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

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO E DE FIBRAS DE VIDRO PARA
REFORÇO DE VIGAS DE MADEIRA**

Juliano Fiorelli

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

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

São Carlos
2002

“A sabedoria não nos é dada.
É preciso descobri-la por nós mesmos,
depois de uma viagem que ninguém
nos pode poupar ou fazer por nós”

Marcel Proust – Escritor Francês

Dedicatória:

Aos meus pais e à Erika,
incentivadores incansáveis.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, coragem e esperança em todas as etapas de minha vida.

Ao professor e orientador Antonio Alves Dias, pela grande amizade, confiança e interminável dedicação, desde o período de graduação, meu eterno muito obrigado.

Aos professores Carlito Calil Jr., Francisco Antonio Rocco Lahr e Almir Sales pelo incentivo e amizade.

À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro.

Aos meus pais, Carlos e Marta, que tiveram especial participação em minha formação e acreditaram nos meus sonhos.

À Erika pelo apoio infinito, força, compreensão e sobretudo pelo carinho durante estes anos.

Aos meus irmãos, Alexandre e Bruno, pelo incentivo.

A todos os amigos e funcionários do LaMEM, pelo companheirismo e colaboração.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de figuras	i
Lista de tabelas	iv
Lista de símbolos	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos do trabalho	03
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 Métodos tradicionais para reforço e recuperação de estruturas de madeira	04
2.2 Fibras reforçadas com polímeros (FRP)	07
2.2.1 Fibra de Vidro	08
2.2.2 Fibra kevlar	10
2.2.3 Fibra de Carbono	11
2.2.3.1 Propriedades da fibra de carbono	11
2.2.3.2 Sistemas de reforço com fibra de carbono	13
2.2.4 Comparação entre propriedades das fibras	15
2.2.5 Análise de custos	16
2.3 Adesivos	17
2.3.1 Adesivos Inorgânicos	17
2.3.2 Adesivos Orgânicos	18
2.3.3. Termofixos	18
2.3.4 Adesivo epóxi AR-300	21
2.3.5 Termoplásticos	22
2.3.6 Adesivo poliuretano à base de mamona	22
2.4 Mecanismos de adesão	23
2.5 Emprego de FRP em reforços de estruturas de madeira	24
2.6 Efeitos de altas temperaturas em reforços com FRP	32
2.7 Critério para dimensionamento de vigas de madeira reforçadas com fibras	33

2.8 Conclusões da revisão	35
3 – DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FIBRAS DE VIDRO E DE FIBRAS DE CARBONO LAMINADAS COM ADESIVOS COMERCIAIS E A BASE DE MAMONA	38
3.1 - Materiais e métodos	38
3.1.1 Materiais utilizados para a confecção dos corpos-de-prova	40
3.1.2 Confecção dos corpos-de-prova	41
3.1.3 Equipamentos utilizados no ensaio	42
3.1.4 Determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade	42
3.1.5 Ensaio realizado	43
3.2 Resultados obtidos	45
3.2.1 Ensaio preliminares (corpos-de-prova com adesivo de mamona, cascophen e epóxi)	45
3.2.2 Corpos-de-prova laminados com resina epóxi	46
3.2.3 Corpos-de-prova sem adesivo	46
3.2.4 Corpos-de-prova de fibras de carbono laminados com resina epóxi	46
3.3 Análise dos resultados	54
3.3.1 Comparação da eficiência dos adesivos na laminação dos corpos-de-prova (ensaio preliminares)	54
3.3.2 Resistência à tração e módulo de elasticidade para fibras de carbono e fibras de vidro laminadas com adesivo epóxi	55
3.3.3 Fibras de vidro sem adesivo	59
4 – AVALIAÇÃO DE ADESIVOS NA INTERFACE FIBRA MADEIRA	61
4.1 Materiais e métodos	61
4.1.1 Confecção dos corpos-de-prova	61
4.1.2 Ensaio realizado	62
4.2 Resultados obtidos	63
4.3 Análise dos resultados	64
5 – MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO E ANÁLISE DE VIGAS REFORÇADAS COM FIBRAS	67
5.1 Introdução	67

