

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNA LERMEN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO USO DE FIBRA DE VIDRO NO
REFORÇO DE MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2014

BRUNA LERMEN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO USO DE FIBRA DE VIDRO NO
REFORÇO DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil, pela Coordenação do Curso Superior em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dra. Fabiana Goia Rosa de Oliveira.

CAMPO MOURÃO

2014



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso Nº 36

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO USO DE FIBRA DE VIDRO NO REFORÇO DE MADEIRA

por

Bruna Lermen

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19 horas do dia 17 de fevereiro de 2014 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. Esp. Sergio Roberto Oberhauser
Quintanilha Braga**

UTFPR

**Prof. Me. Adalberto Luiz Rodrigues de
Oliveira**

UTFPR

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

UTFPR
Orientador

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.

Dedico este trabalho à minha mãe, ao seu imenso amor que me conforta em meio a tanta saudade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, pelo dom da vida, pelo seu amor infinito e por estar sempre à frente nos momentos difíceis, aumentando minha fé a cada dia.

Aos meus pais Mário e Dorildes pelo amor e carinho que sempre me dedicaram, por serem os principais responsáveis pela formação do meu caráter e por me ensinarem o verdadeiro significado da palavra família.

Ao meu irmão Fernando por ser meu companheiro, amigo, confidente, por me apoiar e se apoiar em mim, mostrando que realmente temos um ao outro. À minha irmã Giovanna, por ser tão carinhosa e encher meus dias de alegria.

Ao meu noivo João Paulo por me incentivar, por acreditar em nós e no futuro que desejamos construir juntos, por me apoiar em minhas decisões e por ter compreendido todas as minhas ausências.

Aos meus colegas que se tornaram grandes amigos: Lívia, Aline, Camila, André Luiz, Bruno, Raí, Rafael e Rodrigo, por todos estes anos de amizade e apoio, sem vocês não teria a menor graça.

Às colegas de profissão Fernanda e Rosângela, pela troca constante de informações e risadas.

À minha orientadora Prof. Dra. Fabiana Goia, pela segurança e delicadeza com que me ensinou a conduzir esta pesquisa com paixão.

A todos os professores da Coordenação de Engenharia Civil, por terem contribuído com minha formação, em especial, ao Prof. Jorge Góes, por dedicar-se aos alunos de maneira tão genuína.

Ao meu colega de trabalho e amigo Maiko Sedoski, pela imensa contribuição na realização dos ensaios.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Campo Mourão, pelo espaço cedido para realização deste trabalho.

RESUMO

LERMEN, B. **Avaliação experimental do uso de fibra de vidro no reforço de madeira.** 2014. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

O avanço tecnológico atingiu a indústria da construção civil exigindo o surgimento de novas técnicas construtivas e a utilização de materiais que apresentem uma relação de custo benefício atraente, a utilização de compósitos poliméricos tem se mostrado conveniente para promover um aumento significativo na capacidade de carga de peças estruturais. O objetivo deste trabalho foi verificar a eficiência do compósito de fibra de vidro no reforço e recuperação de estruturas de madeira através dos resultados obtidos em ensaios mecânicos. Para tal, foram realizados ensaios de caracterização da madeira de *Pinus Taeda* e ensaios de flexão simples e tração paralela às fibras em corpos de prova sãos e reforçados visando verificar o acréscimo ocasionado na força de ruptura. Nos ensaios de flexão pôde-se constatar um benefício de 34% para corpos de prova de densidades semelhantes, comparando-se peças com defeitos, observou-se um acréscimo de 15,16% entre um corpo de prova são e um corpo de prova gêmeo contendo nó e reforçado. Constatou-se um acréscimo considerável na flecha máxima gerado pelo reforço, que proporciona maior segurança estrutural ao usuário. Nos ensaios de tração as amostras reforçadas romperam por tração na madeira, deste modo, não foi possível verificar a recuperação ocasionada pelo compósito. Os materiais utilizados na formação do compósito apresentaram excelente aderência ao substrato. Concluiu-se que uso de PRFs é uma alternativa prática e viável no reforço de madeira de *Pinus* e no aproveitamento de peças contendo defeitos.

Palavras-chave: Polímeros Reforçados com Fibras. Recuperação estrutural. Madeira de reflorestamento. Resistência à ruptura.

ABSTRACT

LERMEN, B. **Experimental assessment of the use of fiberglass to reinforce timber.** 2014. 51 f. Conclusion Course Work (Bachelor of Civil Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

The technological advancement has reached the construction industry and it is requiring the development of new construction techniques and use of materials that have a compelling benefit cost ratio and the use of polymer composites has presented convenient to promote a significant increase in load capacity of structural components. The objective of this work was to verify the efficiency of composite fiberglass to the strengthening and recovery of timber structures by the results obtained in mechanical tests. To do that, it was realized tests to characterize the *Pinus Taeda* timber and tests of simple bending and tension parallel to the fibers in specimen goods and reinforced to verify the increase in the tensile strength. In bending tests, it was verified a benefit of 34% for samples of similar densities, comparing samples with defects, there was an increase of 15,16% between a good and twin specimen containing node and reinforced. It was found a significant increase in maximum deflection generated by the reinforcement, what provides an enhanced structural safety to the user. In the tensile strength tests the reinforced samples broke for the tensile strength on the wood, thus it was not possible to verify the recovery caused by the composite. The materials used to generate the composite presented excellent adhesion to the substrate. It was concluded that the use of PRFs is a practical and viable alternative to the strengthening of pinewood and to reuse pieces containing defects.

Keywords: Polymers Reinforced with Fibers. Structural repair. Reforested wood. Tensile strength.

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1: Tecido unidirecional de fibra de vidro VEW090/50.....	26
Fotografia 2: Sistema epóxi utilizado na laminação das amostras.	27
Fotografia 3: Determinação do teor de umidade por medidores elétricos	29
Fotografia 4: Local de armazenagem das vigas de Pinus.....	29
Fotografia 5: Secagem dos corpos de prova em estufa para determinação do teor de umidade	30
Fotografia 6: Corpos de prova imersos em água para obtenção da densidade básica da madeira.....	31
Fotografia 7: Aplicação da resina na superfície da madeira.....	32
Fotografia 8: Etapas do processo de laminação para os corpos de prova ensaiados à flexão	33
Fotografia 9: Ensaio de flexão simples em viga reforçada com PRF.	34
Fotografia 10: Reforço dos corpos de prova ensaiados à tração paralela às fibras ..	34
Fotografia 11: Máquina Universal EMIC utilizada nos ensaios.....	35
Fotografia 12: Seção transversal dos corpos de prova gêmeos da viga D.	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Teor de umidade em porcentagem dos corpos de prova ensaiados	37
Gráfico 2: Comparação entre a força de ruptura em Kgf de vigas sãs e reforçadas para o primeiro caso.	39
Gráfico 3: Comparação entre a massa específica em Kg/m ³ de corpos de prova gêmeos.....	40
Gráfico 4: Comparação entre a força de ruptura em Kgf de vigas sãs e reforçadas para o segundo caso.	41
Gráfico 5: Comparação entre a força de ruptura em Kgf de vigas sãs e reforçadas para o terceiro caso.	42
Gráfico 6: Comparação entre a flecha máxima em cm para vigas sãs e reforçadas	42
Gráfico 7: Comparação entre a força máxima em Kgf para corpos de prova sãos e reforçados.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da Madeira Conífera <i>Pinus Taeda</i>	25
Tabela 2 - Especificações do tecido de fibra de vidro	26
Tabela 3 - Propriedades de laminação do sistema AR-260	27
Tabela 4 - Distribuição dos corpos de prova para ensaios.....	28
Tabela 5 - Caracterização básica da madeira de Pinus	36
Tabela 6 - Resultados do ensaio de flexão simples realizado em vigas sãs e reforçadas.....	38
Tabela 7 - Modo de ruptura da madeira ensaiada sã.....	43
Tabela 8 - Modo de ruptura da madeira reforçada	44
Tabela 9 - Valores obtidos em ensaios de tração paralela às fibras	45
Tabela 10 - Modo de ruptura para corpos de prova ensaiados sem fibra	46
Tabela 11 - Modo de ruptura para corpos de prova reforçados com fibra.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	15
4.1.1 Importância das Estruturas de Madeira.....	15
4.1.2 Causas Comuns de Deterioração	15
4.1.3 Técnicas de Recuperação.....	17
4.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)	18
4.2.1 Conceitos Gerais.....	18
4.2.2 A Fase Fibra.....	18
4.2.2.1 Fibras Naturais	19
4.2.2.2 Fibras Sintéticas.....	20
4.2.2.2.1 Fibra de Carbono.....	20
4.2.2.2.2 Fibra de Aramida.....	21
4.2.2.2.3 Fibra de Vidro.....	21
4.2.3 A Fase Matriz	22
4.2.3.1 Polímeros Termofixos.....	23
4.2.3.2 Polímeros Termoplásticos.....	23
5 METODOLOGIA	25
5.1 MATERIAIS	25
5.1.1 Madeira	25
5.1.2 Fibra de Vidro.....	25
5.1.3 Resina Epóxi	26
5.2 MÉTODOS	28
5.2.1 Normatização	28
5.2.2 Distribuição dos Corpos de Prova	28
5.2.3 Determinação do Teor de Umidade da Madeira Sã	28
5.2.4 Determinação da Densidade da Madeira Sã.....	30
5.2.5 Ensaios de Flexão na Madeira Sã.....	31
5.2.6 Ensaios de Tração na Madeira Sã	31
5.2.7 Aplicação da Fibra de Vidro à Madeira.....	32
5.2.8 Ensaios de Flexão na Madeira Reforçada com Fibra.....	33
5.2.9 Ensaios de Tração na Madeira Reforçada com Fibra	34
5.3 INSTRUMENTAÇÃO.....	35
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
6.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	36
6.2 ENSAIOS DE FLEXÃO NA MADEIRA SÃ E REFORÇADA.....	37
6.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO NA MADEIRA SÃ E REFORÇADA.....	45
7 CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A construção civil brasileira encontra-se em um momento ímpar de sua história, os investimentos na ampliação e melhoria da infraestrutura são maciços. O crescimento da atividade evidenciou a fragilidade do sistema, a necessidade de qualificação dos profissionais e de procedimentos mais racionais e eficientes. Assim como muitas das técnicas construtivas, os materiais tradicionais se mostraram inadequados para determinadas situações, impulsionando a busca de novos materiais com propriedades mais apropriadas.

