quinta semana de ensaios, essa característica não foi mais percebida. Provavelmente, os extrativos foram liberados com maior intensidade à medida que aumentou o teor de umidade das madeiras até a condição saturada;

c) considerando que a NBR7190:1997 indica que as ligações com pregos devem ser, obrigatoriamente, pré-furadas, encontrou-se alguma dificuldade para se executar os furos exatamente na vertical devida à pequena espessura da madeira (10 mm) utilizada para a confecção de corpos de prova com pregos;

c) o método utilizado na remoção dos pregos dos corpos de prova de madeira mostrou-se adequado, sem prejuízo ao elemento metálico. No entanto, deve ser ressaltado que os pregos galvanizados a quente, devido à sua superfície rugosa, retiveram pequenos resíduos de madeira aderidos, de difícil remoção. Todas as avaliações incluíram o registro fotográfico dos elementos após retirados dos corpos de prova;

d) por fim, embora não haja uma recomendação explícita na norma específica, o processo de secagem, principalmente dos parafusos, deve ser feito através de aeração quente (secador) indicando-se uma temperatura e um tempo mínimo de ação.

Esta pesquisa totalizou 873 elementos metálicos analisados e submetidos ao método de decapagens sucessivas, tendo sido realizadas 256 imersões e secagens e, no mínimo, 7.857 pesagens, excluindo-se as repetições que foram realizadas sempre que necessário.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste item estão apresentadas as conclusões obtidas a partir das análises dos resultados dos ensaios de exposição acelerada a um ambiente de atmosfera úmida saturada, com o objetivo analisar o fenômeno da corrosão na interface metal/madeira, englobando diferentes elementos metálicos de ligação – pregos e parafusos – embutidos em diferentes espécies de madeira – *Hymenolobium petraeum*, *Pinus elioti* e *Eucalipto grandis*.

Quanto aos tipos de elementos metálicos ensaiados – parafuso e prego – pode-se observar que a diminuição da velocidade de corrosão nos parafusos de aço carbono foi maior entre os 30 e os 60 dias de exposição do que no mesmo período para os pregos do mesmo aço. Após os 60 dias, a variação da velocidade de corrosão nos parafusos é menor do que no período entre 30 e 60 dias, dando a entender que o fenômeno da corrosão nesses elementos foi mais agressivo no primeiro período de amostragem e depois tendeu à estabilização. Essa diferença pode ser atribuída à existência de maior folga entre os parafusos e a madeira, pois a pré-furação é feita com uma folga de até 0,5 mm antes da inserção do parafuso, enquanto nos pregos, como a pré-furação é menor que o diâmetro do elemento, há menor volume a ser ocupado pela água e pelo oxigênio, o que acelera o processo de corrosão nos parafusos. Na comparação do processo de corrosão entre parafusos e pregos de aço galvanizado a frio, observou-se que nos parafusos não ocorreu a formação da camada de proteção, constituída de hidróxidos e sais básicos de zinco, mas apenas de hidróxidos de zinco, solúvel e não protetora. O comportamento apresentado por esses elementos de ligação de aço galvanizado também pode ser explicado pela folga existente entre o parafuso e a madeira devida à pré-furação. Logo, os elementos do tipo parafuso podem estar sujeitos a um processo de corrosão mais acelerado em comparação aos pregos feitos do mesmo aço.

Quanto aos tipos de aço e de tratamento dos elementos metálicos ensaiados, as principais observações são:

a) os elementos metálicos de aço carbono, incluindo-se pregos e parafusos, apresentaram uma velocidade de corrosão mais elevada na primeira etapa, que sofreu uma diminuição ao longo do tempo de

exposição, dentro dos resultados esperados. As pequenas variações na diminuição da velocidade de corrosão de parafusos de aço carbono podem ser atribuídas ao tamanho das amostras, pois a quantidade de elementos de aço carbono analisados aos 30 e 90 dias, foi 50% menor que nas demais análises, aos 60 e 120 dias.

b) Os parafusos e pregos de aço galvanizado a frio submetidos ao processo de exposição à atmosfera saturada, apresentaram perda da camada protetora ao longo do ensaio. Nos parafusos, desde o início do processo corrosivo houve corrosão vermelha junto da corrosão branca, o que pode ter formado produtos de corrosão aderentes que não foram eliminados pelo método de decapagens sucessivas. Já os pregos apresentaram a formação de uma camada de proteção que se dissolveu com o passar do tempo, período variável de acordo com a espécie de madeira. Observou-se também que os pregos de aço galvanizado a frio perderam a camada de zinco (com brilho) ao longo do tempo, cujo período foi variável conforme o tipo de madeira na qual estavam embutidos. Embora os resultados não possam ser extrapolados para condições de serviço, podem servir de alerta para a influência da hidrólise da celulose, que também ocorre por processos naturais de envelhecimento, formando o ácido acético e causando redução do pH da madeira, tornando-a mais agressiva aos metais. No caso da umidade superficial do elemento metálico atingir, ocasionalmente ou permanentemente, um pH baixo, não haverá formação de hidróxido de zinco ou sais básicos.

c) Os pregos de aço galvanizado a quente apresentaram melhor comportamento que àquele observado nos pregos de aço galvanizado a frio. Embora as taxas de corrosão tenham sido maiores no caso do aço galvanizado a quente, aos 120 dias de ensaio, estes elementos ainda apresentavam material de sacrifício, enquanto os pregos de aço galvanizado a frio embutidos na madeira de *Eucalyptus*, por exemplo, já apresentavam corrosão do metal base. Esse resultado se deve, provavelmente, à maior espessura da camada de zinco resultante do processo de galvanização a quente.

d) Os parafusos de aço inoxidável apresentaram comportamento imune à umidade e às alterações químicas das diferentes espécies de madeira, no tempo de testes aplicado, demonstrando que, mesmo sob condições de arejamento deficiente e de permanência de água na sua superfície, houve formação de uma película fina, provavelmente de óxidos

de cromo hidratados, estável, aderente, impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais, proporcionando uma barreira protetora contra a corrosão.

