Campus de São Carlos

**Método para Avaliação da Durabilidade
e da Reabilitação da Madeira de
Estruturas em Serviço**

Janaina Anadia Ortiz de Campos

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ÁREA INTERUNIDADES EM
"CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS"**

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

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DA
REABILITAÇÃO DA MADEIRA DE ESTRUTURAS EM
SERVIÇO**

Janaina Anadia Ortiz de Campos

Dissertação apresentada à Área Interunidades
em Ciência e Engenharia de Materiais,
para obtenção do título de Mestre
em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036896

São Carlos
2002

Class.	TESE
Cutt.	1108
Tombo	T0081/02

25.1437368

Campos, Janaina Anadia Ortiz de

"Método para avaliação da durabilidade e da reabilitação da madeira de estruturas em serviço"/ Janaina Anadia Ortiz de Campos - São Carlos, 2002

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2002 - páginas: 99

Área Interunidades: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

1.: Durabilidade, 2. Madeira, 3. Reabilitação

I. Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 - São Carlos-SP – Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

e-mail: wladerez@if.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JANAINA ANADIA ORTIZ DE CAMPOS, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 18-02-2002.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. ALMIR SALES (Orientador e Presidente) – UFSCar

Prof. Dr. MAURO AUGUSTO DEMARZO – UNICAMP

Prof. Dr. Antonio Alves Dias – EESC-USP

8

1 3

2

3

4

5

6

7

8

9

Dedicatória:

Aos meus pais, Luiz Gonzaga e Maria Inês

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador, Almir Sales, pela dedicação e amizade.

Aos meus pais, Luiz Gonzaga e Maria Inês, pela paciência e confiança.

Aos meus irmãos, Joseane e Plácido, pelo incentivo.

Aos professores, técnicos e funcionários do LaMEM, pelos auxílios prestados.

Aos colegas do LaMEM e amigos, pelo companheirismo.

Aos meus amigos de Santo Antônio de Posse e de Holambra.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	i
Lista de tabelas.....	iii
Lista de símbolos.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Objetivos do trabalho.....	02
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	03
2.1 Variabilidade e durabilidade naturais da madeira.....	03
2.2 Fatores que influem na durabilidade da madeira.....	05
2.2.1 Condições de exposição.....	06
2.2.2 Preservação de madeiras.....	13
2.2.2.1 Preservativos oleosos e oleossolúveis.....	14
2.2.2.2 Preservativos hidrossolúveis.....	15
2.2.2.3 Sistemas preservativos.....	16
2.2.3 Detalhes de projeto.....	19
2.3 Avaliação da durabilidade da madeira por meio de métodos não destrutivos.....	21
2.3.1 Avaliação visual.....	23
2.3.2 Avaliação por meio de técnicas de ultra-som.....	24
2.3.3 Técnica para obtenção do teor de umidade por meio de medidores elétricos.....	26
2.4 Reabilitação dos elementos de madeira em estruturas.....	27
2.4.1 Manutenção corretiva devido a presença de deterioração inicial.....	29
2.4.2 Manutenção corretiva e tardia devido a presença de deterioração severa.....	31
2.4.2.1 Sistema tradicional.....	32

2.4.2.2	Reparos mecânicos.....	32
2.4.2.3	Reparos adesivos.....	34
2.4.2.4	Reforço com fibras sintéticas.....	35
2.5	Considerações finais.....	35
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	Requisitos para a elaboração do método para a avaliação da durabilidade e reabilitação de madeiras em estruturas.....	37
3.2	Avaliação da durabilidade de elementos de madeira em serviço....	40
3.2.1	Escolha e descrição da estrutura de madeira avaliada.....	40
3.2.2	Definição e descrição dos elementos de madeira avaliados.....	41
3.2.3	Classificação visual.....	43
3.3	Verificação do uso de ensaios não destrutivos na avaliação da durabilidade da madeira em estruturas.....	44
3.3.1	Ensaio de campo.....	45
3.3.2	Ensaio de laboratório.....	47
3.3.2.1	Confecção e codificação dos corpos-de-prova.....	48
3.3.2.2	Determinação do teor de umidade (U%).....	50
3.3.2.3	Determinação da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$).....	51
3.3.2.4	Determinação da resistência à compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade (f_{c0} e E_{c0}).....	51
3.3.2.5	Determinação do módulo de elasticidade na flexão estática (E_M).....	51
3.3.2.6	Determinação do coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}).....	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1	Método para a avaliação da durabilidade e reabilitação de madeiras em estruturas.....	53
4.1.1	Proposição de um sistema de classes de risco para madeiras brasileiras.....	53

4.1.2	Diagrama causa-efeito englobando as causas que afetam a durabilidade da madeira.....	55
4.1.3	Método para a avaliação da durabilidade de madeiras em estruturas.....	57
4.1.4	Método para a reabilitação da madeira em estruturas.....	64
4.2	Avaliação da durabilidade e reabilitação de elementos de madeira em serviço.....	68
4.2.1	Exemplo de aplicação do método - 01.....	68
4.2.2	Exemplo de aplicação do método - 02.....	73
4.2.3	Exemplo de aplicação do método - 03.....	78
4.2.4	Exemplo de aplicação do método a grupos de elementos da passarela pênsil.....	82
4.3	Verificação do uso de ensaios não destrutivos na avaliação da durabilidade da madeira em estruturas.....	85
4.3.1	Determinação dos teores de umidade nas tábuas do tabuleiro.....	85
4.3.2	Utilização da técnica de ultra-som para determinação do C_{LL} em tábuas do tabuleiro.....	88
4.3.3	Ensaio complementares de laboratório.....	90
4.3.4	Comparações entre os resultados obtidos em campo e os ensaios complementares em laboratório.....	91
5.	CONCLUSÕES.....	93
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

Lista de figuras

Figura 01:	Modelo do diagrama Causa – Efeito.....	38
Figura 02:	Símbolos utilizados em modelos organizacionais.....	38
Figura 03:	Modelos de fluxogramas.....	39
Figura 04:	Vista frontal da passarela pênsil localizada em Piracicaba.....	41
Figura 05:	Vista geral da passarela pênsil que faz a ligação entre a Rua do Porto e o Engenho Central na cidade de Piracicaba, interior de São Paulo.....	41
Figura 06:	Vista em planta do tabuleiro que apresenta suas tábuas constituintes sobrepostas.....	43
Figura 07:	Definição dos três trechos para análise do tabuleiro.....	44
Figura 08:	Marcação das tábuas investigadas com o uso de um marcador metálico.....	45
Figura 09:	Utilização do equipamento DIGISYSTEM – Medidor de umidade para madeiras DL 2000.....	46
Figura 10:	Equipamento SYLVATEST utilizado para obtenção do coeficiente da matriz de rigidez das peças de madeira em serviço....	46
Figura 11:	Posicionamento dos transdutores do equipamento SYLVATEST nas extremidades de uma das tábuas investigadas em campo.....	47
Figura 12:	Realização de leituras de tempo que permitiram a determinação do coeficiente da matriz de rigidez das tábuas em serviço.....	47
Figura 13:	Esquema do procedimento adotado na confecção dos corpos-de-prova.....	50
Figura 14:	Realização de ensaio para determinação do módulo de elasticidade na flexão estática.....	51
Figura 15:	Posicionamento dos transdutores e visualização dos três pontos analisados.....	52
Figura 16:	Diagrama causa - efeito referente aos fatores (causas) que afetam a durabilidade da madeira (efeito).....	56

Figura 17: Fluxograma A (Classes de risco).....	61
Figura 18: “Fluxograma B” (Durabilidade).....	62
Figura 19: “Fluxograma C” (Durabilidade).....	63
Figura 20: Possíveis ações perante o comprometimento da durabilidade (efeito).....	64
Figura 21: “Fluxograma B1” (Reabilitação).....	65
Figura 22: “Fluxograma B2” (Reabilitação).....	65
Figura 23: “Fluxograma C1” (Reabilitação).....	65
Figura 24: “Fluxograma C2” (Reabilitação).....	66
Figura 25: “Fluxograma C3” (Reabilitação).....	67
Figura 26: Elemento avaliado no exemplo 01.....	68
Figura 27: Aplicação do “Fluxograma A” ao exemplo 01.....	70
Figura 28: Aplicação do “Fluxograma C” ao exemplo 01.....	71
Figura 29: Aplicação do “Fluxograma C3” ao exemplo 01.....	72
Figura 30: Elemento avaliado no exemplo 02.....	73
Figura 31: Aplicação do “Fluxograma A” ao exemplo 02.....	75
Figura 32: Aplicação do “Fluxograma C” ao exemplo 02.....	76
Figura 33: Aplicação do “Fluxograma C3” ao exemplo 02.....	77
Figura 34: Elemento avaliado no exemplo 03.....	78
Figura 35: Aplicação do “Fluxograma A” ao exemplo 03.....	80
Figura 36: Aplicação do “Fluxograma C” ao exemplo 03.....	81
Figura 37: Aplicação do “Fluxograma C1” ao exemplo 03.....	82
Figura 38: Tábuas superiores do tabuleiro da passarela pênsil.....	83
Figura 39: Tábuas inferiores do tabuleiro da passarela pênsil.....	83
Figura 40: Cavilhas do tabuleiro da passarela pênsil.....	83
Figura 41: Ligações da passarela pênsil.....	84
Figura 42: Atribuição dos níveis de comprometimento (alto, mediano e baixo) da durabilidade para grupos de elementos.....	84
Figura 43: Mapeamento dos teores de umidade nos três trechos do tabuleiro.....	87
Figura 44: Aplicação do “Fluxograma C1” ao grupo de elementos pertencentes às tábuas superiores do tabuleiro.....	88

Lista de tabelas

Tabela I:	Descrições sucintas das classes de risco elaboradas e utilizadas em alguns continentes e países.....	07
Tabela II:	Descrições sucintas das classes de risco elaboradas e utilizadas na Austrália e Japão.....	08
Tabela III:	Descrição sucinta do sistema unificado de classes de risco proposto por Ducatti.....	10
Tabela IV:	Causas e efeitos causados na madeira devido ao intemperismo..	12
Tabela V:	Formulações de composições químicas do preservativo CCA....	15
Tabela VI:	Composição química do preservativo CCB.....	16
Tabela VII:	Codificação dos corpos-de-prova para realização da experimentação.....	49
Tabela VIII:	Descrição do sistema de classes de risco proposto.....	54
Tabela IX:	Etapas e atividades envolvidas na avaliação da durabilidade da madeira em estruturas.....	59
Tabela X:	Análise do elemento avaliado no exemplo 01.....	69
Tabela XI:	Análise do elemento avaliado no exemplo 02.....	73
Tabela XII:	Análise do elemento avaliado no exemplo 03.....	78
Tabela XIII:	Valores dos teores de umidade nas tábuas superiores do tabuleiro.....	85
Tabela XIV:	Valores médios, máximos e mínimos dos teores de umidade para algumas tábuas do tabuleiro.....	87
Tabela XV:	Valores obtidos com o equipamento de ultra-som.....	89
Tabela XVI:	Valores médios, máximos e mínimos de C_{LL} para algumas tábuas do tabuleiro.....	89
Tabela XVII:	Valores dos teores de umidade e densidade obtidos nos ensaios com <i>Eucalypto tereticornis</i>	90

Tabela XVIII:	Valores de resistência à compressão paralela às fibras e respectivos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios com <i>Eucalypto tereticornis</i>	91
Tabela XIX:	Valores médios, máximos e mínimos dos resultados obtidos em laboratório para o <i>Eucalypto tereticornis</i>	92

Lista de símbolos

MOR – módulo de ruptura

MOE – módulo de elasticidade

C_{LL} – coeficiente da matriz de rigidez

ρ - densidade da madeira

v – velocidade da onda longitudinal

d – distância entre os transdutores

t – tempo de propagação da onda

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras

E_{c0} – módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras

$\rho_{ap(12\%)}$ – densidade aparente a um teor de umidade de 12%

U_{eq} – teor de umidade de equilíbrio

U – teor de umidade

E_M – módulo de elasticidade na flexão estática

m_i - massa inicial

m_s - massa seca

L – comprimento da peça

λ - comprimento de onda

U_1 – teores de umidade no trecho 1

U_2 – teores de umidade no trecho 2

U_3 – teores de umidade no trecho 3

RESUMO

No presente trabalho propõem-se um método para a avaliação da durabilidade e reabilitação da madeira presente em estruturas em serviço. Inicialmente, desenvolve-se um diagrama causa-efeito que permite a organização de informações, possibilitando a identificação das possíveis causas que comprometem a durabilidade da madeira. Também descrevem-se as etapas necessárias para a avaliação da durabilidade da estrutura investigada. A síntese destas etapas e o diagrama causa-efeito propostos permitiram a elaboração de fluxogramas visando a avaliação da durabilidade da madeira em estruturas. Para indicar o tipo de manutenção necessária em função do comprometimento da durabilidade, adotam-se os níveis: baixo, mediano e alto. Com base nos conhecimentos reunidos na revisão de literatura são propostos outros fluxogramas que apresentam os principais procedimentos utilizados na reabilitação da madeira em estruturas. Com o intuito de representar os elementos de madeira em serviço no contexto da metodologia desenvolvida, realiza-se um estudo de caso no qual a estrutura investigada é uma passarela pênsil localizada sobre o Rio Piracicaba. Desta forma, foi possível adequar o método proposto e verificar a viabilidade do uso de técnicas de ultra-som na avaliação da durabilidade de elementos de madeira.

ABSTRACT

A method is proposed to evaluate the durability and rehabilitation of wood used in service structures. A cause and effect diagram was drawn up to organize information and allow the possible wood durability-reduction factors to be identified. A description is also given of the phases required to assess the structure's durability. Flowcharts are presented to evaluate the durability of structural wood based on the synthesis of these phases and the proposed cause and effect diagram. A description is also given of the phases required to assess the durability of the structure investigated. A synthesis of these phases and the cause and effect diagram are used to draw up flowcharts to assess the durability of wood in structures. The classifications "low", "medium" and "high" are used to indicate the type of maintenance needed according to the extent to which the wood's durability has been affected. Based on knowledge extracted from the literature, other flowcharts are proposed containing the main procedures employed in the restoration of structural wood. In order to represent wooden elements in service within the context of the methodology developed here, a case study is made of a wooden suspension bridge over the Piracicaba river. This case study allowed for adjustments to be made in the proposed method and the feasibility of using ultrasound techniques to be verified in the evaluation of the durability of wooden elements.

1. INTRODUÇÃO

Entre os materiais utilizados em estruturas para a construção civil, a madeira é o que apresenta maior variabilidade em suas características físicas e mecânicas. Além disso, a madeira apodrece, queima e se deteriora sob a ação dos agentes físico-químicos e biológicos. Por outro lado, o conhecimento das propriedades físico-mecânicas da madeira aliado à definição das condições de exposição, pode conferir às estruturas de madeira desempenho e durabilidade que a tornam competitiva frente aos demais materiais estruturais.