Dentro desse contexto, encontra-se a recuperação de estruturas antigas de madeira, que carece de uma técnica prática e economicamente viável. Uma proposta que tem se mostrado conveniente, é a utilização de compósitos poliméricos que sejam capazes de promover um aumento significativo na resistência mecânica das peças estruturais com capacidade de carga reduzida. Para isso torna-se necessário ampliar o conhecimento e a confiança no uso dos polímeros reforçados por fibras.

No mundo, destacam-se três potenciais frentes de pesquisa: o Japão, interessado na pré-fabricação, nos elementos de pré-tensão e no reforço aos sismos; a América do Norte motivada pelas soluções de problemas de durabilidade de pontes e a Europa preocupada com a necessidade de preservar e reabilitar o patrimônio histórico (JUVANDES, 2002).

No Brasil, os estudos realizados são poucos e recentes, os produtos utilizados são geralmente importados e o reconhecimento das características é baseado nas fichas técnicas do produto. A maior parte dos trabalhos realizados pelos pesquisadores do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras - LaMEM da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC -USP baseia-se no estudo do comportamento experimental de modelos teóricos e na prática de novas técnicas com os sistemas compósitos.

Para usos estruturais recomenda-se o uso de compósitos que apresentem uma matriz polimérica de elevada adesividade e fácil aplicação, e fibras sintéticas de tecido unidirecional, resistentes à solicitações mecânicas e a meios corrosivos, a fibra de vidro é a alternativa mais econômica presente no mercado atual (FIORELLI, 2002).

Deste modo, o objetivo principal deste trabalho foi verificar a eficiência do compósito de fibra de vidro no reforço e recuperação de estruturas de madeira através dos resultados obtidos em ensaios mecânicos, fazendo uso de ferramentas estatísticas para a análise de dados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Verificar a eficiência do compósito de fibra de vidro no reforço e recuperação de estruturas de madeira através dos resultados obtidos em ensaios mecânicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as propriedades físicas da madeira escolhida;
- Caracterizar as propriedades mecânicas da madeira antes e após a aplicação dos polímeros reforçados com fibra de vidro;
- Estabelecer a influência do compósito de fibra de vidro na resistência mecânica da madeira.

3 JUSTIFICATIVA

A recuperação de estruturas de madeira tem ganhado espaço no cenário nacional, segundo dados do IBGE (2012) o turismo no Brasil já gera mais de R\$ 100 bilhões ao ano, o crescimento desta atividade serviu como combustível para a revitalização do patrimônio arquitetônico, cultural e histórico do país. Além disso, em muitas localidades estas edificações estão participando de projetos de urbanização que exigem alterações de uso dos imóveis.

Pinheiro e Rocco Lahr (1997) apontam o ataque biológico como a principal causa da deterioração da madeira, que, aliado a ausência de manutenção durante longos períodos de tempo, resultam em perda de resistência mecânica colocando em risco a segurança do conjunto estrutural e de seus usuários.

A restauração estrutural pode ser efetuada a partir da substituição das peças ou pela adição de elementos que complementem a capacidade mecânica dos elementos comprometidos. A substituição dos elementos antigos encontra-se limitada devido à incompatibilidade de características físicas entre as peças, além do elevado custo econômico e ambiental e da complexidade encontrada na execução.

Elementos metálicos e de madeira já foram estudados como opção de reforço, porém, os que obtiveram resultados mais satisfatórios foram os compósitos avançados, resultantes da combinação de uma matriz polimérica de elevada adesividade com fibras sintéticas que possuem elevada resistência mecânica e à corrosão.

Wheeler e Hutchinson (1998) consideram que a grande vantagem nos métodos de reabilitação que empregam resinas tem sido a capacidade de restaurar a estrutura no local com o mínimo de interferência no método de construção original. Portanto, torna-se necessário verificar a viabilidade técnica do uso das fibras por meio de ensaios que possibilitem mensurar os benefícios estruturais ocasionados nas peças de madeira.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 ESTRUTURAS DE MADEIRA

4.1.1 Importância das Estruturas de Madeira

Inscritas na UNESCO, o Brasil conta com dezessete áreas tombadas como Patrimônios da Humanidade, sendo que seis delas acumulam grande patrimônio arquitetônico histórico. Dentre as áreas tombadas podem ser listadas: Centro Histórico de Goiás (GO), Diamantina (MG), Olinda (PE), Ouro Preto (MG), Centros Históricos de São Luis (MA) e de Salvador (BA). As diversas construções inseridas nessas áreas de patrimônio arquitetônico apresentam alguns aspectos em comum: as estruturas são de madeira; passaram por longos períodos sem receber manutenção devido à estagnação econômica da região; estiveram sujeitas ao ataque de agentes deterioradores; e, atualmente, os projetos de revitalização urbanística dos centros históricos requerem mudanças de uso dos imóveis (CARVALHO, 2005).

O patrimônio arquitetônico representa um bem valioso considerando os aspectos culturais e econômicos, nos últimos anos o turismo e o lazer se tornaram atividades altamente procuradas. Em geral, a existência de um monumento ou de um conjunto monumental emblemático, torna-se a atração principal de um local e consiste na geração direta e indireta de recursos financeiros (ICOMOS, 2003).

4.1.2 Causas Comuns de Deterioração

A desintegração da madeira pode ocorrer de diversas maneiras, por isso, torna-se importante, para cada caso, a identificação da causa principal, pois desta forma, aumentam as possibilidades de combater o problema com sucesso. Para

Mendes (1988) as principais causas de deterioração da madeira são: o desgaste mecânico, e as degradações física, química e biológica.

O desgaste mecânico geralmente ocorre por sobrecarga ou abrasão, elementos estruturais sujeitos a esforços muito elevados (próximos a tensão de ruptura) podem sofrer danos internos capazes de reduzir consideravelmente a sua capacidade de carga. O funcionamento estrutural tem sido prejudicado frequentemente pela introdução de esforços inadequados devido a adaptações e causas acidentais (CRUZ, 2001). A abrasão, causada por movimentos de diversas classes, combinada com a podridão, pode inutilizar a estrutura (MENDES, 1988).

O principal agente físico de destruição é o fogo, pois se manifesta com muita rapidez e geralmente é difícil de ser combatido, visto que no Brasil se dá pouca atenção à proteção ou retardamento de chamas. As peças sofrem alterações de cor e textura quando expostas à conjugação da luz solar e da chuva deixando a madeira com um aspecto envelhecido, geralmente, os prejuízos gerados pelas intempéries são meramente estéticos (GONZAGA, 2006).

Segundo Mendes (1988) o contato com substâncias químicas como bases e ácidos fortes; óxidos e sais, pode reduzir as propriedades físico-mecânicas da madeira que apresenta-se amolecida, e geralmente com aparência esgarçada e desfibrada.

Os agentes biológicos são os responsáveis pela maioria das situações de ruptura total ou parcial das estruturas, esse fator está intimamente ligado com as condições de umidade da madeira, já que o ataque ocorre apenas quando o teor de água atinge determinados valores. A umidade elevada também amplia os fenômenos de fluência da madeira, provocando grandes deformações sob a ação de cargas (CRUZ, 2001).

Pinheiro e Rocco Lahr (1997) dão destaque para as patologias causadas pelos fungos apodrecedores e cupins, que são o apodrecimento e as galerias, respectivamente. Os cupins podem utilizar a madeira como alimento ou meio físico de hospedagem e são responsáveis pela redução de massa, já os fungos, atacam as paredes celulares alterando suas propriedades físicas e químicas.

Os referidos autores enfatizam que para ampliar o período de vida útil das estruturas, algumas medidas de prevenção e cura contra a demanda biológica sejam tomadas, como: época e idade do corte; classificação; método de secagem e

preservação; condições dos locais de armazenamento; disposições construtivas; entre outras.

