

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DANIEL SIQUEIRA SANTOS

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO E REFORÇO EM
ESTRUTURAS DE MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2016

DANIEL SIQUEIRA SANTOS

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO E REFORÇO EM
ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fabiana Goia Rosa de Oliveira

CAMPO MOURÃO

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO E REFORÇO EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

por

Daniel Siqueira Santos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 20h do dia 13 de junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

(UTFPR)

**Prof. Esp. Sérgio Roberto Oberhauser
Quintanilha Braga**

(UTFPR)

**Prof^a. Dr^a. Fabiana Goia Rosa de
Oliveira**

(UTFPR)

Orientadora

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Marcelo Guelbert

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Aos meus pais e meu irmão.

AGRADECIMENTOS

Meus eternos agradecimentos aos meus pais, João e Maria, sem a ajuda dos quais nenhuma realização seria possível. Obrigado pelos ensinamentos e pelo imensurável carinho recebido incessantemente.

Ao meu irmão João Vitor, cujas pegadas guiaram meus passos até a universidade e cujos ombros me serviram de esteio ao longo da caminhada até aqui.

Aos meus amigos, que sempre tornaram tranquilos e felizes até os momentos mais difíceis, em especial à Ana Paula, Ana Raíza, Bruna Maia, Bruna Ayres, Déborah, Gabriel, Haddan, Leandro, Rafael, Renan, Sheila e Taciane.

Obrigado a professora doutora Fabiana Góia Rosa de Oliveira, pela imensa paciência, dedicação e conhecimentos transmitidos, não só durante a orientação deste trabalho, mas ao longo de toda a caminhada universitária.

Agradeço por fim à toda equipe técnico-administrativa e ao corpo docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelos serviços de qualidade prestados ao longo dos últimos anos.

RESUMO

SANTOS, Daniel S. Avaliação de técnicas de reabilitação e reforço em estruturas de madeira. 2016. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

Este trabalho apresenta uma análise das principais técnicas de reforço e reabilitação em estruturas de madeira disponíveis no mercado da construção civil atualmente. A sequência de informações nele apresentadas tem por objetivo pormenorizar os diversos aspectos a serem levados em consideração na análise de estruturas de madeira suscetíveis à degradação e perda de resistência, desde a exposição dos agentes de deterioração desse material e das técnicas de inspeção não destrutivas mais comuns, até a descrição de técnicas que possibilitem o ganho de resistência por parte destas estruturas. A apresentação de dados referentes a estudos de casos de outros autores, visa exemplificar o funcionamento das técnicas de reforço e reabilitação citadas ao longo deste trabalho, permitindo uma análise mais realística da teoria apresentada.

Palavras-chave: Estruturas de madeira. Reforço e reabilitação. Ganho de resistência.

ABSTRACT

SANTOS, Daniel S. Evaluation of reinforcement and rehabilitation techniques in wooden structures. 2016. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

This paper presents an analysis of the main reinforcement and rehabilitation techniques in wooden structures available in the current construction market. The sequence information presented in it aims to detail the various aspects to be taken into consideration in wooden structures analysis susceptible to degradation and loss of strength, since the exposure to agents of deterioration of the material and the most common non-destructive inspection techniques until description of techniques that allow the gain of resistance of these structures. The presentation of data from case studies of other authors, aims to illustrate the functioning of strengthening and rehabilitation techniques used throughout work, allowing a more realistic analysis of the presented theory.

Keywords: Wooden structures. Reinforcement and rehabilitation. Gain of resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nós em elementos de madeira	26
Figura 2 – Exemplo de fenda longitudinal devido a secagem	27
Figura 3 – a) Resistograph® ; b) Unidade móvel do Resistograph®.....	29
Figura 4 – Pilodyn®.....	30
Figura 5 – Exemplo de uso de higrômetro resistivo	31
Figura 6 – Equipamento de ultrassom Sylvatest	31
Figura 7 – À esquerda, equipamentos para a aplicação da técnica de raios-X à inspeção de estruturas de madeira. À direita, exemplo da saída de resultados do ensaio por raio gama.....	32
Figura 8 – Unidade central e antena de um georradar.....	33
Figura 9 – Componentes do aparelho METRIGUARD: À esquerda, unidade central. À direita, martelo de impacto.....	33
Figura 10 - Utilização de viga de reforço transversal apoiada em pilares de madeira	37
Figura 11 – Reforço por substituição de peças de madeira: (a) em uma extremidade/apoio; (b) na zona central de uma viga; (c) na base de uma coluna	37
Figura 12 – Exemplos de reforço com aumento da seção transversal.....	38
Figura 13 - Exemplo de reforço com empalmes de madeira.....	39
Figura 14 - Reforço metálico embutido na região do apoio de viga	40
Figura 15 – a) Reforço com perfis metálicos; b) Reforço com chapas metálicas	40
Figura 16 – Perfis metálicos com vigas de madeira existentes no Mosteiro de Tibães, Braga.....	41
Figura 17 – Reforço de peças de madeira com aplicação de tirantes pré-esforçados	42
Figura 18 - Vigamento apoiada em cantoneira metálica	42
Figura 19 – Preenchimento de fissuras com resina epoxídica	44
Figura 20 – Curvas típicas de tração versus deformação das fibras.....	46
Figura 21 - Laminado de fibra de carbono unidirecional	47
Figura 22 - Exemplos de tecidos unidirecionais de fibra de vidro.....	48
Figura 23 – Estrutura mista de madeira-concreto em residência	52
Figura 24 - Esboço de uma estrutura mista de madeira-concreto mantendo o soalho	52
Figura 25 – a) Ruptura na lâmina abaixo do reforço; b) Ruptura final da viga	55
Figura 26 – Aplicação do consolidante a) Costaneira; b) Escada; c) Vigas do pavimento.....	56
Figura 27 - Flecha acentuada na viga reforçada.....	60
Figura 28 – Vista geral dos pórticos após o processo de substituição das peças.....	61
Figura 29 – Reforço do pavimento do piso térreo com recurso de escoras de madeira	62
Figura 30 – Reforço de vigas do 1º pavimento com a colocação de novos elementos	62
Figura 31 – Reforço do apoio das vigas dos pavimentos com elementos metálicos.....	63
Figura 32 – Reforço dos apoios com uso de argamassa epoxídica	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos tecidos de fibra a 20°C	45
Tabela 2 - Características genéricas das fibras de carbono	47
Tabela 3 - Propriedades típicas de resinas usadas comumente.....	50
Tabela 4 - Propriedades geométricas das vigas de MLC avaliadas experimentalmente.....	53
Tabela 5 - Valor de rigidez à flexão e momento fletor resistente	54
Tabela 6 - Resumo dos ensaios na costaneira	56
Tabela 7 - Resumo dos ensaios na escada.....	57
Tabela 8 - Resumo dos ensaios nas vigas do pavimento.....	57
Tabela 9 - Vigas de Pinus Caribea	59
Tabela 10 - Vigas de Peroba Rosa	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral.....	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3 JUSTIFICATIVA	13
4 REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1 A madeira e suas características	14
4.1.1 Teor de água e higroscopicidade	16
4.1.2 Densidade	17
4.1.3 Retratibilidade	17
4.1.4 Reação e resistência ao fogo.....	18
4.1.5 Resistência à tração paralela às fibras ou axial	19
4.1.6 Resistência à compressão paralela às fibras ou axial.....	19
4.1.7 Resistência à tração perpendicular às fibras.....	20
4.1.8 Resistência à compressão perpendicular às fibras	20
4.1.9 Resistência à flexão estática.....	20
4.1.10 Resistência ao corte ou escorregamento	21
4.2 Agentes patológicos da madeira.....	21
4.3 Defeitos e anomalias das peças de madeira	25
4.4 Técnicas de inspeção	28
4.5 Técnicas de reforço e reabilitação	35
4.5.1 Reforço com elementos de madeira.....	36
4.5.2 Reforço com elementos metálicos	39
4.5.3 Reforço com produtos poliméricos	42
4.5.4 Reforço com materiais compósitos	44
4.5.4.1 Fibra de carbono.....	46
4.5.4.2 Fibras de vidro	47
4.5.4.3 Fibras aramida.....	48
4.5.4.4 Adesivos (Matriz polimérica).....	49
4.5.4.5 Adesivos epóxi.....	50
4.5.4.6 Compósitos madeira-concreto.....	50
4.5.6 Estudos de caso e ensaios sobre o tema.....	52
5 METODOLOGIA.....	64

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
7 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de madeira estão presentes em diversos tipos de construções civis, desde as mais antigas às mais modernas. Em estruturas mais antigas, o desgaste ocasionado pelo tempo acaba colocando em risco seu desempenho, assim como a segurança de seus usuários. Além de fatores relacionados ao tempo de serviço da estrutura, também pode-se citar outros problemas que implicam na necessidade de reforço dessas estruturas, como o mau dimensionamento realizado durante o projeto, por exemplo.

Sendo assim, técnicas de reforço em elementos de madeira se fazem necessárias para que estruturas existentes sejam conservadas, bem como outras cada vez mais eficientes sejam construídas. Mohamad; Accordi e Roca (2011) também destacam que é preferível a utilização de técnicas de reforço e recuperação ao invés da troca de peças inteiras.

No Brasil existe uma grande quantidade de estruturas históricas de madeira, entre elas pontes, coberturas, galpões e ginásios, muitas delas com mais de 50 anos de idade. Nessas estruturas, as manifestações patológicas são intensificadas pela idade das mesmas ou pelas alterações de uso e controle precário, sendo então necessário nesses casos “avaliar as principais manifestações patológicas detectadas e indicar as possíveis intervenções em manutenções, reabilitações, reforços ou substituições” (BRITO, 2014).

Diversas são as técnicas de reforço e reabilitação que podem ser implementadas em estruturas de madeira, associando esse material a outros de uso tradicional ou de uso mais recente. Este trabalho objetiva a coleta de dados e informações referentes às diferentes técnicas conhecidas atualmente no ramo da engenharia civil e de materiais, além de estabelecer uma sequência lógica na análise de estudo das estruturas de madeira, partindo das causas de degradação desse material, passando pelas técnicas de inspeção até finalmente as técnicas de reforço e reabilitação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar os benefícios das técnicas de reabilitação e reforço em estruturas de madeira disponíveis no mercado da construção civil.

2.2 Objetivos Específicos

- Conhecer os fatores que prejudicam o desempenho de estruturas de madeira e as técnicas utilizadas para identificá-los;
- Estudar as diferentes técnicas de reforço e reabilitação em estruturas de madeira;
- Coletar informações sobre a melhora no desempenho de estruturas reais de madeira após a aplicação de técnicas de reforço.

3 JUSTIFICATIVA

A preservação e o bom desempenho de estruturas de madeira são de grande relevância para toda a sociedade. Inúmeras são as estruturas de madeira que preservam a cultura bem como as técnicas construtivas de um povo em determinada época, tornando imprescindível o conhecimento e domínio de técnicas eficazes de reforço que permitam manter em serviço esses patrimônios culturais. Sendo assim, estudos sobre técnicas de reforço para estruturas de madeira se fazem necessários atualmente. Fiorelli et al. (2002) afirmam que muitas edificações fazem parte do patrimônio histórico e arquitetônico e não é aconselhável que sejam demolidas, mas sim restauradas, e assim “a discussão a respeito da manutenção e durabilidade das estruturas é assunto de grande importância”.

De acordo com Brito (2014), diferentemente do que ocorre com a área de projetos estruturais de madeira, que conta com diversas pesquisas científicas, normas técnicas e vasta literatura, a área de metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação e reforço é carente desses recursos e, praticamente, não existem Normas Técnicas específicas no País e há “vários aspectos ainda bastante obscuros e que nem sequer encontram-se registrados em livros especializados” (BRITO, 2014).

Outro fator que justifica a necessidade de pesquisa sobre técnicas de reforço é que a madeira pode apresentar propriedades inadequadas a certos usos, precisando ter suas propriedades melhoradas. “Para vencer estes inconvenientes tornou-se necessário desenvolver produtos que ao mesmo tempo possuíssem as qualidades da madeira e minimizassem suas propriedades negativas” (JUNIOR; CUNHA, 2002). Também vale ressaltar que além da degradação da madeira, “são mais frequentes do que se possa imaginar os erros básicos de concepção estrutural e o mal dimensionamento das estruturas originais, julgando-se imprescindível nesses casos corrigir as deficiências” (CRUZ, 2011).

Dessa forma, percebe-se que o estudo de técnicas de reforço e reabilitação de estruturas de madeira é fundamental para que se garanta a conservação do patrimônio arquitetônico e cultural construído, bem como a criação de estruturas cada vez mais eficientes e que proporcionem maior segurança para o usuário.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 A madeira e suas características

A madeira é usada como elemento estrutural e de acabamento desde a origem das edificações. Para entender seu uso como material estrutural é preciso conhecer sua composição e propriedades. Brito (2014) afirma que a madeira é formada por polímeros naturais e que possui resistência e durabilidade como material estrutural. De forma semelhante, Rodrigues e Sales (2013) a definem como um material de estrutura tubular de condutas paralelas, que apresenta ótima reação mecânica no sentido das fibras.

Segundo Brito (2014), a madeira tem qualidades superiores à maioria dos materiais quando são utilizadas em estruturas devidamente projetadas e desde que submetidas a manutenções periódicas e preventivas. Quando em ambientes agressivos devem ser protegidas e preservadas para que tenham um desempenho adequado.

Na construção civil a madeira é aplicada de diversas formas. Zenid (2009) agrupa os usos da madeira da seguinte forma:

- Construção civil pesada externa (estacas, escoras, estruturas pesadas, vigamentos).
- Construção civil pesada interna (vigas, caibros, tábuas e pranchas usadas em estruturas de coberturas).
- Construção civil leve externa e leve interna estrutural (tábuas e pontaletes de uso temporário em andaimes, escoras e fôrmas de concreto, assim como ripas e caibros utilizados em partes secundárias da cobertura).
- Construção civil leve interna decorativa (forros, painéis, guarnições e lambris com características decorativas).
- Construção civil leve interna de utilidade geral (forros, painéis, guarnições e lambris sem características decorativas).
- Construção civil leve em esquadrias (portas, venezianas e caixilhos).

- Construção civil em assoalhos domésticos (tábuas corridas, tacos e tacões).

Brites (2011) também informa que na construção civil as “peças de madeira podem ser usadas como elementos verticais, para suporte de cargas provenientes da superestrutura, ou como elementos horizontais, para resistir a esforços de flexão”.

Entre as principais propriedades da madeira destaca-se a boa resistência à compressão e ótima resistência à tração, além de ser um material de boa flexibilidade, destacam Rodrigues e Sales (2013). Também apresenta “boas condições de isolamento térmico e absorção acústica”, segundo os autores.

Como desvantagem da madeira tem-se a anisotropia, “característica peculiar a todas as madeiras de apresentar propriedades mecânicas distintas em relação aos seus três eixos de crescimento” (JUNIOR; CUNHA, 2002). De acordo com Rodrigues e Sales (2013) trata-se “um material de composição irregular e vulnerável a agentes bióticos e abióticos responsáveis pelas principais patologias”. Cruz (2011) também ressalta que a madeira é um material de grande variabilidade natural entre espécies diferentes e até mesmo entre elementos de uma mesma espécie, e também fortemente higroscópica.