Os problemas de durabilidade associados à construção de madeira podem ser mais discutidos usando exemplos de deterioração, identificando seus agentes e as condições de uso consideradas mais críticas.

A durabilidade de peças estruturais de madeira pode ser avaliada por meio de métodos não destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos-de-prova, uma vez que a avaliação é feita nos próprios elementos estruturais. Muitas técnicas podem ser enquadradas como avaliação não destrutiva, desde a avaliação visual até os testes químicos e o uso de técnicas de vibração, propagação de ondas, emissões acústicas, raios-x, entre outras.

No presente trabalho foram consideradas as técnicas relacionadas à classificação visual de defeitos, verificação dos teores de umidade e propagação de ondas ultrassônicas utilizando uma estrutura em serviço em diversas situações de risco de biodeterioração. Paralelamente, elaborou-se um método para a avaliação da durabilidade e da reabilitação de estruturas de madeira em serviço, sendo que o mesmo foi aplicado numa passarela pênsil em madeira.

É neste contexto que o conhecimento desenvolvido na presente pesquisa representa uma significativa contribuição no sentido de favorecer a utilização da madeira como material estrutural, permitindo um incremento no controle da durabilidade das estruturas de madeira e tornando este material mais competitivo em relação a outros materiais como o aço e o concreto.

1.1 Objetivos do trabalho

No contexto apresentado, este trabalho possui como objetivos:

- propor um método para avaliação da durabilidade da madeira em elementos estruturais;
- propor procedimentos visando reabilitar a madeira de elementos estruturais;
- verificar o uso de técnica de ultra-som na avaliação da durabilidade da madeira em elementos estruturais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo trata do levantamento do conhecimento científico relativo ao estudo da variabilidade e durabilidade da madeira, enfocando os fatores que influem nestas características. Relatam-se alguns métodos não destrutivos capazes de permitir a avaliação da durabilidade da madeira, bem como descrevem-se procedimentos de reabilitação comumente utilizados após a verificação das condições detectadas. Tem-se o intuito de exprimir no contexto a importância do desenvolvimento da presente pesquisa.

2.1 Variabilidade e durabilidade naturais da madeira

Entre os materiais utilizados em estruturas para a construção civil, a madeira é o que apresenta maior variabilidade em suas características físicas e mecânicas, tendo-se uma durabilidade natural distinta em função da essência utilizada. Esta variabilidade dificulta a sua utilização como material estrutural, pois a madeira empregada com função estrutural deve preservar sua durabilidade natural, além de desempenhar satisfatoriamente suas funções previstas em projeto (Sales, 1996).

A durabilidade pode ser definida como a capacidade de se manter em serviço, por longo tempo, as qualidades ou características originais (Benevente, 1995).

Segundo Silva (1997), a durabilidade é a capacidade de um produto manter seu desempenho acima de valores mínimos preestabelecidos, em consonância com os usuários, em condições previstas de uso.

De acordo com Ino (1997), para garantir a durabilidade de uma estrutura é essencial o conhecimento da cadeia produtiva da madeira utilizada, considerando-se a importância em cada etapa do processo de produção (derrubada, retirada da árvore da floresta, transporte, armazenamento, desdobro, secagem, usinagem, pré-fabricação e aplicação).

De acordo com Déon (1989), não se pode afirmar que uma peça de madeira é durável ou pouco durável, sem se precisarem suas condições de exposição, simultaneamente aos riscos de deterioração presentes.

Segundo Ino (1997), nos primeiros momentos de concepção do projeto, devem-se considerar as condições de exposição da estrutura. No detalhamento, é imprescindível que o projetista considere as condições de exposição relativas ao solo, à umidade e às intempéries.

Em suma, o projetista deve verificar as condições de exposição da estrutura a ser construída, bem como quais os possíveis ataques pelos agentes deterioradores e os prováveis comprometimentos provocados por estes. Por meio destas verificações, pode-se projetar uma estrutura de madeira durável e permeada de requisitos favoráveis em relação aos demais materiais aplicados na conformação de elementos estruturais para a construção civil.

No item que se segue são descritos e analisados os fatores que influem na durabilidade de elementos de madeira, englobando tanto os que agem positivamente como os que acarretam declínio nas propriedades deste material.

2.2 Fatores que influem na durabilidade da madeira

Segundo Ino (1997), a garantia da durabilidade da madeira está relacionada com alguns princípios:

- a madeira deve estar sempre em condição ventilada;
- a madeira deve ser usada em condição seca, com umidade de equilíbrio do ar;
- as extremidades e saliências presentes na estrutura devem estar protegidas;
- as águas pluviais devem escoar rapidamente nos elementos estruturais;
- deve-se evitar o contato da madeira com o solo, pois ocorre ascensão da umidade por capilaridade.

O fator durabilidade natural garante uma longa vida útil da madeira. Contudo, as condições de exposição das peças podem atenuar essa durabilidade própria deste material (Mateus, 1978).

Segundo Benevente (1995), para se garantir a durabilidade existem basicamente três linhas de ações:

- utilização de madeira dotada de elevada resistência biológica. Contudo, a ocorrência dos fenômenos de natureza física ou química podem deteriorar a madeira;
- incorporação de produtos químicos à madeira, tais como: preservativos e acabamentos superficiais;

- introdução de alterações químicas permanentes na estrutura dos componentes poliméricos da madeira.

Para se garantir a durabilidade da madeira, necessita-se de uma classificação quanto às condições de exposição que seja tão objetiva quanto possível, visando o conhecimento dos tratamentos preventivos e execução de detalhes minuciosos de projeto (Benevente, 1995).

Esta classificação deve considerar as possíveis combinações de condições de exposição da estrutura de madeira, considerando fatores tais como: temperatura normalmente presente, fontes de umidade, contato ou distanciamento da madeira com o solo, presença de coberturas ou proteções nos elementos, entre outros.

Desta forma, verifica-se que as condições de exposição associadas aos preservativos utilizados e aos detalhes de projeto executados, podem ser considerados os principais fatores que influem na durabilidade da madeira em estruturas. No item que se segue, tem-se a descrição detalhada destes fatores.

2.2.1 Condições de exposição

As condições de exposição da madeira em estruturas são importantes fatores que influem na permanência da durabilidade. O projetista deve verificar a que classe de risco se enquadra a estrutura de madeira para providenciar os melhores tratamentos e incrementar detalhes construtivos eficientes.

Neste item, são abordadas normas vigentes em diversos países que tratam esta classificação como imprescindível para o correto emprego da madeira em estruturas, bem como são descritos os sistemas de classes de risco elaborados por pesquisadores brasileiros os quais os propõem como texto preliminar para subsidiar a NBR-7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira.

Morris (1996) apud Ducatti (1997) trata os sistemas de classes de risco como métodos de agrupamento dos produtos de madeira em relação ao grau de risco à biodeterioração. Os pesquisadores consideram estes sistemas como sendo ferramentas de auxílio para a utilização de produtos de madeira tratada.

A seguir, estão apresentados os dados relativos às normas vigentes em alguns continentes e países propondo sistemas de classes de risco.

Tabela I: Descrições sucintas das classes de risco elaboradas e utilizadas em alguns continentes e países (Fonte: Ducatti, 1997).

Classes de risco para madeiras	Europa	África do Sul	América do Norte
01	Aplicada sem contato com o solo e com presença de cobertura.	Aplicada internamente e sem contato com o solo.	Aplicada internamente e sem contato com o solo.
02	Aplicada sem contato com o solo e com cobertura. Pode ser umidificada.	Aplicada internamente e sem contato com o solo, tendo risco de ataque do cupim.	Aplicada externamente e sem contato com o solo. Pode estar exposta ao clima.
03	Não apresenta contato com solo, mas encontra-se ausente de cobertura e exposta às intempéries.	Aplicada externamente sem contato com solo. Mas com umidade e lixiviação periódica.	Não apresenta contato com solo, mas ausente de cobertura e exposta às intempéries.

Tabela I: Continuação

Classes de risco para madeiras	Europa	África do Sul	América do Norte
04	Contato direto com o solo ou com fontes permanentes de umidade.	Em contato com solo ou exposição às condições de umidade e lixiviação.	Em contato com solo ou água doce.
05	Não há esta classe.	Em contato com solo ou água doce. Exposição às condições de umidade extrema.	Em contato com solo e em meios agressivos.
06	Exposição à água salgada.	Exposição à água salgada ou condição de lixiviação.	Exposição à água salgada.

Tabela II: Descrições sucintas das classes de risco elaboradas e utilizadas na Austrália e Japão (Fonte: Ducatti, 1997).

Classes de risco para madeiras	Austrália	Japão
01	Aplicada interiormente, sem contato com o solo, protegida contra os organismos deterioradores e com ventilação apropriada.	Aplicada sem contato com o solo e apresenta-se constantemente seca.
02	Aplicada interiormente e sem contato com o solo. Apresenta-se protegida do risco de ataque por cupim.	Aplicada sem contato com o solo e com presença de cobertura. Pode ser umidificada.
03	Aplicada externamente sem contato com solo. Mas com umidade e lixiviação periódica e moderada.	Aplicada sem contato com solo, mas sujeita à umidificação frequente.
04	Aplicada externamente em solo úmido e sujeita à lixiviação.	Contato direto com o solo e que necessitam de baixo desempenho com pequenas solicitações.
05	Em contato com solo ou água doce. Exposição à condição extrema de lixiviação.	Contato direto com o solo e que necessitam de alto desempenho com grandes solicitações.
06	Exposição à água salgada.	Não há esta classe.

Considerando as pesquisas nacionais, destaca-se o estudo de Déon (1989), o qual combina as possíveis condições de exposição da madeira em serviço. Os principais fatores considerados foram: contato com solo, presença de coberturas, contato com fontes de umidade permanentes ou intermitentes, e contato com água doce ou salgada. Esta proposta relata as classes de risco sem nomeá-las, considerando as seguintes condições de exposição para a madeira:

- contato direto com o solo e sob intempéries;
- isolada do solo mas exposta às intempéries;
- sob abrigo mas em contato permanente com fonte de umidade;
- isolada do solo e protegida contra todos os riscos de reumidificação;
- imersa em água doce;
- imersa em água salgada ou salobra.

Por sua vez, Carlos (1995) propõe uma divisão para as classes de risco enfatizando a biodeterioração da madeira e considerando as seguintes classes:

- classe 1: Situação em que a madeira ou o produto à base de madeira está sob abrigo, inteiramente protegido das intempéries e não exposto à umidificação;
- classe 2: Quando a madeira ou o produto à base de madeira está sob abrigo, inteiramente protegido das intempéries, sendo que a umidade ambiental elevada pode conduzir à umidificação ocasional, embora não persistente;
- classe 3: A madeira ou o produto à base de madeira não está abrigado nem em contato com o solo. Está continuamente exposto às intempéries ou abrigado, mas sujeito à umidificação freqüente;

- classe 4: Situação em que a madeira ou produto à base de madeira está em contato com o solo ou com a água doce, ou seja, em condição de exposição permanente à umidificação;
- classe 5: A madeira está permanentemente em contato com a água salgada expondo-se ao ataque de moluscos e crustáceos.

Ducatti (1997) reúne considerações de normas nacionais e internacionais propondo um sistema internacional e unificado de classes de risco, no qual consideram-se três fatores como influentes na permanência da durabilidade dos produtos de madeira: fontes de umidade, disponibilidade de nutrientes exógenos e potencial inócuo dos agentes de biodeterioração.

Pelo fato deste sistema considerar somente o potencial de biodeterioração, o pesquisador recomenda que outros níveis de classificação sejam adicionados, impossibilitando o uso deste sistema como referência para especificação de preservativos adequados.

Tabela III: Descrição sucinta do sistema unificado de classes de risco proposto por Ducatti (1997).

Classes de risco para madeiras	Sistema internacional e unificado proposto.
00	Não há fonte de umidade, de nutrientes exógenos e de agentes de biodeterioração. É a linha básica da qual irá se desenvolver o restante do sistema.
01	Fonte de umidade: somente ar; nutrientes: água de condensação. Inócuo: ovos de inseto, insetos adultos e esporos de fungos.
02	Fontes de umidade: ar e materiais de contato (alvenaria, etc.). Nutrientes: água de condensação e materiais componentes do contato. Inócuo: similar à classe 01.

Tabela III: Continuação

Classes de risco para madeiras	Sistema internacional e unificado proposto.
03	Fontes de umidade e nutrientes: ar, precipitação bloqueada e materiais para construção. Inócuo: ovos de insetos, esporos de fungos e micélios.
04	Fontes de umidade e nutrientes: ar, precipitação bloqueada, solo, água doce ou materiais de contato. Inócuo: ovos de insetos, insetos adultos, esporos de fungos e micélios.
05	Fontes de umidade e nutrientes: ar, precipitação bloqueada, contato com solo rico em nutrientes ou solo saturado. Inócuo: ovos de insetos, insetos adultos, esporos de fungos e micélios.
06	Fontes de umidade e nutrientes: água salobra e precipitação bloqueada. Inócuo: larvas de brocas marinhas.

Elementos de madeira presentes em estruturas que enquadram-se em determinadas classes de risco exigem maiores cuidados quanto à preservação. Na ausência de tratamentos preservativos, estas estruturas são comumente atacadas por uma seqüência de atuação dos agentes degradadores.

Entre os principais agentes responsáveis pela degradação da madeira, destacam-se:

- microorganismos: bactérias e fungos;
- térmitas ou cupins;
- outros insetos: carunchos e brocas;
- brocas marinhas: moluscos, crustáceos e teredos.

Gandolfi Júnior (1980) enumerou alguns fatores imprescindíveis para que haja a decomposição da madeira, sendo estes: presença de oxigênio, teores de umidade da madeira superiores a 20%, temperaturas favoráveis, suprimento de alimentação adequada e acidez do meio.

Quando a madeira é exposta às intempéries, vários fatores físicos, químicos e mecânicos contribuem para a ocorrência de um fenômeno denominado intemperismo.

Segundo Kropf (2000), as principais causas e efeitos que implicam numa sequência de falhas na madeira exposta ao intemperismo podem ser verificadas na tabela que se segue.

Tabela IV: Causas e efeitos causados na madeira devido ao intemperismo
(Fonte: Kropf, 2000)

Causas	Efeitos
Raios solares	Retração da madeira
Esforços internos	Fendas longitudinais
Chuva	Água nas fendas
Inchamento	Aprofundamento das fendas
Fendas profundas	Permanência de umidade
Permanência de umidade	Desenvolvimento de fungos
Ação de fungos	Deterioração interna
Deterioração pronunciada	Perda de resistência

Na madeira exposta ao intemperismo incidem diretamente os raios solares, entre os quais os ultravioletas, propiciando a degradação fotoquímica. Esse fenômeno provoca a formação de fendas longitudinais na peça de madeira. A partir disto, é possível o desencadeamento da sequência sugerida por Kropf (2000).

Segundo Mendes; Alves (1988), de um modo geral, o ataque dos microorganismos ocorre quando a madeira apresenta um teor de umidade acima de 20%. A condição ótima para o desenvolvimento desses microorganismos é quando a madeira atinge o ponto de saturação das fibras.