4.1.3 Técnicas de Recuperação

A madeira é frequentemente usada para formar estruturas articuladas, nas quais os principais problemas estão relacionados com rupturas parciais nos nós. As medidas de intervenção mais comuns consistem no reforço dos nós ou na solidarização de elementos adicionais. O desmonte e a reconstrução de estruturas de madeira é uma operação delicada devido ao risco de danos, existe também a possibilidade da perda de materiais associados com o valor histórico (ICOMOS, 2003).

Diferentes metodologias para reforçar estruturas de madeira vêm sendo estudadas. Uma técnica muito comum consiste em usar placas de aço ou alumínio. Todavia, a principal desvantagem dos vários métodos de reforço envolvendo placas de metal é o alto risco de corrosão do reforço, particularmente quando usados em construções expostas às intempéries (CRUZ, 2001).

Para reabilitar os elementos estruturais de madeira, é possível optar pela substituição das peças danificadas ou pela adesão de elementos que complementem a capacidade mecânica dos elementos estruturais comprometidos. A primeira das opções é a técnica usual, mas ela encontra limitações tais como a indisponibilidade de peças de madeira para a devida substituição, os custos elevados, o custo ambiental, a escassez dos materiais envolvidos ou, ainda, a incompatibilidade de suas características físicas. Dessa forma, a segunda alternativa torna-se atraente e no contexto dessas limitações surge a técnica de colagem de tecidos naturais e sintéticos, impregnados com resinas poliméricas (MIOTTO; DIAS, 2006).

A técnica de reforço de estruturas de madeira com fibras sintéticas também pode ser aplicada em novas construções, especialmente em estruturas de madeira laminada colada (MLC). Embora a MLC apresente um grande número de vantagens, quando comparada às estruturas de madeira convencionais, mostram-se como desvantagens o seu modo de ruptura frágil e sua baixa rigidez. Assim, uma das

soluções para se obter uma maior resistência à flexão, assim como modificar o seu modo de ruptura, consiste na utilização de reforço com fibras na face tracionada das peças (FIORELLI, 2005).

4.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)

4.2.1 Conceitos Gerais

Os PRF são materiais compósitos. Um material compósito é produzido quando dois ou mais materiais são combinados com o intuito de obter um novo material, com propriedades superiores às dos materiais constituintes, que continuam sendo identificáveis visualmente (GARCEZ, 2007). A maior parte dos materiais compósitos possui duas fases distintas: uma fase contínua, também chamada de matriz, e uma fase dispersa, que é envolta e protegida pela matriz. Pelo princípio da combinação de ações, as propriedades dos compósitos variam de acordo com o volume, a geometria e as propriedades das partes constituintes (CALLISTER, 2002).

Um compósito pode ser denominado Polímero Reforçado por Fibras (PRF) quando a matriz é fabricada a partir de um material polimérico e a fase dispersa é constituída por um material fibroso. A utilização de fibras de alto desempenho combinadas com matrizes poliméricas permite obter alternativas atraentes na geração de materiais interessantes para reforço de estruturas de concreto armado e madeira (GARCEZ, 2007).

4.2.2 A Fase Fibra

Nos PRF, as fibras representam as componentes de resistência e rigidez do compósito, por isso deve existir um critério de seleção para os parâmetros: tipo de fibra; grau de concentração; comprimento e forma de disposição sobre a matriz. A resistência à tração e o respectivo módulo de elasticidade são máximos para a

direção principal das fibras, que exibem um comportamento perfeitamente elástico, sem presença de deformação plástica, ao contrário dos metais (JUVANDES, 2002)

4.2.2.1 Fibras Naturais

Para Marinelli *et. al.* (2008) o uso das fibras naturais surge como uma solução para os problemas de impacto ambiental, pois são materiais biodegradáveis, renováveis e de fácil descarte. Dá-se um destaque para as fibras de origem vegetal, em razão da enorme variedade de plantas disponíveis na biodiversidade brasileira, e acredita-se que, com o aumento das pesquisas, pode-se descobrir um material com as propriedades desejáveis. Além disso, a difusão de seu uso poderá resultar em geração de renda para populações rurais inativas.

Em sua avaliação do uso das fibras de sisal no reforço de estruturas de madeira, Carvalho (2005) identificou uma alta variabilidade nas propriedades mecânicas do tecido de sisal, devido à heterogeneidade química e física das fibras têxteis, verificou também, que para as mesmas dimensões, a fibra de vidro apresenta uma resistência específica seis vezes superior à de sisal. Sua pesquisa é justificada pela grande produção brasileira dessa fibra, que atualmente tem sido por volta de 134 mil toneladas anuais, correspondente a 40% da produção mundial.

Fortes e Dias (2011) avaliaram a resistência à tração de tecidos naturais impregnados com resina epóxi e encontraram resultados satisfatórios para os compósitos de sisal e carauá, principalmente para condições de ruptura em pontos localizados, os valores médios de resistência de tração encontrados variaram entre 350 e 450 MPa. Como as vigas de madeira estão sujeitas preponderantemente à flexão, utilizando os compósitos de sisal-epóxi, Carvalho (2005) observou um aumento de rigidez em média de 14,2% com a presença do reforço.

4.2.2.2 Fibras Sintéticas

4.2.2.2.1 Fibra de Carbono

O carbono é um material de fibra de alto desempenho e consiste no reforço mais comumente utilizado em compósitos avançados com matriz polimérica. De acordo com Callister (2002, p.372) as razões para tal são as seguintes:

- a) As fibras de carbono possuem os maiores módulos específicos dentre todos os materiais fibrosos de reforço
- b) Eles retêm seus elevados módulos de tração e suas grandes resistências mesmo a temperaturas elevadas; a oxidação a temperaturas elevadas, no entanto, pode ser um problema.
- c) À temperatura ambiente, as fibras de carbono não são afetadas pela umidade ou por uma ampla variedade de solventes, ácidos e bases.
- d) Essas fibras exibem múltiplas características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos que incorporam essas fibras possuam propriedades especificamente engenheiradas.
- e) Foram desenvolvidos processos de fabricação para as fibras e os compósitos que são relativamente baratos e de boa relação custo-benefício.

Além das aplicações na engenharia civil, as fibras de carbono possuem inúmeras aplicações na indústria aeroespacial e automotiva, também em barcos, bicicletas e equipamentos esportivos, onde a elevada resistência à tração e o baixo peso, são requisitos fundamentais (JUVANDES, 2002)

O carbono é um elemento químico, e sua forma mais estável a temperatura ambiente é o carbono cristalizado, ou grafite. As fibras de carbono são, normalmente, produzidas a partir de três materiais orgânicos: rayon (polímero celulósico), poliacrilonitrila (PAN) e piche (alcatrão de petróleo ou de carvão). As características das fibras e o processo de fabricação a ser utilizado dependerão do material base escolhido. Apresentam coloração escura e podem ser manipuladas durante o processo de manufatura para obter resistências ou módulos de elasticidade mais elevados. Para obter maiores módulos de elasticidade devem ser utilizadas temperaturas mais elevadas durante a fabricação, o que reduz a resistência à tração (GARCEZ, 2007).

4.2.2.2.2 Fibra de Aramida

A aramida é conhecida quimicamente como poli-parafenileno-teraftalamina. Este grupo de materiais é produzido a partir de polímeros semicristalinos chamados poliamidas aromáticas, através de um processo chamado fiação por fusão, em que uma fibra sólida é tecida a partir de uma mistura química líquida, passando por uma fieira de pequenos orifícios. Durante a síntese, as moléculas são alinhadas na direção do eixo longitudinal das fibras, como domínios de cristal líquido (CALLISTER, 2002).

Geralmente apresentam coloração amarelada e são baixas condutoras de eletricidade, de acordo com sua estrutura, são classificadas como para-aramidas e meta-aramidas. As mais utilizadas são as para-aramidas que apresentam um esqueleto molecular linear e elevada resistência ao fogo, suas propriedades só começam a ser afetadas após os 400°C. As meta-aramidas possuem o esqueleto em zig-zag, também são resistentes à combustão, porém, a manutenção das propriedades iniciais só é garantida até os 200°C (DU PONT, 2002).

Este tipo de fibra é utilizado principalmente na indústria aeroespacial e automobilística. Nos últimos anos, tem se tornado um material amplamente utilizado na construção de barcos, buscando-se maior rigidez e leveza. Proporcionam a maior resistência específica (resistência/densidade) dentre as fibras disponíveis no mercado, porém, apresentam baixa resistência à compressão e elevada absorção de água (FIORELLI, 2002).

4.2.2.2.3 Fibra de Vidro

O vidro é um ótimo agente de reforço pois possui elevada resistência à tração e um alto módulo de elasticidade. As fibras de vidro contam com uma boa estabilidade dimensional, não sofrem fluência e essas características são repassadas diretamente para o compósito reforçado com estas fibras. Como o vidro é um material relativamente inerte, as fibras também são imunes aos ataques biológicos e têm uma boa resistência aos ataques de solventes e produtos químicos.

As fibras de vidro não são inflamáveis e têm boas propriedades elétricas (DE; WHITE, 1996).