De acordo com Hellmeister (1983), as características físicas mais importantes da madeira são umidade, retratibilidade, densidade e resistência mecânica, sendo que esta última se subdivide em resistência estática e resistência dinâmica. Já Santos (2009) informa que entre as propriedades físicas mais importantes estão: densidade aparente, teor de água e higroscopicidade, retratibilidade e reação e resistência ao fogo, ao passo que suas propriedades mecânicas mais relevantes são:

- Resistência à tração paralela às fibras ou axial;
- Resistência à compressão paralela às fibras ou axial;
- Resistência à tração perpendicular às fibras;
- Resistência à compressão perpendicular às fibras;
- Resistência à flexão estática;
- Resistência ao corte ou escorregamento;
- Dureza;
- Resistência à fadiga;
- Fluência.

4.1.1 Teor de água e higroscopicidade

De acordo com Santos (2009), a madeira é considerada um material higroscópico pois realiza trocas de água com o meio ambiente continuamente até atingir um ponto de equilíbrio. Já Neves (2013) explica o fenômeno da higroscopicidade como a alteração do teor de água da madeira em função da higrometria do ambiente, ou seja, o conteúdo de vapor de água e a temperatura do ar com que entra em contato.

A água pode existir na madeira sob três diferentes formas: água de constituição, água de impregnação e água livre. A água livre preenche os vazios intercelulares e é liberada rapidamente após o abate da árvore, a água de impregnação preenche os vazios das paredes celulares e sua saída implica a contração das células, causando retração na madeira, e por fim, a água de constituição pode ser definida como a água que está combinada com os constituintes do material lenhoso, só sendo eliminada com a destruição da estrutura molecular da madeira (JÚNIOR, 2006; NEVES, 2013).

Para a determinação de propriedades da madeira através de ensaios laboratoriais, estabeleceu-se um valor de referência para o teor de água em 12%. Através do teor de água da madeira também é comum classificá-la da seguinte maneira (JÚNIOR, 2006; SANTOS, 2009):

- Madeira verde: teor de água acima do ponto de saturação das fibras, geralmente superior a 30%;
- Madeira semi-seca: teor de água inferior ao ponto de saturação das fibras e superior a 23%;
- Madeira seca: teor de água entre 18% e 23%;
- Madeira seca ao ar: teor de água entre 13% e 18%;
- Madeira dessecada: teor de água entre 0% e 13% (geralmente através de secagem artificial);
- Madeira completamente seca ou anidra: teor de água igual a 0%.

4.1.2 Densidade

Júnior (2006) explica que a densidade é definida como a medida do peso da madeira por unidade de volume, e esclarece ainda que na área de estudo das madeiras geralmente a densidade é considerada em termos da densidade específica aparente, ou seja, o volume considerado é o aparente, sem descontar o volume compreendido pelos poros. Dessa forma, esse parâmetro é influenciado fortemente pelo teor de água, já que este último influencia tanto o peso quanto o volume da madeira. Sendo assim, Neves (2013) esclarece que o valor encontrado para o quociente referido anteriormente é específico para determinado teor de água, um variando conforme o outro varia, sendo que a densidade de referência é definida com corpos de prova com 12% de teor de água.

Hellmeister (1983) explica que a densidade varia de acordo com a espécie de madeira examinada, bem como da localização do corpo de prova na tora entre outros fatores. Apesar disso, o valor da densidade de uma determinada espécie de madeira oscila entre um valor médio, e de forma geral pode-se dizer que o valor da “densidade das madeiras distribui-se de 0,30 até 1,20 g/cm³” (HELLMEISTER, 1983).

Pode-se dizer que as madeiras apresentam um valor de densidade relativamente baixo, face à sua resistência mecânica e módulo de elasticidade, o que lhe atribui grandes potencialidades para uso estrutural, já que possui um baixo peso comparada com materiais de características de resistência mecânica semelhante (JÚNIOR, 2006; NEVES, 2013; SANTOS, 2009).

4.1.3 Retratibilidade

De acordo com Júnior (2006), quando a madeira altera seu teor de água entre o estado saturado e anidro, procurando manter o equilíbrio higroscópico com o meio, ela preenche ou liberta os vazios de suas paredes celulares, resultando em alterações nas suas dimensões. Esse autor então explica que a retratibilidade pode ser dividida em volumétrica e linear, sendo que essa última ocorre diferentemente nas direções radial, tangencial e axial.

As expressões que quantificam essas variações são apresentadas nas Equações (1) e (2), cujos valores são dados em porcentagem:

$$C_h = \frac{V_h - V_0}{V_0} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que,

C_h é o índice de contração volumétrica para o teor de água h ;

V_h é o volume do provete para o teor de água h ;

V_0 é o volume do provete no estado anidro.

$$C = \frac{L_h - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que,

C é o índice de contração linear para o teor de água h ;

L_h é a dimensão do provete para o teor de água h ;

L_0 é a dimensão do provete no estado anidro.

4.1.4 Reação e resistência ao fogo

A madeira apresenta uma boa resistência ao fogo, apresentando um melhor comportamento que estruturas equivalentes em concreto ou aço. Em madeiras normais a combustão se dá a temperaturas da superfície por volta de 300° C quando existe a presença de chama, ou valores acima de 400° C quando não existe chama (JÚNIOR,2006; SANTOS,2009).

Durante o processo de combustão da madeira, a superfície exterior rapidamente entra em combustão, mas logo cria uma camada carbonizada que é cerca de 6 vezes mais isolante que a própria madeira, atrasando o processo e protegendo a madeira no interior da peça. Sendo assim, num caso de incêndio, o fogo não reduz as propriedades mecânicas da madeira, mas sim a seção transversal do elemento estrutural. Quanto maior a densidade da madeira, menor é a facilidade e a velocidade da combustão (JÚNIOR, 2006; NEVES,2013; SANTOS,2009).

4.1.5 Resistência à tração paralela às fibras ou axial

A resistência à tração da madeira na direção paralela às fibras é bastante elevada, e isso ocorre devido ao fato de que a solicitação de tração nesse sentido provoca a aproximação das fibras, aumentando a coesão e aderência da peça de madeira (JÚNIOR, 2006).

Carvalho (1996 apud SANTOS, 2009) afirma que nessa direção a resistência pode ser até três vezes maior que a resistência à compressão paralela às fibras e um pouco maior que a resistência à flexão estática, em peças livres de defeito.

Desta forma, geralmente os elementos não sofrem ruptura pela ação isolada deste esforço, e nos casos em que a ruptura ocorre para valores inferiores aos conhecidos, significa que estão presentes outros tipos de solicitações (JÚNIOR, 2006).

4.1.6 Resistência à compressão paralela às fibras ou axial

Santos (2009) esclarece que a resistência à compressão da madeira no sentido paralelo às fibras é elevada, porém, é inferior à resistência a tração no mesmo sentido e à flexão. Isso ocorre porque esse esforço provoca o afastamento longitudinal entre os filamentos da madeira, provocando a redução da coesão e da resistência da peça.

A resistência à compressão axial da madeira está intrinsecamente relacionada a outros fatores, como o teor de água e a densidade da peça. A madeira apresentará resistência máxima à compressão paralela quando estiver no seu estado anidro, e mínima quando o teor de água for superior ao ponto de saturação (JÚNIOR, 2006).

De acordo com Santos (2009), este tipo de resistência é muito importante na análise de elementos estruturais como pilares e colunas, sendo que neste tipo de peças o valor do módulo de elasticidade influencia muito o seu comportamento, e quanto menor for o valor da rigidez menor será a resistência de peças esbeltas a este tipo de esforço.

4.1.7 Resistência à tração perpendicular às fibras

Uma vez que as fibras da madeira se distribuem preferencialmente no sentido longitudinal do tronco, na direção transversal as ligações são escassas, prejudicando a resistência à tração do elemento nesta direção, já que não há travamento das fibras longitudinais e existe uma debilidade nas ligações intercelulares transversais (JÚNIOR, 2006; NEVES, 2013).

Santos (2009) afirma ainda que nesta direção a resistência à tração é da ordem de 30 à 70 vezes menor que na direção axial. Esse autor também informa que a resistência à tração no sentido perpendicular às fibras não se relaciona com a densidade, já que esta última não condiciona a aderência entre as fibras.

4.1.8 Resistência à compressão perpendicular às fibras

A resistência à compressão nesse sentido é muito inferior à mesma solicitação no sentido paralelo às fibras, na ordem de 20% a 25%. Essa resistência pode ser traduzida pela resistência da peça ao esmagamento, sendo dependente da densidade do material (JÚNIOR, 2006; NEVES, 2013).

De acordo com Santos (2009), este tipo de solicitação ocorre nos locais de apoios de viga, “onde toda a carga se concentra numa pequena área de superfície que tem como função a transmissão adequada dos esforços de reação aos apoios sem sofrer deformações relevantes (esmagamento) e plastificação” (SANTOS, 2009).

4.1.9 Resistência à flexão estática

A resistência à flexão estática da madeira é bastante elevada e, para a maioria das espécies de madeira, atinge valores próximos aos de resistência à tração paralela às fibras. Essa resistência é influenciada pelo teor de água e pela densidade da

mesma maneira que em elementos sujeitos à esforços de compressão paralela às fibras (JÚNIOR,2006; SANTOS,2009).

Neves (2013) afirma que esta é uma das propriedades mais complexas da madeira em termos estruturais, pois possui componentes de vários outros tipos de esforços puros, como tração, compressão e cisalhamento.

4.1.10 Resistência ao cisalhamento

Neves (2013) explica que as tensões de cisalhamento são causadas devido à tendência de deslizamento entre diferentes planos, sendo por isso necessário considerar a possível existência de vários tipos de tensões, como compressão e tração em sentidos opostos, por exemplo.

De acordo com Júnior (2006), essa resistência pode ser quantificada por três tipos de tensões tangenciais: tensões tangenciais normais às fibras, paralelas às fibras e oblíquas às fibras. Esse autor afirma também que os ensaios de avaliação de resistência ao cisalhamento são realizados com tensões tangenciais paralelas às fibras, pois a resistência ao corte da madeira é mínima nessa direção.

4.2 Agentes patológicos da madeira

De acordo com Brites (2011), a degradação da madeira em seu meio ambiente é natural e relativamente rápida, porém, a madeira aplicada em estruturas pode durar décadas e até séculos desde que devidamente protegida. Essa degradação é causada por diversos agentes, que de maneira geral podem ser divididos em dois grupos: agentes bióticos e abióticos.

Mohamad et al. (2011) explica que a madeira sofre degradação por ataques de fungos e cupins típicos do clima tropical brasileiro, o que compromete as características físicas e mecânicas das peças. Além disso, a aplicação de sobrecargas (combinadas ou não com ataques biológicos) deforma as estruturas, diminui sua massa, peso e resistência.

Júnior (2006) afirma que os agentes bióticos mais representativos dos ataques em estruturas de madeira são os fungos xilófagos, os insetos de ciclo larvar e os insetos sociais. Segundo esse autor, os fungos xilófagos se dividem em: fungos cromógenos e bolores e fungos de podridão.

Os fungos cromógenos e bolores atacam superficialmente a madeira, não produzindo alterações nas propriedades mecânicas do material, mas sim um ligeiro aumento de sua permeabilidade, potencializando o desenvolvimento de fungos de podridão. Esses últimos causam danos graves na madeira pois segregam enzimas capazes de destruir totalmente as paredes celulares do material, de onde retiram seu alimento, resultando na perda das propriedades mecânicas da madeira de densidade, resistência estática e dinâmica. Já a degradação na madeira causada por insetos de ciclo larvar está ligada a seu processo reprodutivo, pois durante esse período as fêmeas colocam seus ovos nos orifícios e ranhuras da madeira, de onde irão eclodir larvas que se alimentarão da madeira, causando sua degradação mecânica. Os insetos sociais também se alimentam da madeira; um grupo da colônia (as obreiras) possuem bactérias no sistema digestivo capazes de decompor a celulose e transformá-la em açúcares assimiláveis que servirão de alimento para toda a colônia (JÚNIOR, 2006).

De acordo com Cunha (2013), entre os agentes abióticos podemos citar radiação solar e a chuva. A primeira consiste na ação do Sol através dos raios ultravioleta que degradam a camada superficial da madeira, mais especificamente através da degradação da lignina. A combinação desse fator com a exposição à água da chuva faz com que ocorram ciclos de umidificação/secagem que provocam a exposição de novas camadas de madeira à radiação, dando continuidade ao processo de degradação. Esse processo de secagem causa o aparecimento de fendas na madeira, criando zonas suscetíveis ao alojamento da umidade e ataques bióticos.

Ainda entre os agentes abióticos de degradação da madeira, Cunha (2013) cita os danos causados pela concepção e construção inicial da estrutura de madeira. Entre os erros causados nessa fase pode-se citar o incorreto dimensionamento da estrutura, a escolha de seções insuficientes para as cargas atuantes e a má ligação entre elementos. Essas situações podem não causar problemas imediatos na estrutura, mas levam a uma fragilização progressiva do seu comportamento. Outro agente abiótico mencionado por Cunha (2013) são as intervenções posteriores inadequadas, como por exemplo a remoção de elementos construtivos, o aumento de

cargas devido a alterações de funcionalidade da edificação, assim como a introdução de novos materiais sem se levar em conta as relações com os materiais já existentes.

No Quadro 1, são apresentados diversos agentes pertencentes aos grupos de agentes bióticos e abióticos de degradação da madeira.

Agentes de deterioração da madeira		
Agentes bióticos	Bactérias	
	Fungos	Fungos manchadores
		Fungos emboloradores
		Fungos apodrecedores
		Fungos de podridão parda ou cúbica
		Fungos de podridão branca ou fibrosa
		Fungos de podridão mole
	Insetos	Térmitas isópteras (Cupins-de-madeira)
		Térmitas-de-madeira-seca
		Térmitas-de-madeira-úmida
		Térmitas-subterrâneos
		Térmitas-epígeos
		Térmitas-arborícolas
		Brocas-de-madeira
		Brocas que atacam árvores vivas
		Brocas que atacam árvores recém-abatidas
		Brocas que infestam a madeira durante a secagem
		Brocas de madeira seca
		Formigas-carpinteiras
		Abelhas-carpinteiras
	Perfuradores marinhos	Moluscos
		Teredinidae
		Crustáceos
Pholadidae		
Limnoria		
Sphaeroma terebrans		
Agentes abióticos	Agentes Físicos	Patologias de origem estrutural
		Instabilidade
		Remoção de elementos estruturais
		Fraturas incipientes
		Movimentos de nós e distorções
		Deformações, deslocamentos e flechas
		Presença de defeitos naturais
		Danos mecânicos
		Danos por animais silvestres
	Danos por vandalismo	
	Agentes Químicos	Corrosões em ligações
		Efeito da corrosão na madeira
	Agentes Atmosféricos ou Meteorológicos	Ação de luz ultravioleta
		Intemperismo
		Danos por inchamento e retração da madeira
		Ações de vento nas estruturas
		Raios atmosféricos
		Danos devido ao fogo

Quadro 1 - Principais tipos de agentes de deterioração da madeira

Fonte: Brito (2014)

Para que uma estrutura de madeira possa ser reforçada ou reabilitada de maneira eficaz, além de conhecer os agentes deterioradores da mesma é preciso saber o que causou o surgimento dessas patologias, possibilitando assim que após a intervenção a estrutura não voltará a se deteriorar. Nos Quadros 2 e 3, são apresentadas diversas origens da deterioração nas estruturas de madeira.