Quanto à influência das espécies de madeira no processo de corrosão, as principais observações são:

a) os elementos metálicos foram submetidos a um ambiente de atmosfera úmida saturada, embutidos em três espécies de madeira diferentes: duas folhosa, o *Hymenolobium petraeum* e o *Eucalípto grandis* e uma conífera, o *Pinus elioti*. A madeira possui uma complexa estrutura química, responsável por sua considerável resistência à ação de solventes e de substâncias químicas que podem ter efeitos em alguns de seus componentes e não afetar seus demais constituintes. Ácidos voláteis e fenóis aromáticos, por exemplo, são citados com freqüência na literatura, como sendo fatores que afetam a corrosividade da madeira. Nesse sentido, face à complexidade da estrutura química da madeira e à dificuldade de encontrar respaldo nos Laboratórios especializados, a caracterização química das espécies ensaiadas ficou comprometida.

b) Com o exceção dos elementos de aço inoxidável, os demais elementos metálicos não demonstraram imunidade às diferenças atribuídas à hidrólise da celulose nas diferentes espécies de madeira. A análise quantitativa – com base na estatística descritiva – e, principalmente, a análise qualitativa apontam a espécie *Eucalyptus grandis* como sendo a madeira na qual os elementos metálicos sofreram alterações mais significativas ao serem submetidos ao processo de envelhecimento acelerado.

c) No caso dos elementos de aço carbono, a segunda espécie que apresentou alterações mais significativas foi o *Pinus Elliotti*, seguido do *Hymenolobium petraeum*. Já os elementos de aço galvanizado a frio ou a quente, no geral, não apresentaram diferenças significativas entre essas duas espécies.

d) Os registros fotográficos comprovam o prejuízo estético nos diferentes elementos metálicos de ligação embutidos nas três espécies de madeira. Os elementos de aço carbono embutidos na espécie *Eucalyptus grandis*, por exemplo, apresentaram o maior prejuízo estético, seguido da espécie *Hymenolobium petraeum*, coincidindo com a ordem de agressividade apresentada pelas taxas de corrosão de ambas as espécies. Outro comportamento importante verificado nos registros fotográficos é o

fato dos elementos de aço galvanizado apresentarem uma diferenciação no processo de corrosão. O processo corrosivo não era visível na porção externa do elemento que se encontrava em contato direto com a madeira, enquanto no interior dela o parafuso apresentava um avançado processo de oxidação, mascarando uma possível avaliação visual do processo de corrosão por meio de uma inspeção.

Como conclusão geral, com base nas condições aplicadas nesta pesquisa, pode-se dizer que os métodos de ensaio das Normas NBR8095:1983 e da NBR6210:2008 necessitam de complementação para que sejam aplicáveis a todos tipos de aço, sendo algumas sugestões apresentadas neste trabalho. Entre as três espécies de madeira selecionadas, a que apresentou maior agressividade nos ensaios realizados foi a de *Eucalyptus grandis*, coincidindo com a previsão feita com base nos referenciais teóricos. Nas comparações entre resultados de parafusos e pregos de mesmo aço, os primeiros apresentaram um processo inicialmente mais acelerado de corrosão, pelo espaço vazio entre a superfície do elemento e a madeira. Entre os diversos tipos de aços testados, sob as condições de ensaio aplicadas, o aço que obteve melhor desempenho foi o aço inoxidável, seguido do aço galvanizado a quente, do aço galvanizado a frio e do aço carbono, este último com o pior desempenho quanto à corrosão.

Como sugestão para futuros trabalhos cita-se a elaboração de ensaios de longa duração que possam ser correlacionados a resultados de campo, incluindo um estudo aprofundado do modelo proposto no Manual n.º 6, do Forest & Wood Products Australia (Nguyen et al, 2008) para resultados experimentais obtidos para condições brasileiras; o estabelecimento de uma convenção para determinação do pH das madeiras, pois nas pesquisas consultadas não é especificado qual método foi utilizado; o estudo de outras espécies de madeiras além das utilizadas neste trabalho; a realização de testes com diferentes dimensões de pregos e parafusos para verificar-se se a determinação da taxa de corrosão é independente deste parâmetro; e o estudo do processo de corrosão de metais em madeiras que passam por tratamento prévio, seja com produtos químicos ou com variação de temperatura (madeira termotratada).

## BIBLIOGRAFIA

### **Bibliografia Citada**

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 6209:2007 - Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Ensaio não-acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_, ABNT, NBR6210:2008 “Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos de prova em ensaios de corrosão.” Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR 6215:2011 Produtos Siderúrgicos – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR 7190:1997 “Projeto de Estruturas de Madeira.” Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR7414:2009 Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido por imersão a quente – Terminologia. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR 8095:1983 - Material metálico revestido e Não-revestido – Corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_, ABNT NBR10476:1998 – Revestimentos de Zinco Eletrodepositado sobre Ferro ou Aço. Rio de Janeiro, 1998.

ANG AHS, TANG WH. Probability concepts in engineering: emphasis on applications to civil and environmental engineering. John Wiley & Sons, 2006.

ARNI P. C., COCHRANE G. C., GRAY J. D., APPL.J. Chem. 1965, 15, 305.

ASTM. 2003a. Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. ASTM B-117-03. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM. 2003b. Standard test methods for mechanical fasteners in wood.