A temperatura ideal varia entre 25⁰ a 30⁰ C, sendo que é possível o desenvolvimento destes microorganismos a temperaturas entre 0⁰ e 40⁰ C. O fornecimento de oxigênio é outra condição favorável para a ocorrência da degradação da madeira (Mendes; Alves, 1988).

2.2.2 Preservação de madeiras

A utilização de preservativos associada aos métodos de aplicação adequados são importantes fatores que influem na durabilidade da madeira. O projetista deve verificar as condições de exposição da estrutura em madeira para requerer a adoção de medidas preventivas que visem proporcionar permanência da durabilidade.

Nahuz; Freitas (2000) descrevem que a preservação química é a mais conhecida e utilizada no campo da tecnologia da madeira, e esta técnica pode ser entendida como sendo a incorporação de produtos químicos em quaisquer peças, com a finalidade de retardar ou prevenir o ataque de organismos xilófagos.

Essencialmente, o preservativo deve ter efeito residual alto na madeira, devendo ser quimicamente estável e resistindo a perdas por evaporação e/ou lixiviação, acrescido da necessidade de influir positivamente ou inalteradamente nas propriedades físicas e mecânicas da madeira (ABPM, 2000).

Um outro requisito considerado essencial para o preservativo é relativo ao custo, que deve ser razoável, a fim de assegurar a competitividade da madeira preservada em relação a outros materiais. Por outro lado, a preservação química da madeira não pode ser considerada como custo adicional, mas como um investimento

indispensável que traz benefícios e proporciona melhores condições de durabilidade à madeira (Pinheiro; Lahr, 2000).

Nos itens que se seguem, são descritos os principais preservativos utilizados atualmente, bem como técnicas e procedimentos de aplicação destes produtos químicos na madeira.

2.2.2.1 Preservativos oleosos e oleossolúveis

Os preservativos oleosos são produtos químicos essencialmente representados pelos derivados do alcatrão de hulha, enquanto que os oleossolúveis são produtos contendo misturas complexas de agentes fungicidas e inseticidas à base de compostos de natureza orgânica e/ou organometálicas (IPT, 2000).

O creosoto de alcatrão da hulha, empregado na indústria de conservação de madeira, é um produto destilado do alcatrão procedente da carbonização da hulha betuminosa, à alta temperatura. Compõem-se de hidrocarbonetos aromáticos, sólidos e líquidos, contendo quantidades apreciáveis de ácidos e bases de alcatrão (IPT, 1986).

Um importante produto comercial de natureza química oleosa, que tem como composição básica o óleo derivado de alcatrão de hulha, é o carbolineum ou óleo de antraceno. Este normalmente é aplicado na madeira pelo método preventivo sem uso de pressão artificial (Macêdo, 1991).

2.2.2.2 Preservativos hidrossolúveis

Em virtude da escassez dos derivados de petróleo, os preservativos hidrossolúveis vêm assumindo uma importância significativa e ascendente na preservação da madeira (ABPM, 2000).

Os preservativos hidrossolúveis são produtos contendo misturas mais ou menos complexas de sais orgânicos metálicos e não metálicos (IPT, 1986).

Um dos principais preservativos hidrossolúveis utilizados é o CCA (Arseniato de cobre cromatado) que encontra-se disponível em forma de sais cristalinos, pastas ou líquidos concentrados, sendo o preservativo salino de mais larga utilização.

De acordo com a “American Wood Preservers Association” (A.W.P.A.) e com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (A.B.N.T.), o preservativo CCA pode apresentar três formulações químicas apresentadas na tabela V a seguir (IPT, 1986).

Tabela V: Formulações de composições químicas do preservativo CCA
(Fonte: IPT, 1986).

INGREDIENTES ATIVOS	TIPOS - %		
	A	B	C
CrO ₃	65,5	35,3	47,5
CuO	18,1	19,6	18,5
As ₂ O ₅	16,4	45,1	34,0

Como reação inicial e instantânea do CCA com a madeira, tem-se um rápido decréscimo de PH oriundo da fixação do cobre, por troca iônica, com liberação de prótons. Isto implica numa perda de resistência da madeira tratada, sobretudo da

propriedade mecânica tenacidade que está relacionada com o aumento de retenção do preservativo (IPT, 1986).

Outro importante preservativo hidrossolúvel utilizado é o CCB (Borato de Cobre Cromatado) que originou-se da substituição do arsênio pelo boro, devido aos possíveis perigos representados pelo arsênio. Sua composição típica apresenta-se, a seguir, na tabela VI.

Tabela VI: Composição química do preservativo CCB
(Fonte: Pinheiro; Lahr, 2000).

INGREDIENTES ATIVOS	%
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	35,8
H_3BO_3	22,4
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	38,5
NaHSO_4	2,1

Esse preservativo pode ser fixado lentamente propiciando o tratamento de madeiras pouco permeáveis. Em contrapartida, o CCB fornece pequena resistência à lixiviação e ineficácia no combate à insetos considerando-se longos prazos (IPT, 1986).

2.2.2.3 Sistemas preservativos

Em função das condições de agressividade biológica que o componente de madeira está sujeito na construção, a aplicação dos produtos preservantes pode ser efetuada por meio de processos sem pressão (caseiros), bem como por processos com pressão (industriais) (ABPM, 2000).

- Processos sem pressão

No processo de tratamento sem pressão tem-se a impregnação superficial da madeira, ou seja, não há pressão externa aplicada forçando a penetração do preservativo. Os principais processos de tratamento utilizados são: imersão rápida, imersão prolongada, substituição da seiva e banho quente – frio (IPT, 1986).

O tratamento sem pressão por meio da imersão rápida consiste em imersão da madeira na solução preservativa por um tempo muito curto, variando de poucos segundos a poucos minutos (Pinheiro; Lahr, 2000). Este processo prolonga pouco a durabilidade da madeira e deve ser complementado com medidas a nível de projeto que minimizem a absorção de água pela madeira. Este tratamento é muito utilizado para o tratamento de esquadrias de madeira (ABPM, 2000).

No tratamento por imersão prolongada, o teor de umidade da madeira influi na escolha do preservativo a ser utilizado. Para madeira verde, devem ser utilizados preservativos hidrossolúveis que são absorvidos por meio do fenômeno de difusão. Caso o teor de umidade da madeira a ser tratada esteja abaixo do ponto de saturação das fibras, é recomendável o uso de soluções oleossolúveis de baixa viscosidade, pois predomina-se a absorção do preservativo por capilaridade (IPT, 1986).

Por sua vez, o tratamento sem pressão com a substituição da seiva promove o deslocamento desta última por meio de uma solução hidrossolúvel. Não se recomenda a utilização dos preservativos de fixação rápida, tipo CCA, preferindo-se o uso daqueles formulados à base de elementos de baixa massa molecular, tipo CCB.

Dois processos práticos podem ser utilizados para a realização deste tratamento: Transpiração Radial e Processo Boucherie (Pinheiro; Lahr, 2000).

Um outro tratamento sem pressão bastante empregado é o do banho quente – frio, utilizando-se principalmente preservativos oleosos. Consiste na imersão da madeira num recipiente contendo o preservativo a uma temperatura entre 90 e 100°C. Espera-se a madeira equilibrar-se termicamente com a solução, pois ocorre expansão do ar presente nas células que é parcialmente expulso. Em seguida, a peça é transferida para um recipiente que contém o preservativo à temperatura ambiente. Desta forma, o ar remanescente da madeira se contrai e ocorre a absorção do líquido preservativo (IPT, 1986).

- Processos com pressão

No processo com pressão, tem-se a impregnação profunda da madeira permeável e um maior controle do preservativo absorvido, resultando uma proteção mais efetiva com economia do produto aplicado. Os processos são mais eficientes devido à distribuição e penetração mais uniforme do preservativo na peça tratada. Todavia, tais processos apresentam algumas desvantagens como o custo do equipamento e sua manutenção, necessidade de mão-de-obra mais especializada e realização do transporte da madeira até a usina de tratamento (Montana, 2000).

A madeira deve ser tratada à pressão quando se sujeitar às situações de maior agressividade biológica e/ou em situações de responsabilidade estrutural, como por exemplo: em contato com água do mar (imersa ou não), em contato com o solo, sujeita às fontes de umidade ou às situações de intensas intempéries. A madeira

tratada à pressão é recomendada em quaisquer situações onde se queira obter maior durabilidade (ABPM, 2000).

O tratamento com pressão é realizado em unidades industriais denominadas Usinas de Preservação de Madeiras – UPMs. Tais unidades possuem grandes cilindros horizontais, conectados às tubulações, bombas e tanque. Estes sistemas são conhecidos como autoclave, tratando-se de um equipamento que combina o uso do vácuo e da pressão ao produto químico. O tipo de produto preservativo a ser utilizado é definido em função da utilização da madeira.

Os principais processos de tratamento da madeira com uso de pressões superiores à atmosférica são: o processo de célula cheia que é o mais utilizado e o processo de célula vazia.

De um modo geral, em ambos os processos, a madeira é submetida a um período de secagem natural de aproximadamente três meses, cessando-se na obtenção de um teor de umidade compatível à sua finalidade. Levadas ao pátio de trabalho, as peças são classificadas e recebem os acabamentos necessários, tais como desbaste, entalhe, furação, bisel, chanfro ou conectores. Por meio de vagonetas, as peças são encaminhadas para o interior da autoclave onde ocorre o tratamento (Irpa, 2000).

2.2.3 Detalhes de projeto

Estudos realizados por Miotto (2000) fazem referência à antiga NB 11 (1951), no tocante às disposições construtivas, como forma de estabelecer relações com o texto normativo atual, procurando-se evidenciar as prováveis evoluções em alguns

conceitos. O pesquisador relata que esta norma, objetivando a redução de degradação precoce nas peças estruturais, previa que:

- devem ser tomadas precauções tais como: tratamento adequado, facilidade de escoamento das águas e arejamento de faces vizinhas e paralelas;
- as peças sujeitas à degradação acelerada devem ser facilmente substituíveis, tomando-se todas as precauções para facilitar essas operações;
- os pranchões resistentes de pontes ferroviárias lastradas, dispostos transversalmente, devem ser de madeira tratada.

De acordo com a NBR 7190 (1997), para se evitar a degradação acelerada das peças, devem ser providenciados: tratamento preservativo adequado, facilidade de escoamento das águas e arejamento de faces vizinhas e paralelas. As peças que conformam a estrutura devem ser projetadas de modo a oferecer facilidade de inspeção. Segundo Miotto (2000), recomendações semelhantes são fornecidas no texto normativo da NB 11 (1951).

No caso de pontes ferroviárias lastradas, os pranchões resistentes dispostos transversalmente deverão ser de madeira tratada. E, em pontes rodoviárias ou para pedestres, sem revestimento protetor, deve-se admitir uma camada de desgaste com pelo menos dois centímetros de espessura (NBR 7190, 1997).

Conforme Benevente (1995): “O projeto deve evitar reentrâncias e cortes, concentrar as áreas molháveis, além de sugerir a substituição da madeira em locais sujeitos à intensa umidificação”.

De acordo com Szücs (1992), numa construção de madeira os locais mais expostos à degradação são:

- a parte baixa da construção, na qual a madeira encontra-se em contato direto com o solo ou muito próximo dele;
- a parte exterior da construção (portas, janelas, paredes externas e cobertura) constantemente exposta às intempéries, na qual aconselha-se evitar a execução de detalhes que facilitem a infiltração ou o acúmulo de água.

No detalhamento, deve-se impedir a transferência de umidade do solo por meio dos elementos de fundação, bem como introduzir mecanismos que impeçam a migração de insetos xilófagos para a estrutura. Esta barreira, de acordo com Szücs (1992), poderá ser introduzida com inserção de uma placa metálica na extremidade inferior do elemento de fundação, apresentando as bordas dobradas para baixo.

2.3 Avaliação da durabilidade da madeira por meio de métodos não destrutivos

De acordo com a NBR 7190 (1997), a caracterização das propriedades de resistência e rigidez da madeira deve ser realizada por meio de ensaios destrutivos de corpos-de-prova.

De acordo com Gorniak; Matos (2000), testes destrutivos com a finalidade de verificar as condições de qualidade, durabilidade e empregabilidade da madeira em estruturas resultam em perda de material, bem como não condizem com as reais condições dos elementos avaliados. Os valores obtidos são representativos para determinado lote de madeira.

Segundo Puccini; Gonçalves (2000), os métodos não destrutivos podem ser utilizados na detecção da presença de nós, presença de ataque de microorganismos, direcionamento das fibras e decomposição da madeira.

Segundo Oliveira (2001), podem-se utilizar métodos não destrutivos para avaliação mecânica de peças de madeira. Estes apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais, entre os quais merecem destaque: a possibilidade de avaliar a integridade estrutural de uma peça sem a extração de corpos de prova; maior rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção. Deste modo, a avaliação não destrutiva propicia resultados econômicos e eficientes quando utilizada em estruturas de madeira em serviço.

Neste contexto, a durabilidade de peças estruturais de madeira em uso pode ser avaliada por meio de métodos não destrutivos, nos quais é desnecessária a extração de corpos-de-prova, uma vez que a avaliação é feita nos próprios elementos estruturais (Oliveira, 2001).

De acordo com Gonçalves (1998), os métodos comumente utilizados que permitem este tipo de avaliação em peças de madeira são:

- método visual;
- método químico;
- métodos de emissão acústica ou de ondas de tensão;
- método de microondas;
- métodos de avaliação mecânica não destrutiva;
- método de ultra som;

- método de scanner;
- métodos de pilodyn e de sonda pressler;
- método de raio x;
- método de vibração.

Os métodos não destrutivos enfatizados neste trabalho são a avaliação visual e o uso de técnicas de ultra-som. Como técnica complementar não destrutiva, utiliza-se um equipamento apropriado para obtenção de valores de teores de umidade das peças avaliadas.

2.3.1 Avaliação visual

De acordo com Oliveira (2001), a avaliação visual analisa a qualidade da madeira pela sua dimensão e distribuição de anomalias perceptíveis pela superfície da peça, tendo como desvantagens o fato de ater-se aos defeitos aparentes e admitir resistência equivalente para as peças com defeitos semelhantes. As principais características visuais que podem ser observadas durante estas avaliações são:

- presença de nós: o efeito desfavorável do nó deve-se à distorção das fibras em relação à sua direção normal;
- presença de rachaduras: são originárias da separação das fibras decorrentes do processo de secagem e provenientes da liberação de tensões internas. Como consequência tem-se alteração dos valores das propriedades de resistência da madeira;
- empenamento: geralmente esse defeito não afeta significativamente a resistência das peças de madeira, sendo originado durante o processo de secagem;

- inclinação das fibras: as fibras inclinadas originam componentes de tensão na direção transversal, diminuindo a resistência devido a menor capacidade de carga da madeira quando solicitada à compressão perpendicular às fibras;
- deterioração: a inspeção visual impossibilita verificar com segurança o comprometimento causado pelo ataque de agentes degradadores, sendo que peças seriamente atacadas devem ser descartadas.