Causas intrínsecas (inerentes às estruturas)		
Falhas humanas durante a construção	Ausência ou falha de Projetos Estruturais	
	Ausência de mão de obra qualificada e/ou falhas em práticas de construção	
	Utilização incorreta dos materiais de construção	Resistências inferiores às especificadas Ausência de tratamento preservativo Falhas no processo de tratamento preservativo Solo com características diferentes
	Deficiências nas ligações	Tipos de ligações diferentes das especificadas Diâmetros inferiores aos especificados Resistências inferiores às especificadas
	Deficiência no transporte	
	Inexistência de controle de qualidade	
Falhas humanas durante a utilização	Ausência de manutenções periódicas e/ou medidas preventivas	
	Manutenções corretivas inadequadas e/ou insuficientes	
Causas naturais	Ação de agentes bióticos	Presença de umidade Temperatura adequada Oxigênio Fonte de alimento disponível
	Ação de agentes abióticos	Causas químicas Causas físicas

Quadro 2 - Causas intrínsecas aos processos de deteriorações em estruturas de madeira
Fonte: Brito (2014)

Causas extrínsecas (externas ao corpo estrutural)	
Falhas humanas durante o projeto	Ausência de projetos estruturais Ausência de profissional especialista na área Inadequações na escolha da categoria de uso ao ambiente Falha na concepção de projeto e/ou modelação estrutural inadequado Avaliações inadequadas de cargas e ações Detalhamentos inadequados e/ou insuficientes Ausência de sondagem de solo Incorrelações nas interações solo-estrutura Falhas entre integrações dos projetos complementares
Falhas humanas durante a utilização	Alterações estruturais Mudanças no tipo de utilização parcial ou total da edificação Sobrecargas excedidas Alterações nas condições do terreno e/ou fundações
Ações mecânicas	Choques de veículos Recalque de fundações Acidentes por ações imprevisíveis Abrasão mecânica
Ações atmosféricas	Intemperismo Incidência de luz ultravioleta (Insolação) Atuação constante de presença de água Variações de temperatura Ações de enchentes Ações de vento Descargas de raios atmosféricos
Ações químicas	Acidentes com tombamento de veículos Reações de tratamentos preservativos CCA e CCB em ligações e pinos metálicos não galvanizados
Ações biológicas	Presença de agentes bióticos na região e/ou em edificações vizinhas

Quadro 3- Causas extrínsecas aos processos de deteriorações em estruturas de madeira
Fonte: Brito (2014)

4.3 Defeitos e anomalias das peças de madeira

Além da degradação causada por agentes patológicos, outros fatores podem comprometer o bom desempenho das peças de madeira. Para Júnior (2006) “o principal fator que afeta a qualidade e conseqüentemente os valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira, são os defeitos e anomalias das peças”. Como exemplo dessas anomalias Dias (2008) cita a existência de nós, fendas, empenos, fio inclinado em relação ao eixo da peça, entre outras.

- Nós

Júnior (2006) explica que esse defeito está associado ao processo de formação lenhosa, que se apresentam como seções simples da massa lenhosa formando a porção base de um ramo inserida no tronco da árvore, como pode ser visto na Figura 1.

Segundo Dias (2008), os nós são considerados os defeitos que mais influenciam na resistência global dos elementos. O autor também explica que geralmente os nós não diminuem a resistência à compressão da peça, mas quase sempre afetam a resistência à tração.

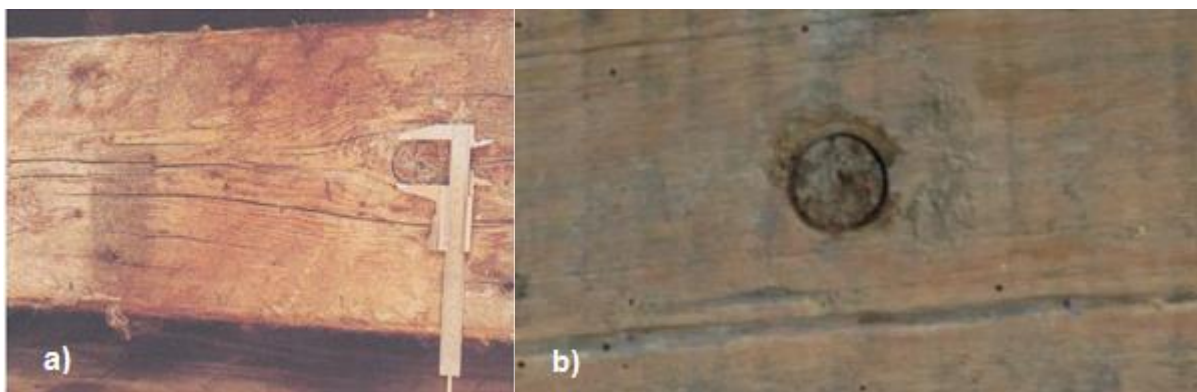


Figura 1 - Nós em elementos de madeira
Fonte: a) Tampone (2005 apud JÚNIOR,2006); b) Cunha (2013).

- Fendas

As fendas surgem devido ao processo de secagem da madeira, uma vez que as retrações da mesma são diferentes em cada região da peça. As retrações na direção tangencial são maiores que na direção radial, e longitudinalmente são quase desprezíveis (DIAS, 2008). Um exemplo dessa anomalia é apresentado na figura 2.

Para Zoreta (1986 apud DIAS, 2008), as fendas são um dos piores danos da madeira, pois um processo de secagem mal efetuado pode gerar tensões internas na madeira, as quais podem ser libertadas bruscamente caso o estado de equilíbrio adquirido seja alterado. Segundo o mesmo autor, “as fendas, que muitas vezes chegam a quase dividir a seção original em duas, podem conduzir à redução do momento de inércia e ter graves repercussões estruturais” (ZORETA 1986 apud DIAS,2008)

Júnior (2006) também informa que as fendas conduzem à redução da seção útil resistente da peça, e podem ser muito graves se unirem faces opostas da madeira, se estiverem em zonas de união entre peças ou em elementos sujeitos à compressão axial. Esse autor, porém, esclarece que as fendas “dentro de determinados limites dimensionais estabelecidos nas normas de classificação visual, têm reduzida influência na resistência da peça” (JÚNIOR, 2006).



Figura 2 – Exemplo de fenda longitudinal devido a secagem
Fonte: Júnior (2006).

- Inclinação das fibras em relação ao eixo da peça

Esse defeito consiste na inclinação mais ou menos acentuada das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça de madeira, podendo ser causado por um processo de corte mal executado ou devido à utilização de elementos que já possuíam essa característica em sua natureza morfológica, como é o caso do corte de troncos curvos, por exemplo (JÚNIOR, 2006).

De acordo com Dias (2008), a presença dessa anomalia torna o elemento de madeira mais difícil de utilizar, uma vez que as elevadas tensões internas que atuam na madeira com esta característica, podem provocar fendas e empenos em função de pequenas alterações de umidade, podendo também ter problemas graves na resistência mecânica.

4.4 Técnicas de inspeção

Campanhas de inspeção periódicas são necessárias para conhecer as reais condições de serviço das estruturas de madeira, sendo possível avaliar o estado de conservação das peças e interromper a progressão dos processos de deterioração em andamento. O conhecimento rigoroso do estado de conservação de uma estrutura exige a utilização de técnicas destrutivas de inspeção, porém, em muitos casos essa alternativa se mostra simplesmente inviável e deve-se recorrer às inspeções visuais e técnicas não-destrutivas de inspeção (NEVES, 2013).

Segundo Machado et al. (2000 apud CUNHA, 2013), as técnicas não-destrutivas de inspeção são aquelas que não condicionam significativamente a capacidade resistente dos elementos inspecionados. Entre as diversas utilidades desse tipo de inspeção pode-se citar “detecção de vazios e cavidades; avaliação do teor de humidade e altura de ascensão capilar; detecção de degradação superficial e avaliação de algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais” (CUNHA, 2013).

Dias (2008) afirma que existem diversos instrumentos para a realização de ensaios não destrutivos, e cita entre eles o uso do martelo e formão assim como aparelhos mais sofisticados, como o *Resistograph*®, o *Pilodyn*® e os sismógrafos.

Além das técnicas não-destrutivas, o processo de inspeção de estruturas de madeira também conta com os métodos semi-destrutivos e destrutivos, sendo que os primeiros “utilizam provetes de tamanho reduzido, podendo não implicar a inutilização do elemento estrutural ensaiado, os segundos ensaios, utilizando amostras de tamanho real, conduzem à destruição do elemento estrutural ensaiado” (DIAS, 2008).

- Inspeção visual

Segundo Neves (2013), a inspeção visual permite ter uma noção geral dos problemas da estrutura, permitindo estabelecer um posterior plano detalhado de inspeção. Essa técnica conta com o auxílio de instrumentos simples, como faca ou formão. Deve-se procurar identificar a presença de fontes de umidade, deformações excessivas de tetos ou pavimentos, existência de canais de terra sobre a madeira, cheiro de mofo, entre outros fatores.

Oliveira (2005) também informa que nessa técnica a qualidade da madeira é analisada pela dimensão e distribuição das anomalias que podem ser vistas na superfície da peça e por isso apresenta a desvantagem de considerar apenas os defeitos aparentes e admitir resistência igual para as peças com os mesmos defeitos.

Brites (2011) complementa que apesar dos resultados obtidos por essa técnica serem qualitativos, se forem cruzados com resultados de outros ensaios não-destrutivos é possível estabelecer apreciações quantitativas da qualidade da peça.

- *Resistograph®*

Esse aparelho mede a resistência da madeira à perfuração por meio de uma broca, e através da análise da variação dos perfis de densidade dos elementos ensaiados, permite detectar defeitos ou degradações, assim como estimar propriedades físico-mecânicas da peça, como a densidade, por exemplo (NEVES, 2013). Na figura 3 são apresentados componentes desse aparelho.

Dias (2008) afirma que esse é um dos métodos não-destrutivos mais utilizado, uma vez que realiza perfurações quase imperceptíveis na peça e não gera qualquer influência na resistência mecânica da mesma. O aparelho fornece gráficos da variação da resistência à perfuração da peça, o que permite identificar variações de densidade, anéis de crescimento, zonas de degradação, fendas e vazios, por exemplo. Porém, o mesmo autor esclarece que é preciso efetuar um tratamento estatístico dos dados recolhidos para que se possa obter valores quantitativos.

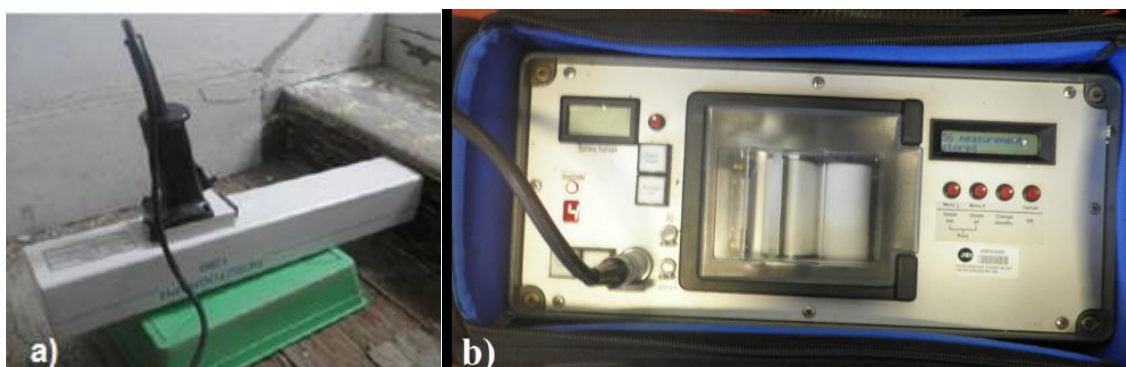


Figura 3 – a) Resistograph® ; b) Unidade móvel do Resistograph®
Fonte: Neves (2013)

- *Pilodyn®*

O funcionamento do aparelho *Pilodyn®*, que pode ser visualizado na figura 4, se baseia na introdução por impacto de um pino metálico na peça de madeira, sendo que a profundidade de penetração pode indicar a intensidade e profundidade da degradação por fungos de podridão, por exemplo. Uma desvantagem desse aparelho é que só mede as propriedades superficiais de até 40mm da peça e, além disso, a umidade afeta significativamente a profundidade de penetração, devendo ser controlada com a ajuda de um higrômetro, por exemplo (NEVES, 2013).

Dias (2008) esclarece que as correlações existentes entre os valores obtidos pelo aparelho e as propriedades da madeira são na maioria correlações “entre a dureza superficial (ou a resistência à penetração superficial) e a densidade, o que acaba por ser uma limitação deste equipamento” (DIAS, 2008).



Figura 4 – Pilodyn®
Fonte: Júnior (2006)

- Higrômetro

Este aparelho permite a obtenção do teor em água da peça de madeira, o que contribui para identificar o potencial de ataques de agentes bióticos, assim como revelar problemas de impermeabilização (DIAS, 2008).

Brites (2011) informa que esses aparelhos medem o teor de água da madeira por correlações com as propriedades dielétricas do material, sendo o higrômetro resistivo um dos mais utilizados, possuindo duas pontas metálicas que medem a resistência elétrica e conseqüentemente o teor de água, como pode ser visto na figura 5. Esse autor também esclarece que os resultados dessa técnica podem ser distorcidos por fatores como o umedecimento recente da superfície da madeira ou o tratamento preservador aplicado à peça.



Figura 5 – Exemplo de uso de higrômetro resistivo
Fonte: Brites (2011)

- Ultrassom

Oliveira (2005) explica que, em geral, os aparelhos de ultrassom baseiam-se “na relação entre a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça” (OLIVEIRA, 2005). Essa autora também esclarece que a propagação dessas ondas depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular, podendo-se esperar que os valores de velocidade de propagação resultem em intervalos devido às características anatômicas e presença de defeitos nas peças analisadas.

Bucur e Böhnke (1994 apud OLIVEIRA, 2005) informam que existem fatores que influenciam a propagação de ondas ultrassônicas na madeira, tais como as características geométricas da espécie (macro e microestruturas), condições do meio (temperatura e umidade), propriedades físicas do substrato e o procedimento utilizado na tomada das medidas (como as características do equipamento, por exemplo). Na Figura 6 é possível ver um dos aparelhos de ultrassom disponível no mercado.