ASTM D1761-88. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

AWPA. 2004a. Standard method of determining corrosion of metal in contact with treated wood. AWPA E12-94. Selma, AL: American Wood Preservers' Association.

BAECHLER, R.H. 1939. Corrosion of metal fastenings in zincchloride treated wood after ten years. In: Proceedings of the annual meeting of the American Wood-Preservers' Association; 1939; Washington, DC. Bethesda, MD: American Wood-Preservers' Association: 35: 56–63.

BAECHLER, R.H. 1949. Corrosion of metal fastenings in zinc chloride-treated-wood after 20 years. In: Proceedings of the annual meeting of the American Wood-Preservers' Association; 1949; St. Louis, MO. Bethesda, MD: American Wood- Preservers' Association: 45: 381–397.

BAILEY, G.; SCHOFIELD, M.J. 1984. Corrosion of metal fastenings in CCA-treated timber—the corrosion science assessment. *Journal of Institute of Wood Science*. 10(1): 14–18.

BAKER, A.J. 1978. Corrosion of metal in wood products. In: Durability of building materials and components. Proceedings, First International Conference; 1978 Aug. 21–23; Ottawa, Canada. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

BAKER, A.J. 1992. Corrosion of nails in CCA and ACA treated wood in two environments. *Forest Products Journal*. 42(9): 39–41.

BAKER, A.J.; GJOVICK, L.R. 1977. Report on inspection of all weather wood foundations in Virginia and Minnesota. Unpublished rep. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

BENGELSDORF, M.F. 1983. Fastener corrosion in waterborne preservative-treated wood. Rep. PT80–1A. Tacoma, WA: American Plywood Association. 17 p.

BARTEL-KORNACKA, E. T. *Wood* 1967, 32, 39.

Boletín de información técnica AITIM (Asociación para La Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho) 1963 a 1968, nº 1 y 2.

BURGER, Luiza Maria; RICHTER, Hans Georg. Anatomia da madeira. São Paulo: Nobel, 1991. 154p. ISBN: 8521306695

CANEVA, Giulia; NUGARI, Maria Pia; SALVATORI, Ornella. Biology in the conservations of works of art. Rome: ICCROM, 1991.

CARRASCO, Gessonia Leite de Andrade. Preservação de artefatos ornamentais de ferro integrados à arquitetura - estudo de caso: cemitério do imigrante, Joinville, SC. Orientador: Sérgio Castello Branco Nappi. - Florianópolis, SC, 2009 133 f.: il., tabs. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

CASTRO MENDES, Paulo Miguel Ferreira. Ligações em estruturas de madeira tecnologia e dimensionamento de acordo com o eurocodigo 5. Dissertação de mestrado apresentada à faculdade de engenharia da Universidade do Porto, 1994.

<[http://biblioteca.universia.net/html\\_bura/ficha/params/title/liga%C3%A7%C3%B5es-em-estruturas-madeira-tecnologia-dimensionamento-acordo-com-eurocodigo-5/id/49351951.html](http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/liga%C3%A7%C3%B5es-em-estruturas-madeira-tecnologia-dimensionamento-acordo-com-eurocodigo-5/id/49351951.html)> acesso em 23/11/2010.

COLE, I.S., GANTHER, W.D. and LEOCESTER, R.H. (2001). Processes Controlling the Microclimate in Dwellings on the Eastern Seaboard of Australia. International Conference on Building Envelope, Ottawa, Canada, 26-29 June 2001.

COLE, I.S., GANTHER, W.D., BRADBURY, A., & O'BRIEN, D.J. (1996b). Performance of connectors in treated and untreated Radiata Pine exposed in different parts of the building envelope, 25th Forest Products Research Conference, Melbourne, Australia, November 18-21, 1996, pp. paper 2/23.

COLE, I.S., TRINIDAD, G.S., and CHAN, W.Y. (1999), Prediction of the impact of the environment on timber components: A GIS-based

approach, Proc. Durability of Building Materials and Components 8 (DBMC8), Ottawa, Canada.

COSTA, Alexandre Floriano da. Secagem e Preservação de Madeira, Departamento de engenharia florestal, Universidade de Brasília, 2003. PDF 29 P. Disponível em <[http://www.unb.br/ft/efl/arq\\_de\\_texto/prof\\_alexandre/als\\_secagem.pdf](http://www.unb.br/ft/efl/arq_de_texto/prof_alexandre/als_secagem.pdf)> Acesso em 12 jul 2003.

CRUZ, H. Patologia, avaliação, e conservação de estruturas de madeira, Santarém, Associação Portuguesa dos Municípios com Centro Histórico; 2001. Forum UNESCO Portugal. LNEC, Lisboa.

DOYLE, D.V. 1964. Performance of nails and bolts in fire-retardant-treated wood. Unpublished rep. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

FARMER, R.H; PORTER, R.C. 1962. The corrosion of metals in association with wood. Pt. 3: Corrosion of Aluminum in contact with wood. Wood. 28(12): 505–507.

FERREIRA, Jane Zoppas. Corrosão e proteção de materiais. (200-?) Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/48075966/Corrosao>> acesso em 10/10/2010.

FONTINHA, Rute. Prevenção da corrosão de componentes metálicos da construção. Apresentação no seminário: Materiais em Ambientes Marítimos. Funchal, Outubro de 2007. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

GANTHER, W. and NORBERG, P. (1996a). Estimation of the moisture condition of timber framework in Australian houses. Proceedings of 25th Forest Products Research Conference, CSIRO, Clayton, Australia, 18–21 November, Vol. 1: 10 pages.

GANTHER, W.D. and Cole I.S. (2002). Building envelope corrosion. Corrosion & Prevention, Australasian Corrosion Assoc. 42nd Annual Conf., Adelaide, South Australia, 10-13 November 2002.