Existem diferentes composições para a fibra de vidro, de acordo com Murphy (1994) as mais utilizadas são:

1) Tipo E (electrical): Composta por cálcio, alumínio e borosilicato com baixo teor de componentes alcalinos. É a fibra mais utilizada em materiais reforçados. Possui razoável resistência mecânica e rigidez, bom isolamento elétrico e custo relativamente baixo, porém sua resistência ao impacto é baixa. Sua densidade é $2,54 \text{ g/cm}^3$, o módulo de elasticidade à flexão é de 69 GPa e a resistência à tração é de 2,4 GPa;

2) Tipo C (corrosion): possui melhor resistência química que os demais e é muito utilizado em tecidos e mantas;

3) Tipo S: Possui alto teor de sílica e é capaz de resistir a temperaturas elevadas. O módulo de elasticidade e a resistência à tração é superior aos demais. Seus filamentos são de diâmetros menores, o que eleva a área superficial do reforço. Foi desenvolvido a partir das demandas técnicas da indústria aeroespacial e de defesa. Sua densidade é de $2,49 \text{ g/cm}^3$, o módulo de elasticidade à flexão é de 86 GPa e a resistência à tração é de 3,45 GPa.

4.2.3 A Fase Matriz

A matriz polimérica tem como funções transmitir os esforços entre as fibras e a estrutura envolvente, e ainda, proteger as fibras da agressividade ambiental e dos danos mecânicos. Representa também, o suporte físico contra a instabilidade das fibras sobre ações de compressão. A matriz polimérica pode também ser chamada de resina impregnante ou, simplesmente, resina (JUVANDES, 2002).

A matriz geralmente é quem controla as propriedades elétricas, químicas e o comportamento do compósito quando submetido a altas temperaturas. A durabilidade de um PRF também é definida pela durabilidade dos polímeros que formam o compósito. Um dos critérios importantes para a seleção da matriz é sua densidade final pós-cura, que deve, preferencialmente, ser menor que a das fibras, para minimizar o peso do compósito. As matrizes podem ser agrupadas em duas

categorias, de acordo com sua resposta mecânica a temperaturas elevadas: termofixos e termoplásticos (ASKELAND; PHULÉ, 2003).

4.2.3.1 Polímeros Termofixos

A fabricação dos polímeros termofixos é realizada, normalmente, em dois estágios: primeiramente ocorre a preparação de um polímero linear, em forma líquida, com baixo peso molecular, que é convertido em um produto final, duro e rígido; o segundo estágio é a cura, que pode ocorrer durante o aquecimento e/ou com a adição de catalisadores, frequentemente sob pressão. Durante a cura, são formadas as ligações cruzadas, ou em rede. Resinas de base poliéster, éster vinílicas, epóxi e fenólicas são alguns exemplos de polímeros termofixos (CALLISTER, 2002).

As resinas fenólicas são bons isolantes elétricos, apresentando boa resistência a altas temperaturas e a ataques químicos, porém, possuem desempenho mecânico bem inferior a outros tipos de resinas. Resinas do tipo poliamida são utilizadas na formação de compósitos de alta performance frente a elevadas temperaturas, entretanto, são difíceis de fabricar e possuem um elevado custo (ASKELAND; PHULÉ, 2003).

As resinas de base epóxi são as mais utilizadas para a fabricação dos compósitos aplicados na construção civil. Embora seu custo seja elevado, apresentam excelentes propriedades mecânicas e elétricas, grande adesividade e, principalmente, possibilidade de cura à temperatura ambiente. O principal problema, comum a todas as matrizes poliméricas, é a resistência a altas temperaturas, que não ultrapassa os 200°C (GARCEZ, 2007).

4.2.3.2 Polímeros Termoplásticos

São um grupo especial de polímeros, com cadeias moleculares emaranhadas, mas não interconectadas. As longas cadeias moleculares são

mantidas por ligações químicas fracas, do tipo forças de Van der Waals, mas as ligações entre moléculas individuais podem ser mais fortes. A moldagem é o método mais comum para conformação de polímeros termoplásticos. Normalmente, o polímero fundido é forçado, sob elevada temperatura e pressão, a escoar para o interior de um molde, assumindo sua forma (ASKELAND; PHULÉ, 2003).

A principal desvantagem dos polímeros termoplásticos é a de que sua viscosidade é aproximadamente duas ordens de grandeza superior à dos polímeros termofixos. A alta viscosidade da matriz dificulta sua aplicação e pode provocar problemas, como o desalinhamento das fibras e a formação de bolhas na matriz. Tais problemas, restringiram o uso de polímeros termoplásticos para fabricação de PRF (CALLISTER, 2002).

5 METODOLOGIA

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Madeira

Para a realização deste estudo, foram adquiridas seis vigas de madeira da classe conífera, do gênero *Pinus*, de dimensões (5 x 10 x 400) cm. A espécie escolhida foi a *Pinus Taeda*, por apresentar as melhores propriedades mecânicas dentro do gênero.

A escolha do *Pinus* deveu-se também à facilidade no procedimento de secagem, já que a umidade da madeira é fator determinante na obtenção de resultados confiáveis. Na Tabela 1 apresentam-se as características da madeira definida.

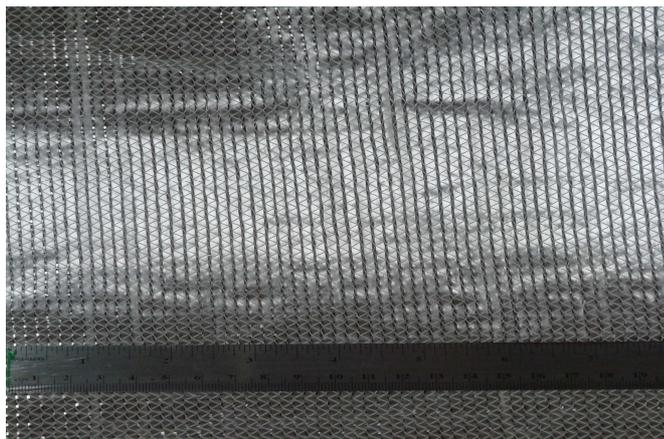
Tabela 1 - Características da Madeira Conífera *Pinus Taeda*

Características	V. Médios	Unidade
Massa específica aparente a 12% de umidade	645	Kg/m ³
Resistência à compressão paralela às fibras	44,4	MPa
Resistência à tração paralela às fibras	82,8	MPa
Resistência à tração normal às fibras	2,8	MPa
Resistência ao cisalhamento	7,7	MPa
Módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão	13304	MPa
Número de corpos de prova ensaiados	15	Un.

Fonte: NBR 7190 (1997).

5.1.2 Fibra de Vidro

Para os ensaios de tração e flexão foram utilizados tecidos unidirecionais de fibra de vidro onde uma pequena parte das fibras correm no sentido contrário apenas para manter as fibras primárias unidas, na Fotografia 1 apresenta-se o tecido a ser utilizado.



Fotografia 1: Tecido unidirecional de fibra de vidro VEW090/50
Fonte: Autoria própria.

As especificações do tecido VEW090/50 cedidas pelo fabricante podem ser consultadas na tabela 2.

Tabela 2 - Especificações do tecido de fibra de vidro

Especificações do material	
Peso Nominal a 0°	300 g/m ²
Peso Nominal a 90°	15 g/m ²
Cursos por polegada	1,85 ppi
Comprimento do rolo	182,8 m
Tolerância de Largura	¼"

Fonte: Barracuda Composites (2013).

5.1.3 Resina Epóxi

O sistema epóxi utilizado é formado por resina e endurecedor, sendo o primeiro comercializado pelo nome de AR-260 e o segundo AH-30 de acordo com a Fotografia 2. Segundo recomendações do fabricante a proporção de utilização deve ser de 1 parte de endurecedor para cada 3 partes de resina por peso.



Fotografia 2: Sistema epóxi utilizado na laminação das amostras
Fonte: Autoria própria.

A formulação apresenta características favoráveis à sua utilização por possuir baixa viscosidade, permitindo um fácil manuseio durante o processo de impregnação e a disposição de várias camadas sucessivas de reforço, além disso, a mistura e a cura da resina podem ser realizadas em temperatura ambiente. As propriedades do sistema encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades de laminação do sistema AR-260	
Propriedades após a mistura a 25°C	
Viscosidade (CPS)	580
Tempo de trabalho (pot-life), min.	30
Tempo de gel (gel time 150g, 25°C), min.	30
Proporção da mistura por peso	100:33
Propriedades físicas e mecânicas após a cura total	
Resistência ao Alogamento (%)	7,0
Contração	<0,002
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,2
Resistência à flexão (MPa)	132
Resistência à compressão (MPa)	100

Fonte: Barracuda Composites (2013).

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Normatização

Todos os ensaios realizados foram fundamentados de acordo com a Norma NBR 7190 para Projetos de Estruturas de Madeira da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

5.2.2 Distribuição dos Corpos de Prova

Para a obtenção dos resultados a serem analisados, foram confeccionados corpos de prova nas quantidades relatadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição dos corpos de prova para ensaios

Ensaio	Quantidade
Determinação do teor de umidade e densidade	12
Flexão na madeira sã	6
Tração na madeira sã	6
Flexão na madeira reforçada	6
Tração na madeira reforçada	6
Total	36

5.2.3 Determinação do Teor de Umidade da Madeira Sã

No momento da aquisição das peças de madeira foi efetuada a medição do teor de umidade com o uso de medidores elétricos conforme apresentado na Fotografia 3.