Figura 6 – Equipamento de ultrassom Sylvatest
Fonte: Oliveira (2005)

- Raio-X

De acordo com Neves (2013), o funcionamento desse aparelho se baseia no fato da penetração deste tipo de radiação ser dependente da densidade e espessura do material, permitindo a identificação de fendas e outras discontinuidades, bem como a identificação de ataques xilófagos através da detecção de perdas de massa. Júnior (2006) acrescenta que o resultado desta técnica consiste num esquema bidimensional da variação de densidade do elemento analisado, como pode ser visto na figura 7. De acordo com este último autor, a técnica de raio-x foi sendo progressivamente substituída pela técnica de raios gama (ou radiografia digital), pois essa última é menos perigosa, apresenta menor custo e fornece uma imagem do elemento analisado em tempo real.



Figura 7 – À esquerda, equipamentos para a aplicação da técnica de raios-X à inspeção de estruturas de madeira. À direita, exemplo da saída de resultados do ensaio por raio gama.
Fonte: Júnior (2006)

- Georradar

Costa (2009) explica que essa técnica se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas que são emitidas por impulsos de curta duração e então captadas por antenas. Durante a propagação, as ondas causam fenômenos de reflexão, refração e difração, graças à heterogeneidade do material. As antenas receptoras captam as diferenças de energia eletromagnética oriundas das alterações das propriedades magnéticas dos diferentes meios atravessados pelas ondas no elemento. Segundo o autor, essas variações dependem de fatores como temperatura, dureza, densidade e principalmente o teor de água, tornando mais fácil a detecção da

presença de focos de umidade e degradação. Na figura 8 podem ser vistos componentes desse equipamento.



Figura 8 – Unidade central e antena de um georadar
Fonte: Costa (2009)

- Método das vibrações induzidas

Júnior (2006) explica que esse método consiste em medir a velocidade de propagação de ondas de choque ao longo das fibras da madeira. Como as ondas de choque se propagam com mais velocidade na madeira sã do que na madeira degradada, é possível identificar problemas como vazios interiores e podridões. Júnior (2006) explica o funcionamento do aparelho METRIGUARD, que se baseia na análise de vibrações induzidas e é composto por uma unidade central, um martelo de impacto e acelerômetros, como pode ser visto na figura 9. A unidade central recebe as informações recolhidas pelos acelerômetros, que estão conectados ao martelo de impacto.



Figura 9 – Componentes do aparelho METRIGUARD: À esquerda, unidade central. À direita, martelo de impacto.
Fonte: Júnior (2006).

No caso de avaliações *in situ* de estruturas de madeira, é preciso salientar que nenhuma técnica não-destrutiva utilizada isoladamente é capaz de realizar uma descrição completa do elemento de madeira, recomendando-se que sejam utilizadas em conjunto, de maneira que se complementem (NEVES, 2013). No Quadro 4 são apresentados os diversos critérios que influenciam na escolha de cada técnica não-destrutiva.

Objetivo da inspeção	Técnica não destrutiva
Identificação da espécie de madeira	Inspeção Visual Análise Laboratorial
Identificação do tipo de degradação biológica	Inspeção Visual Detecção Acústica
Detecção da extensão de degradação biológica	Meios tradicionais (formão, martelo, etc) Resistógrafo Raios-X/Raios Y Método das vibrações induzidas Georradar Ultrassons
Classes de qualidade	Inspeção Visual Ultrassons Georradar Raios-X/Raios Y
Teor de umidade	Higrômetro Georradar (de forma indireta)
Detecção de defeitos localizados	Ultrassons Resistógrafo Raios-X/Raios Y Método das vibrações induzidas
Determinação do Módulo de Elasticidade	Ultrassons Resistógrafo Método das vibrações induzidas
Determinação da densidade	Resistógrafo
Determinação da densidade superficial	Pilodyn
Datação das madeiras	Dendrocronologia

Quadro 4 – Critério de escolha da técnica não-destrutiva
Fonte: Guimarães et al. (2012 apud CUNHA, 2013)

4.5 Técnicas de reforço e reabilitação

A diferença entre reforço e reabilitação é explicada por Brito (2014) da seguinte maneira: reabilitação é o termo mais adequado quando se refere a restaurar a capacidade original, enquanto o termo reforço é empregado para os casos em que há a necessidade de melhorar a geometria ou a capacidade de carregamento da estrutura. De maneira semelhante, Fiorelli et al. (2002) esclarece que há situações em que as estruturas precisam ser reparadas “tornando-as novamente aptas para uso, e outros casos em que é necessária a execução de reforço para obter um aumento na capacidade de carga do elemento estrutural” (FIORELLI, 2002).

Dias (2008) define reabilitação, reforço e substituição da seguinte maneira:

- **Reabilitação:** “em termos estruturais, consiste na alteração da estrutura, para que esta volte a um estado ou condição referente a um ponto particular da sua história (ou seja, consiste na reaquisição da sua capacidade de trabalho)” (DIAS, 2008).

- **Reforço:** intervenções que “pretendem aumentar a capacidade resistente original do elemento estrutural ou da estrutura” (DIAS, 2008).

- **Substituição:** pode ser “funcional, na qual os elementos estruturais são mantidos apenas com função estética (não desempenhando função estrutural), ou total, na qual os elementos estruturais são efetivamente removidos” (DIAS, 2008).

Toda ação de intervenção estrutural que envolva estruturas de madeira deve levar em consideração as particularidades desse material, uma vez que se trata de um “material de origem biológica, com uma elevada variabilidade devido às suas propriedades físicas e mecânicas” (BRITO, 2014).

De acordo com Uzielli (1995 apud BRITO, 2014), as reabilitações em estruturas de madeira podem se dar em diversos níveis:

- elementos estruturais de madeira individualizados;
- unidades estruturais;
- estruturas inteiras;
- conexões em ligações;
- restrições externas ou conexões.

Brites (2011) divide os métodos de recuperação e reforço em três grupos em função do material utilizado: madeira, aço ou materiais compósitos (Polímeros

Reforçados com Fibras). Já segundo Mettem e Robinson (1991 apud FIORELLI et al., 2002) os métodos mais utilizados para se fazer a restauração de estruturas de madeira são:

- Método tradicional: são adicionadas peças novas de dimensões semelhantes às originais;
- Método mecânico: são utilizados conectores metálicos para se fazer os reparos;
- Método adesivo: que consiste no emprego de variações de resina epóxi combinadas com peças metálicas.

Outro método descrito por Ritter (1990 apud FIORELLI et al., 2002), e que pode ser enquadrado no método mecânico é o reparo por emenda, que consiste na adição de peças de madeira associadas com parafusos. Ainda segundo esse autor, outra técnica de reforço muito eficiente é a utilização do reparo epóxi, onde o epóxi é injetado manualmente nas partes danificadas, aumentando a resistência e capacidade de carga da peça, reduzindo o aparecimento de futuras rachaduras, vedando a área danificada, juntamente com a incorporação de certa flexibilidade.

Fiorelli et al. (2002) também citam o método das Fibras Reforçadas com Polímeros, que são materiais flexíveis e podem substituir as técnicas descritas anteriormente. As fibras utilizadas com mais sucesso nesse método são as fibras de carbono, vidro e aramida.

4.5.1 Reforço com elementos de madeira

Segundo Brites (2011), este método de reforço consiste na adição de peças de madeira à estrutura, de modo a melhorar seu desempenho mecânico. Pode se dar através da criação de novos apoios, substituição de partes degradadas e aumento da seção transversal da peça. A criação de novos apoios visa a diminuição dos esforços ou deformações excessivas, podendo consistir na colocação de pilares ao longo do vão de vigas ou na criação de apoios em extremidades deterioradas de vigas. Um aspecto negativo desta técnica é a possível incompatibilidade arquitetônica com o uso previsto do local. Costa (2009) também cita a técnica de colocação de novas vigas para dividir vãos, que consiste na introdução de novas vigas de madeira que dividem

o vão do pavimento em dois ou mais. Esse autor salienta, porém, que caso a dimensão transversal às vigas antigas seja muito grande, pode-se apoiar as novas vigas através de pilares (de madeira, alvenaria ou metálicos), como pode ser observado na figura 10.



Figura 10 - Utilização de viga de reforço transversal apoiada em pilares de madeira
Fonte: Costa et al. (2007 apud COSTA, 2009)

Nos casos em que o nível de degradação da peça requer a substituição do elemento, é preciso dar preferência a peças novas da mesma espécie de madeira e com um teor de água compatível, além de atentar para o correto dimensionamento e execução das ligações entre as peças [(BRITES, 2011); (LOPES, 2007)]. Esse tipo de reforço é exemplificado na figura 11.

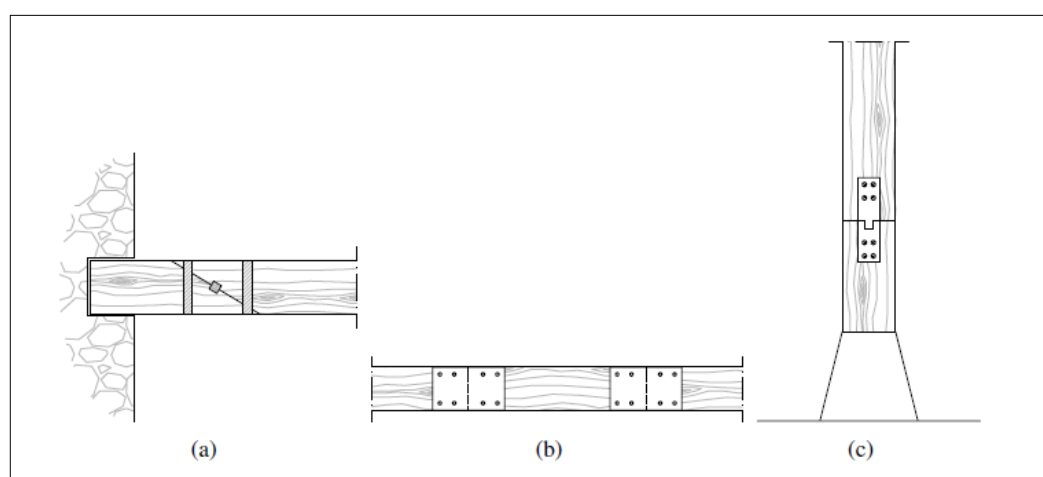


Figura 11 – Reforço por substituição de peças de madeira: (a) em uma extremidade/apoio; (b) na zona central de uma viga; (c) na base de uma coluna
Fonte: Apolo e Martinez-Luengas (1995 apud BRITES, 2011)

Já a técnica de aumento da seção transversal é indicada para os casos em que a peça necessita de reforço devido a insuficiência estrutural, mas não apresenta dano significativo. O aumento da seção se dará através da junção de peças de madeira nas faces superior e inferior ou laterais, ajudando a reduzir a esbeltez de pilares ou outras peças sujeitas a instabilidade. Neste tipo de técnica também é importante tomar cuidado com a espécie de madeira da nova peça e seu teor de água para que as diferenças com as peças já existentes sejam mínimas. As ligações entre as peças podem ser feitas através de parafusos de rosca, parafusos de porca, pregos ou resinas epoxídicas (BRITES, 2011). Na figura 12 é apresentada essa técnica.

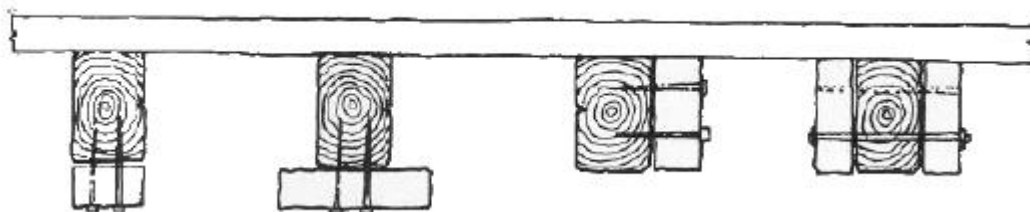


Figura 12 – Exemplos de reforço com aumento da seção transversal
Fonte: Arriaga (2002 apud COSTA, 2009)

Dias (2008) afirma que no caso de fixação de novas peças de madeira às antigas em regiões de apoio de vigas, é preciso garantir um cobrimento de sobreposição mínimo entre elas para que ocorra a correta transmissão dos esforços. Este autor também cita a utilização desta técnica ao longo do vão de vigas, e informa que é uma solução adotada normalmente em casos de elementos com perda de seção resistente, com fendas de grande dimensão, com roturas localizadas ou com seções insuficientes. Segundo ele, a fixação das peças pode ser feita com pregos, parafusos de porca, chapas ou cintas metálicas. No caso da substituição de partes degradadas por novas peças, Dias (2008) esclarece que os elementos de ligação devem ser dimensionados levando-se em conta os esforços de flexão, tração, compressão e de corte atuantes na seção.

Lopes (2007) também cita a técnica de reforço com empalmes de madeira que, segundo ele, consiste na aplicação de novos elementos de madeira de um ou dos dois lados da peça a ser reforçada, reestabelecendo a continuidade da peça, como pode ser visto na figura 13. A ligação entre os elementos pode ser feita através de parafusos e porcas, por exemplo. Costa (2009) complementa que essa técnica é

utilizada quando elementos estruturais de madeira estão partidos ou fissurados em zona de vão e salienta que os novos elementos devem ter a mesma altura que os elementos antigos, além de um comprimento que assegure a sua ligação com zonas não degradadas do elemento antigo.

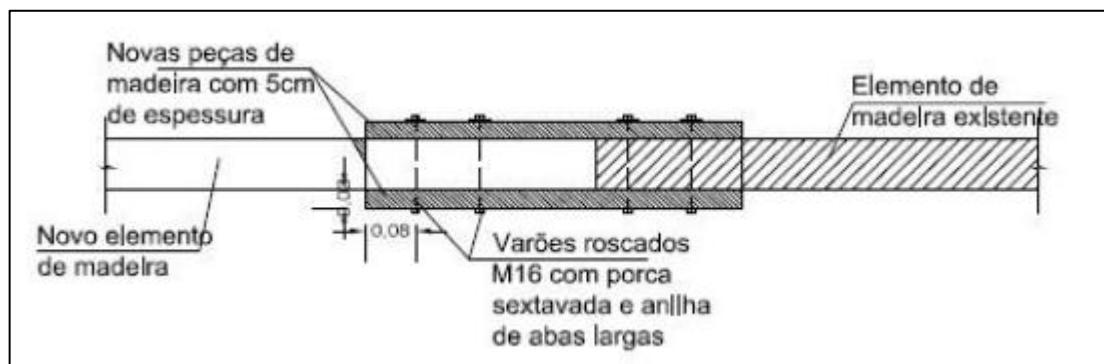


Figura 13 - Exemplo de reforço com empalmes de madeira
 Fonte: Costa (2009)

4.5.2 Reforço com elementos metálicos

De acordo com Brites (2011), a utilização de elementos metálicos como reforço em estruturas de madeira se justifica pela maior rigidez dos materiais metálicos frente à madeira e pela fluência da mesma, o que permite a transmissão de esforços da madeira para o reforço metálico, reduzindo esses esforços na estrutura de madeira. Segundo esse autor, as técnicas de reforço com elementos metálicos mais difundidas são parafusos ou chapas embutidas nas peças, reforço das seções por junções com perfis ou chapas e criação de uma estrutura metálica de apoio.