GANTHER, W.D., COLE, I.S., and LECESTER, R.H. (2001). Measurement of microclimate in dwellings along the Australian Eastern

Seaboard. International Conference on Building Envelope, Ottawa, Canada, 26-29 June 2001.

GENTIL, V. Corrosão. 3ªed. Rev. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

GIOVANELLA, Rodrigo. Propriedades tecnológicas da madeira relacionadas com a preservação e restauração do patrimônio histórico. Disponível em:

<[http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/artigopreserva\\_\\_o2PDF.pdf](http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/artigopreserva__o2PDF.pdf)> acesso em 19/10/2010.

GÓMEZ ACOSTA, José M. y D. López Martínez. 2002. Tecnología arquitectónica hasta la revolución científica: arte y estructura de las grandes construcciones. Robert Mark, ed. Revisión de la traducción: Juan Calatrava. Madrid: Akal.

GRAHAM, R.D.; WILSON, M.M.; OTENG-AMOAKO, A. 1976. Wood-metal corrosion. An annotated survey. Res. Bull. 21. Corvallis, OR: Forest Research Laboratory, Oregon State University. 34 p.

Interações e Transformações: Química – Ensino médio: Livro do aluno: Guia do professor / GEPEC. 6.ed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. ISBN: 85-314-0127-5.

JIMÉNEZ, Milagrosa Borrallo. Evolución histórica del uso de elementos metálicos en la construcción con madera. In FERNANDÉZ, Santiago Huerta. Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 27-29/01/2005. Ed.: Instituto Juan de Herrera, Madrid. ISBN: 84-9728-149-7

JONES, D.A. 1996. Principles and prevention of corrosion, 2nd ed. Saddle River, NJ: Prentice Hall. 572 p.

KEAR, G. et al, 2006. 'The Corrosion of Metallic Fastener Materials in Untreated, CCA-, CuAz-, and ACQ-based Timbers', BRANZ Study Report No. SR 153. BRANZ Ltd, Judgeford, New Zealand.

KLOCK, Humberto et al. Química da Madeira. 3ª Ed. Curitiba, 2005. Universidade Federal do Paraná.

LOFERSKI, Joseph R. Technologies for wood preservation. in *Historic Preservation*. Department of Wood Science, Virginia Polytechnic Institute, USA. *Archives and Museum Informatics* 13: 273–290, 1999/2001. © 2001 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. DOI: 10.1023/A:1012468326445

MARAGNO, A. S. Sistematização das causas de patologias em madeiramento estrutural de coberturas em edificações antigas. Universidade Federal Fluminense Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Niterói, RJ, 2003, 200p.

MELCHERS, R.E.; JEFFREY, R, Early corrosion of mild steel in seawater *Corrosion Science*.47 (2005)1678-1693.

MELLO, Alexandre Galvão Brasileiro. Influência da Deformação Plástica na Corrosão de Aço Carbono, Aço Inoxidável e Cobre em Sistemas de Resfriamento / Alexandre Galvão Brasileiro de Mello. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008. xv, 79f.: il

MOHEN, Jean Pierre. Histoire de la Métallurgie Pré-Industrielle. In: VOLFOVSKY, Claude (Org.). *La conservation des métaux*. Paris:CNRS Editions, 2001. 295p.

NGUYEN, et al (2008) Manual No. 6: Embedded corrosion of fasteners in timber structures. CSIRO Sustainable Ecosystems, available online at Forest & Wood Products Australia website: [www.fwpa.com.au](http://www.fwpa.com.au). <[www.timber.org.au/resources/ManualNo6-EmbeddedCorrosion.pdf](http://www.timber.org.au/resources/ManualNo6-EmbeddedCorrosion.pdf)> acesso em: 20/10/2010

PADARATZ, Ivo J. Notas de aula. Disciplina: Patologia das edificações. PPECV/ UFSC, 2009.

PALLADIO, A. [1570] 1968. I quattro libri dell'architettura, libroquarto, 20, 73–74 y lámina 77. Reedición de Milán.

PANNONI, Fabio Domingos. Princípios da Galvanização a Fogo. Artigo Técnico. [S.l.: s.n., 19--]. Disponível em: <<http://www.ztec.ind.br/pdf/principios/principios.pdf>>. Acesso em 09 de fev. 2012.

RESENDE, Adriano C. et al. Influência da temperatura na taxa de corrosão do aço carbono ASTM A36 em meio contendo CO<sub>2</sub>. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em <sec.s bq.org.br/cdrom/34ra/resumos/T3460-1.pdf> Acesso em 24 jan.2012

RICHOLSON, J.M. 1959. Establishment of trend curves for the corrosivity of five common shipbuilding woods to five classes of metal wood screws. Lab Project 5090-3, Pt. 4; Final Rep. NS 032-001. Brooklyn, NY: Material Laboratory, New York Naval Shipyard. 46 p.

RUDDICK, J.N.R. 1987. Corrosion of metals in contact with preservative treated wood. In: Proceedings, AmericanWood-Preservers' Association Technical Committee Meeting. September 1987. Selma, AL: American Wood Preservers' Association. 23 p.

SCHOLTEN, J.A. 1965. Effect of various preservative treatments on field boxes on nail holding. Res. Paper FPL-42. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 8 p.

SELWYN, Lyndsie. Metals and corrosion: a handbook for the conservations professional. Ottawa: Canadian Conservation Institute, 2004. 223 p.

SERPA, Fabíola Bristot. Caracterização das principais espécies de madeira utilizadas em estruturas de telhado comercialmente disponíveis na Grande Florianópolis quanto à durabilidade. Novembro de 2009. Trabalho apresentado na disciplina ECV 4319 UFSC.