Fotografia 3: Determinação do teor de umidade por medidores elétricos
Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, no laboratório, foi realizada a secagem natural da madeira em ambiente protegido de intempéries e ventilado como pode ser visto na Fotografia 4, visando a redução do teor de umidade sem a ocorrência de defeitos de secagem e a obtenção da umidade de equilíbrio.



Fotografia 4: Local de armazenagem das vigas de Pinus
Fonte: Autoria própria.

O teor de umidade foi obtido através da relação 1:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que $U(\%)$ é o teor de umidade em porcentagem, m_i é a massa inicial em gramas e m_s a massa seca em gramas. A massa inicial foi aferida com o uso de uma balança de 0,01 g de precisão e a massa seca foi determinada mantendo-se os corpos de prova em estufa a 103°C como mostrado na Fotografia 5, até que os corpos de prova atingissem a constância de massa.



Fotografia 5: Secagem dos corpos de prova em estufa para determinação do teor de umidade
Fonte: Autoria Própria.

5.2.4 Determinação da Densidade da Madeira Sã

Foram realizados ensaios para obter a densidade aparente e a densidade básica da madeira de Pinus. A densidade aparente da madeira é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova com teor de umidade igual a 12%. A massa foi aferida com o uso de uma balança com 0,01 g de precisão e volume foi obtido com o uso de um paquímetro com 0,05 mm de precisão.

Após a coleta de dados para o cálculo da densidade aparente os corpos de prova foram colocados em um recipiente imersos em água como mostrado na Fotografia 6, até atingir a constância de massa. Logo, pela razão entre massa seca e volume saturado foi possível obter o valor para densidade básica das amostras.



Fotografia 6: Corpos de prova imersos em água para obtenção da densidade básica da madeira

Fonte: Autoria própria.

5.2.5 Ensaios de Flexão na Madeira Sã

Por meio de ensaios de flexão simples (três pontos) foram determinados os valores para força de ruptura e flecha máxima. A flecha no meio do vão foi medida com o uso de transdutores de deslocamento.

5.2.6 Ensaios de Tração na Madeira Sã

Uma carga monotônica crescente foi aplicada nos corpos de prova para determinar a força de ruptura por tração paralela às fibras da madeira.

5.2.7 Aplicação da Fibra de Vidro à Madeira

O processo utilizado para reforçar as peças de madeira foi o de laminação manual, onde a resina foi aplicada diretamente sobre a superfície a ser reforçada, e em seguida, sobre o tecido utilizado, obtendo-se assim um produto laminado (fibra + resina).

Para a realização deste processo primeiro efetuou-se a limpeza da superfície, que precisa estar limpa, seca e livre de partículas soltas. Posteriormente, aplicou-se uma camada de resina sobre a superfície com a utilização de um pincel de acordo com a Fotografia 7.



Fotografia 7: Aplicação da resina na superfície da madeira
Fonte: Autoria própria.

Em seguida, colocou-se a primeira camada de tecido de fibra de vidro, e com a ajuda de um rolo de desaeração, pressionou-se a fibra contra o adesivo para eliminar a possibilidade da formação de bolhas de ar que podem prejudicar a qualidade do reforço. Sobre a fibra, aplicou-se uma nova camada de resina, e em seguida o processo foi repetido para todas as camadas de fibra. O processo de cura durou cerca de 48 horas.

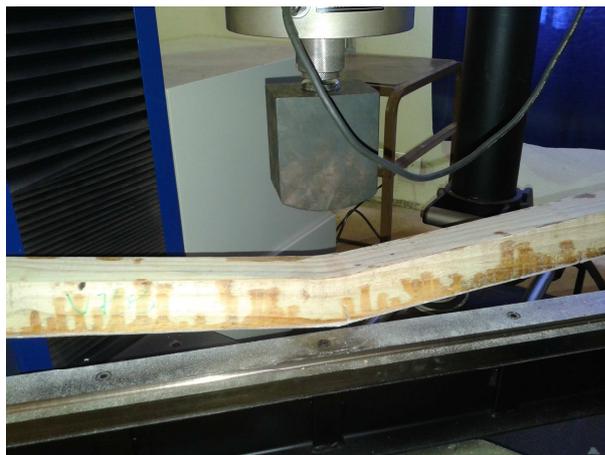
5.2.8 Ensaio de Flexão na Madeira Reforçada com Fibra

Na verificação das características das peças reforçadas, os corpos de prova de madeira foram extraídos da mesma peça ensaiada, para reduzir a variabilidade de suas propriedades. O reforço foi aplicado na face tracionada da viga, com três camadas de fibra. Na fotografia 8 são ilustradas as etapas do procedimento de laminação dos corpos de prova.



Fotografia 8: Etapas do processo de laminação para os corpos de prova ensaiados à flexão
Fonte: Autoria própria.

Primeiramente foi aplicada uma camada de resina de aproximadamente 30 gramas por corpo de prova para reduzir possíveis problemas de adesão gerados pelas altas taxas de absorção comuns em madeiras de baixa densidade. Após um período de 24 horas, a face impregnada que já estava seca, foi lixada, e com a ajuda de um pano seco foi efetuada a limpeza da superfície, logo, foi realizado o processo de laminação descrito acima para três camadas de fibra de vidro, o número de camadas escolhido deveu-se às recomendações feitas por Fiorelli (2002). Na Fotografia 9 é possível visualizar-se a realização do ensaio de flexão simples para um corpo de prova reforçado.



Fotografia 9: Ensaio de flexão simples em viga reforçada com PRF
Fonte: Autoria própria.

5.2.9 Ensaios de Tração na Madeira Reforçada com Fibra

Para verificar o desempenho do compósito na recuperação da resistência da madeira, os corpos de prova foram cortados na região central para posterior ligação por meio de fibra e adesivo. A ligação entre as duas partes de um mesmo corpo de prova foi efetuada por meio de fibras com largura de 5 cm e comprimento de 7 cm laminadas com adesivo epóxi que foram coladas com uma camada de tecido em cada face. A laminação das amostras encontra-se ilustrada na Fotografia 10.



Fotografia 10: Reforço dos corpos de prova ensaiados à tração paralela às fibras
Fonte: Autoria própria.

5.3 INSTRUMENTAÇÃO

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos destrutivos em Máquina Universal EMIC mostrada na Fotografia 11, com capacidade de 30 toneladas, a uma velocidade constante de deformação de 10 MPa/min. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus* Campo Mourão.



Fotografia 11: Máquina Universal EMIC utilizada nos ensaios
Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

O levantamento das características básicas da madeira utilizada serviu de embasamento para a análise dos resultados colhidos em ensaios mecânicos. Na tabela 5 são apresentados os valores obtidos para teor de umidade, densidade básica e densidade aparente da madeira da espécie *Pinus Taeda*.

Tabela 5 - Caracterização básica da madeira de Pinus

Corpo de prova	Teor de umidade (%)	Densidade básica (kg/m³)	Densidade aparente (kg/m³)
VAS	13,22%	307,96	349,28
VAF	13,35%	274,52	318,70
VBS	13,55%	354,45	410,30
VBF	14,09%	404,98	456,78
VCS	13,43%	360,14	425,60
VCF	14,02%	432,29	526,78
VDS	15,62%	512,09	601,94
VDF	14,48%	335,94	380,56
VES	14,97%	401,02	465,57
VEF	14,52%	383,17	427,20
VFS	14,14%	370,16	413,80
VFF	14,02%	287,42	338,44
Valores Médios	14,12%	368,68	426,25
Coef. de Variação	5,00%	18,00%	19,00%

Fonte: Ensaio realizado pela autora.

Segundo a NBR 7190 a densidade aparente média a 12% de umidade encontrada para a espécie *Pinus Taeda* foi de 645 kg/m³, para as vigas analisadas este valor foi de 426,25 kg/m³, 33,90% inferior ao descrito na norma. A densidade das amostras apresentou uma variação significativa, já que o valor mínimo encontrado foi de 318,70 kg/m³ e o máximo foi de 601,94 kg/m³.

Para a densidade básica o valor mínimo ficou em 274,52 kg/m³, e o máximo em 512,09 kg/m³, o coeficiente de variação foi de 18%, semelhante ao da densidade aparente que foi de 19%. Posteriormente, será discutida a influência dessa variação na resistência da madeira.

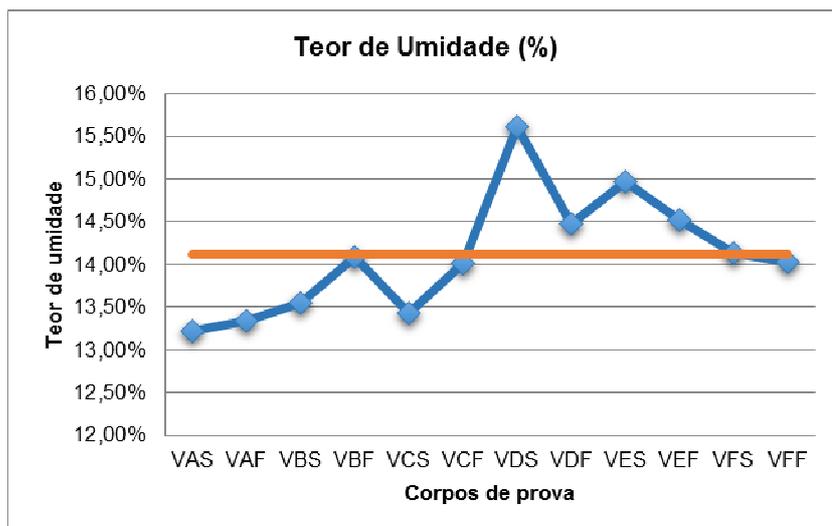


Gráfico 1: Teor de umidade em porcentagem dos corpos de prova ensaiados
Fonte: Ensaio realizado pela autora.