No caso de reforço com parafusos ou chapas embutidas, a colocação das peças se dá de maneira que o funcionamento seja semelhante ao do concreto armado: o elemento metálico resistirá à tração, e a peça de madeira à compressão, sendo que essa técnica é aplicada principalmente na reconstrução de apoios. Nesse tipo de reforço a fixação entre os elementos metálicos e a madeira pode ser feita através de resinas, sendo mais utilizada a resina termorígida de epóxi (BRITES, 2011). Brito (2014) menciona a técnica de reforço com placas internas coladas *in loco*, que consiste na adição de placas metálicas inseridas em ranhuras nas vigas, de maneira a suportar quase todo o carregamento, salientando que essas placas devem ficar escondidas, protegidas do fogo e da corrosão, como pode ser visto na figura 14.

Segundo Dias (2008), reforços com peças metálicas podem ser feitos com chapas ou perfis fixados nas faces externas da madeira ou introduzidos no interior das peças a reforçar. Nesse segundo caso, a parte de madeira degradada deve ser removida e a parte sã deve sofrer um corte onde será introduzido o elemento metálico. Os trechos metálicos expostos devem ser cobertos com madeira, conferindo-lhes uma proteção ao fogo.

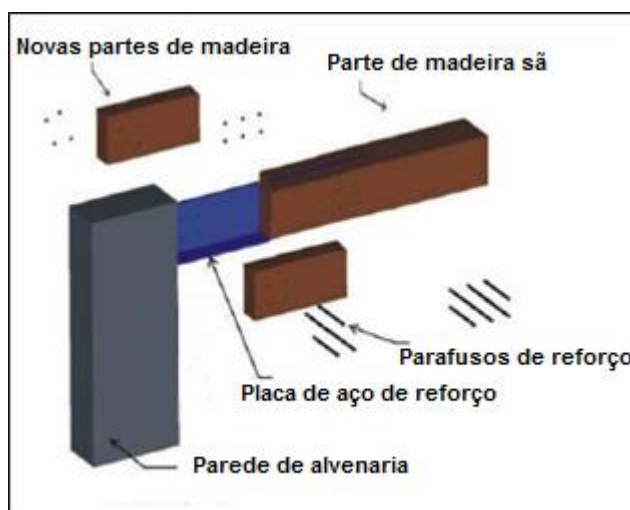


Figura 14 - Reforço metálico embutido na região do apoio de viga
Fonte: Adaptado de Ilharco et al. (2007 apud DIAS, 2008)

Já a técnica de reforço com junções metálicas é semelhante ao reforço com elementos de madeira, porém, permite realizar reforços significativos com uma seção transversal menor, devido às melhores propriedades mecânicas do aço (BRITES, 2011). De acordo com Lopes (2007), essa técnica é utilizada para reparar a ruptura e manter a continuidade de vigas por exemplo, ajudando a melhorar a resistência e rigidez da estrutura. Além disso, Lopes (2007) também cita essa aplicação em casos de reforço da capacidade resistente em zonas deterioradas da madeira. Na figura 15 são apresentados exemplos desse tipo de técnica.

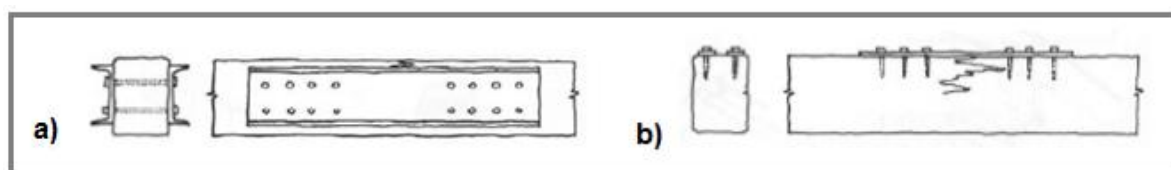


Figura 15 – a) Reforço com perfis metálicos; b) Reforço com chapas metálicas
Fonte: Arriaga (2002 apud DIAS, 2008)

O método de criação de uma estrutura metálica de apoio é utilizado em pavimentos, e consiste na colocação de perfis metálicos entre as vigas de madeira ou sobre elas, de maneira que esta estrutura, independente da outra, receba parte da carga aplicada pelo pavimento, reduzindo os esforços que a estrutura de madeira tem que suportar (BRITES, 2011). Costa (2009) também afirma que esta técnica ajuda os elementos existentes de madeira a resistir às cargas e a reduzir seu nível de esforços, além de aumentar a rigidez do pavimento e reduzir a deformabilidade e o nível de vibração. Esse sistema é ilustrado na figura 16.



Figura 16 – Perfis metálicos com vigas de madeira existentes no Mosteiro de Tibães, Braga
Fonte: Dias (2008 apud COSTA, 2009)

Brites (2011) ainda cita a técnica de reforço com tirantes metálicos que, de maneira análoga ao que ocorre no concreto protendido, consiste na colocação de cabos de aço destinados a aplicar uma contra-flecha à peça ou diminuir os esforços de flexão, como pode ser observado na figura 17. O autor, porém, salienta que nessa técnica é preciso ter cuidado na aplicação de esforços elevados, para que não ocorra esmagamentos, rupturas ou fenômenos de longo prazo. Lopes (2007) acrescenta que essa técnica permite a redução das deformações da peça, melhora o estado de tensões na madeira e permite o aumento da inércia da peça, ficando o tirante tracionado e a viga comprimida, o que aumenta a capacidade de carga da mesma. Já para Brito (2014), a técnica de reforço com tirantes de barras ou cabos de aço, equipados com esticadores ou outros dispositivos, contribui com a resistência e rigidez de elementos estruturais individuais ou treliças, além de possibilitar o ajuste da tensão nas vigas com protensão e controlar desvios excessivos.

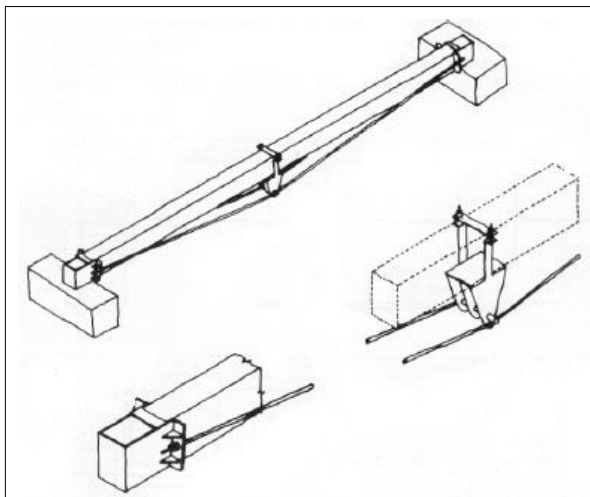


Figura 17 – Reforço de peças de madeira com aplicação de tirantes pré-esforçados
Fonte: Lopes (2007)

No que se refere ao reforço de pavimentos, Dias (2008) também cita a fixação de uma cantoneira metálica à parede através de parafusos. Essa solução é indicada nos casos em que as vigas do pavimento apresentam degradação em seus apoios, e a cantoneira metálica passa a ter a função de suporte desses elementos em sua parte sã. Essa técnica pode ser visualizada na figura 18.



Figura 18 - Vigamento apoiada em cantoneira metálica
Fonte: Guedes et al. (2002 apud DIAS, 2008)

4.5.3 Reforço com produtos poliméricos

Os produtos poliméricos podem ser aplicados de forma a preencher as zonas degradadas, embebendo as células e espaços livres entre elas, com o objetivo de conseguir características próximas as da madeira original e estabelecer ligações com

a madeira sã. Os materiais poliméricos são formados por um conjunto de polímeros, sendo estes últimos definidos como “macromoléculas constituídas pela repetição de pequenas e simples unidades químicas, os monômeros” (NEVES, 2013).

Os polímeros podem ser classificados em naturais, semi-sintéticos ou sintéticos, sendo que estes últimos ainda se subdividem em elastômeros, termoplásticos e termofixos. Os polímeros semi-sintéticos são obtidos através da manufatura dos polímeros naturais, e os sintéticos são produzidos através de processos químicos adequados. Os polímeros sintéticos (termoplásticos e termofixos) são os mais utilizados na recuperação de estruturas de madeira, e segundo Henriques (2011 apud NEVES, 2013) “é de referir que os consolidantes de características termoplásticas mais comuns são os baseados em resinas acrílicas, sendo as resinas epoxídicas, as mais comuns entre os materiais termoendurecíveis”. Esse autor ainda esclarece que os materiais epoxídicos são geralmente comercializados em sistemas com dois componentes: resina e endurecedor.

A resina epoxídica pode ser utilizada como uma espécie de argamassa, já que sofre um endurecimento térmico e pode ser moldada às formas pretendidas (BRITES, 2011).

Ritter (1990 apud FIORELLI et al., 2002) considera a utilização do reparo epóxi como uma das técnicas mais eficientes para reforçar estruturas de madeira. Esse autor explica que o epóxi pode ser injetado nas partes danificadas da peça de madeira, promovendo um aumento da resistência da mesma, e também explica que, “além de vedar a área danificada, aumenta a capacidade de carga da estrutura e reduz o aparecimento de futuras rachaduras”. Fiorelli et al. (2002) ainda afirmam que esse método promove a incorporação de certa flexibilidade à estrutura.

Na figura 19 pode ser observado uma peça de madeira que recebeu a aplicação de resina epóxi.



Figura 19 – Preenchimento de fissuras com resina epoxídica
Fonte: Lopes (2007)

4.5.4 Reforço com materiais compósitos

Os Polímeros Reforçados com Fibra (PRF) são compósitos formados a partir da união de fibras a uma matriz (adesivo), apresentando propriedades de elasticidade e resistência mecânica superiores aos dois materiais analisados separadamente (FIORELLI, 2005). Entre as características positivas desse produto, Fiorelli (2002) cita a facilidade de se associar a outros materiais, o baixo aumento no peso próprio da estrutura na qual são aplicados, aumentos significativos da resistência e da rigidez, além de ser um material muito flexível e de boa aceitação no mercado. Junior e Cunha (2002) afirmam que “uma grande vantagem dos materiais compostos é a possibilidade da variação dos elementos constituintes da estrutura segundo as direções preferenciais dos esforços, permitindo uma otimização do comportamento mecânico”. Os PRF também permitem o uso de peças com seção transversal menor do que as mesmas peças sem o reforço.

O reforço com PRF pode ser utilizado tanto em peças novas quanto em peças que já estão em serviço, sendo necessário em ambos os casos “a correta especificação dos materiais e o dimensionamento das soluções a implementar, bem como uma preparação e prática corretas” (CRUZ et al., 2000).

Miotto e Dias (2006) destacam também que peças de madeira de qualidade inferior apresentam baixo custo e alta resistência à compressão, porém possuem baixa resistência à tração, que é compensada com a aplicação do PRF.

Para Cruz et al. (2000), o que ainda limita o uso dos polímeros reforçados com fibra é o desconhecimento geral quanto às potencialidades e aplicações do produto, e quanto ao seu dimensionamento e técnicas de aplicação.

Norris e Saadatmanesh (1994 apud FIORELLI, 2005) explicam que a função da fibra é garantir a resistência do compósito, ao passo que a matriz (adesivo) é responsável por unir as fibras e transmitir os esforços aplicados.

“As fibras que vem apresentando melhores resultados são: fibra de vidro, Kevlar 49 (aramid) e fibra de carbono. O processo de fabricação difere para cada um destes materiais, resultando em microestruturas com propriedades distintas” (FIORELLI,2002).

Miotto e Dias (2006) explicam que, embora essas fibras apresentem uma densidade expressiva, como são aplicadas em pequenas quantidades às estruturas de madeira, não geram problemas por acréscimo no peso próprio. Outra característica benéfica desse material é descrita por Dagher (2000 apud MIOTTO; DIAS, 2006), ao relatar que “ enquanto a ruptura à flexão de uma viga de madeira é tipicamente frágil, a correspondente ruptura de uma viga de madeira apropriadamente reforçada com fibras no lado tracionado é dúctil”, em outras palavras, o emprego dos polímeros reforçados com fibra aumenta a confiabilidade em relação ao modo de ruptura.

Algumas das propriedades das fibras citadas anteriormente, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos tecidos de fibra a 20°C

Fibras	Características		
	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Fibra de vidro	900	76	2,55
Orgânica (Kevlar)	1500	125	1,44
Fibra de carbono	2200	160 - 300	1,75

Fonte: Fiorelli (2002 apud MIOTTO; DIAS, 2006)

Outro comparativo entre as diferentes propriedades dessas fibras pode ser visualizado na Figura 20.

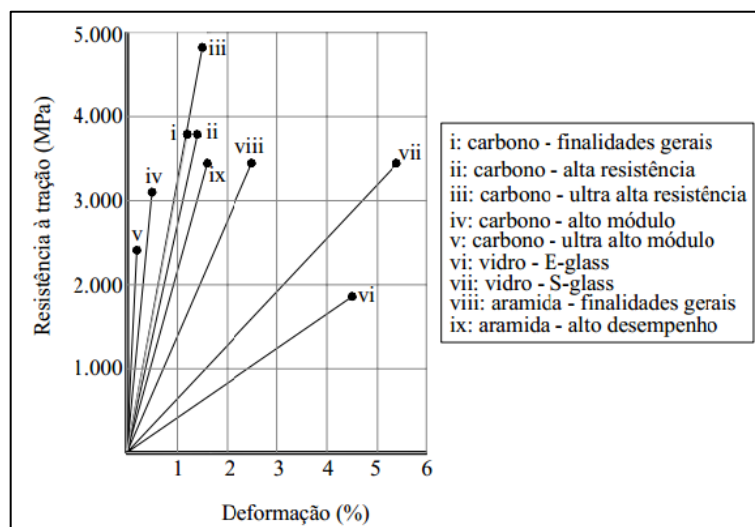


Figura 20 – Curvas típicas de tração versus deformação das fibras
Fonte: FERRARI et al., 2002

4.5.4.1 Fibra de carbono

Segundo Fiorelli (2002), as fibras de carbono são produzidas a partir de um componente básico chamado poliácrlonitrila (PAN). O autor também explica que as fibras podem apresentar diferentes configurações de resistência e módulo de elasticidade, dependendo do tratamento recebido pela fibra básica, o qual inclui carbonização, oxidação e grafitação.

“As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso próprio, grande durabilidade, facilidade de assumir formas complexas, alta resistência e grande rigidez” (FIORELLI, 2002).

Fiorelli (2002) relata que no mercado brasileiro existem três tipos de sistemas de reforço que utilizam fibras de carbono, são eles:

- Lâminas impregnadas com resina epóxi ou poliéster.
- Fios de fibra de carbono, que são enrolados sob tensão.
- Tecidos pré-impregnados, que apresentam pequena espessura, colados com resina e que permitem acompanhar a curvatura do elemento. Nesse sistema os filamentos de fibra de carbono são esticados unidirecionalmente.

Na figura 21 pode-se ver um dos tipos de fibra de carbono comercializados.