Segundo Puccini; Gonçalves (2000), para alguns casos, a avaliação visual torna-se falha devido à impossibilidade de detectar aspectos de qualidade da madeira, tais como a presença de nós internos, existência de medula e ataques de insetos. Esta avaliação pode ser considerada um método precursor de classificação, sendo bastante utilizado na Comunidade Européia e nos EUA, onde o controle da confecção de embalagens, paletes ou lâminas é baseado unicamente neste tipo de avaliação.

Puccini; Gonçalves (2000) relatam que a aplicação da técnica visual, como forma única de avaliação, produz resultados incertos que diferem em função do país avaliador. Todavia, o método visual pode ser utilizado como uma análise preliminar da qualidade e durabilidade das peças de madeira, devendo-se incrementá-lo com métodos mais precisos. Uma das maneiras de complementar esta avaliação é o emprego de técnicas de ultra-som.

2.3.2 Avaliação por meio de técnicas de ultra-som

Segundo Oliveira (2001), o conceito de propagação de som na madeira tem sido empregado por gerações como modo não destrutivo de avaliação. Este método utiliza-se da habilidade de um inspetor para distinguir sons produzidos por batidas de

martelo, propícios a indicar presença de deterioração. Nota-se que esta técnica limita-se à frequência perceptível pela audição humana, associada à subjetividade presente durante a avaliação.

Em virtude das notáveis limitações que envolvem o método descrito, desenvolveram-se pesquisas utilizando-se sensores elétricos com cristais piezo-eletrônicos, capazes de detectar altas frequências de vibração sonora. Estes equipamentos tornaram-se base para a maioria das técnicas acústicas atuais, tendo-se como exemplo o ultra-som caracterizado por frequências acima de 20000 Hz.

De acordo com Gonçalves (1998), a técnica de ultra-som utiliza-se de um fenômeno físico que auxilia na determinação da rigidez das peças de madeira, bem como possibilita a detecção de nós e desvios das fibras.

Bucur (1995) determinou as equações fundamentais da propagação das ondas de ultra-som na madeira e demonstrou a influência do teor de umidade, da densidade, da anatomia e da forma do corpo-de-prova na propagação de ondas.

Segundo Oliveira (2001) e Bartholomeu (2001) os três módulos de Young são proporcionais à rigidez corrigida dos coeficientes de Poisson. Assim, para corpos-de-prova longos (considerados infinitos), o fator de correção é 1, sendo que deste modo, o C_{LL} pode representar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

A aplicação e medição de ondas consistem no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda é induzida no material e o

instrumento realiza a contagem de tempo em microssegundos. Utiliza-se este tempo registrado no cálculo do coeficiente da matriz de rigidez, por meio da seguinte expressão:

$$C_{LL} = \rho \times v^2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

sendo:

C_{LL} - coeficiente da matriz de rigidez (MPa);

ρ - densidade da madeira (kg/m³);

v - velocidade da onda longitudinal (m/s).

A velocidade pode ser obtida pela expressão:

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

sendo:

v - velocidade (m/s);

d - distância entre os transdutores (m);

t - tempo de propagação (s).

2.3.3 Técnica para obtenção do teor de umidade por meio de medidores elétricos

A obtenção do teor de umidade trata-se de uma meta preliminar para a avaliação da durabilidade de peças de madeira, pois esta determinação possibilita comparações entre as propriedades físicas e mecânicas obtidas experimentalmente com valores

encontrados na literatura, além de indicar o tipo de organismo xilófago em condições mais favoráveis de desenvolvimento.

O teor de umidade pode ser determinado por meio de estufa, de medidores elétricos de resistência ou medidores elétricos de capacitância.

Rodrigues; Sales (2000) afirmam que as técnicas baseadas na determinação do teor de umidade por meio de medidas de capacitância e condutividade apresentam grande variabilidade. Em contrapartida, as que utilizam-se de medidores elétricos de resistência apresentam valores satisfatórios.

2.4 Reabilitação dos elementos de madeira em estruturas

A manutenção de peças estruturais de madeira engloba o conjunto de atividades necessárias para preservar as condições de utilização e assegurar a segurança requerida para a estrutura. Estas atividades podem ater-se apenas aos reparos dos defeitos, como também incrementar correções para prevenir e reduzir futuros problemas (Silva, 1997).

Negligenciando-se ou tornando-se a manutenção irregular, predis põem-se a estrutura ao desenvolvimento de deterioração ou desgaste dos elementos que implicarão na necessidade de reparos ou recuperações imediatas (Volny; Pellerin, 1995).

Um programa adequado de inspeção e detecção dos pontos deficientes da estrutura, associados à manutenção necessária e regular, tendem a proporcionar uma relação custo - benefício bastante compensatória (Johnson; Isakson, 1995).

Neste contexto, tem-se comumente optado pela reabilitação de elementos estruturais em contrapartida à demolição. Os estudos referentes às técnicas que proporcionem o aumento da durabilidade de estruturas por meio da reabilitação, considerando manutenção regular como recurso viável, são de suma importância.

A realização da manutenção preventiva visa conservar a madeira em bom estado, sendo que os procedimentos necessários são realizados objetivando a redução de futuros problemas. As peças que são condicionadas a esta categoria de manutenção devem estar desprovidas de deterioração ou desgastes. Contudo, as condições de exposição mantêm os potenciais de riscos presentes nas peças (Forsberg, 1996).

Ritter (1990) trata a reabilitação como manutenção corretiva e a subdivide em duas categorias, as quais encontram-se relacionadas às condições de deterioração dos elementos de madeira em estudo.

- Categoria 1: Manutenção corretiva devido à presença de deterioração inicial.

Nesta categoria, a degradação encontra-se presente mas incapaz de afetar a capacidade ou desempenho normal de serviço da peça de madeira. Os elementos que requerem este tipo de manutenção apresentam danos iniciais que são eminentes e podem ser sanados com a introdução de ações corretivas adequadas.

- Categoria 2: Manutenção corretiva e tardia devido à presença de deterioração severa.

Envolve a restauração da capacidade requerida para a madeira, bem como de suas condições iniciais. Nesta categoria de manutenção, as deteriorações progridem em direção aos elementos estruturais que desempenham funções essenciais para a

integridade da estrutura, tornando os reparos ou recuperações imprescindíveis para manter a capacidade de carga da estrutura.

Em função da degradação presente na madeira devem-se utilizar métodos compatíveis que visem mantê-la apropriada ao uso. Nos tópicos que se seguem, são descritas as principais técnicas corretivas aplicadas na reabilitação da madeira em estruturas, descrevendo-se as vantagens e desvantagens que as permeiam.

2.4.1 Manutenção corretiva devido a presença de deterioração inicial

As técnicas que compõem este tipo de manutenção são denominadas de tratamentos superficiais ou de impregnação aplicados na madeira *'in loco'*. As principais técnicas utilizadas são: fumigação, injeção, aspersão e pincelamento do agente químico (Ritter, 1990).

- **Fumigação**

A fumigação ou expurgo é um processo bastante eficiente que consiste em submeter a peça de madeira atacada à ação de um gás tóxico por um período pré - determinado. A principal vantagem da fumigação é o alto poder de difusão dos gases que permite uma penetração profunda na madeira. Como desvantagens têm-se a ausência de resíduos do preservativo na peça tratada desvinculando a proteção duradoura deste tratamento. Entre os inúmeros gases que podem ser utilizados no processo, destacam-se o brometo de metila e a fosfina.

Na fumigação, as peças de madeira que serão tratadas devem ser recobertas e vedadas com lona impermeável ao gás utilizado.

penetração do preservativo encontra-se atuante em todas as faces da peça e em regiões de topo, encaixes ou junções.

- **Pincelamento**

Os tratamentos superficiais visam proporcionar à madeira um retorno ao aspecto original, muitas vezes desvinculados com fatores estruturais. De acordo com o IPT (1986), estes são os tratamentos mais simples disponíveis que requerem investimentos mínimos e permitem a utilização dos preservativos de baixa viscosidade. Em contrapartida, apresentam dificuldades para execução nas superfícies inferiores das peças, adicionando-se ao elevado tempo necessário para realização deste tratamento.

Esta técnica pode ser aplicada em madeiras que apresentam teores de umidade bastante distintos, sempre caracterizando-se pela superficialidade de penetração.

Vale ressaltar que qualquer movimentação da madeira após tratamento “in loco” por pincelamento pode provocar ruptura da camada protetora, com conseqüente exposição da parte interior não tratada (IPT, 1986).

2.4.2 Manutenção corretiva e tardia devido a presença de deterioração severa

Mettem; Robinson (1991) propuseram uma subdivisão para este tipo de manutenção em métodos tradicionais, reparos mecânicos e adesivos. Nos itens que se seguem são descritos estes métodos bem como as vantagens e desvantagens que condicionam à sua viabilidade para cada situação e necessidade de aplicação analisada.

2.4.2.1 Sistema tradicional

Neste método, peças da estrutura de madeira são substituídas por novas peças que apresentam dimensões e tamanhos semelhantes às originais, sendo também denominado de método de substituição.

Segundo Mettem; Robinson (1991), este método é um dos mais utilizados na recuperação de elementos estruturais, devido à permanência das características originais do projeto e substituição por mesmo material. Em contrapartida, apresenta limitações no comportamento estrutural e requer habilidade técnica para execução do serviço.

A substituição é recomendada nos casos em que peças de madeira encontram-se em condições limites de uso ou quando partes principais que apresentam importantes funções estruturais encontram-se intensamente degradadas (Ritter, 1990).

Vale ressaltar que este método é viável em situações que se têm poucas peças deterioradas, que tornam a demolição inviável, e têm a conformação de uma nova estrutura como alternativa dispendiosa (Monteiro; Yojo, 2000).

2.4.2.2 Reparos mecânicos

Estes reparos propiciam um prejuízo estético à estrutura pela possibilidade de visualização da união entre os elementos de ligação e a madeira, bem como pode-se ter um enrijecimento excessivo acarretando presença de rachaduras na peça reabilitada (Mettem; Robinson, 1991).

Inúmeras são as técnicas aplicadas na reabilitação da estrutura por meio de reparos mecânicos. A seguir são descritas sucintamente as principais técnicas utilizadas.

- Reforços com execução de cortes e inserção de conectores

Neste método, realizam-se os reparos estruturais utilizando-se conectores, anéis ou chapas metálicas fixadas na peça de madeira por meio de ligações com parafusos ou outros materiais. Estas inserções podem ser combinadas com a confecção de cortes, biséis ou chanfros que visam facilitar e enrijecer as ligações (Mettem; Robinson, 1991).

- Reparos mecânicos por emenda

Ritter (1990), estudou os reforços mecânicos que tratam de reparos por emenda, consistindo em adicionar à estrutura peças de madeira associadas com parafusos. Esta técnica é muito utilizada quando a peça estrutural apresenta rachaduras longitudinais.

- Reparos com chapas metálicas

Outro tipo de reparo muito utilizado em rachaduras longitudinais, consiste em introduzir chapas metálicas para reforçar a estrutura, fixando-as com parafusos ou com adesivo epoxi. O objetivo desta técnica não é unir as partes rachadas, mas prevenir a separação da peça em duas partes (Fiorelli; Dias, 2000).

Caso sejam utilizados adesivos para unir a chapa metálica à madeira, pode ocorrer a corrosão da chapa na sua interface com o adesivo, comprometendo perigosamente a

aderência entre os elementos. Esta patologia apresenta difícil identificação durante as inspeções de rotina (Ritter, 1990).

- Reforço com camisa de concreto

Em muitos casos, faz-se necessária a adoção de medidas mais rigorosas, como a utilização de camisas de concreto visando proteger regiões da estrutura expostas a condições severas de intemperismo. São reforços que podem ser aplicados, por exemplo, em pilares de madeira presentes em pontes, nos quais existe a possibilidade de reumidificação dos elementos provocada pela variação de maré (Ritter, 1990).

2.4.2.3 Reparos adesivos

O reparo com utilização de resina epoxi também é denominado de método adesivo. Para a execução deste tipo de reforço, podem-se utilizar distintas composições químicas de resinas epoxi que podem ser aplicadas, conjuntamente com peças metálicas ou fibras, na madeira a ser reabilitada (Sika, 2000).

De acordo com Ritter (1990), este é um método eficiente para reforçar peças de madeira, sendo que o epoxi é um gel de betume que pode ser injetado manualmente nas partes danificadas, promovendo o aumento da resistência da peça estrutural.

Mettem; Robinson (1991) realizaram os primeiros projetos utilizando estas resinas como material componente reabilitador em meados de 1960, sendo que as alternativas técnicas de aplicação foram por injeção ou preenchimento. Como vantagens deste método, têm-se o aumento da capacidade de carga da estrutura juntamente com a incorporação de certa flexibilidade. Todavia, o bom desempenho

será perceptível à longos prazos, bem como têm-se um incremento no peso próprio da estrutura (Fiorelli; Dias, 2000).

2.4.2.4 Reforço com fibras sintéticas

Para reforçar estruturas de madeira, encontra-se em ascendência o estudo da utilização de polímeros que permitem o aumento da rigidez e da resistência das peças. Para a realização do reforço, faz-se uso das fibras de polímeros, comumente denominadas de FRP (fibras reforçadas com polímeros). Entre as principais fibras sintéticas utilizadas para esta finalidade destacam-se: fibra de vidro, Kevlar 49 (aramid) e fibra de carbono (Fiorelli; Dias, 2000).

Das FRP aplicáveis, a fibra de carbono combinada com adesivos diversos é a mais utilizada na recuperação de madeira em estruturas, principalmente por possuir características que facilitam a associação de materiais com propriedades físicas diferentes (Sika, 2000).

Este método de reforço pode ser aplicado em pilares, vigas e lajes apresentando-se em ascendência sua aplicação em vigas laminadas – coladas, bastante utilizadas nos países europeus.

2.5 Considerações finais

A revisão da literatura apresentada permite concatenar os principais fatores intervenientes na garantia da durabilidade da madeira em estruturas:

- condições de exposição da peça de madeira;
- necessidade de tratamentos preservativos;

- execução de detalhes construtivos eficientes.

A não observância destes fatores sujeita as estruturas de madeira a diversos níveis de degradação, necessitando-se reabilitar os elementos degradados. Esta intervenção provoca um significativo aumento no custo da estrutura em uso, pois as alterações nas etapas de projeto e execução são mais viáveis economicamente que a reabilitação.

Apesar disto, a reabilitação de elementos estruturais não deve ser descartada em contrapartida à demolição, principalmente considerando-se as diversas técnicas viáveis para cada situação, conforme já descrito nesta revisão.