5.2	Análise da rigidez à flexão das vigas	68
5.2.1	Cálculo da seção transformada	68
5.2.2	Análise da eficiência do reforço	70
5.2.3	Comentários	74
5.3	Análise da resistência	74
5.3.1	Cálculo do momento fletor último	74
5.3.1.1	Modo de ruptura: compressão	77
5.3.1.2	Modo de ruptura - tração	78
5.3.2	Análise de vigas reforçadas com fibras, utilizando o modelo teórico	80
5.3.2.1	Reforço com fibra de vidro	80
5.3.2.2	Reforços com fibra de carbono	85
5.3.2.3	Comentários	89
5.3.3	Avaliação do parâmetro “k”	89
5.3.4	Análise comparativa dos reforços de fibra de vidro e de fibra de carbono	91
5.3.4.1	Comentários	95
6	– AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS REFORÇADAS COM FIBRAS	96
6.1	Ensaio de flexão preliminares	96
6.1.1	Materiais utilizados para a confecção das vigas	96
6.1.2	Equipamentos utilizados no ensaio	97
6.1.3	Método de ensaio empregado	97
6.1.4	Método de aplicação de FRP	99
6.1.5	Realização do ensaio	101
6.1.6	Resultados obtidos	102
6.1.7	Análise dos resultados	105
6.1.7.1	Análise do momento máximo resistido - experimental e teórico	105
6.1.7.2	Análise da rigidez a flexão	107
6.2	Ensaio principais	109
6.2.1	Materiais utilizados para a confecção das vigas	109
6.2.2	Caracterização das peças de madeira	111
6.2.3	Instrumentação das vigas	111

6.2.4 Resultados obtidos	113
6.2.5 Análise dos resultados	116
6.2.5.1 Análise do momento máximo resistido - experimental e teórico	116
6.2.5.2 Análise da rigidez à flexão	118
6.2.5.3 Análise das deformações	119
7 – CONCLUSÕES	132
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

Lista de figuras

FIGURA 01: Pilar de madeira recuperado com reforço de "camisa" de concreto	05
FIGURA 02: Reforço com chapa metálica	06
FIGURA 03: Modelo do processo de protensão transversal	06
FIGURA 04: Produtos em fibra de vidro	09
FIGURA 05: Tecido Multi-axial de fibra de vidro	10
FIGURA 06: Fibra Kevlar	11
FIGURA 07: Arranjo HCP dos átomos de carbono	12
FIGURA 08: Tecido unidirecional e lâmina de fibra de carbono	14
FIGURA 09: Aplicação do reforço de lâminas de fibra de carbono	27
FIGURA 10: Fibra reforçando juntas de viga laminada colada	30
FIGURA 11: Ensaio de tração para verificar a resistência das peças	31
FIGURA 12: Possibilidades de reforço com fibra de vidro em ligações	31
FIGURA 13: Distribuição de tensões em vigas reforçadas	35
FIGURA 14: Dimensões de corpos-de-prova para ensaio de tração	39
FIGURA 15: Tecido de fibras de carbono	40
FIGURA 16: Tecido de fibras de vidro	40
FIGURA 17: Laminação de corpos-de-prova de fibras de vidro com resina epóxi	41
FIGURA 18: Corpos-de-prova de fibras de carbono laminados com duas camadas de tecido	42
FIGURA 19: Ensaio de tração em fibras de carbono	43
FIGURA 20: Corpos-de-prova de fibras de vidro sem laminação	44
FIGURA 21: Corpo-de-prova de fibras de vidro laminado com cascophen.	54
FIGURA 22: Corpo-de-prova de fibras de vidro laminado com mamona	54
FIGURA 23: Corpos-de-prova de fibras de carbono e de fibras de vidro laminados com epóxi.	55
FIGURA 24: Gráfico comparativo entre forças máximas resistidas por corpos-de-prova de fibras de carbono e de fibras de vidro	58
FIGURA 25: Curva tensão x deformação fibras de vidro laminadas	59
FIGURA 26: Curva tensão deformação fibras de carbono laminadas	59
FIGURA 27: Colagem de fibras de vidro nos corpos-de-prova de madeira adesivo cascophen	62
FIGURA 28: Ensaio de tração em corpos-de-prova de madeira (adesivo de mamona)	62