Figura 21 - Laminado de fibra de carbono unidirecional
Fonte: Mohamad et al. (2011)

Machado (2015), apresenta uma classificação dos tipos de fibra de carbono e algumas de suas propriedades, que podem ser visualizadas na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2. Características genéricas das fibras de carbono

Tipo de Fibra de Carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tração (MPa)	Deformação de Ruptura(%)
De uso geral	220 – 235	< 3.790	> 1,2
Alta resistência	220 – 235	3.790 – 4.825	> 1,4
Ultra alta resistência	220 – 235	4.825 – 6.200	> 1,5
Alto módulo	345 – 515	> 3.100	> 0,5
Ultra alto módulo	515 - 690	> 2.410	> 0,2

Fonte: Machado (2015)

4.5.4.2 Fibras de vidro

As fibras de vidro são formadas por sílica (SiO_2) com adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Apresentam um custo menor quando comparadas às fibras de carbono e aramida e também possuem alta resistência ao impacto e a corrosão (FIORELLI, 2002).

De acordo com Beber (2003), as fibras de vidro podem ser divididas em dois grupos, um deles com módulo de elasticidade de cerca de 70 GPa e resistência à tração entre 1000 e 2000 MPa (fibras do tipo E, A, C e E-CR, por exemplo), e outro

grupo com elasticidade de cerca de 85 GPa e resistência à tração entre 2000 e 3000 MPa (fibras do tipo R, S e AR, por exemplo). Na figura 22 pode-se ver a aparência desse material.

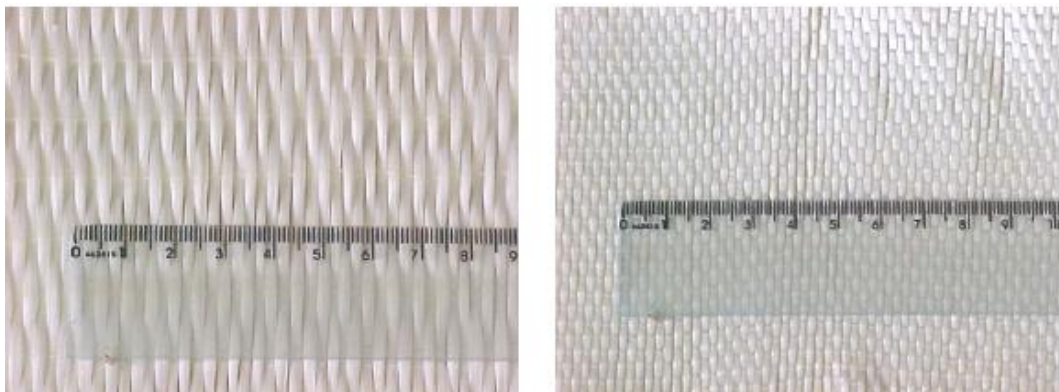


Figura 22 - Exemplos de tecidos unidirecionais de fibra de vidro
Fonte: Fiorelli (2005)

4.5.4.3 Fibras aramida

“As fibras aramídicas são fibras orgânicas obtidas por extrusão e fiação a partir de poliamidas aromáticas. A fibra aramídica mais conhecida é o Kevlar produzido pela Dupont (EUA)” (CRUZ et al, 2000). Esse tipo de fibra, segundo Fiorelli (2002), apresenta três estruturas moleculares diferentes: nylon, aramida e poliestireno. O autor também afirma que essas fibras são muito usadas na indústria automobilística e aeroespacial, assim como na construção de barcos. A resistência específica (resistência/densidade) desse tipo de fibra é superior a todos os outros tipos disponíveis no mercado.

Outras propriedades desse tipo de fibra, segundo Beber (2003), são a resistência ao fogo e excelente desempenho sob altas temperaturas, além de sua tenacidade. “As fibras aramida apresentam resistências da ordem de 3000 MPa e módulo de elasticidade variando entre 60 GPa e 120 GPa” (BEBER, 2003).

4.5.4.4 Adesivos (Matriz polimérica)

Carrazedo (2005) explica que matrizes e adesivos são materiais constituintes dos polímeros reforçados por fibras e normalmente são resinas poliméricas. O autor também informa que em muitos sistemas de reforço a mesma resina é utilizada como matriz e também como adesivo do compósito.

Brito (2014) define adesivo como “a substância capaz de unir materiais através do contato entre suas superfícies”. De acordo com sua composição química, Fiorelli (2002), classifica os adesivos em orgânicos e inorgânicos:

- Adesivos inorgânicos: a ligação ocorre através da desidratação do solvente e proporcionam uma ligação de alta resistência mecânica.

- Adesivos orgânicos: esse tipo adesivo pode ter origem natural ou sintética, sendo esse último o mais empregado na indústria, por ser resistente à água e não sofrer à ação de microrganismos. Este grupo ainda pode ser subdividido em: termofixos (endurecem devido a reações químicas ativadas por catalisadores ou pela temperatura) e termoplásticos (adesivos de cura reversível, que fundem ou amolecem com o aumento de temperatura, e voltam a solidificar quando resfriados).

De acordo com Cunha et al. (2006), o adesivo (ou matriz polimérica) “tem as funções de agregar as fibras, dar proteção às suas superfícies contra danos por abrasão e atenuar os efeitos adversos das condições ambientais na utilização do compósito”, além de proporcionar a adesão adequada que possibilite a transferência de tensões para as fibras.

Cunha et al. (2006) também alertam sobre a influência da umidade no desempenho da matriz polimérica e conseqüentemente do compósito como um todo. Segundo eles “ a umidade absorvida nos compósitos de fibra de carbono/epóxi pode reduzir a resistência e a rigidez do laminado, devido à plasticização da matriz com o enfraquecimento da interface fibra/resina”. Os autores ainda relatam que temperaturas elevadas também prejudicam o desempenho da resina.

Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades típicas de resinas termofixas usadas comumente.

Tabela 3. Propriedades típicas de resinas usadas comumente

Tipo de resina	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Peso Específico (kg/m³)	Retração na cura (%)
Poliéster	35 – 104	2.1 – 3.5	1100 – 1400	5 – 12
Vinil éster	73 – 81	3.0 – 3.5	1100 – 1300	5 – 10
Epóxi	55 – 130	2.8 – 4.1	1200 – 1300	1 – 5

Fonte: Taerwe et al. (1997 apud ARAÚJO, 2002)

4.5.4.5 Adesivos epóxi

“Consistem em bases de resina e agentes químicos de endurecimento, que são misturados em conjunto numa forma de líquido, gel ou pasta” (BRITO, 2014). Esse tipo de adesivo apresenta um nível alto de aderência em superfícies limpas. Segundo Miotto e Dias (2006) o adesivo epóxi é utilizado comumente para colagem de fibras à madeira.

Brito (2014) também esclarece que o adesivo epóxi é mais eficaz quando é utilizado “como uma matriz de colagem para proporcionar resistência ao cisalhamento entre os elementos para reabilitações e/ou reforços estruturais em locais secos”.

O adesivo epóxi AR-300 foi desenvolvido para apresentar ótima penetração aos diversos tipos de fibras existentes. Também possui baixa viscosidade e não torna a superfície pegajosa após sofrer a cura, o que torna possível a “laminação sucessiva de outras camadas de fibras” (FIORELLI, 2002).

De acordo com a FIB (2001 apud CARRAZEDO, 2005) as resinas epóxi apresentam diversas vantagens sobre outros polímeros para serem utilizadas como adesivo na engenharia civil, como por exemplo alta resistência coesiva, reduzida retração e ainda poderem acomodar irregularidades com espessuras consideráveis.

4.5.4.6 Compósitos madeira-concreto

Esta técnica se refere a um reforço/reabilitação aplicada em pavimentos de madeira, “aumentando a sua capacidade de carga e diminuindo deformações e vibrações, tendo por isso um caráter de reforço global” (DIAS, 2008). O sistema é composto pelos materiais madeira e concreto, sendo que o concreto apresenta boa resistência à compressão, mas baixa resistência à tração, ao passo que a madeira apresenta resistências à tração e à compressão da mesma ordem de grandeza. Para que essa laje mista funcione corretamente, é preciso que os esforços de tração sejam absorvidos pela madeira e os esforços de compressão pelo concreto, e para que isso ocorra, a ligação entre os dois materiais deve ser feita de forma adequada, reduzindo os deslocamentos relativos entre os dois materiais. Essa ligação normalmente é feita através de ligadores metálicos (DIAS, 2008).

Por outro lado, Miotto e Dias (2006) esclarecem que a ligação entre os dois materiais deve garantir a transferência dos esforços horizontais de cisalhamento e impedir o desprendimento vertical entre as peças. Segundo os autores, essa ligação pode ser do tipo rígido ou fixo, sendo que o primeiro é obtido através da aplicação de um adesivo epóxi na superfície de contato entre os materiais, e o segundo tipo é obtido por conectores metálicos (pregos, parafusos, chapas metálicas, anéis metálicos ou pinos).

De acordo com Miotto e Dias (2006), a adição da camada de concreto proporciona diversas vantagens, entre elas benefícios no isolamento acústico e acréscimo significativo na rigidez da estrutura. Segundo esses autores, essa técnica também ajuda a amenizar o inconveniente da exposição direta das estruturas de madeira às intempéries, e tem sido utilizada com sucesso em estruturas de pontes, edificações residenciais, industriais e esportivas.

Brito (2014) também afirma que nesse sistema a resistência à flexão e a rigidez aumentam consideravelmente e há uma melhora no comportamento dinâmico da estrutura. De maneira semelhante Jorge (2005) informa que esse tipo de estrutura promove “aumento significativo da capacidade de carga e rigidez de flexão da solução mista comparada com soluções de pavimentos simples de madeira” (JORGE, 2005), além de melhorar a resistência ao fogo do pavimento se comparado com o de madeira. Segundo esse autor, estudos realizados nessa área evidenciaram aumento no tempo de resistência ao fogo de 30 minutos (para pavimentos de madeira sem concreto) para 90 minutos nos pavimentos mistos de madeira-concreto. Nas figuras 23 e 24 pode-se ver a aparência deste tipo de reforço.

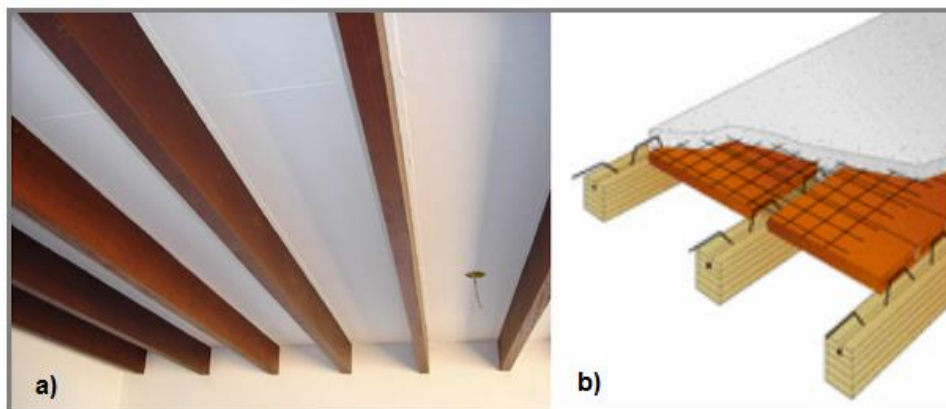


Figura 23 – Estrutura mista de madeira-concreto em residência
Fonte: a) Miotto e Dias (2006); b) Cardoso (2010)

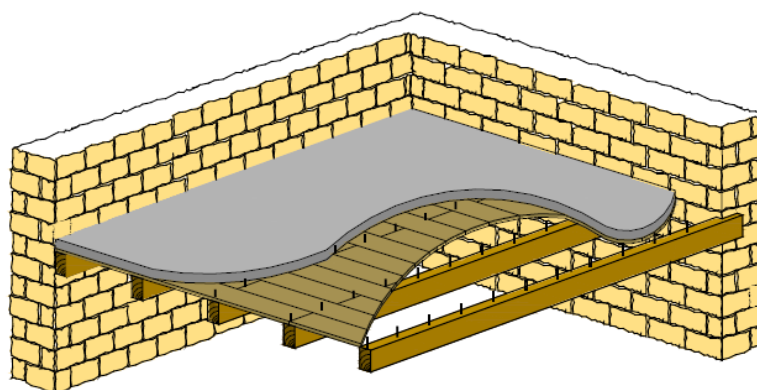


Figura 24 - Esboço de uma estrutura mista de madeira-concreto mantendo o soalho
Fonte: Jorge (2005)

4.5.6 Estudos de caso e ensaios sobre o tema

Esta seção se dedica a apresentar dados obtidos através de estudos de casos de outros autores que exemplifiquem e comprovem os benefícios das técnicas de reforço apresentadas ao longo deste trabalho.

É importante salientar que as informações apresentadas a seguir são apenas exemplos do desempenho de algumas técnicas citadas neste trabalho, uma vez que os critérios de execução de reforço e reabilitação devem ser implementados caso a caso, pois, geralmente, não existem situações idênticas em reabilitações de estruturas antigas de madeira (BRITO, 2014).

- **Estudo de caso 1 (Fiorelli, 2005) – Reforço com fibra de vidro**

No estudo de caso de Fiorelli (2005) foram confeccionadas doze vigas em MLC da espécie *Pinus caribea var.hondurensis*. Na última linha de cola da seção tracionada as vigas foram reforçadas com fibras de vidro. As lâminas de MLC foram coladas com o adesivo Phenol-resorcinol (Axo-Nobel) e para a colagem do tecido de fibra de vidro foi utilizado o adesivo à base de resinas epoxídicas AR-300 (Barracuda). A espessura do reforço é considerada em relação à espessura nominal da fibra, e a porcentagem de reforço indicada é dada em relação à altura da viga de MLC. Na tabela 4 são apresentadas as dimensões dos corpos de prova e a porcentagem de reforço de fibra de vibro.

Tabela 4. Propriedades geométricas das vigas de MLC avaliadas experimentalmente

Viga	Nº de lâminas de madeira	Espessura aproximada das lâminas	b (cm)	h (cm)	Porcentagem de reforço (%)	Espessura do reforço (cm)
1	6	3,3 ± 0,2	6,9	20,0	0,0	0,0
2			6,9	20,5		
3			6,9	20,5	1,2	0,25
4			6,9	20,2		
5			7,0	20,5	3,3	0,6
6			7,0	24,0		
7	7		7,7	28,9	0,0	0,0
8			7,5	28,7		
9			7,6	30,4		
10	12		7,0	30,2	1,2	0,35
11			6,9	30,8		
12			7,0	30,6	3,3	0,9

Fonte: Fiorelli (2005).

Os ensaios foram realizados com carga aplicada nos terços do vão e a flecha foi medida no meio do vão.

Os valores de M1 e M2 indicados na tabela 5 correspondem respectivamente à: valor do momento quando ocorreu a ruptura na última lâmina tracionada, posicionada abaixo do reforço e valor do momento fletor quando ocorreu a ruptura final da viga.