Portanto, no contexto apresentado, evidencia-se a importância do desenvolvimento da presente pesquisa ao propor um método para a avaliação da durabilidade e procedimentos visando a reabilitação de elementos de madeira.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se a descrição dos materiais e métodos presentes nesta pesquisa. São descritos os requisitos para a elaboração do diagrama e fluxogramas propostos, bem como os critérios para a definição da estrutura e dos elementos de madeira estudados. Também, são apresentados os procedimentos aplicados na experimentação realizada em campo e em laboratório para verificação do uso da técnica de ultra-som na avaliação da durabilidade de elementos de madeira em serviço.

3.1 Requisitos para a elaboração do método para a avaliação da durabilidade e reabilitação de madeiras em estruturas

Neste item, são apresentadas as ferramentas utilizadas e os requisitos necessários para a elaboração do diagrama e fluxogramas propostos no método desenvolvido para a avaliação da durabilidade e reabilitação de madeiras em estruturas.

O diagrama utilizado neste trabalho denomina-se diagrama Causa – Efeito, o qual é uma representação gráfica que permite a organização das informações, possibilitando a identificação das possíveis causas de um determinado problema ou efeito (Oliveira, 1995). Este diagrama pode ser empregado quando objetiva-se ampliar o universo de causas prováveis em relação aos efeitos identificados, sendo que apresenta um sentido de leitura da esquerda para a direita, Figura 01.

FIGURA 01: Modelo do diagrama Causa – Efeito

Com base na literatura pertinente à gestão da qualidade e nas ferramentas existentes para o aprimoramento dos processos organizacionais, são descritos os símbolos que permitem a identificação das atividades do processo em estudo e suas relações. Estes símbolos são largamente utilizados nos modelos organizacionais e objetivam substituir uma extensa descrição verbal, permitindo que por meio de uma rápida análise seja possível obter uma visão geral da natureza e extensão do processo, Figura 02 (Oliveira, 1995).

FIGURA 02: Símbolos utilizados em modelos organizacionais

Da mesma forma que os símbolos descritos, são utilizados fluxogramas os quais fornecem representações gráficas das diversas etapas que constituem um determinado processo. Os fluxogramas podem ser do tipo básico ou matricial, conforme a Figura 03 apresentada a seguir.

FIGURA 03: Modelos de fluxogramas

No presente trabalho, os fluxogramas desenvolvidos para a avaliação da durabilidade e reabilitação de madeiras em estruturas subsidiarão a análise dos processos de deterioração envolvidos, tornando-se um meio eficaz para o planejamento e a solução de problemas.

Esta forma de representação gráfica facilita tanto a visualização das diversas etapas que compõem o processo de deterioração e reabilitação da madeira, como também permite a identificação dos pontos responsáveis pelo aumento ou diminuição da vida útil de uma estrutura de madeira.

3.2 Avaliação da durabilidade de elementos de madeira em serviço

Neste item, são descritos os critérios para a definição da estrutura estudada e de seus elementos. Também são apresentados os procedimentos utilizados para a realização da classificação visual dos elementos de madeira em serviço investigados.

3.2.1 Escolha e descrição da estrutura de madeira avaliada

Definiram-se alguns critérios para a escolha da estrutura avaliada, sendo estes:

- estrutura em serviço com idade superior a cinco anos;
- existência de documentação referente ao projeto, ao dimensionamento e ao memorial descritivo;
- possibilidade de acesso aos elementos estruturais, de modo a permitir a experimentação;
- estrutura que possua elementos com diferentes graus de exposição às intempéries.

A passarela pênsil localizada na cidade de Piracicaba (estado de São Paulo) enquadrou-se em todos os quesitos definidos anteriormente. Seu projeto foi feito em 1991, tendo sua execução em 1992, e uma idade atual de serviço de oito anos. Além disso, apresenta toda a documentação referente ao projeto, ao dimensionamento e ao memorial descritivo, sendo que o LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira – da Escola de Engenharia de São Carlos / USP foi o responsável pelo projeto.

Esta tipologia estrutural possui elementos que permitem fácil acesso para a avaliação requerida e proporciona situações distintas quanto aos riscos de biodegradação de seus componentes.

A passarela sobre o rio Piracicaba apresenta 105 metros de comprimento total e 75 metros em estrutura pênsil, composta por seções pré-fabricadas de madeira. Segundo Calil et al. (1998), esta passarela pênsil em madeira é considerada a maior do hemisfério sul, Figuras 04 e 05.

FIGURA 04: Vista frontal da passarela pênsil localizada em Piracicaba

FIGURA 05: Vista geral da passarela pênsil que faz a ligação entre a Rua do Porto e o Engenho Central na cidade de Piracicaba, interior de São Paulo

3.2.2 Definição e descrição dos elementos de madeira avaliados

Para a definição dos elementos de madeira consideraram-se como parâmetros principais: a facilidade de acesso para realização dos ensaios de campo, a adequada representatividade quanto às solicitações predominantes e às condições de risco de biodeterioração.

Neste contexto, definiu-se o tabuleiro da passarela como elemento adequado para o estudo da presente pesquisa. Suas tábuas apresentam fácil acesso para a investigação e foram subdivididas em trechos de acordo com as interligações entre estas e os demais componentes da passarela.

O tabuleiro está em contato direto com os seguintes componentes:

- calçadas de concreto executadas diretamente sobre o solo;
- guarda - corpo em aço;
- tirantes de suspensão;
- módulos estruturais de madeira.

Estas interligações proporcionam condições de risco de biodeterioração distintas, ao tabuleiro, associadas às diferentes proximidades com as águas de condensação do rio Piracicaba, sendo mais intensa no trecho central. Além disso, o tabuleiro está exposto a diversas intempéries como: chuva, vento e radiação solar, os quais facilitam a ação de organismos xilófagos.

O tabuleiro é composto por duas camadas de tábuas justapostas, dispostas ao longo do comprimento da passarela, formando um ângulo de 45° com o eixo longitudinal, Figura 06. A solidarização dos elementos constituintes do tabuleiro foi obtida por meio de pregos, fixando-os às travessinas e às peças auxiliares das vigas de rigidez. As tábuas possuem uma espessura de 2,5 cm e largura de 20,0 cm.

FIGURA 06: Vista em planta do tabuleiro que apresenta suas tábuas constituintes sobrepostas (Fonte: Calil et al. 1998)

Analisando-se o projeto e memorial descritivo referente ao tabuleiro da passarela pênsil, verificou-se a utilização da espécie botânica *Eucalipto tereticornis* tratada com o preservativo hidrossolúvel CCB (Borato de cobre cromatado) em autoclave por processo vácuo – pressão, na indústria PREMA de Rio Claro – S.P (Nascimento, 1993). O nome científico desta espécie é *Eucalyptus tereticornis* e, de acordo com a NBR 7190/97, apresenta um valor médio característico para suas propriedades de $f_{c0}=57,7$ MPa, $E_{c0}=17198$ MPa e $\rho_{ap(12\%)}=899$ kg/m³.

3.2.3 Classificação visual

Para facilitar a identificação e classificação dos diversos defeitos e ocorrências de deterioração de cada constituinte do tabuleiro em estudo, fez-se uma subdivisão em três grandes trechos e analisaram-se os pontos de interface do tabuleiro com os demais componentes da passarela.

Dois destes trechos tratam das extremidades do tabuleiro da passarela que dão acesso ao Engenho Central (Trecho 1) e à Rua do Porto (Trecho 3), enquanto que o outro trecho (Trecho 2) trata-se da parte central e suspensa da passarela que apresenta contato mais ativo com as águas de condensação do rio, conforme esquema

apresentado na Figura 07. Vale ressaltar que o Trecho 1 corresponde aos 6,0 primeiros metros do tabuleiro da passarela.

FIGURA 07: Definição dos três trechos para análise do tabuleiro

Durante esta etapa, numeraram-se todas as peças superiores do tabuleiro, de tal forma que os números que identificavam as tábuas de cada um dos trechos (detalhes da Figura 07) representassem a real posição de cada peça no conjunto, o que facilitou a investigação.

3.3 Verificação do uso de ensaios não destrutivos na avaliação da durabilidade da madeira em estruturas

Foram realizados ensaios não destrutivos para a avaliação da durabilidade de alguns elementos de madeira em serviço, visando obter teores de umidade e estimar coeficientes da matriz de rigidez. Com o intuito de comparar e obter parâmetros de

referência para as características investigadas em campo, realizaram-se ensaios complementares em laboratório.

3.3.1 Ensaios de campo

Para verificação dos teores de umidade da madeira dos elementos definidos para o presente estudo, utilizou-se o equipamento DIGISYSTEM – Medidor de umidade para madeiras DL 2000. Este equipamento permite a adequação de trinta e três grupos de espécies de madeira com a variação de temperatura de 0^oC a 95 ^oC, possibilitando medições do teor de umidade de 6% a 60%.

As tábuas do tabuleiro investigadas foram escolhidas em função da representatividade das condições de exposição. Deste modo, escolheram-se tábuas em elevado grau de risco de biodeterioração e peças em condições favoráveis relativas à permanência da durabilidade.

Visando facilitar a avaliação e análise dos dados obtidos em campo, enumeraram-se as tábuas estudadas com o uso de um marcador metálico (Figura 08).

FIGURA 08: Marcação das tábuas investigadas com o uso de um marcador metálico

Objetivando obter valores mais confiáveis do teor de umidade das peças em estudo, utilizou-se um martelete com eletrodos com uma polegada e meia de comprimento. Na figura 09 pode ser observado a utilização deste equipamento para obtenção do teor de umidade numa tábua constituinte do tabuleiro da passarela em estudo.

FIGURA 09: Utilização do equipamento DIGISYSTEM – Medidor de umidade para madeiras DL 2000

Os ensaios de ultra-som realizados utilizaram o equipamento SYLVATEST conforme ilustrado na Figura 10. Este equipamento é indicado para peças de tamanho estrutural e utiliza transdutores com frequência de 22 kHz.

FIGURA 10: Equipamento SYLVATEST utilizado para obtenção do coeficiente da matriz de rigidez das peças de madeira em serviço

Para a definição das tábuas do tabuleiro investigadas, considerou-se como critério a ausência de defeitos tais como nós, rachaduras, fendas ou empenamentos aparentes.

Após a definição das tábuas investigadas, fez-se a marcação das mesmas conforme procedimento descrito anteriormente para a determinação dos teores de umidade. Em seguida, posicionaram-se os transdutores do equipamento SYLVATEST nas extremidades de cada uma das tábuas e realizaram-se as leituras de tempo requeridas (Figuras 11 e 12).

FIGURA 11: Posicionamento dos transdutores do equipamento SYLVATEST nas extremidades de uma das tábuas investigadas em campo

FIGURA 12: Realização de leituras de tempo que permitiram a determinação do coeficiente da matriz de rigidez das tábuas em serviço

3.3.2 Ensaios de laboratório

Visando comparar os valores obtidos nos ensaios de campo com os determinados em laboratório, selecionaram-se duas vigas de madeira com dimensões 6cm x 12cm x 400cm isentas de defeitos e da mesma essência botânica das tábuas constituintes do tabuleiro, *Eucalipto tereticornis*.

Salienta-se que as peças escolhidas já estavam devidamente entabicadas há mais de cinco anos no depósito do laboratório e em função disto, já apresentavam teor de umidade de equilíbrio na condição seca ao ar ($U_{eq} \approx 12\%$ para a região de São Carlos). A confirmação botânica da espécie de eucalipto foi fornecida pelo controle florestal do Horto Florestal de Rio Claro.

Para esta amostra, realizaram-se ensaios para determinação das seguintes propriedades:

- teor de umidade: U (%);
- densidade aparente a um teor de umidade de 12%: $\rho_{ap,12\%}$ (kg/m^3);
- resistência à compressão paralela às fibras: f_{c0} (MPa);
- módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras: E_{c0} (MPa);
- módulo de elasticidade na flexão estática: E_M (MPa);
- coeficiente da matriz de rigidez: C_{LL} (MPa).

Salienta-se que para corpos-de-prova longos (que podem ser considerados infinitos), o fator de correção do coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}) é próximo de 1, sendo que deste modo o C_{LL} pode representar o módulo de elasticidade dinâmico.

3.3.2.1 Confeção e codificação dos corpos-de-prova

Com o intuito de otimizar e permitir um controle eficiente da experimentação, foi desenvolvida uma codificação para identificar os diversos corpos-de-prova. Esta codificação foi realizada simultaneamente à confeção dos corpos-de-prova.

Atribuíram-se os códigos 1 e 2 às vigas escolhidas, e foram confeccionadas tábuas similares às presentes no tabuleiro para obtenção dos valores de E_M (MPa) e C_{LL} .

(MPa). Também foram confeccionados corpos-de-prova com dimensões recomendadas pela NBR 7190/97 para obtenção das seguintes propriedades:

- teor de umidade: U (%);
- densidade aparente a um teor de umidade de 12%: $\rho_{ap,12\%}$ (kg/m^3);
- resistência à compressão paralela às fibras: f_{c0} (MPa);
- módulo de elasticidade no ensaio de compressão paralela: E_{c0} (MPa);

Na codificação dos corpos-de-prova acrescentaram-se as siglas X, Y, Z ou T em seus códigos anteriores, conforme demonstrado na tabela a seguir.

Tabela VII: Codificação dos corpos-de-prova para realização da experimentação

Viga (6x12x400 cm)	U	$\rho_{ap,12\%}$	E_M / C_{LL}	f_{c0} / E_{c0}
1	1X	1X	1X	1X
	1Y	1Y		
	1Z	1Z	1Y	1Y
	1T	1T		
2	2X	2X	2X	2X
	2Y	2Y		
	2Z	2Z	2Y	2Y
	2T	2T		

Na figura 13 tem-se o esquema do procedimento de confecção dos corpos-de-prova para uma viga 6cm x 12cm x 400cm investigada.

FIGURA 13: Esquema do procedimento adotado na confecção dos corpos-de-prova

3.3.2.2 Determinação do teor de umidade (U%)

O método utilizado neste ensaio seguiu as recomendações da NBR 7190/97, na qual os corpos-de-prova devem apresentar forma prismática com seção transversal retangular de 2 cm x 3 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. Conhecendo-se a massa inicial (m_i) e a massa seca (m_s) do corpo-de-prova, utilizou-se a expressão descrita a seguir, para determinação do teor de umidade.

$$U = \frac{m_i - m}{m_s} s \times 100 \quad (03)$$

Sendo:

U (%): teor de umidade;

$m_i(g)$: massa inicial do corpo-de-prova;

m_s (g): massa seca do corpo-de-prova.

3.3.2.3 Determinação da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$)

O método utilizado neste ensaio seguiu as recomendações da NBR 7190/97, anexo B6, na qual os corpos-de-prova devem apresentar forma prismática com seção transversal retangular de 2 cm x 3 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm.

3.3.2.4 Determinação da resistência à compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade (f_{c0} e E_{c0})

O método utilizado nestes ensaios seguiram as recomendações da NBR 7190/97, anexo B8, na qual os corpos-de-prova devem apresentar forma prismática com seção transversal de 5 cm x 5 cm e comprimento ao longo das fibras de 15 cm.