Os valores encontrados para teor de umidade representados no Gráfico 1 foram satisfatórios e apresentaram um coeficiente de variação de apenas 5%, indicando que o procedimento de secagem das vigas foi eficiente e uniforme. Além disso, os valores estão muito próximos ao equilíbrio higroscópico da madeira, desta forma, é possível afirmar que a umidade presente na madeira não é capaz de dissimular as suas reais características.

6.2 ENSAIOS DE FLEXÃO NA MADEIRA SÃ E REFORÇADA

Na tabela 6 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de flexão simples para força máxima e flecha máxima dos corpos de prova gêmeos das seis vigas analisadas.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de flexão simples realizado em vigas sãs e reforçadas

Corpo de prova	Força máxima (kgf)	Flecha máxima (cm)
VAS	347,10	5,03
VAF	528,80	5,98
VBS	380,25	4,30
VBF	583,68	10,57
VCS	265,55	1,59
VCF	624,43	3,36
VDS	708,90	4,28
VDF	608,00	4,60
VES	411,80	4,44
VEF	485,41	7,78
VFS	612,27	4,55
VFF	621,48	5,30
Valores Médios	514,90	5,15

Fonte: Ensaio realizado pela autora.

Por ser um material natural, a madeira apresenta características bastante heterogêneas e essa desuniformidade é ainda mais acentuada em madeiras de reflorestamento. Desta forma, os resultados obtidos corresponderam a três situações distintas em que foram agrupados e serão analisados a seguir.

O primeiro caso a ser avaliado é a presença de nós. Em torno dos nós, a direção das fibras da madeira sofre bastante alteração, pois surgem desvios com inclinações excessivas, nesta região, as cargas aplicadas causam tensão de tração normal na madeira. Como a resistência à tração normal da madeira é muito baixa, a redução na força de ruptura torna-se bastante significativa de acordo com Stanalker e Harris (1989 apud CARREIRA, 2003, p. 160).

Nos ensaios realizados com corpos de prova que apresentavam este defeito, tomou-se o cuidado de posicionar os nós na face comprimida, objetivando minimizar as perdas estruturais nas peças, porém, como os defeitos encontravam-se localizados muito próximos ao ponto de aplicação de carga, os danos foram expressivos. No gráfico 2 explana-se a influência da presença de nós na força de ruptura das vigas C e E.

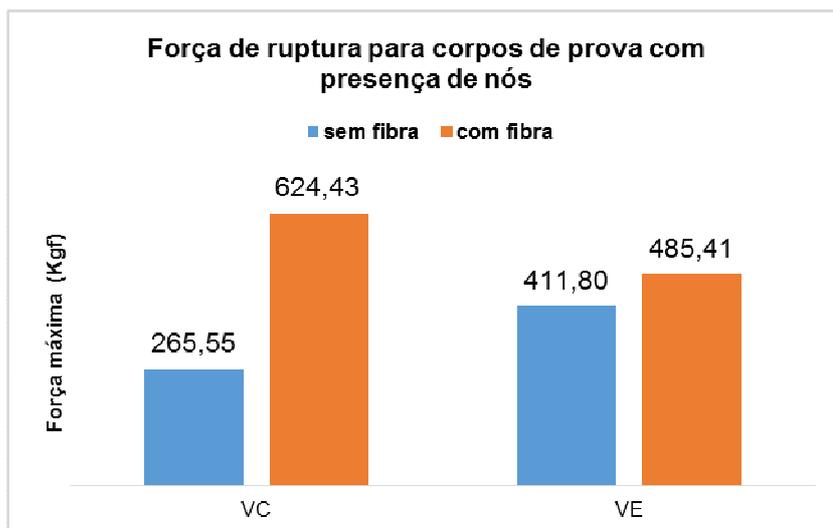


Gráfico 2: Comparação entre a força de ruptura em Kgf de vigas sãs e reforçadas para o primeiro caso
Fonte: Ensaios realizados pela autora.

Para a viga C o corpo de prova que apresentava defeito foi ensaiado sem a presença de reforço, e para a viga E o corpo de prova defeituoso foi reforçado, visando verificar a influência do compósito para as duas situações.

Na viga C o reforço do corpo de prova gêmeo proporcionou um acréscimo de 57,47% na força de ruptura, e na viga E mesmo com a presença do nó, a força de ruptura do corpo de prova reforçado superou em 15,16% a da madeira sã isenta de defeitos. Desta forma, podemos concluir que o compósito aumenta consideravelmente a resistência à ruptura da madeira e que seu uso é uma alternativa para a utilização estrutural de peças com defeitos.

O segundo caso observado, compreende corpos de prova gêmeos que apresentaram densidades consideravelmente distintas. Notou-se através da literatura, que a densidade está intimamente ligada a dois fatores: taxa de crescimento e idade da madeira.

A taxa de crescimento determina a distância entre os anéis de crescimento, quanto mais próximos estes forem, mais densa e resistente será a madeira. A idade da madeira para as coníferas é dividida pelo vigésimo anel de crescimento, a madeira juvenil possui propriedades inferiores à madeira adulta.



Fotografia 12: Seção transversal dos corpos de prova gêmeos da viga D.
Fonte: Autoria Própria.

Na Fotografia 12 ilustra-se a diferença anatômica entre as amostras da viga D, onde é possível visualizar que o corpo de prova ensaiado sem reforço possui o dobro de anéis de crescimento presentes no corpo de prova reforçado. No gráfico 3 podemos verificar que as vigas D e F apresentaram diferenças abruptas entre as densidades das vigas ensaiadas com e sem reforço.

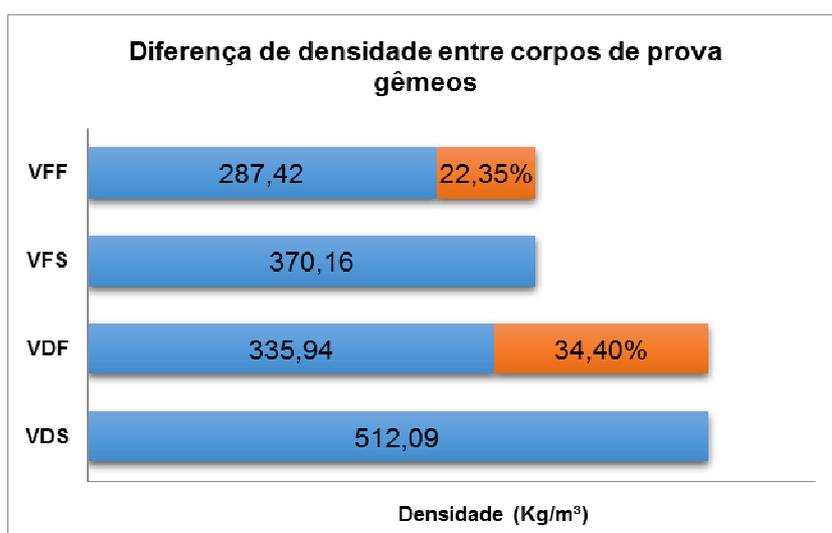


Gráfico 3: Comparação entre a massa específica em Kg/m³ de corpos de prova gêmeos
Fonte: Ensaio realizado pela autora.

Na viga F a densidade do corpo de prova ensaiado sem reforço foi de 22,35% superior à do corpo de prova gêmeo reforçado, essa diferença foi ainda superior na viga F, onde atingiu significativos 34,4%. Os valores para força de ruptura do segundo caso são mostrados no Gráfico 4.

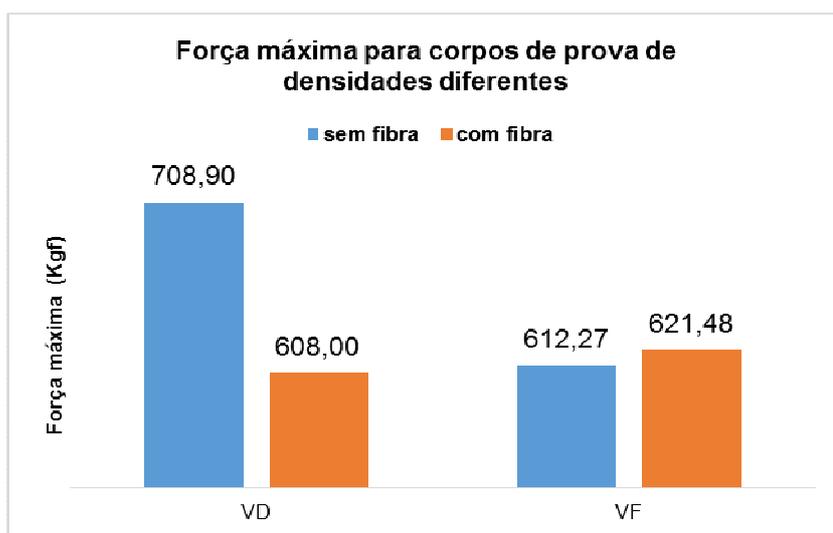


Gráfico 4: Comparação entre a força de ruptura em Kgf de vigas sãs e reforçadas para o segundo caso
Fonte: Ensaios realizados pela autora.