SIAU, J.F. (1995) Wood: Influence of moisture on physical properties. Dept of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995, 227 pages.

SICA, Yuri Cleverthon. Mapeamento da Corrosividade Atmosférica de São Luís – MA e a Correlação das Variáveis Ambientais que Influenciaram na Degradação dos Materiais Metálicos. 145p. Dissertação (mestrado). UFPR. Curitiba, 2006.

SIMM, D.W.; BUTTON, H.E. 1985a. Corrosion behaviour of certain materials in CCA-treated timber. Environmental tests at 100% relative humidity. Corrosion Prevention & Control. 32(2): 25–35.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomas. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. 1ed. São Paulo: Pini, 1998

SUCHSLAND, O.; WOODSON, G. E. Fiberboard manufacturing practices in the United States. Madison: Forest Products Research Society, 1991.

SZÜCS, Carlos Alberto. Usando as madeiras com tecnologia e consciência ambiental, 2002. Notas de aula. Grupo Interdisciplinar de Estudo da Madeira GIEM/UFSC.

TAYLOR, George. La madera. Barcelona: Editorial Blume, 1980. Tradução de Concepcion Rigau do original: The International Book of Wood. Michell Beazley - Publishers Limited, Londres, 1978. 275P, p. 19

TEREZO, Rodrigo Figueiredo. Propriedades mecânicas de madeiras utilizadas em estruturas históricas e contemporâneas estimadas por meio de ultra-som. Orientadora: Ângela do Valle. Florianópolis, SC, 2004 120 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC.

VALLE, Ângela do. Deterioração de madeiras em edificações, 2006. Notas de aula. Grupo Interdisciplinar de Estudo da Madeira GIEM/UFSC.

VALLE, Ângela do. et al. Estruturas de madeira. Florianópolis, Agosto de 2007. Apostila Didática. Departamento de Engenharia Civil. Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina.

VERGÉS, G. R.; Estudo do desempenho de sistemas de pintura para materiais das redes de distribuição de energia elétrica situadas em regiões litorâneas. Curitiba, 2005. 213 p. Dissertação (mestrado) – PIPE, Universidade Federal do Paraná.

WALLIN, T. 1971. Corrosion of fasteners in treated wood. Sixth Scandinavian Corrosion Congress; 1949; Gothenburg, Sweden. 13 p.

WINKELMANN H., BADISCH E., ILO S., EGLSAER S., Mater. Corros. 2009, 60, 192.

ZELINKA, S., RAMMER, D. 2005. Review of test methods used to determine the corrosion rate of metals in contact with treated wood. Gen. Tech. Rep. FPL-156. Madison, WI: U.S.D.A. Forest Service, Forest Products Laboratory.

ZELINKA, S., STONE, D. S. 2010. The effect of tannins and pH on the corrosion of steel in wood extracts. Materials and Corrosion 2010, 61, No. 9999. DOI: 10.1002/maco. 201005845.

### **Bibliografia Pesquisada**

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 14643:2001 - Corrosão atmosférica - Classificação da corrosividade de atmosferas.

ACKER, J. Van et al. Biological durability of wood in relation to end-use. European Journal Of Wood And Wood Products, Springer Berlin/Heidelberg, pp.35-45, 01/02/2003. ISSN 0018-3768

ARRIAGA, Francisco; ESTEBAN, Miguel. Protección de la madera mediante el diseño constructivo. Boletín de información técnica [de] AITIM, n.214, pp31. ISSN 0044-9261

CARVALHO, Walter et al. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. Quím. Nova [online]. 2009, vol.32, n.8, pp. 2191-2195. ISSN 0100-4042. doi: 10.1590/S0100-40422009000800033.

FARIA, J. A. Reabilitação de estruturas de madeira. Palestra proferida nas 2as Jornadas de Engenharia Civil do Instituto Politécnico da Guarda – 12 e 13 de Maio de 2004.

GARCÍA, María Dolores Gayo. Metodología de análisis químico para el estudio de materiales. Bienes culturales: revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español, n.2, pp.169-174. ISSN 1695-9698

GONZAGA, A. L. Madeira: uso e conservação. Brasília - Distrito Federal. Cadernos Técnicos; 6. IPHAN/Monumenta, 2006. 246 p: il.

GONZÁLEZ, Elena; LEAL, Joaquina. Comportamiento de consolidantes de metales sometidos a envejecimiento acelerado. Bienes Culturales: revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español, n.8, pp.223-232, 2008. ISSN 1695-9698

GOODELL, Barry ; Nicholas, Darrel D. ; Schultz, Tor P. Introduction to wood deterioration and preservation, In wood deterioration and preservation; Goodell, B., et al.; ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 2003. DOI: 10.1021

HELLMEISTER, J. C. Sobre a determinação de características físicas da madeira. São Carlos, 1973, 161p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1973.

IPT. Manual Biodeterioração de madeiras em edificações. Ed. IPT, São Paulo, 2001.

IPT. Manual de preservação de madeiras, volumes 1 e 2. Ed. IPT, São Paulo, 1986.