3.3.2.5 Determinação do módulo de elasticidade na flexão estática (E_M)

Para a realização destes ensaios, posicionaram-se as tábuas apresentando dimensões 2,5x10x230 cm na posição de sua menor inércia, conforme ilustrado na Figura 14.

Em seguida, as tábuas foram submetidas a um carregamento aplicado no meio do vão e foram feitas 8 leituras de deformação. A partir dos dados de carga e deformação, calculou-se o módulo de elasticidade na flexão estática.

FIGURA 14: Realização de ensaio para determinação do módulo de elasticidade na flexão estática

3.3.2.6 Determinação do coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL})

Os ensaios de ultra-som realizados utilizaram o mesmo equipamento utilizado no ensaio de campo (SYLVATEST).

Inicialmente, aplicou-se gel medicinal nas extremidades das peças de madeira e na sequência realizaram-se três leituras do tempo de propagação da onda: no centro da peça e nas partes superior e inferior, conforme Figura 15.

FIGURA 15: Posicionamento dos transdutores e visualização dos três pontos analisados.

Os ensaios não destrutivos precederam os estáticos visando minorar possíveis variabilidades ocasionadas pela deformação introduzida no ensaio de flexão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como as análises e discussões pertinentes. Propõe-se um sistema de classes de risco para madeiras brasileiras e elabora-se um diagrama causa-efeito, objetivando subsidiar o método desenvolvido para avaliar a durabilidade e reabilitar a madeira em estruturas. Aplica-se este método desenvolvido em elementos da passarela pênsil avaliada, e verifica-se o uso de ensaios não destrutivos na avaliação da durabilidade de madeiras em estruturas.

4.1 Método para a avaliação da durabilidade e reabilitação de madeiras em estruturas

Para o desenvolvimento do presente método são propostos um sistema de classes de risco para madeiras brasileiras e um diagrama causa-efeito. Além disso, são elaborados diversos fluxogramas que concatenam os conceitos de durabilidade e procedimentos para reabilitação da madeira, descritos na revisão da literatura, a fim de compor o método proposto.

4.1.1 Proposição de um sistema de classes de risco para madeiras brasileiras

Adotando-se o estudo de Déon (1989) como referência principal e baseando-se na revisão bibliográfica da presente pesquisa, elaborou-se um sistema de classes de

risco relatando-se exemplos de tipologias de estruturas que podem pertencer à classificação descrita (Tabela VIII).

Tabela VIII: Descrição do sistema de classes de risco proposto

CLASSES DE RISCO	DESCRIÇÃO
Classe de risco 1 Estrutura de madeira isolada do solo, sob abrigo e protegida contra a reumidificação	Essas condições de exposição são as mais favoráveis para a aplicação da madeira na construção civil. Contudo, deve-se verificar a possibilidade de ataque das peças por agentes deterioradores de madeira seca e adotar medidas preventivas equivalentes às situações detectadas. Essa categoria de exposição pode ser verificada em escadas, portas, rodapés, mobiliários, entre outros. Nota-se a incidência desta categoria em interiores, constituindo-se de peças fabricadas comumente em carpintarias.
Classe de risco 2 Estrutura de madeira isolada do solo, sob abrigo e em contato permanente com fonte de umidade	É nesta categoria de emprego que ocorrem os incidentes de conservação mais freqüentes, devido a um otimismo exagerado implicando numa ausência de precaução. Apesar da madeira encontrar-se abrigada e isolada da umidade com o solo, deve-se verificar se esta apresenta contato permanente com fonte de umidade. Tem-se que estudar a possibilidade de reumidificação da madeira por meio de água de condensação ou simplesmente por pequenos vazamentos de água. Esta categoria engloba casos em que a madeira apresenta contato com alvenarias úmidas ou quando está presente nas peças de fixação de ar condicionado, em armários sob pias, em banheiros, entre outros.
Classe de risco 3 Estrutura de madeira isolada do solo mas exposta às intempéries	Nesta classe de exposição a única fonte de umidificação é constituída pela chuva e águas de condensação. Para as madeiras isoladas do solo e expostas às intempéries, a ação da água é intermitente e, caso se estagne nas fendas ou ligações abertas dos elementos de madeira, pode-se desenvolver um ataque por agentes degradadores tanto nas partes úmidas como nas partes sãs. Nessas condições de exposição, as peças de madeira encontram-se comumente empregadas em estruturas externas, treliças expostas, treliças de pontes, entre outros.
Classe de risco 4 Estrutura de madeira em contato direto com o solo e/ou sob intempéries	Verificando-se as condições de exposição das madeiras em uso que pertencem à esta classe, observa-se que o contato direto com o solo expõe este material às variações de umidade e aos resíduos orgânicos presentes na superfície de apoio. Por sua vez, o intemperismo permite que a estrutura sofra mudanças constantes de temperatura, esteja em contato direto com os raios ultravioletas, e se exponha às variações de umidade. Em alguns casos, necessita-se empregar a madeira nestas condições, sendo os principais: dormentes de ferrovias, postes de telecomunicações e de transmissão de energia elétrica, cercas e estacas.

Tabela VIII: Continuação

CLASSES DE RISCO	DESCRIÇÃO
Classe de risco 5 Estrutura de madeira imersa em água doce	Nesta condição de exposição, a madeira é submetida às condições de anaerobiose. Na condição de umidade saturada, as paredes celulares atingem o máximo de inchamento criando aberturas dentro da matriz polimérica. Quando a madeira encontra-se imersa em parte, a zona emersa se apresenta exposta à degradação. A condição se assemelha à classe de exposição em que a peça encontra-se em contato permanente com fonte de umidade. Os casos críticos desta categoria estão nas estruturas presentes em obras fluviais, tais como: elementos constituintes de passarelas ou pontes, estacas que em parte estão abaixo do nível do lençol freático, entre outros.
Classe de risco 6 Estrutura de madeira imersa em água salgada ou salobra	Nesta categoria de exposição as madeiras são susceptíveis aos ataques de agentes deterioradores marinhos. A evolução e gravidade dos ataques estão relacionados à salinidade, à temperatura da água e à infestação eventual. Pode-se dizer que a aplicação da madeira em águas salobras encontra-se subordinada à utilização e ao estudo de técnicas aprimoradas de preservação. Nota-se a incidência desta categoria em regiões litorâneas, podendo ser verificada principalmente nos portos, pontes ou passarelas.

4.1.2 Diagrama causa-efeito englobando as causas que afetam a durabilidade da madeira

Com base na revisão da literatura, elaborou-se um diagrama causa-efeito englobando as causas que afetam a durabilidade da madeira. De modo a encaminhar às conclusões pertinentes ao desenvolvimento da presente pesquisa, a seguir apresenta-se este diagrama (Figura 16) que auxiliou na elaboração do método proposto. Este método privilegia as condições de exposição, uma vez que estas balizam os detalhes de projeto e a preservação aplicada na madeira.

FIGURA 16: Diagrama causa - efeito referente aos fatores (causas) que afetam a durabilidade da madeira (efeito)

4.1.3 Método para a avaliação da durabilidade de madeiras em estruturas

O método proposto para a avaliação da durabilidade e reabilitação da madeira em estruturas foi desenvolvida com o auxílio de tabelas e fluxogramas, os quais permitiram concatenar as diversas etapas e atividades inerentes ao estudo.

Com o auxílio da Tabela IX têm-se seis etapas compostas por inúmeras atividades que permitem avaliar a estrutura de madeira quanto a sua durabilidade.

O acompanhamento desta sequência de atividades propostas permite o armazenamento de informações referentes ao elemento de madeira a ser avaliado. Sugere-se, também, uma consulta ao primeiro fluxograma elaborado (“Fluxograma A”), que se trata de uma ferramenta auxiliar para enquadrar o elemento em uma classe de risco de biodeterioração. Por meio desta consulta ao “Fluxograma A”, é possível verificar o próximo fluxograma a ser consultado (B ou C).

Os “Fluxograma B” e “Fluxograma C” são compostos por atividades, decisões e avaliações que ressaltam determinadas verificações a serem realizadas nos elementos de madeira. Estas verificações são consideradas importantes numa classificação visual pois englobam detecções das degradações químicas, físicas, mecânicas e biológicas presentes. Além disso, enfatizam os pontos de interface da madeira com os demais componentes constituintes da estrutura investigada.

A consulta ao “Fluxograma B” ou “Fluxograma C” permite diagnosticar o nível de comprometimento da durabilidade do elemento de madeira investigado. Para tanto,

adotaram-se os seguintes níveis: baixo, médio e alto comprometimento, sendo que cada nível indica o tipo de manutenção necessária a ser realizada.

O baixo comprometimento da durabilidade indica que a manutenção preventiva é suficiente para reabilitar o elemento de madeira. O comprometimento médio indica a necessidade da manutenção corretiva imediata devido a presença de deterioração inicial. O alto comprometimento indica a necessidade da manutenção corretiva imediata devido à presença de deterioração severa no elemento de madeira.

A seguir estão apresentados a Tabela IX, o “Fluxograma A”, o “Fluxograma B” e o “Fluxograma C”, os quais compõem o método desenvolvido para a avaliação da durabilidade da madeira em estruturas.

Tabela IX: Etapas e atividades envolvidas na avaliação da durabilidade da madeira em estruturas

ETAPAS	ATIVIDADES
<p>1ª Etapa: Definição dos elementos de madeira a serem investigados</p> <p>Para a definição dos elementos, recomenda-se considerar a facilidade de acesso para realização dos ensaios de campo.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conhecer a estrutura de madeira a ser avaliada 2. Definir os elementos de madeira a serem investigados 3. Facilidade de acesso para realização dos ensaios de campo? 4. Redefinir os elementos de madeira 5. Numerar os elementos de madeira
<p>2ª Etapa: Identificação das espécies botânicas</p> <p>Analisando-se o projeto e memorial descritivo, recomenda-se verificar a espécie botânica utilizada, bem como os tratamentos preservativos aplicados. Além disso, recomenda-se verificar os valores médios e característicos para as propriedades: f_{c0}, E_{c0}, E_M e $\rho_{ap(12\%)}$, segundo a NBR 7190/97.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 6. A estrutura de madeira apresenta projeto e memorial descritivo? 7. Identificar as espécies botânicas dos elementos 8. Arquivar os valores médios e característicos para as propriedades f_{c0}, E_{c0} e $\rho_{ap,12\%}$, segundo NBR 7190/97 9. Identificar os tratamentos preservativos aplicados nos elementos 10. Arquivar o tipo de tratamento
<p>3ª Etapa: Classificação dos elementos em classes de risco</p> <p>Enquadra-se os elementos a serem avaliados em classes de risco com o auxílio do "Fluxograma A".</p>	<ol style="list-style-type: none"> 11. Realizar classificação visual dos elementos com o auxílio do "Fluxograma B" ou "Fluxograma C". 12. Conector entre páginas
<p>4ª Etapa: Classificação visual</p> <p>Sugere-se análise dos pontos de interface dos elementos com os demais componentes da estrutura investigada.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 11. Realizar classificação visual dos elementos com o auxílio do "Fluxograma B" ou "Fluxograma C". 12. Conector entre páginas

Tabela IX: Continuação

ETAPAS	ATIVIDADES
<p>5ª Etapa: Verificação dos teores de umidade</p> <p>Recomenda-se verificar os teores de umidade dos elementos utilizando-se um medidor de umidade para madeiras do tipo resistivo com eletrodos de penetração.</p>	<pre> graph TD 14[14] --> 15((15)) 15 --> 16(16) </pre> <p>14 Conector entre páginas</p> <p>15 Verificar os teores de umidade dos elementos com uso de equipamento resistivo</p> <p>16 Arquivar os valores dos teores de umidade</p>
<p>6ª Etapa: Utilização de técnicas de ultra-som</p> <p>Deve-se utilizar equipamentos adequados às dimensões do elemento avaliado, sendo necessário que o comprimento de onda seja algumas vezes menor que a amostra. Pesquisas em andamento indicam que a relação comprimento da peça/comprimento de onda (L/λ) deve ser superior a 5. Assim, para peças pequenas é indicado o uso de equipamento de ultra-som de frequência mais elevada. O equipamento SYLVATEST é indicado para peças de tamanho estrutural, o qual utiliza transdutores com frequência de 22 kHz. Já o equipamento STEINKAMP BP-7 é indicado para peças pequenas e utiliza frequência de 45 kHz.</p>	<pre> graph TD 17((17)) --> 18{18} 18 -- Sim --> 19((19)) 18 -- Não --> 19'((19')) 19 --> 20(20) 19' --> 20 20 --> Fim([Fim]) </pre> <p>17 Verificar os valores de C_{LL} dos elementos por meio de técnica de ultra-som</p> <p>18 O equipamento de ultra-som utilizado é adequado às dimensões do elemento avaliado?</p> <p>19 Conferir os valores de C_{LL} por meio da técnica de ultra-som, relacionando aos valores da literatura e/ou ensaios complementares em peças de mesma dimensão e espécie</p> <p>19' Utilizar outra técnica</p> <p>20 Arquivar valores obtidos</p>

FIGURA 17: Fluxograma A (Classes de risco)

FIGURA 18: "Fluxograma B" (Durabilidade)

FIGURA 19: "Fluxograma C" (Durabilidade)

4.1.4 Método para a reabilitação da madeira em estruturas

Com base nos conhecimentos reunidos na revisão de literatura, desenvolveu-se uma representação gráfica que engloba as mais importantes ações perante o comprometimento da durabilidade da madeira em estruturas (Figura 20).

FIGURA 20: Possíveis ações perante o comprometimento da durabilidade (efeito)

A partir do diagnóstico do nível de comprometimento da durabilidade (“Fluxograma B” e “Fluxograma C”) devem ser realizadas as manutenções necessárias ou a demolição, em função da intensidade deste efeito. Para tanto, desenvolveu-se um método para a reabilitação da madeira em estruturas, sendo esta composta por cinco fluxogramas que contemplam os principais procedimentos utilizados na recuperação da madeira. Estes fluxogramas (Figuras 21, 22, 23, 24 e 25) devem ser consultados de acordo com a ação adequada definida por meio do “Fluxograma B” e/ou “Fluxograma C”, apresentados no item 4.1.3.

FIGURA 21: "Fluxograma B1" (Reabilitação)

FIGURA 22: "Fluxograma B2" (Reabilitação)

FIGURA 23: "Fluxograma C1" (Reabilitação)

FIGURA 24: "Fluxograma C2" (Reabilitação)

FIGURA 25: "Fluxograma C3" (Reabilitação)

4.2 Avaliação da durabilidade e reabilitação de elementos de madeira em serviço

Com o intuito de representar alguns elementos de madeira em serviço no contexto do método proposto no item 4.1, foi realizado um estudo de caso no qual a estrutura investigada tratou-se da passarela pênsil descrita no item 3.2.

O acompanhamento da sequência de atividades da Tabela IX permitiu o armazenamento de informações referentes ao elemento de madeira em serviço. Fez-se uma consulta aos fluxogramas visando enquadrar o elemento numa classe de risco de biodeterioração, avaliar o nível de comprometimento de sua durabilidade, bem como indicar os procedimentos adequados para reabilitá-lo.