Para a viga D a superioridade de 34,4% na densidade do CP sem fibra resultou em uma resistência à ruptura 16,6% superior à do corpo de prova reforçado. Na viga F o benefício ocasionado pelo reforço foi de apenas 1,48%, valor este que não justificaria sua aplicação. Pelo segundo caso foi possível verificar que diferenças significativas de densidade entre os corpos de prova prejudicam a avaliação dos benefícios gerados pelo reforço.

No terceiro caso foram encontrados valores bastante próximos para a força máxima, os corpos de prova gêmeos apresentaram diferenças de densidade próximas a 10% facilitando a comparação dos resultados que podem ser observados no Gráfico 5.

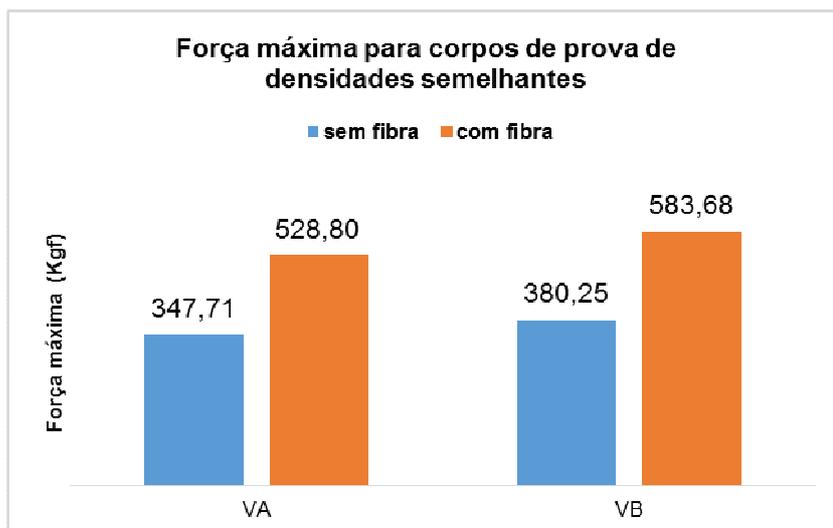


Gráfico 5: Comparação entre a força de ruptura em Kgf de vigas sãs e reforçadas para o terceiro caso
Fonte: Ensaios realizados pela autora.

As vigas A e B foram as que apresentaram menor densidade entre as amostras ensaiadas, o acréscimo de resistência gerado pela presença do compósito ficou em torno de 34% e foi praticamente análogo para as duas vigas. Fiorelli (2002) concluiu que o reforço apresenta benefícios mais significativos para madeiras de menor densidade. Os resultados referentes à flecha máxima são apresentados no Gráfico 6.

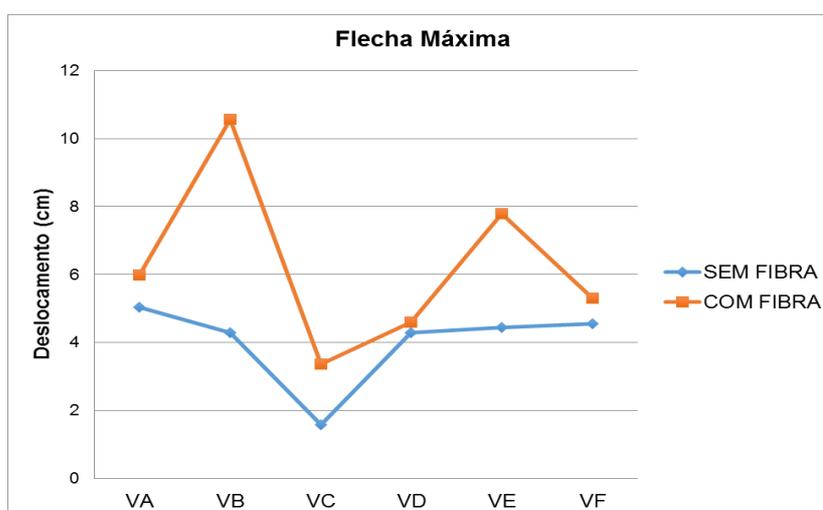


Gráfico 6: Comparação entre a flecha máxima em cm para vigas sãs e reforçadas
Fonte: Ensaios realizados pela autora.

É possível verificar que para todas as amostras reforçadas, houve um acréscimo no deslocamento vertical próximo à ocorrência da ruptura quando comparadas às vigas ensaiadas sãs. Segundo Fiorelli (2002) esse comportamento é positivo, pois a presença de grandes deslocamentos antes da ruptura, garantem uma maior segurança estrutural.

A seguir será analisada a intervenção provocada pelo compósito de fibra de vidro no modo de ruptura das vigas ensaiadas. Na tabela 7 são contemplados os modos de ruptura das vigas ensaiadas sem a presença do reforço.

Tabela 7 - Modo de ruptura da madeira ensaiada sã

Corpo de Prova	Ruptura	Modo de Ruptura
VAS		Tração
VBS		Tração
VCS		Tração
VDS		Tração
VES		Tração
VFS		Tração

Fonte: Ensaios realizados pela autora

De acordo com as fotografias presentes na tabela 7 é possível verificar que as vigas romperam por tração das fibras inferiores, exceto a viga C que rompeu por tração normal às fibras devido à presença do nó na região central do corpo de prova. As diferenças na ruptura das vigas permite identificar que as amostras A e B foram extraídas da parte juvenil enquanto as demais foram extraídas da parte adulta da árvore. O modo de ruptura das vigas ensaiadas com a presença do reforço encontra-se ilustrado na tabela 8.

Tabela 8 - Modo de ruptura da madeira reforçada

Corpo de Prova	Ruptura	Modo de Ruptura
VAF		Tração na madeira
VBF		Tração na madeira e cisalhamento do compósito
VCF		Tração na madeira
VDF		Tração na madeira e cisalhamento do compósito
VEF		Tração na madeira
VFF		Tração na madeira

Fonte: Ensaios realizados pela autora.

O modo de ruptura das vigas reforçadas, conforme já observado por Fiorelli (2002), inicia-se com a compressão das fibras superiores por esmagamento, que é mais acentuado em vigas de menor densidade, com posterior colapso por tração na face inferior da madeira.

Nas vigas B e D houve também cisalhamento do material compósito, que para o primeiro caso ocorreu devido a um deslocamento vertical superior a 10 cm antes do colapso; e para o segundo, devido à maior resistência do corpo de prova graças à continuidade e alinhamento das fibras.

6.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO NA MADEIRA SÃ E REFORÇADA

Na tabela 9 é possível verificar os valores de força máxima obtidos nos ensaios de tração para os corpos de prova sãos e reforçados.

Tabela 9 - Valores obtidos em ensaios de tração paralela às fibras

Corpo de Prova	Força máxima sem adição de fibra	Força máxima com adição de fibra
VA	988	*
VB	1131	1203
VC	*	1108
VD	3023	1050
VE	3444	915
VF	1615	1205
Valores Médios	2040	1096
Coef. de Variação	55%	11%

Fonte: Ensaios realizados pela autora.

(*) Erro de ensaio

Os valores encontrados nas amostras ensaiados sem fibra apresentaram um coeficiente de variação de 55%, enquanto os resultados obtidos para os corpos de prova reforçados variaram em apenas 11%. Isto é atribuído ao fato de que os corpos de prova ensaiados sem fibra foram extraídos da região adulta da madeira, exceto para as vigas A e B, constituídas totalmente por madeira juvenil. No gráfico 7 são comparadas as forças de ruptura para os corpos de prova gêmeos.

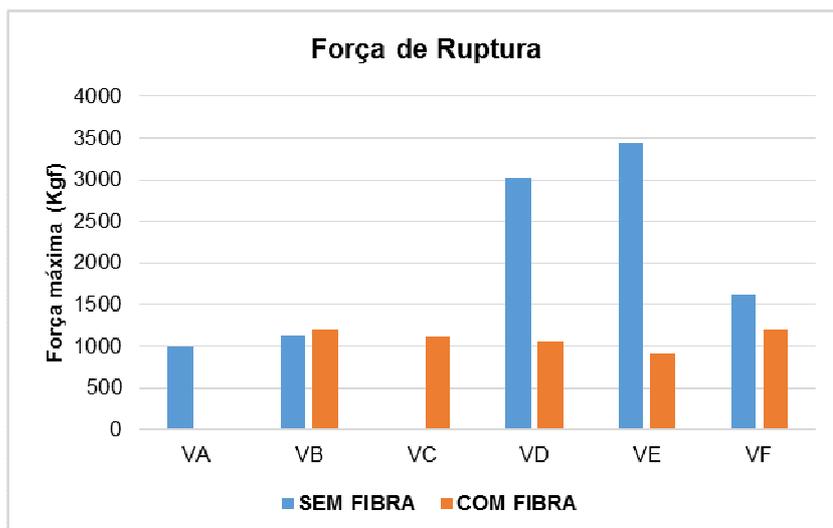


Gráfico 7: Comparação entre a força máxima em Kgf para corpos de prova sãos e reforçados

Fonte: Ensaio realizado pela autora.