NGUYEN, et al (2008a) Manual No. 5: Atmospheric corrosion of fasteners in timber structures. CSIRO Sustainable Ecosystems, availableonline at Forest & Wood Products Australia website: [www.fwpa.com.au](http://www.fwpa.com.au). <[www.timber.org.au/resources/ManualNo5-AtmosphericCorrosion.pdf](http://www.timber.org.au/resources/ManualNo5-AtmosphericCorrosion.pdf)> acesso em: 20/10/2010

NUMAZAWA, Camila Thiemy Dias. Arquitetura japonesa no Pará: Estudo de caso em edificações com técnica construtiva que favoreceu uma maior durabilidade da arquitetura em madeira no município de Tomé-Açu. Orientadora: Ângela do Valle. - Florianópolis, SC, 2009 99 f.: il., tabs., grafs., mapas, plantas. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

OLIVEIRA, Elbio S., VALLE, Ângela do. Diagnóstico e formulação de guia de referência tecnológico para sistemas construtivos com componentes em madeira. 2008. Relatório final de atividades PIBIC/CNPq. UFSC.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. Tecnologia da Conservação e Restauração: Materiais e Estruturas – Roteiros de Estudos. 18ª Edição. Salvador: Mestrado em Arquitetura e Urbanismo da UFBA/PNUD/UNESCO, 1995. 144p. cap. VII, p. 65.

OLIVEIRA, Mário Mendonça. Tecnologia da conservação e da restauração: materiais e estruturas. 3. ed. Salvador: EDUFBA-PPGAU, 2006.

PETRUCCI, Eládio G. R. Materiais de construção. 2 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1976. 435 p. cap. 3, p. 125.

PFEIL, Walter. Estruturas de madeira. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e Científicos Editora SA, 1994. cap. 1, p.7.

PFEIL, Walter. PFEIL, Michèle. Estruturas de aço: dimensionamento prático. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

RODRIGO, Nieves Valentin. Análisis de biodeterioro. Infestaciones y su erradicación Bienes culturales: revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español, n.2, pp.175-186, 2003. ISSN 1695-9698

SANCHEZ, Andres Abasolo, et al. Evolucion histórica de las estructuras leñosas. La madera como material constructivo estructural. In: Alfonso de Aguila Garcia. Curso de patologia: Conservación y restauración de edificios. 2. ed. Universidade Politécnica de Madri. COAM – Colégio oficial de arquitetos de Madri. Madri: Graf Cinco SA, 1993. 138p. V. 2 , cap. 14, p. 7-88.

SÁNCHEZ, Andrés Abásolo. Evolucion histórica de las estructuras leñosas. La madera como material constructivo estructural . cap. 14. In: GARCIA, Alfonso Del Aguila et al. Curso de Patologia: Conservación y restauración de edificios. 2. ed. Madri: Ed. Graf Cinco S.A., 1993. 138 p., 2V., p. 38.

TELES, Carlos D. de Melo, VALLE, Ângela do, TEREZO, Rodrigo. Estruturas de madeira: ferramentas para inspeção e conservação. XI Congresso Da ABRACOR. Rio de Janeiro, RJ, 2002.

VALLE, Ângela do. Características da madeira, 2003. Notas de aula. Grupo Interdisciplinar de Estudo da Madeira GIEM/UFSC.

VALLE, Ângela do. Fenômenos patológicos em construções de madeira, 2009. Notas de aula. Grupo Interdisciplinar de Estudo da Madeira GIEM/UFSC.

VALLE, Ângela do. Origem das anomalias nas construções em madeira, 2005. Notas de aula. Grupo Interdisciplinar de Estudo da Madeira GIEM/UFSC.

VALLE, Ângela do. Técnicas não destrutivas para avaliação de estruturas de madeira em serviço, 2002. Notas de aula. Grupo Interdisciplinar de Estudo da Madeira GIEM/UFSC.

VALLE, Ângela Do; TEREZO, Rodrigo Figueredo; TELES, C. D. M. . Uso de técnicas não destrutivas no diagnóstico de patologias em estruturas de madeira. E-Mat (Porto Alegre), v. 01, p. 148-157, 2004.

XUELIANG, Wang; WEILIAN, Qu. Reliability-based service life prediction of an ancient timber structure. Management and Service Science, 2009. MASS '09. International Conference on Wuhan, China, pp. 35-45. DOI 10.1109/ICMSS.2009.5302282

- ANEXOS -



## ANEXO A – Informações Sobre Madeiras: Angelim Pedra

### Angelim-pedra

**Nome científico:** *Hymenolobium petraeum* Ducke, Leguminosae.

Observação: nesta ficha são apresentadas informações para a espécie *H. petraeum*, no entanto existem outras espécies de *Hymenolobium*, como *H. complicatum* Ducke, *H. elatum* Ducke, *H. excelsum* Ducke, *H. heterocarpum* Ducke, *H. modestum* Ducke, que são comercializadas no Brasil como angelim-pedra.

**Outros nomes populares:** angelim, angelim-amarelo, angelim-da-mata, angelim-do-pará, angelim-macho, mirarema.

**Nomes internacionais:** angelim-pedra (Espanha; Estados Unidos; França; Grã Bretanha; Itália), erejoerde, lialiadan koleroe, saandoe (Suriname), sapupira amarela (ATIBT,1982), St. Martin Gris (Guiana Francesa).

### Ocorrência:

Brasil: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Outros países: Guiana, Guiana Francesa, Suriname.



Face Tangencial

Face Radial

Fotomacrografia (10x)

### CARACTERÍSTICAS GERAIS

**Características sensoriais:** cerne e alborno distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado claro ou escuro, com manchas castanhas mais escuras devido à exudação de óleo-resina, alborno castanho-pálido; brilho ausente; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade média; dura ao corte; grã direita a revessa; textura grossa, aspecto fibroso.

### Descrição anatômica macroscópica:

Parênquima axial: visível a olho nu, paratraqueal aliforme, confluyente em trechos longos tendendo a formar faixas largas.

Raios: visíveis a olho nu no topo e na face tangencial na qual sua estratificação (2 a 3 por mm) é regular; finos.