Tabela 5. Valor de rigidez à flexão e momento fletor resistente

Viga	Porcentagem de reforço	Seção	EI (kN.cm ²)	Momento Fletor (kN.cm)		Flecha máxima (cm)
				M1	M2	
1	---	6,9 x 20,0	6.488.396	2489		8
2	---	6,9 x 20,5	6.914.197	2273		8
3	1,2% FV	6,9 x 20,5	6.644.274	2381	2814	11
4	1,2% FV	6,9 x 20,2	6.766.187	2056	2887	13
5	3,3% FV	7,0 x 20,5	7.022.504	2561	3283	16
6	3,3% FV	7,0 x 24,0	9.980.947	3210	3694	12
7	---	7,7 x 28,9	16.826.463	3824		6
8	---	7,5 x 28,7	17.179.260	4220		5
9	1,2%FV	7,6 x 30,4	22.050.998	6200	7835	12
10	1,2%FV	7,0 x 30,2	19.278.948	6143	6875	9
11	3,3%FV	6,9 x 30,8	24.255.268	8173	8906	12
12	3,3%FV	7,0 x 30,6	21.978.306	7948	8568	10

Fonte: Fiorelli (2005).

As vigas reforçadas com fibra de vidro apresentaram dois estágios de ruptura. O primeiro, iniciando por tração na emenda da lâmina de madeira localizada abaixo da camada de reforço, e o segundo após haver um aumento da força aplicada, devido a uma combinação de ruptura por compressão, tração e cisalhamento. Na região comprimida das peças ensaiadas também foi observada a ocorrência de esmagamento pronunciado, e foram obtidos deslocamentos na proximidade dessa última ruptura, quando comparado às vigas de madeira sem reforço. Comportamento esse que propicia uma reserva adicional de segurança, pois causa anúncio da ruptura por grandes deslocamentos. A situação descrita anteriormente pode ser observada na figura 25.

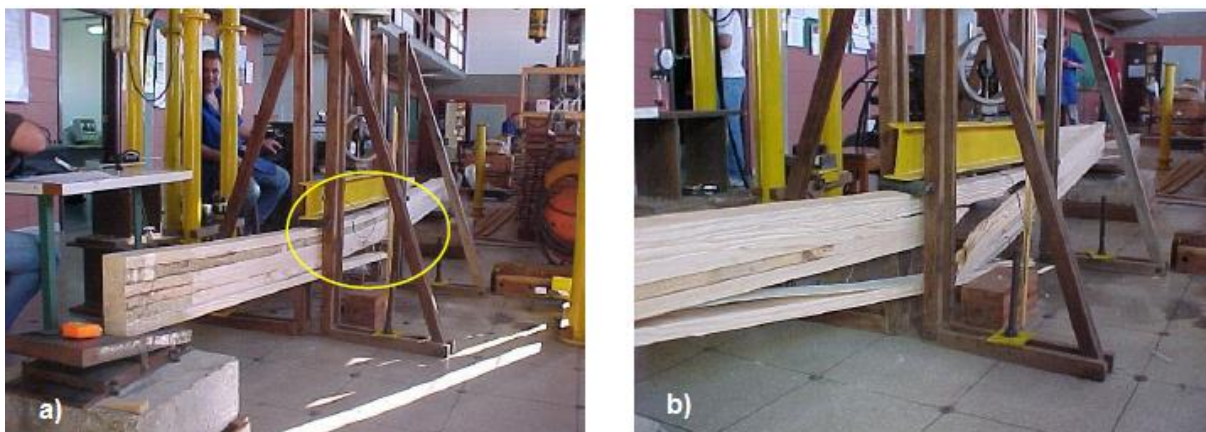


Figura 25 – a) Ruptura na lâmina abaixo do reforço; b) Ruptura final da viga
Fonte: Fiorelli (2005)

- **Estudo de caso 2 (Neves, 2013) – Reforço com resina epoxídica**

Neves (2013) realizou a aplicação *in situ* do método de tratamento e consolidação estudado ao longo de sua tese. Esse processo envolveu duas partes, a primeira onde aplicou-se o produto de tratamento para fungos, o Bora-Care, e a segunda onde foi aplicado o material consolidante à base de resinas epoxídicas, o EPO 155. Os pontos de estudo foram escolhidos entre elementos estruturais e não estruturais medianamente degradados por fungos, com perda de massa mediana. O trabalho desse autor apresenta uma estimativa das propriedades mecânicas dos elementos intervencionados, baseando-se nos resultados dos ensaios não destrutivos realizados e nas correlações descritas ao longo de seu trabalho.

O estudo foi realizado num edifício nobre, datado de 1877, situado em Lisboa, Portugal. Quanto à madeira existente, pelo aspecto e período construtivo, é em sua maioria Pinho, parecendo pertencer às espécies *Pinus sylvestris L.* e *Pinus pinaster Ait.*

Os elementos de estudo escolhidos foram: uma costaneira de uma parede de tabique, uma parte de uma escada e uma viga de pavimento, pois pretendeu-se avaliar a eficácia do método de tratamento e consolidação de madeira medianamente degradada por fungos, estudado ao longo da tese do autor, tanto ao nível de elementos estruturais como não estruturais. Dentro de cada elemento em estudo, identificou-se uma zona medianamente degradada por fungos, zona A, uma zona bastante degradada para comparação, zona B, e uma zona sã para controle, zona C.

O tratamento foi aplicado em todas as zonas estudadas, porém, o consolidante foi aplicado apenas nas zonas A, medianamente degradadas, pois nas

zonas B, muito degradadas, e C, sãs, não se espera haver um aumento significativo de resistência, de acordo com a pesquisa apresentada na tese do autor. Na figura 26 pode-se ver um pouco desse processo.



Figura 26 – Aplicação do consolidante a) Costaneira; b) Escada; c) Vigas do pavimento
Fonte: Neves (2013)

Os valores apresentados nas tabelas 6, 7 e 8 são valores médios obtidos através de tratamento estatístico realizado entre todas as medições efetuadas, através do aparelho *Pilodyn*® e do *Resistograph*®. Para avaliar o efeito do tratamento e consolidação, optou-se por determinar a medida resistográfica numa extensão de 10 mm para os elementos não estruturais, de espessura menor, e 15 mm para as vigas, rejeitando sempre os 2 mm iniciais, considerados como zona de perturbação.

Tabela 6. Resumo dos ensaios na costaneira

Propriedades – valores médios	Costaneira			
	Inicial	Tratada e consolidada	Inicial	Inicial
Teor em água (%)	4	5	2	12
Medida resistográfica $Mr_{\text{médio}}$ (20cm/min)	8,5	9,2	6,3	13,1
<i>Pilodyn</i> ® (mm)	-	-	-	12,3

Fonte: Neves (2013).

A aplicação do tratamento e consolidação parece ter potenciado o ganho de resistência, conforme se pode verificar pela análise dos valores apresentados na tabela 6, comprovado pela medida resistográfica, que sobe cerca de 1 valor após a aplicação do tratamento e consolidação.

Só foi possível utilizar o aparelho *Pilodyn*® na zona C, pois era a única tábua costaneira contraventada.

Tabela 7. Resumo dos ensaios na escada

Propriedades – valores médios	Escada			
	A		B	C
	Inicial	Tratada e consolidada	Inicial	Inicial
Teor em água (%)	10	10	7	9
Medida resistográfica	6,4	8,7	1,0	11,6
$Mr_{\text{médio}}$ (20cm/min)				
<i>Pilodyn</i> ® (mm)	14,1	11,4	17,8	11,4

Fonte: Neves (2013).

As medidas resistográficas demonstram um ganho real da resistência à perfuração após a aplicação do tratamento e consolidação, como se pode observar na tabela 7, embora o valor registado seja inferior ao da zona sã, ainda assim houve um ganho substancial de resistência.

O uso do *Pilodyn*® mostrou que a penetração na zona A, após o tratamento e consolidação, aproximou-se bastante da registada para a madeira sã da zona C, levando-se a acreditar que o consolidante à base de resinas epoxídicas estudado promove uma grande dureza superficial.

Tabela 8. Resumo dos ensaios nas vigas do pavimento

Propriedades – valores médios	Vigas do pavimento			
	A		B	C
	Inicial	Tratada e consolidada	Inicial	Inicial
Teor em água (%)	7	8	3	7
Medida resistográfica	11,8	15,6	7,0	12,8
$Mr_{\text{médio}}$ (20cm/min)				
<i>Pilodyn</i> ® (mm)	14,8	13,9	21,3	16,2

Fonte: Neves (2013).

Os dados da tabela 8 demonstram um ganho extraordinário de resistência após a aplicação do tratamento e consolidação.

Ao que tudo indica, a viga C, sã e de referência, deve se tratar de uma madeira diferente das restantes, já que tanto o *Resistograph*® como o *Pilodyn*® apresentaram melhores resultados para a viga A, tratada e consolidada, do que para a viga C, sã, o que não faria muito sentido caso se tratasse da mesma madeira.

De acordo com o estudo realizado em sua tese, Neves (2013) esperava um aumento da resistência das peças após a aplicação do tratamento e consolidação escolhidos, e de acordo com os resultados apresentados nas tabelas 6, 7 e 8, pode verificar-se que a consolidação promoveu um ganho de resistência em todos os elementos estudados.

- **Estudo de caso 3 (Fiorelli, 2002) – Reforço com fibras de carbono e fibras de vidro**

Os ensaios de tração realizados por Fiorelli (2002) em sua dissertação foram feitos com tecido unidirecional de fibras de carbono (VGW 095) e de fibras de vidro (VEW 130).

Os ensaios foram realizados em vigas com dimensões estruturais de *Pinus caribea* (*Pinus caribea var.hondurensis*) e de Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*). As vigas 1, 2, 3, 4 e 9 têm dimensões 6x12x300cm. As vigas 5, 6, 7 e 8 têm dimensões 6x16x300cm. As vigas 10, 11, 12 e 13 têm dimensões 6x12x200cm.

As vigas de madeira de *Pinus* e Peroba Rosa foram reforçadas com seis camadas de fibra de vidro ou com duas camadas de fibra de carbono. Este número de camadas de fibras foi estabelecido baseando-se na análise teórica de cálculo apresentada no trabalho do autor, a qual indica uma proximidade entre os valores de momento máximo resistido por vigas de madeira reforçadas com duas camadas de fibra de carbono e seis camadas de fibra de vidro.

A viga número 9 de *Pinus* foi reforçada com 20 camadas de fibra de vidro, para verificar se existe diferença de comportamento, quando se utiliza uma maior quantidade de camadas de fibras.

As tabelas 9 e 10 apresentam valores de ruptura experimental, de rigidez à flexão (EI) e o tipo de ruptura apresentado pelas vigas de *Pinus* e de Peroba.

Tabela 9. Vigas de Pinus Caribea

Viga	Reforço	Seção (mm)		Momento de ruptura (kN.cm)	EI (kN.cm ²)		Flecha máxima (cm)	Modo de ruptura
					Sem reforço	Com reforço		
1	Fibra de vidro	11,6	5,4	920	556.371	711.534	12	Tração
2	vidro	11,6	5,4	1051	958.128	1.081.958	11	Tração
3	Fibra de carbono	11,7	5,4	978	705.910	914.934	15	Compressão
4	carbono	11,6	5,4	1072	1.054.281	1.236.808	16	Tração
5	Fibra de vidro	15,3	5,3	1095	1.303.614	1.463.894	9	Tração
6	vidro	15,4	5,4	1301	1.450.813	1.669.113	16	Tração
7	Fibra de carbono	15,4	5,4	1491	1.999.199	2.279.938	10	Tração
8	carbono	15,4	5,7	1060	1.389.845	1.611.869	12	Tração
9	Fibra de vidro	11,8	5,5	1056	913.062	1.440.282	11	Tração

Fonte: Fiorelli (2002).

Tabela 10. Vigas de Peroba Rosa

Viga	Reforço	Seção (mm)		Momento de ruptura (kN.cm)	EI (kN.cm ²)		Flecha máxima (cm)	Modo de ruptura
					Sem reforço	Com reforço		
10	Fibra de vidro	11,3	5,5	1258	1.125.733	1.220.987	6	Tração
11	vidro	11,3	5,0	1195	732.921	927.283	11	Tração
12	Fibra de carbono	11,3	5,0	1211	929.454	1.102.436	9	Tração
13	carbono	11,3	5,0	1351	1.102.280	1.269.827	8	Tração

Fonte: Fiorelli (2002).

O emprego do reforço de fibras possibilita que a ruptura ocorra na presença de grandes deslocamentos verticais, como pode ser visto na figura 27.

Apesar do esmagamento das fibras superiores por compressão nas vigas reforçadas, observa-se aumento na capacidade da viga até o colapso, que varia com o número de camadas de reforço, que se inicia com a ruptura por tração na parte inferior da madeira.



Figura 27 - Flecha acentuada na viga reforçada
Fonte: Fiorelli (2002)

- **Estudo de caso 4 (Fiorelli et al., 2002) – Substituição de peças deterioradas**

Fiorelli et al. (2002) realizaram a recuperação de uma edificação construída com madeira da espécie Pinho do Paraná (*Araucária angustifolia*), com sistema estrutural em pórtico treliçado, ligação com chapas de dentes estampados e vedação em madeira e alvenaria. Os elementos verticais do pórtico estavam degradados pela exposição direta ao intemperismo e pela ausência de tratamento preservativo que resultaram no ataque de fungos. A técnica de recuperação utilizada foi a substituição das peças degradadas.

A substituição foi feita por peças da espécie Eucaliptus citriodora (*Eucalyptus citriodora*) tratadas com CCB (borato de cobre cromaltado). A nova espécie de madeira apresenta maior resistência mecânica e maior resistência ao ataque de fungos e insetos do que a espécie anterior. A fixação do pórtico às fundações foi feita através de chapas metálicas galvanizadas, como pode-se ser visto na figura 28.



Figura 28 – Vista geral dos pórticos após o processo de substituição das peças
Fonte: Fiorelli et al. (2002)

Segundo os autores, a maior durabilidade do sistema estrutural é garantida pelo uso de madeira tratada e pela fixação suspensa dos pórticos, que impede o acúmulo de água e permite a ventilação, prevenindo contra a proliferação de fungos.

- **Estudo de caso 5 (Costa, 2009) – Reforço de vigas à meio do vão e nos apoios**

Costa (2009) acompanhou os trabalhos de reabilitação do Cine-Teatro de Fafe, edifício inaugurado no final do século XIX, localizado na cidade de Fafe em Portugal. O trabalho de Costa (2009) acompanhou a análise das patologias presentes nos pavimentos da edificação e a implantação de reforços nos mesmos.

No pavimento da plateia do teatro (pavimento térreo), verificou-se deformações elevadas, que provocavam desconforto nos usuários. A solução de reforço adotada foi o escoramento das vigas estruturais do pavimento na metade do vão, como pode ser visto na figura 29. As dimensões das escoras variam de acordo com a deformação de cada viga, de maneira a vencer as flechas apresentadas pelas mesmas. Além das escoras, foram colocadas peças de madeira nos apoios das vigas nos muros de alvenaria que as interligavam, para se obter uma melhoria das condições de rigidez e de união dos elementos do pavimento térreo.