Seguem-se quatro exemplos de aplicação deste método em elementos de madeira presentes na passarela investigada.

4.2.1 Exemplo de aplicação do método - 01

Para a avaliação da durabilidade do elemento (Figura 26) utilizou-se a Tabela IX do item 4.1.3. Por meio das atividades sugeridas, tem-se o resultado descrito a seguir.

Elemento avaliado - Tábua nº33

FIGURA 26: Elemento avaliado no exemplo 01

Tabela X: Análise do elemento avaliado no exemplo 01

ATIVIDADES (sugeridas)	RESULTADOS (obtidos)
1. Conhecer a estrutura de madeira a ser avaliada.	Passarela pênsil localizada sobre o Rio Piracicaba – S.P.
2. Definir os elementos de madeira a serem investigados.	Elementos: Tábuas superiores do tabuleiro. Localização: Trecho 1 do tabuleiro.
3. Facilidade de acesso para realização dos ensaios de campo?	Sim.
4. Redefinir os elementos de madeira.	Elementos: Tábuas superiores do tabuleiro. Localização: Trecho 1 do tabuleiro.
5. Numerar os elementos de madeira.	Trecho 01: Tábuas 00 a 36. Elemento avaliado: Tábua n.º 33.
6. A estrutura de madeira apresenta projeto e memorial descritivo?	Sim.
7. Identificar as espécies botânicas dos elementos.	Eucalipto tereticornis.
8. Arquivar os valores médios característicos para as propriedades f_{c0} , E_{c0} e $\rho_{ap,12\%}$, segundo NBR 7190/97.	$f_{c0}=57,7$ MPa; $E_{c0}=17198$ MPa e $\rho_{ap(12\%)}=899$ kg/m ³ .
9. Identificar os tratamentos preservativos aplicados nos elementos.	Sistema preservativo com pressão
10. Arquivar o tipo de tratamento preservativo aplicado nos elementos.	Sistema preservativo com pressão utilizando preservativo hidrossolúvel CCB.
11. Enquadrar os elementos de madeira em classes de risco por meio do “Fluxograma A”.	Classe de risco 3 (Verificar na Figura 27, traçado em vermelho).
12. Verificar, por meio do “Fluxograma A”, o próximo fluxograma que deve ser consultado (B ou C).	Próximo Fluxograma a ser consultado: “Fluxograma C” (Verificar na Figura 27, traçado em vermelho).
13. Realizar classificação visual dos elementos com o auxílio do “Fluxograma B” ou “Fluxograma C”.	Classificação visual com auxílio do “Fluxograma C” Resultado: Alto comprometimento da durabilidade (Verificar na Figura 28, traçado em vermelho).

A seguir, estão apresentados os fluxogramas (Figuras 27, 28 e 29) consultados, contendo as análises que permitiram a avaliação do nível de comprometimento da durabilidade e a proposição de procedimentos para reabilitação do elemento.

FIGURA 27: Aplicação do "Fluxograma A" ao exemplo 01

FIGURA 28: Aplicação do "Fluxograma C" ao exemplo 01

FIGURA 29: Aplicação do "Fluxograma C3" ao exemplo 01

Os resultados obtidos no exemplo 01 permitem afirmar que para a tábua superior do tabuleiro n.º 33 do Trecho 1:

- pode ser enquadrada como pertencente à classe de risco de biodeterioração 3;
- apresenta alto nível de comprometimento de sua durabilidade;
- necessita ser substituída.

4.2.2 Exemplo de aplicação do método - 02

Para a avaliação da durabilidade do elemento (Figura 30) utilizou-se a Tabela IX do item 4.1.3. Por meio das atividades sugeridas têm-se o resultado descrito a seguir.

FIGURA 30: Elemento avaliado no exemplo 02

Tabela XI: Análise do elemento avaliado no exemplo 02

ATIVIDADES (sugeridas)	RESULTADOS (obtidos)
1. Conhecer a estrutura de madeira a ser avaliada.	Passarela pênsil localizada sobre o Rio Piracicaba – S.P.
2. Definir os elementos de madeira a serem investigados.	Elementos: Tábuas inferiores do tabuleiro. Localização: Trecho 2 do tabuleiro.
3. Facilidade de acesso para realização dos ensaios de campo?	Não.
4. Redefinir os elementos de madeira.	Elementos: Tábuas inferiores do tabuleiro. Localização: Trecho 2 do tabuleiro.
5. Numerar os elementos de madeira.	Trecho 02: Tábuas 37 a 281. Elemento avaliado: Tábua n.º 197.
6. A estrutura de madeira apresenta projeto e memorial descritivo?	Sim.

Tabela XI: Continuação

ATIVIDADES (sugeridas)	RESULTADOS (obtidos)
7. Identificar as espécies botânicas dos elementos.	Eucalipto tereticornis.
8. Arquivar os valores médios característicos para as propriedades f_{c0} , E_{c0} e $\rho_{ap,12\%}$, segundo NBR 7190/97.	$f_{c0}=57,7$ MPa; $E_{c0}=17198$ MPa e $\rho_{ap(12\%)}=899$ kg/m ³ .
9. Identificar os tratamentos preservativos aplicados nos elementos.	Sistema preservativo com pressão.
10. Arquivar o tipo de tratamento preservativo aplicado nos elementos.	Sistema preservativo com pressão utilizando preservativo hidrossolúvel CCB.
11. Enquadrar os elementos de madeira em classes de risco por meio do "Fluxograma A".	Classe de risco 3 (Verificar na Figura 31, traçado em vermelho).
12. Verificar, por meio do "Fluxograma A", o próximo fluxograma que deve ser consultado (B ou C).	Próximo Fluxograma a ser consultado: "Fluxograma C" (Verificar na Figura 31, traçado em vermelho).
13. Realizar classificação visual dos elementos com o auxílio do "Fluxograma B" ou "Fluxograma C".	Classificação visual com auxílio do "Fluxograma C". Resultado: Alto comprometimento da durabilidade (Verificar na Figura 32, traçado em vermelho).

A seguir estão apresentados os fluxogramas (Figuras 31, 32 e 33) consultados, contendo as análises que permitiram a avaliação do nível de comprometimento da durabilidade e a proposição de procedimentos para reabilitação do elemento.

Os resultados obtidos no exemplo 02 permitem afirmar que para a tábua inferior do tabuleiro n.º 197 do Trecho 2:

- pode ser enquadrada como pertencente à classe de risco de biodeterioração 3;
- apresenta alto nível de comprometimento de sua durabilidade;
- necessita ser substituída.

FIGURA 31: Aplicação do "Fluxograma A" ao exemplo 02

FIGURA 32: Aplicação do "Fluxograma C" ao exemplo 02

FIGURA 33: Aplicação do "Fluxograma C3" ao exemplo 02

4.2.3 Exemplo de aplicação do método - 03

Para a avaliação da durabilidade do elemento (Figura 34) utilizou-se a Tabela IX do item 4.1.3. Por meio das atividades sugeridas têm-se o resultado descrito a seguir.

Elemento avaliado - Tábua n.º 279

FIGURA 34: Elemento avaliado no exemplo 03

Tabela XII: Análise do elemento avaliado no exemplo 03

ATIVIDADES (sugeridas)	RESULTADOS (obtidos)
1. Conhecer a estrutura de madeira a ser avaliada.	Passarela pênsil localizada sobre o Rio Piracicaba – S.P.
2. Definir os elementos de madeira a serem investigados.	Elementos: Tábuas superiores do tabuleiro Localização: Trecho 2 do tabuleiro.
3. Facilidade de acesso para realização dos ensaios de campo?	Sim.
4. Redefinir os elementos de madeira.	Elementos: Tábuas superiores do tabuleiro. Localização: Trecho 2 do tabuleiro.
5. Numerar os elementos de madeira.	Trecho 02: Tábuas 37 à 281. Elemento avaliado: Tábua n.º 279.
6. A estrutura de madeira apresenta projeto e memorial descritivo?	Sim.
7. Identificar as espécies botânicas dos elementos.	Eucalipto tereticornis.
8. Arquivar os valores médios característicos para as propriedades f_{c0} , E_{c0} , E_M e $\rho_{ap,12\%}$, segundo NBR 7190/97.	$f_{c0}=57,7$ MPa; $E_{c0}=17198$ MPa e $\rho_{ap(12\%)}=899$ kg/m ³ .
9. Identificar os tratamentos preservativos aplicados nos elementos.	Sistema preservativo com pressão.
10. Arquivar o tipo de tratamento preservativo aplicado nos elementos.	Sistema preservativo com pressão utilizando preservativo hidrossolúvel CCB.
11. Enquadrar os elementos de madeira em classes de risco por meio do "Fluxograma A".	Classe de risco 3 (Verificar na Figura 35, traçado em vermelho).

Tabela XII: Análise do elemento avaliado no exemplo 03

ATIVIDADES (sugeridas)	RESULTADOS (obtidos)
12. Verificar, por meio do “Fluxograma A”, o próximo fluxograma que deve ser consultado (B ou C).	Próximo Fluxograma a ser consultado: “Fluxograma C” (Verificar na Figura 35, traçado em vermelho)
13. Realizar classificação visual dos elementos com o auxílio do “Fluxograma B” ou “Fluxograma C”.	Classificação visual com auxílio do “Fluxograma C” Resultado: Baixo comprometimento da durabilidade (Verificar na Figura 36, traçado em vermelho)

A seguir estão apresentados os fluxogramas (Figuras 35, 36 e 37) consultados, contendo as análises que permitiram a avaliação do nível de comprometimento da durabilidade e a proposição de procedimentos para reabilitação do elemento.

Os resultados obtidos no exemplo 03 permitem afirmar que para a tábua superior do tabuleiro n.º 279 do Trecho 2:

- pode ser enquadrada como pertencente à classe de risco de biodeterioração 3;
- apresenta baixo nível de comprometimento de sua durabilidade;
- necessita de limpeza;
- necessita de pincelamento ou aspersão de produto preservativo;
- necessita de manutenção periódica.

FIGURA 35: Aplicação do "Fluxograma A" ao exemplo 03

FIGURA 36: Aplicação do "Fluxograma C" ao exemplo 03

FIGURA 37: Aplicação do “Fluxograma C1” ao exemplo 03

4.2.4 Exemplo de aplicação do método a grupos de elementos da passarela pênsl

Da mesma forma como aplicada para elementos individuais, aplicou-se o método para grupos de elementos. Assim, avaliou-se o nível de comprometimento da durabilidade de alguns grupos de elementos, tais como: tábuas superiores, tábuas inferiores, cavilhas e ligações.

Visando facilitar a análise realizada, considerou-se a subdivisão do tabuleiro em trechos, conforme proposição descrita no item 3.2.3.

Nas Figuras 38, 39, 40 e 41 estão apresentadas fotos de tábuas superiores e inferiores do tabuleiro, cavilhas e ligações, respectivamente, para cada um dos trechos avaliados da passarela pênsil.

FIGURA 38: Tábuas superiores do tabuleiro da passarela pênsil

FIGURA 39: Tábuas inferiores do tabuleiro da passarela pênsil

FIGURA 40: Cavilhas do tabuleiro da passarela pênsil

FIGURA 41: Ligações da passarela pênsl

De modo a concatenar as informações referentes ao comprometimento da durabilidade destes grupos de elementos, está apresentado na Figura 42 um diagrama, no qual atribuiu-se níveis de comprometimento para a passarela em estudo.

FIGURA 42: Atribuição dos níveis de comprometimento (alto, médio e baixo) da durabilidade para grupos de elementos

No diagrama da Figura 42, observa-se que as tábuas superiores do tabuleiro apresentam baixo comprometimento da durabilidade em todos os trechos analisados. Além disso, o trecho 3 apresenta baixo comprometimento para todos os grupos de elementos, provavelmente pela menor influência da água de condensação do rio, pois este trecho encontra-se quase totalmente sobre a terra.

Após a verificação dos níveis de comprometimento da durabilidade dos grupos de elementos avaliados, aplicou-se o presente método para indicar os possíveis procedimentos necessários para reabilitá-los.

4.3 Verificação do uso de ensaios não destrutivos na avaliação da durabilidade da madeira em estruturas

Foram realizados ensaios de campo para obtenção dos teores de umidade e determinação dos coeficientes da matriz de rigidez de tábuas superiores do tabuleiro, conforme descrito no item 3.2.2. Visando obter parâmetros de referência para as características investigadas em campo, realizaram-se ensaios complementares em laboratório para peças da mesma espécie utilizada na passarela pênsil.

4.3.1 Determinação dos teores de umidade nas tábuas do tabuleiro

Foram determinados os teores de umidade em diversas regiões das tábuas superiores do tabuleiro, conforme a subdivisão proposta no item 3.2.3. Na tabela XIII estão apresentados os valores dos teores de umidade obtidos nos três trechos do tabuleiro (tábuas superiores) utilizando-se o equipamento descrito no item 3.3.1.

Tabela XIII: Valores dos teores de umidade nas tábuas superiores do tabuleiro

	Número da tábua	Teor de umidade (%)
TRECHO I	05	15,3
	06	13,7
	07	13,3
	08	12,9
	09	10,6
	10	10,7
	11	15,7
	19	16,9
	20	11,4
	21	13,3

Tabela XIII: Continuação

	Número da tábua	Teor de umidade (%)
TRECHO 2	50	12,1
	58	13,2
	91	13,8
	100	16,3
	129	12,7
	130	12,4
	133	15,6
	278	15,2
	279	14,6
	281	13,5
TRECHO 3	282	12,1
	283	15,7
	284	11,1
	285	20,1
	286	13,0
	287	17,9
	288	13,2
	369	9,6
	373	8,2
	381	14,4

Estes valores foram determinados com a umidade relativa do ar apresentando um valor de 39% e com a temperatura ambiente variando de 32,5°C a 37,1°C, condições estas utilizadas na calibração do equipamento.

Por meio do mapeamento dos teores de umidade das tábuas superiores do tabuleiro, foi possível comparar os valores obtidos nos três trechos, conforme apresentado na Figura 43.

FIGURA 43: Mapeamento dos teores de umidade nos três trechos do tabuleiro

Na tabela XIV estão apresentados os valores médios, máximos e mínimos para os teores de umidade obtidos nos ensaios de campo. Os valores de U_1 , U_2 e U_3 correspondem aos teores de umidade nos trechos 1, 2 e 3 do tabuleiro, respectivamente.

Tabela XIV: Valores médios, máximos e mínimos dos teores de umidade para algumas tábuas do tabuleiro

	U_1 (%)	U_2 (%)	U_3 (%)
Número de observações	10	10	10
Média	13,4	13,9	13,5
Mínimo	10,6	12,1	8,2
Máximo	16,9	16,3	20,1
Coefficiente de variação	15,1	9,8	25,6

A verificação dos teores de umidade compõe a 5ª Etapa da Tabela IX, relativa à avaliação da durabilidade para o grupo de elementos pertencentes às tábuas superiores do tabuleiro. Esta verificação é um importante indicativo no sentido de se conhecer o conjunto de fatores favoráveis à formação dos ambientes intrínsecos aos diversos organismos xilófagos, conforme descrito na revisão da literatura.