Vasos: visíveis a olho nu, médios a grandes; poucos; porosidade difusa; solitários, múltiplos, às vezes em cadeias radiais; vazios ou com substância esbranquiçada.

Camadas de crescimento: distintas, individualizadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras.

Fonte: (IPT,1983)

Observação: informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.

### DURABILIDADE / TRATAMENTO

**Durabilidade natural:** Madeira durável a muito durável em relação a fungos apodrecedores; moderadamente resistente a brocas marinhas e resistente a cupins-de-madeira-seca.

(IBAMA,1997a; SUDAM/IPT,1981)

**Tratabilidade:** o cerne é difícil de preservar e o alburno é muito fácil de preservar, em processo sob pressão, tanto com creosoto (oleossolúvel) como CCA (hidrossolúvel). (IBAMA,1997a)

Observação: informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.

### CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO

**Trabalhabilidade:** a madeira de angelim-pedra é fácil de ser trabalhada. Acabamento de regular a bom na plaina, torno e broca. (IBAMA,1997a) É moderadamente fácil de serrar e aplinar; é fácil de pregar, parafusar e permite acabamento satisfatório. (INPA,1991)

**Secagem:** a secagem é muito rápida em estufa, apresentando pequena tendência a torcimento e arqueamento. (IBAMA,1997a) A secagem ao ar livre é moderadamente difícil. (Jankowsky,1990)

Programas de secagem podem ser obtidos em (IBAMA,1997a; Jankowsky,1990)

Observação: informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.

### PROPRIEDADES FÍSICAS

**Densidade de massa (r):**

Aparente a 12% de umidade ( $r_{ap, 12}$ ): 710 kg/m<sup>3</sup>

Madeira verde ( $r_{verde}$ ): 1190 kg/m<sup>3</sup>

Básica ( $r_{básica}$ ): 590 kg/m<sup>3</sup>

**Contração:**

Radial: 4,1 %

Tangencial: 6,3 %

Volumétrica: 10,1 %

Resultados obtidos de acordo com a Norma COPANT.

Fonte: (IBAMA,1997a)

Observação: informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.Para comparar esses valores de contração ( $C_{COPANT}$ ) com aqueles obtidos pela Norma ABNT ( $C_{ABNT}$ ) é necessário transformá-los usando a equação:  $C_{ABNT} = C_{COPANT} / (1 - C_{COPANT} / 100)$ .**PROPRIEDADES MECÂNICAS****Flexão:**Resistência ( $f_M$ ):

Madeira verde: 70,6 MPa

Madeira a 12% de umidade: 109,3 MPa

Módulo de elasticidade - Madeira verde: 9414 MPa

Módulo de elasticidade - Madeira a 12%: 11572 MPa

Resultados obtidos de acordo com a Norma COPANT.

Fonte:

Observação: Informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.**Compressão paralela às fibras:**Resistência ( $f_{c0}$ ):

Madeira verde: 38,0 MPa

Madeira a 12% de umidade: 52,3 MPa

**Compressão perpendicular às fibras:**Resistência ( $f_{c0}$ ):

Madeira verde: 6,4 MPa

Madeira a 12% de umidade: 11,3 MPa

Resultados obtidos de acordo com a Norma COPANT.

Fonte: (IBAMA,1997a)

Observação: informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.**Outras propriedades:**

Resistência ao impacto na flexão - Madeira a 15% (choque): 22,6

Trabalho absorvido: 22,6

Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

Observação: Informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.

Cisalhamento - Madeira verde: 10,0 MPa

Cisalhamento - Madeira a 12%: 12,3 MPa

Dureza janka paralela - Madeira verde: 5325 N

Dureza janka paralela - Madeira a 12%: 7659 N

Dureza janka transversal - Madeira verde: 5050 N

Dureza janka transversal - Madeira a 12%: 5786 N

Tração normal às fibras - Madeira verde: 4,2 MPa

Tração normal às fibras - Madeira a 12%: 3,8 MPa

Resultados obtidos de acordo com a Norma COPANT.

Fonte: (IBAMA,1997a)

Observação: Informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.

Fendilhamento - Madeira verde: 1,1 MPa

Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

Observação: Informações para a espécie *Hymenolobium petraeum* Ducke.

Fonte: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=8](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=8)>

## ANEXO B – Informações Sobre Madeiras: Pinus Eliote

### Pinus-eliote

**Nome científico:** *Pinus elliottii* Engelm., Pinaceae.

Observação: Madeira de reflorestamento.

**Outros nomes populares:** pinheiro, pinheiro-americano, pinus.

**Nomes internacionais:** slash pine, southern pine (BSI,1991), southern yellow pine.

### Ocorrência:

Brasil: Amapá, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo.

Outros países: Estados Unidos.

Observação: Espécie Introduzida no Brasil.



Face Tangencial

Face Radial

Fotomicrografia (10x)

### CARACTERÍSTICAS GERAIS

**Características sensoriais:** cerne e alburno indistintos pela cor, branco-amarelado, brilho moderado; cheiro e gosto distintos e característicos (resina), agradável; densidade baixa; macia ao corte; grã direita; textura fina.

### Descrição anatômica macroscópica:

Parênquima axial: invisível mesmo sob lente.

Raios: visíveis apenas sob lente no topo, na face tangencial é invisível mesmo sob lente.

Camadas de crescimento: distintas; transição brusca entre o lenho inicial e o tardio.

Canais de resina: visíveis sob lente; em disposição axial e radial.

## DURABILIDADE / TRATAMENTO

**Durabilidade natural:** observações feitas pelo IPT complementadas por ensaios de laboratório, permitem considerar esta Madeira como susceptível ao ataque de fungos (emboloradores, manchadores e apodrecedores), cupins, brocas-de-Madeira e perfuradores marinhos.