Figura 29 – Reforço do pavimento do piso térreo com recurso de escoras de madeira
Fonte: Costa (2009)

Em outros pavimentos do edifício observou-se a redução de seções transversais devido a ataques biológicos. Nesses casos a solução adotada foi o reforço com a colocação de novos elementos juntamente aos degradados ou, no caso de elementos com podridão avançada, a substituição por novos elementos de dimensões equivalentes e mesmo tipo de madeira, como pode-se ver na figura 30.



Figura 30 – Reforço de vigas do 1º pavimento com a colocação de novos elementos
Fonte: Costa (2009)

Alguns apoios de vigas apresentavam problemas nas ligações com as paredes estruturais e também a presença de degradação biológica. Nos elementos onde a degradação biológica era pequena e apenas a ligação era problemática efetuou-se o reforço com o uso de elementos metálicos aparafusados à peça de madeira e à alvenaria de pedra, melhorando assim a conexão entre elementos e evitando movimentos de rotação das peças de madeira, como pode-se ver na figura 31.



Figura 31 – Reforço do apoio das vigas dos pavimentos com elementos metálicos
Fonte: Costa (2009)

As vigas que apresentavam degradação maior na região do apoio foram reforçadas com argamassa epoxídica, reconstruindo a zona de apoio, melhorando as condições de aderência às paredes e as condições higrotérmicas da ligação, o que pode ser visto na figura 32.

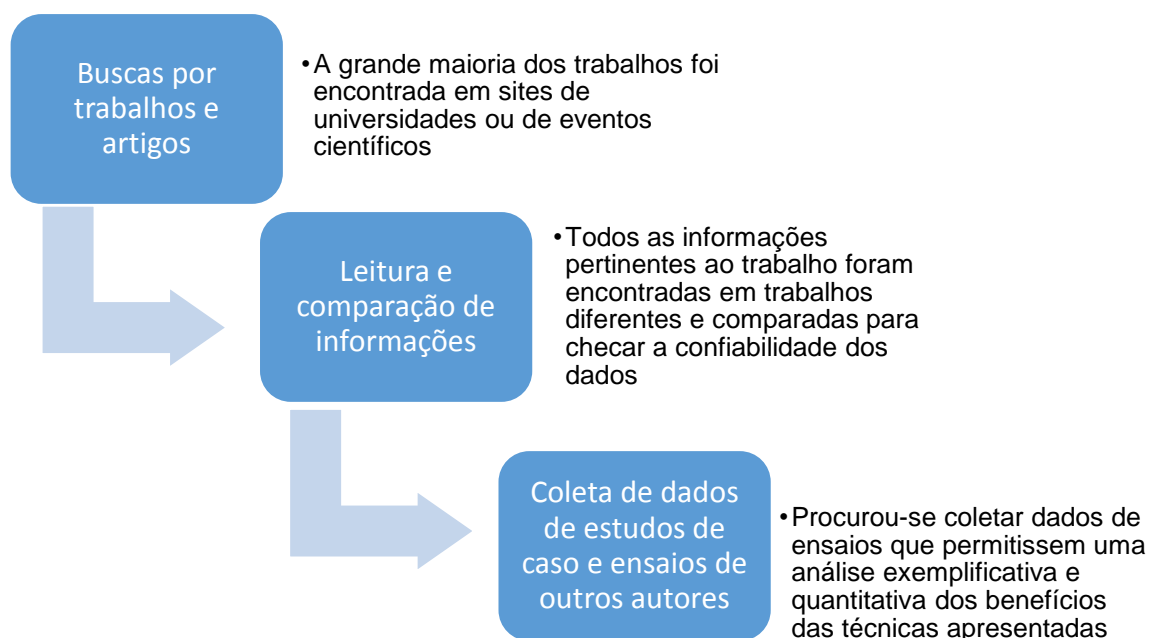


Figura 32 – Reforço dos apoios com uso de argamassa epoxídica
Fonte: Costa (2009)

5 METODOLOGIA

Este trabalho consistiu no levantamento bibliográfico de informações sobre o tema da pesquisa, utilizando-se como fontes de conhecimentos diversos trabalhos acadêmicos, bem como artigos de eventos científicos na área, desenvolvidos por autores do Brasil e do exterior.

O método de estudo e coletas de informações seguiu uma sequência lógica de passos que pode ser observada no Fluxograma 1:



Fluxograma 1 – Metodologia da pesquisa
Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do levantamento bibliográfico realizado com este trabalho, foi possível conhecer diversas técnicas de reforço e reabilitação em estruturas de madeira e a maneira como estas influenciam o comportamento de tais estruturas.

Nos quadros 5 a 8 são apresentados, como resultado desse trabalho, os benefícios que essas técnicas proporcionam, de acordo com o referencial bibliográfico consultado.

Reforço com elementos de madeira		
Técnica	Benefícios	Referências
Colocação de novos apoios	Diminuição dos esforços e de deformações excessivas	Brites (2011), Costa (2009)
Substituição de partes degradadas	Eliminação de degradações excessivas.	Brites (2011); Costa (2009); Fiorelli et al. (2002); Lopes (2007)
Aumento da seção transversal da peça	Redução da esbeltez de peças sujeitas a instabilidade; Aumento da seção resistente.	Brites (2011); Dias(2008)
Empalmes de madeira	Reestabelecimento de continuidade na peça	Lopes (2007); Costa (2009)

Quadro 5 – Benefícios de reforços com elementos de madeira

Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber que mesmo havendo problemas na madeira, os reforços podem ser realizados com esse mesmo material, trazendo diversos benefícios, desde que se tome cuidado com a escolha da madeira a ser introduzida, sempre optando por espécies de características adequadas e nas quais sejam aplicadas o devido tratamento.

Reforço com elementos metálicos		
Técnica	Benefícios	Referências
Junções com perfis ou chapas metálicos	Aumento da rigidez; Melhora da resistência; Redução de esforços	Brites (2011); Lopes (2007)
Varões ou chapas embutidas nas peças	Redução dos esforços de tração na madeira; Suporta quase todo o carregamento	Brites (2011); Brito (2014)
Tirantes metálicos	Redução dos esforços de flexão; Melhora da resistência e rigidez de elementos estruturais individuais ou treliças; Controle de desvios excessivos; Aumento da capacidade de carga de vigas	Brites (2011); Brito (2014); Lopes (2007)
Estrutura metálica de apoio	Redução de esforços na estrutura de madeira; Redução da deformabilidade e vibração do pavimento; Aumento da rigidez do pavimento	Brites (2011); Costa (2009)

Quadro 6 – Benefícios de reforços com elementos metálicos

Fonte: Autoria própria

De maneira geral, observa-se que os reforços com elementos metálicos atuam de maneira a resistir aos esforços antes resistidos apenas pela madeira, agora menos solicitada, o que é possível graças às ótimas propriedades de resistência dos materiais metálicos. Além disso, fica claro que esse tipo de reforço é eficaz no controle de deformações de peças de madeira.

Reforço com materiais compósitos		
Técnica	Benefícios	Referências
Polímeros Reforçados com Fibras	<p>Aumento da resistência e rigidez da peça;</p> <p>Possibilidade de redução das seções transversais das peças de madeira;</p> <p>Flechas acentuadas antes da ruptura por flexão (favorável à segurança);</p> <p>Baixo aumento no peso próprio da estrutura;</p> <p>Aumento da confiabilidade em relação ao modo de ruptura</p>	<p>Fiorelli (2002); Fiorelli (2005); Junior e Cunha (2002); Miotto e Dias (2006)</p>
Compósitos madeira-concreto	<p>Aumento da capacidade de carga;</p> <p>Redução de deformações e vibrações;</p> <p>Transferência dos esforços de compressão para o concreto;</p> <p>Melhora no isolamento acústico;</p> <p>Acréscimo na rigidez da estrutura;</p> <p>Aumento da resistência à flexão;</p> <p>Melhora no comportamento dinâmico da estrutura;</p> <p>Melhora na resistência ao fogo</p>	<p>Dias (2008); Miotto e Dias (2006); Brito (2014); Jorge (2005)</p>

Quadro 7 – Benefícios de reforços com materiais compósitos
Fonte: Autoria própria

Observa-se que a união de dois ou mais materiais, de maneira a atuarem como um só, permite a exploração das melhores propriedades dos mesmos, tornando as estruturas muito mais eficientes e seguras, o que não aconteceria se os materiais fossem utilizados separadamente.

Reforço com produtos poliméricos		
Técnica	Benefícios	Referências
Injeção de resina epóxi	Aumento da resistência e capacidade de carga da peça; Redução do aparecimento de futuras rachaduras; Vedação da área danificada; Incorporação de certa flexibilidade.	Ritter (1990 apud FIORELLI et al., 2002); Neves (2013); Costa (2009)

Quadro 8 – Benefícios de reforços com produtos poliméricos
Fonte: Autoria própria

Fica clara a eficácia na interação entre as resinas epoxídicas e a madeira, pois esse tipo de reforço traz diversos benefícios sem a necessidade de elementos de ligação entre os dois materiais, a própria resina já garante essa ligação.

7 CONCLUSÃO

No que se refere à suscetibilidade da madeira à degradação, pôde-se perceber com esta pesquisa a grande quantidade de agentes e fatores que podem influenciar negativamente as propriedades deste material, tais como agentes bióticos, abióticos e falhas associadas a projetos e execuções. Da mesma maneira, observou-se a utilidade das técnicas não destrutivas de inspeção, que permitem a coleta de diversas informações dos elementos estruturais de madeira, sendo possível correlacionar tais informações com propriedades físicas e mecânicas do material, e conseqüentemente verificar a necessidade ou não de reforço em tais estruturas.

No que tange às técnicas de reforço e reabilitação de estruturas de madeira, ficou evidente a grande variedade de materiais que permitem a otimização da madeira como elemento estrutural, pertencendo a esses materiais tanto elementos metálicos, quanto elementos de madeira e materiais compósitos, como os Polímeros Reforçados com Fibras e os compósitos de madeira-concreto. A associação desses materiais melhora as propriedades das estruturas de madeira e oferece mais segurança aos seus usuários.

Estudos de caso realizados por diversos pesquisadores nessa área exemplificam os diferentes benefícios trazidos por essas técnicas. Cabe salientar, porém, que cada uma delas traz benefícios diferentes para a estrutura, sendo necessário analisar caso a caso o que é preciso melhorar ou reparar, para que então se escolha a técnica mais adequada a ser executada.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Caroline M. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. 2002. 153 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BEBER, Andriei J. **Comportamento estrutural de vigas em concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003.317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BRITES, Ricardo José Delgado Sousa. **Avaliação de segurança das estruturas antigas de madeira**. 2011. 307 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2011. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/14069>>. Acesso em: 8 fev. 2016.

BRITO, Leandro Dussarat. **Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. 2014. 502 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/.../2014DO_LeandroDussarratBrito.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2016.

CARDOSO, Luís Manuel Ribeiro. **Recuperação de pavimentos antigos em madeira com lajes mistas madeira-betão**. 2010. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

CARRAZEDO, Ricardo. **Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão**. 2005. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

COSTA, Luís F. S. da. **Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos**. 2009. 142 f. Relatório de projeto (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2009.

CRUZ, Helena et al. Reforço local de elementos estruturais de madeira por meio de compósitos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2000, Lisboa. Disponível em: < <http://mestrado-reabilitacao.fa.utl.pt/disciplinas/jbastos/HCRUZREPARFRP%20final.pdf> >. Acesso em: 18 set. 2015.

CRUZ, Helena. Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira. In: JORNADAS DE MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO, 1., 2011, Lisboa, Portugal. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Helena_Cruz.pdf>. Acesso em: 18 set. 2015.

CUNHA, José A. P., COSTA, Michelle L.; REZENDE, Mirabel C. Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência à tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 16, n. 3, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v16n3/04.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2015.

CUNHA, João Tiago P e. **Diagnóstico e avaliação da segurança de estruturas de madeira existentes**. 2013. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013. Disponível em: <recipp.ipp.pt/handle/10400.22/4694>. Acesso em: 20 fev. 2016.

DIAS, Tiago I.de M. P. **Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural**. 2008. 315 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2008. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12485>>. Acesso em 19 jan. 2016.

FERRARI, Vladimir J.; PADARATZ, Ivo J.; LORIGGIO, Daniel D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n.6, p. 1783 – 1791, 2002.

FIORELLI, Juliano; DIAS, Antonio A.; INO, Akemi. Alternativas para recuperação de estruturas de madeira – Estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002, Foz do Iguaçu. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/.../ENTAC2002_1841_1848.pdf>. Acesso em 13 mar. 2016.

FIORELLI, Juliano. **Utilização de fibras de carbono e fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FIORELLI, Juliano. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

HELLMEISTER, João C. Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1., 1983, São Carlos. Disponível em: <https://ibramem.files.wordpress.com/2014/05/1-ebramem_caracteristicas.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2016.

JORGE, Luís Filipe de Carvalho. **Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves**. 2005. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005.

JUNIOR, Dogmar A. de S.; CUNHA, Jesiel. Análise do comportamento mecânico de placas de madeira reforçadas por fibra de carbono. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., 2002, João Pessoa. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2002/trabalhos/tema01/CPB0015.PDF>>. Acesso em: 18 set. 2015.

JÚNIOR, Jerônimo Araújo Botelho. **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos**. 2006. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~jmfaria/TesesOrientadas/MestrAntigo/AvaliNaoDestruEdifAntigo.PDF>>. Acesso em: 2 jan. 2016.

LOPES, Miguel Alberto Cameira. **Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edifícios antigos**. 2007. 188 f. Dissertação (Mestrado em Reabilitação do Patrimônio Edificado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. Viapol. 120 p. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2015

MIOTTO, José L.; DIAS, Antonio A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Revista Semina: ciências exatas e tecnológicas**, Londrina, v.27, n.2, p. 163 – 174, jul./dez. 2006. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/1875/1581>>. Acesso em: 13 fev. 2016.

MOHAMAD, G.; ACCORDI J.; ROCA L. E. Avaliação da associação de compósito de fibra de vidro e carbono no reforço de madeira eucalyptus in natura e autoclavada. **Revista Matéria**, v.16, n.1, pp. 621-637, 2011. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11423/>>. Acesso em: 18 set. 2015.

NEVES, André Emanuel P. S. das. **Avaliação, Tratamento e Consolidação de Madeira em Edifícios Antigos**. 2013. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Disponível em: <repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/3169/1/Dissertação.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2016.

OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa de. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som**. 2005. 91 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-25112014-152224/en.php>>. Acesso em: 09 abr. 2016.

RODRIGUES, Menandro A. S.; SALES Juscelino C. A madeira e suas patologias – Estudo de caso: Igreja Nossa Senhora das Mercês – Itapipoca/CE. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURA, 9., 2013, João Pessoa. Disponível em: <http://www.casadagua.com/wp-content/uploads/2014/02/A1_170.pdf>. Acesso em: 18 set. 2015.

SANTOS, Hugo M. O. **Validação da segurança estrutural de pavimentos existentes de madeira**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2009.

ZENID, Geraldo J. et al; **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA, 2009.