Verificou-se novamente a relevância da diferença de densidade entre os corpos de prova na comparação dos resultados, tendo apenas a viga B apresentado resultados próximos. Os erros causados nas amostras VAF e VCS ocorreram durante a colocação dos corpos de prova na máquina de ensaios, prejudicando desta forma, a comparação entre amostras gêmeas de 2 vigas. Encontrou-se bastante dificuldade na fabricação dos corpos de prova de tração e na realização destes ensaios. Na Tabela 10 são ilustrados os modos de ruptura encontrados para os corpos de prova ensaiados sem reforço.

Tabela 10 - Modo de ruptura para corpos de prova ensaiados sem fibra

Corpo de Prova	VAS	VBS	VCS	VDS	VES	VFS
Ruptura						
Modo de Ruptura	Compressão	Compressão	Erro de ensaio	Tração	Tração	Tração

Fonte: Ensaio realizado pela autora.

Para os corpos de prova ensaiados à tração sem a presença de reforço observou-se que a ruptura ocorreu na região comprimida pela garra da máquina para os corpos de prova de baixa densidade.

Para todas as amostras a madeira apresentou um comportamento elástico-linear até próximo da ruptura, os corpos de prova D e E apresentaram os maiores valores para força máxima, e pelas figuras acima é possível verificar que esses corpos de prova possuíam um número muito superior de anéis de crescimento em relação aos demais analisados.

Tabela 11 - Modo de ruptura para corpos de prova reforçados com fibra

Corpo de Prova	VAF	VBF	VCF	VDF	VEF	VFF
Ruptura						
Modo de Ruptura	Erro de ensaio	Tração na madeira	Cisalhamento do compósito	Tração na madeira	Tração na madeira	Tração na madeira

Fonte: Ensaios realizados pela autora.

De acordo com a tabela 11 notou-se que houve uma boa aderência entre a fibra de vidro e a resina utilizada, de tal forma, que dentre as amostras ensaiadas, apenas em uma foi detectada a ruptura por cisalhamento do compósito, em todos os demais casos, a ruptura ocorreu por tração na madeira.

Desta maneira o objetivo principal deste ensaio não foi atingido, pois não foi possível verificar a recuperação gerada pela fibra dado que o corpo de prova C sem adição de fibra rompeu por erro de ensaio. Porém, a eficiência do reforço fica comprovada e sua resistência à tração é superior à de madeiras de baixa densidade.

Mohamad et. al (2011) utilizaram a resina AR-300 com o endurecedor AH-30 e encontraram problemas de aderência entre o compósito e o substrato devido à formação de bolhas que ocorreu durante o processo de laminação, prejudicando também, uma análise efetiva da recuperação ocasionada.

7 CONCLUSÕES

O levantamento das características físicas de cada corpo de prova é essencial para fundamentar e analisar o comportamento da madeira quando submetida à solicitações mecânicas, pois tais propriedades encontram-se intimamente ligadas. O valor encontrado para densidade aparente das amostras ensaiadas foi 33,9% inferior ao referido pela NBR 7190.

A densidade básica média encontrada foi de 368,68 Kgf/m³ e a média para densidade aparente foi de 426,25 Kgf/m³ com um coeficiente de variação de aproximadamente 19%. A grande variabilidade encontrada entre as peças ensaiadas justifica a pesquisa e o desenvolvimento de materiais engenheirados de madeira para uso estrutural, com propriedades pré-estabelecidas e uniformes.

A presença do reforço ocasionou alterações no modo de ruptura das vigas ensaiadas à flexão, já que devido ao esmagamento da face comprimida e ao posterior abaixamento da linha neutra, a ruptura por tração ocorre após grandes deslocamentos, garantindo uma melhoria na segurança estrutural. Nos ensaios de tração observou-se que a resistência à ruptura do material compósito é superior à de madeiras de baixa densidade, não foi possível avaliar a recuperação gerada pelo PRF já que as amostras romperam por tração na madeira.

O tecido utilizado apresentou bom desempenho, e a eficácia do adesivo foi comprovada tanto na formação do material compósito quanto na aderência ao substrato. O processo de laminação é de simples execução, pois a resina apresenta alta trabalhabilidade dentro do tempo de gel estabelecido pelo fabricante.

Foi observado um acréscimo de 34% na resistência à ruptura para peças com características semelhantes e de 15,16% ao comparar uma peça isenta de defeitos com uma peça com nó reforçada, comprovando que o uso de PRFs é uma alternativa viável e prática na recuperação de estruturas antigas e na redução dos danos gerados pela presença de nós na madeira de Pinus.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, D. R; PHULÉ, P. P. **The Science and Engineering of Materials**. United States of America: Thomson, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BARRACUDA. <<http://www.barracudacomposites.com.br/>>. Acesso em: 12 Jul. 2013.

CALLISTER JR, Willian D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos S. A., 2002.

CARREIRA, Marcelo R. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus SP**. 2003. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde.../mrcarreira.pdf>. Acesso em: 19 Nov. 2013.

CARVALHO, Ricardo F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 2005. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-10062005-184350/pt-br.php>>. Acesso em: 13 Jul. 2013.

COMITE CIENTÍFICO INTERNACIONAL PARA A ANÁLISE E RESTAURO DE ESTRUTURAS DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO. **ICOMOS**: Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do patrimônio arquitetônico. Lisboa, 2003. Disponível em: <<http://icomos.fa.utl.pt/documentos/cartasdoutrina/icomosrecomendacoesestruturas.pdf>>. Acesso em: 16 Ago. 2013

CRUZ, Helena. **Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira**. In: Curso livre internacional de Patrimônio, Associação Portuguesa dos Municípios com Centro Histórico; Fórum UNESCO Portugal, 2., fev./mar., 2001, Santarém. p 1-9. Disponível em: <<http://mestradoreabilitacao.fa.utl.pt/disciplinas/jbastos/Hcruzpatol%20aval%20e%20conserv%20madeiras%20SANTAREM.pdf>>. Acesso em: 18 Ago. 2013.

DE, S. K. ; WHITE, J. R. **Short Fibre-Polymer composites**. 1. ed. Manchester: Woodhead, Publishing Limited England, 1996.

DU PONT. <<http://www.dupont.com/>>. Acesso em: 24 Ago. 2013.

FIORELLI, Juliano. **Utilização de fibras de carbono e de 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. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-12052003-144536/pt-br.php>>. Acesso em: 22 Jun. 2013.

_____. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde.../tesejuliano.pdf>. Acesso em: 13 Jul. 2013

FORTES, G. L. ; DIAS, A. A. . Avaliação da resistência à tração de compósitos de fibras naturais e resina epóxi. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 2011, São Carlos. **Anais....** São Paulo : USP, 2011. v. Cd rom. p. 1p..

GARCEZ, Mônica R. **Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras**. 2007. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-12052003-144536/pt-br.php>>. Acesso em: 22 Jun. 2013

GONZAGA, Armando L. **Madeira: Uso e Conservação**. IPHAN/MONUMENTA. Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.monumenta.gov.br/upload/Caderno%20Madeiraweb_1173383037.pdf>. Acesso em: 4 Ago. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Economia do Turismo - Uma perspectiva macroeconômica - 2003-2009**. Disponível em: <<http://economia.ig.com.br/mercados/2012-10-10/turismo-gera-renda-de-mais-de-r-100-bilhoes-ao-ano-no-brasil.html>> Acesso em: 15 jul. 2013.

JUVANDES, Luis F. P. **Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP.**

Disponível em:

<http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica_2002_2003/LJ_Ciencia_Materiais_2002.pdf>. Acesso em: 14 Ago. 2013

MARINELLI, Alessandra L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v18n2/a05v18n2.pdf>>. Acesso em: 28 Jul. 2013.

MENDES, Alfredo de S. **A degradação da madeira e sua preservação.** Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. Departamento de Pesquisas - Laboratório de produtos florestais, Brasília, 1988. Disponível em: <www.florestal.gov.br/index.php?option=com_k2&view=item...id...>. Acesso em: 2 Jul. 2013.

MIOTTO, José L. ; DIAS, Antônio A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **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>>. Acesso em: 17 Jul. 2013.

MOHAMAD, G. ; ACCORDI, J. ; ROCA, L. E. Avaliação da associação de compósito de fibra de vidro e carbono no reforço de madeira de eucalyptus in natura e autoclavada. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v.16, n. 1, p. 621-637, mai. 2011.

MURPHY, J. **The Reinforced Plastics Handbook.** Nova York: Elsevier Advanced Technology, 1994, 451 p.

PINHEIRO, Roberto V. ; LAHR, Francisco A. R. Patologias em estruturas de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Acervo da Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. p 1-8.

WHEELER, A. S. ; HUTCHINSON, A. R. Resin repairs to timber structures. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 18, n. 1, p 1-13, fev. 1998.