**Tratabilidade:** o pinus elioti é fácil de tratar. (IPT,1989b)

## CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO

**Trabalhabilidade:** a Madeira de pinus-elioti é fácil de ser trabalhada. É fácil de desdobrar, aplainar, desenrolar, lixar, tornejar, furar, fixar, colar e permite bom acabamento. (IPT,1989b)

**Secagem:** a Madeira é fácil de secar. (IPT,1989b)

## PROPRIEDADES FÍSICAS

### Densidade de massa (r):

Aparente a 15% de umidade ( $r_{ap, 15}$ ): 480 kg/m<sup>3</sup>

Básica ( $r_{básica}$ ): 400 kg/m<sup>3</sup>

### Contração:

Radial: 3,4 %

Tangencial: 6,3 %

Volumétrica: 10,5 %

Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

## PROPRIEDADES MECÂNICAS

### Flexão:

Resistência ( $f_M$ ):

Madeira verde: 48,0 MPa

Madeira a 15% de umidade: 69,6 MPa

Limite de proporcionalidade - Madeira verde: 19,7 MPa

Módulo de elasticidade - Madeira verde: 6463 MPa

Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

### Compressão paralela às fibras:

Resistência ( $f_{c0}$ ):

Madeira verde: 18,5 MPa

Madeira a 15% de umidade: 31,5 MPa

Coefficiente de influência de umidade: 6,7 %

Limite de proporcionalidade - Madeira verde: 13,7 MPa

Módulo de elasticidade - Madeira verde: 8846 MPa

Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

**Outras propriedades:**

Resistência ao impacto na flexão - Madeira a 15% (choque): 14,5

Cisalhamento - Madeira verde: 5,8 MPa

Dureza janka paralela - Madeira verde: 1932 N

Tração normal às fibras - Madeira verde: 3,0 MPa

Fendilhamento - Madeira verde: 0,4 MPa

Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

Fonte: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=7](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7)



## ANEXO C – Informações Sobre Madeiras: Eucalipto Grandis

### Eucalipto-grandis

**Nome científico:** *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden., Myrtaceae.

Observação: Madeira de reflorestamento

**Outros nomes populares:** eucalipto.

**Nomes internacionais:** eucalipto grandis (Costa Rica), flooded gum, rose gum (Austrália), toobur.

### Ocorrência:

Brasil: Amapá, Bahia, Espírito Santo, Góias, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo.

Outros países: África do Sul, Congo, Malauí, Nigéria, Nova Zelândia, Quênia, Zaire, Zimbábue.



Face Tangencial

Face Radial

Fotomicrografia (10x)

## CARACTERÍSTICAS GERAIS

**Características sensoriais:** cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho-rosado-claro, alburno bege-rosado; pouco brilho; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade baixa; macia ao corte; grã direita; textura fina a média.

### Descrição anatômica macroscópica:

Parênquima axial: indistinto mesmo sob lente, paratraqueal vasicêntrico escasso.

Raios: visíveis apenas sob lente no topo, finos.

Vasos: visíveis a olho nu, pequenos a médios; poucos; porosidade difusa; arranjo diagonal; solitários; obstruídos por tilos.

Camadas de crescimento: distintas, individualizadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras.

Fonte: (Angyalossy-Alfonso,1987)

## DURABILIDADE / TRATAMENTO

**Durabilidade natural:** madeira considerada com moderada durabilidade aos fungos apodrecedores e cupins (Silva,2001) e com baixa durabilidade aos fungos de podridão mole e cupins-de-solo (*Nasutitermes* sp.).

**Tratabilidade:** o cerne é difícil de ser tratado, entretanto, o alburno é permeável.

## CARACTERÍSTICAS DE PROCESSAMENTO

**Trabalhabilidade:** Madeira excelente para serraria, no entanto, requer o uso de técnicas apropriadas de desdobro para minimizar os efeitos das tensões de crescimento. Apresenta boas características de aplainamento, lixamento, torneamento, furação e acabamento. (IPT,1997)

**Secagem:** em geral, as madeiras de espécies de eucalipto são consideradas como difíceis de secar, podendo ocorrer defeitos como colapso, empenamentos e rachas. A secagem em estufa deve ser feita de acordo com programas suaves, combinando, por exemplo, baixas temperaturas com altas umidades relativas. É recomendável a secagem ao ar, ou o uso de pré-secador, antes da secagem em estufa.

Programa de secagem pode ser obtido em (Silva,2001)

## PROPRIEDADES FÍSICAS

### Densidade de massa ( $\rho$ ):

Aparente a 15% de umidade ( $\rho_{ap, 15}$ ): 500 kg/m<sup>3</sup>

Básica ( $\rho_{básica}$ ): 420 kg/m<sup>3</sup>

### Contração:

Radial: 5,3 %

Tangencial: 8,7 %

Volumétrica: 15,7 %

Resultados foram obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

## PROPRIEDADES MECÂNICAS

### Flexão:

Resistência ( $f_M$ ):

Madeira verde: 53,8 MPa

Madeira a 15% de umidade: 75,6 MPa

Módulo de elasticidade - Madeira verde: 9689 MPa

Resultados foram obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

**Compressão paralela às fibras:**

Resistência ( $f_{c0}$ ):

Madeira verde: 26,3 MPa

Madeira a 15% de umidade: 42,1 MPa

Limite de proporcionalidade - Madeira verde: 19,7 MPa

Módulo de elasticidade - Madeira verde: 11572 MPa

Resultados foram obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

**Outras propriedades:** • Dureza janka paralela - Madeira verde: 2687 N

Resultado obtido de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Fonte: (IPT,1989b)

Fonte:< [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=13](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=13)>