Neste exemplo de aplicação do método, os valores obtidos para o teor de umidade sugerem que este grupo de elementos não está susceptível ao ataque de fungos e bactérias. Todavia, os valores apresentados na Tabela XIV indicam a condição de umidade favorável à ação de térmitas ($U < 20\%$). Deste modo, recomenda-se a manutenção periódica para este grupo de elementos, conforme indicado no “Fluxograma C1” da Figura 44 (traçado em vermelho).

FIGURA 44: Aplicação do “Fluxograma C1” ao grupo de elementos pertencentes às tábuas superiores do tabuleiro

4.3.2 Utilização da técnica de ultra-som para determinação do C_{LL} em tábuas do tabuleiro

Foram determinados os coeficientes da matriz de rigidez (C_{LL}) em diversas regiões das tábuas superiores da passarela, conforme a subdivisão proposta no item 3.2.3. Na tabela XV estão apresentados os valores de C_{LL} obtidos.

Tabela XV: Valores obtidos com o equipamento de ultra-som

Tábua	L (cm)	t (μs)	v (m/s)	C_{LL} (MPa)
05	223	540	4130	15331
06	293	571	5131	23671
07	335	666	5030	22746
08	374	775	4826	20936
09	414	829	4994	22421
370	595	1358	4381	17258
371	596	1230	4846	21108
372	598	1639	4826	20942
373	598	1673	4698	19838
379	596	1330	4481	18053
380	594	1185	5013	22589
381	599	1227	4882	21425
382	595	1247	4771	20467
383	597	1209	4938	21921

Na tabela XVI estão apresentados os valores médios, máximos e mínimos para os valores de C_{LL} obtidos em campo. O valor de C_{LL} refere-se ao coeficiente da matriz de rigidez obtido por meio de ultra-som, conforme já descrito no item 3.3.1.

Tabela XVI: Valores médios, máximos e mínimos de C_{LL} para algumas tábuas do tabuleiro

	C_{LL} (MPa)
Número de observações	14
Média	20622
Mínimo	15331
Máximo	23671
Coeficiente de variação	10,9

Estes valores, obtidos com a técnica de ultra-som, devem ser comparados aos valores existentes na literatura e/ou com os obtidos em peças similares e da mesma espécie. Estas comparações serão realizadas nos próximos itens.

4.3.3 Ensaios complementares de laboratório

Na experimentação em laboratório foram obtidos valores de algumas propriedades físicas e mecânicas do *Eucalypto tereticornis* conforme recomendações da NBR 7190/97. Para a obtenção dos valores de E_M e C_{LL} foram confeccionadas tábuas similares às presentes nos ensaios de campo. Nas tabelas XVII e XVIII estão apresentados os valores obtidos nesta etapa da experimentação.

Tabela XVII: Valores dos teores de umidade e densidade obtidos nos ensaios com *Eucalypto tereticornis*

Corpo-de-prova	U (%)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)
1X	14,5	0,990
1Y	14,3	0,968
1Z	13,8	0,971
1T	14,1	0,999
2X	14,8	0,978
2Y	14,8	1,025
2Z	13,9	1,005
2T	13,8	0,949

Tabela XVIII: Valores de resistência à compressão paralela às fibras e respectivos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios com *Eucalypto tereticornis*

Corpo-de-prova	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_M (MPa)	C_{LL} (MPa)
1X	59	11385	17694	21447
1Y	61	13130	15136	18233
2X	58	15012	14730	16575
2Y	55	10647	17796	20240

A seguir, apresenta-se uma análise descritiva dos valores obtidos em laboratório referentes ao *Eucalypto tereticornis*.

Tabela XIX: Valores médios, máximos e mínimos dos resultados obtidos em laboratório para o Eucalipto tereticornis

	U (%)	$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_M (MPa)	C_{LL} (MPa)
Número de corpos de prova	8	8	4	4	4	4
Média	14,3	0,986	58	17310	16339	19124
Mínimo	13,8	0,949	55	14693	14730	16575
Máximo	14,8	1,025	61	20717	17796	21447
Coefficiente de variação	2,7	2,0	3,5	13,4	8,7	9,8

4.3.4 Comparações entre os resultados obtidos em campo e os ensaios complementares em laboratório

Comparando-se os valores de C_{LL} determinados em campo com os obtidos em laboratório, verificou-se que:

- O valor médio de C_{LL} obtido em campo excedeu em 8% o valor médio de C_{LL} obtido em laboratório.

De acordo com Bartholomeu; Gonçalves (2000), o C_{LL} é 22% mais alto que os métodos estáticos quando não se aplica a correção com o coeficiente de Poisson.

No presente caso, comparando-se os valores dos ensaios dinâmicos (C_{LL}) realizados em campo com os valores de E_{c0} e E_M determinados nos ensaios complementares realizados em laboratório, verificou-se que:

- O valor médio de C_{LL} obtido em campo excedeu em 19% o valor médio de E_{c0} , e em 26% o valor médio obtido para E_M em laboratório.

Além disso, comparando-se os valores de C_{LL} determinados em campo com o valor médio de E_{c0} presente na NBR 7190/97 (anexo E), verificou-se que:

- O valor médio de C_{LL} obtido em campo excedeu em 20% o valor médio de E_{c0} indicado na norma para o Eucalipto tereticornis.

Salienta-se que a verificação dos valores de C_{LL} compõe a 6ª Etapa da Tabela IX, relativa à durabilidade para o grupo de elementos pertencentes às tábuas superiores do tabuleiro.

Esta verificação é uma importante ferramenta no sentido de se avaliar estruturalmente os elementos de madeira, sem que haja a necessidade de destruição de alguma peça, ou mesmo interditar o acesso (ou o funcionamento) da estrutura a ser avaliada.

Neste exemplo de aplicação do método, os valores de C_{LL} obtidos para o grupo de elementos da passarela são superiores aos valores dos ensaios complementares, e também superiores aos valores do módulo de elasticidade estático disponível na literatura para o Eucalipto tereticornis.

Deste modo, considerando o baixo comprometimento deste grupo de elementos (item 4.2.4), não se torna necessária a recuperação ou substituição dos elementos, recomendando-se a realização de manutenção periódica, conforme indicado no “Fluxograma C1” da Figura 44.

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises apresentadas no capítulo 4, e nos aspectos destacados na Revisão da Literatura, registram-se as seguintes conclusões:

- O método proposto no presente trabalho pode ser aplicado para enquadrar elementos estruturais de madeira em classes de risco de biodeterioração, e também para avaliar o nível de comprometimento da durabilidade de peças de madeira. Pode ser empregado para avaliar tanto a durabilidade de elementos individuais, como também para grupos de elementos.
- O método proposto no presente trabalho permite indicar os procedimentos adequados a serem adotados para reabilitar os elementos estruturais avaliados. Na aplicação deste método na avaliação da durabilidade da estrutura escolhida (passarela pênsil) observou-se que, apesar da atribuição de um baixo nível de comprometimento da durabilidade a um grupo de elementos, pode ocorrer um alto comprometimento de algum elemento pertencente a este grupo. Isto denota a importância de se estabelecer uma programação de manutenções periódicas visando monitorar a deterioração da estrutura de madeira, de modo a formar um cadastro para acompanhamento da durabilidade. O estabelecimento de um programa de manutenção que utilize o método desenvolvido nesta pesquisa

poderá diminuir significativamente os custos relacionados à reabilitação, pois a deterioração de determinado elemento pode ser diagnosticada no seu estágio inicial. O cadastro gerado a partir da aplicação do método proposto poderá indicar recomendações para a especificação, projeto e execução de estruturas de madeira similares.

- A utilização do ultra-som como técnica não destrutiva na avaliação da durabilidade da madeira em elementos estruturais demonstrou-se promissora. Salienta-se que o ultra-som permite a avaliação sob o ponto de vista estrutural, de modo a indicar se houve diminuição dos valores dos módulos de elasticidade esperados para a espécie investigada. Para isto, torna-se necessário o conhecimento das propriedades envolvidas e suas relações (C_{LL} , E_{c0} e E_M) para permitir uma melhor confiabilidade da avaliação. Na aplicação da técnica de ultra-som nos elementos da estrutura escolhida neste trabalho (tábuas do tabuleiro), os resultados obtidos foram compatíveis com os ensaios em peças similares da mesma espécie botânica. Ressalta-se, porém, que a utilização do ultra-som necessita ser empregada em conjunto com outros procedimentos descritos no método, visando a avaliação do comprometimento da durabilidade, sendo que a confiabilidade desta técnica poderá aumentar com o incremento nas pesquisas que visem a determinação de propriedades de rigidez das madeiras brasileiras por meio de ultra-som.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABPM (2000). O que é preservação de madeiras. <http://www.abpm.com.br>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). *NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro.

BARTHOLOMEU, A. (2001). *Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som*. Campinas. 98p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.

BARTHOLOMEU, A. & GONÇALVES, R. (2000). Uso do ultra-som na determinação da constante elástica da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo. *Anais*, Cd-rom, arquivo digital.

BENEVENTE, V.A. (1995). *Durabilidade em Construções de Madeira - uma questão de projeto*. São Carlos. 231p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BUCUR, V. (1995). *Acoustics of wood*. New York, CRC Press Inc.

CALIL, C. J.; DIAS A. A. & LAHR, F. A. R. (1998). A maior passarela pênsil em madeira do hemisfério sul. *Revista Técnica*, n.34, p. 50-51, mai./jun. 1998.

CARLOS, V. (1995). *Resistência a insetos xilófagos*. Revista madeira, n.19. p. 42-43.

- CASABERNARDO (2001). Conheça nossos produtos.
<http://www.casabernardo.com.br>
- DÉON, G. (1989). *Manual de preservação das madeiras em clima tropical*. França - Centre Technique Forestier Tropical: Department du CIRAD, 1989. 116p.
- DUCATTI, M. A. (1997). *Classes de risco*. Preservação de madeiras. ESALQ – CCTM. Piracicaba, São Paulo. 15p.
- IORELLI, J. & DIAS, A. A. (2000). Utilização de fibra de carbono para recuperação e reforço de peças estruturais de madeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 14. São Pedro, São Paulo, Brasil. *Anais* (Resumos). São Carlos, DEMa – UFSCar, p.100.
- FORSBERG, T. E. (1996). Long-span timber trusses – Evaluating a repair method. *Revista Practice periodical on structural desing and construction*, n.89, p. 89-92, mai. 1996.
- GONÇALVES, R. et al. (1998). Montagem de equipamento para ensaios não destrutivos em madeira utilizando ultra-som. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 6. Florianópolis, 1998. *Anais*, Florianópolis. v.4 p.343-354.
- GORNIAK, E. & MATOS, J. L. M. (2000). Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. São Carlos, São Paulo, Brasil. *Anais*, Cd -rom, arquivo digital.
- INO, A. (1997). Princípios Básicos para garantir a Durabilidade de uma Construção em Madeira. In: WORKSHOP DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São Leopoldo, RS. *Anais*.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
S.A. – IPT. (1986). *Manual de preservação de madeiras*. São Paulo, v.1., 702p.

IPT (2000). Preservação. <http://www.ipt.com.br>

IRPA (2000). Madeira preservada. <http://www.irpa.com.br>

JOHNSON, K. A. & ISAKSON, E. (1995). *Rehabilitation of slab span timber bridges*. Restructuring: - America and Beyond Structures Congress Proceedins. v1 1995, ASCE, New York, NY, USA. P281-289.

KROPF, F. W. (2000). Durabilidade e detalhes de projeto - O resultado de 15 anos de contínua implementação. *Revista madeira: arquitetura e engenharia*. v.1, n.1, p. 7-13, jan./abr. 2000.

MACÊDO, A. N. (1991). *Biodeterioração e preservação de madeiras*. São Paulo, DATE e TDC. 135p.

MATEUS, T. J. E. (1978). *Condições de aplicação de madeiras em edifícios tendo em vista minimizar os riscos de ataques por agentes biológicos*. Lisboa, L.N.E.C. 53p.

MENDES, A. S.& ALVES, M. V. S. (1988). *A degradação da madeira e sua preservação*. Brasília, Ministério da Agricultura. 69p.

METTEM, C. J. & ROBINSON, G. C. (1991). *The repair of structural timber*. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE LONDON, London, 1991. *Anais*. London.

MIOTTO, J. L. (2000). *Disposições construtivas e durabilidade em estruturas de madeira*. Monografia da disciplina Propriedades físicas, de resistência e de elasticidade da madeira - SCM 5753. São Carlos, EESC – USP.

MONTANA (2000). Tratamento de madeiras. <http://www.montana.com.br>

MONTEIRO, M. B. B. & YOJO, T. (2000). Biodeterioração e análise estrutural em residência. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. São Carlos, São Paulo, Brasil. *Anais*, Cd - rom, arquivo digital.

NASCIMENTO, M. L. (1993). *Análise de sistemas estruturais e construtivos de pontes de madeira – algumas considerações*. São Carlos. 193p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

NAHUZ, M. A. R. & FREITAS, A. R. (2000). IPT – 100 anos de contribuição tecnológica. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. São Carlos, São Paulo, Brasil. *Anais*, Cd - rom, arquivo digital.

OLIVEIRA, S. T. (1995). *Ferramentas para o aprimoramento da qualidade*. São Paulo, Editora Pioneira. 115p.

OLIVEIRA, F.G.R. (2001). *Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamentos de ultra-som*. São Carlos. 55p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

PINHEIRO, R. V. & LAHR, F. A. R. (2000). Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. São Carlos, São Paulo, Brasil. *Anais*, Cd -rom, arquivo digital.

PUCCINI, C.T. & GONÇALVES, R. (2000). Uso do ultra-som na avaliação da qualidade da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo. *Anais*, Cd-rom, arquivo digital.

RITTER, R.C (1990). *New process restores timber piles*. Ocean Industry. May: 92-93.

RODRIGUES, W. & SALES, A. (2000). Determinação do teor de umidade da madeira por meio de medidores elétricos. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. São Carlos, São Paulo, Brasil. *Anais*, Cd -rom, arquivo digital.

SALES, A. (1996). *Proposição de classes de resistência para madeira*. São Paulo. 223p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP.

SIKA (2000). Colagem rígida a base de epoxi. <http://www.sika.com.br>.

SILVA, I.J. (1997). *A Importância da Disciplina Patologia na Ciência Engenharia*. São Paulo, Prova Didática. 32p.

SZÜCS, C. P.(1992). Usando o pinnus: uma questão de desenho. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, São Paulo, Brasil . *Anais*, v.2, p.177-85.

VOLNY, N. J. & PELLERIN, R. F. (1995). *Inspecion and repair of a timber truss bridge*. Restructuring: América and Beyond Structures Congrees Proceedings. v1 1995, ASCE, New York, NY, USA. p.492-495.