FIGURA 29: Formas de ruptura para adesivo epóxi – ruptura na madeira (pinus) e ruptura por cisalhamento (eucalipto)	64
FIGURA 30: Formas de ruptura para adesivo de mamona e cascophen	64
FIGURA 31: Comparação da resistência dos adesivos em corpos-de-prova de Pinus elliotti	65
FIGURA 32: Comparação da resistência dos adesivos em corpos-de-prova de eucalipto Grandis	65
FIGURA 33: Viga constituída por dois materiais diferentes (a) e seção equivalente (b)	69
FIGURA 34: Variação do momento de inércia - reforço com fibra vidro	72
FIGURA 35: Variação do momento de inércia reforço com fibra de carbono	73
FIGURA 36: Diagrama de deformação na seção transversal	75
FIGURA 37: Diagrama $\sigma \times \epsilon$ na compressão paralela às fibras	75
FIGURA 38: Distribuição de tensões na seção transversal (ruptura por compressão)	77
FIGURA 39: Distribuição de tensões na seção transversal (ruptura por tração na madeira)	79
FIGURA 40: Relação entre momento x número de camadas de fibra de vidro	82
FIGURA 41: Relação entre momento x número de camadas de fibra de vidro	83
FIGURA 42: Relação entre momento x número de camadas de fibra de vidro	84
FIGURA 43: Relação entre momento x número de camadas de fibra de carbono	86
FIGURA 44: Relação entre momento x número de camadas de fibra de carbono	87
FIGURA 45: Relação entre momento x número de camadas de fibra de carbono	88
FIGURA 46: Diagrama tensão por deformação	90
FIGURA 47: Gráficos comparativos entre os reforços com fibra de vidro e fibra de carbono	92
FIGURA 48: Gráficos comparativos entre os reforços com fibra de vidro e fibra de carbono	93
FIGURA 49: Gráficos comparativos entre os reforços com fibra de vidro e fibra de carbono	94
FIGURA 50: Modelo do ensaio de flexão em vigas simplesmente apoiadas	98
FIGURA 51: Ciclo de carregamento	98
FIGURA 52: Procedimento de aplicação de fibras de vidro em vigas	100
FIGURA 53: Ensaio de flexão em viga de eucalipto	102
FIGURA 54: Flecha viga de Pinus	105

FIGURA 55: Comparação entre momento fletor de ruptura (experimental e teórico)	106
FIGURA 56: Comparação entre momento fletor de ruptura (experimental e teórico)	107
FIGURA 57: Valores EI (reforço)/EI x número de camadas	108
FIGURA 58: Valores EI (reforço)/EI x número de camadas	109
FIGURA 59: Esquema dos ensaios de flexão nas vigas	111
FIGURA 60: Posição dos extensômetros na seção transversal da viga	112
FIGURA 61: Flecha na viga	115
FIGURA 62: Ruptura por tração na madeira	116
FIGURA 63: Força x deformação específica de vigas de Pinus seção 6x12 cm	120
FIGURA 64: Força x deformação específica de vigas de Pinus seção 6x16 cm	121
FIGURA 65: Força x deformação específica de vigas de Pinus seção 6x12 cm	121
FIGURA 66: Força x deformação específica de vigas de Peroba Rosa	122
FIGURA 67: Variação da deformação na seção transversal da viga 01 sem reforço e reforçada	123
FIGURA 68: Variação da deformação na seção transversal da viga 02 sem reforço e reforçada	124
FIGURA 69: Variação da deformação na seção transversal da viga 03 sem reforço e reforçada	125
FIGURA 70: Variação da deformação na seção transversal da viga 04 sem reforço e reforçada	126
FIGURA 71: Variação da deformação na seção transversal da viga 06 sem reforço e reforçada	127
FIGURA 72: Variação da deformação na seção transversal da viga 08 sem reforço e reforçada	128
FIGURA 73: Variação da deformação na seção transversal da viga 09 sem reforço e reforçada com 20 camadas de fibra	129
FIGURA 74: Variação da deformação na seção transversal da viga 11 sem reforço e reforçada	130

Lista de tabelas

TABELA 01: Características da fibra de vidro	08
TABELA 02: Tipos de fibra de vidro para reforço	09
TABELA 03: Emprego de FRP em estruturas	14
TABELA 04: Características dos tecidos de fibras a 20°C	15
TABELA 05: Custo das fibras	17
TABELA 06: Características das fibras aramid e vidro	25
TABELA 07: Características das fibras aramid e vidro	29
TABELA 08: Geometria dos corpos-de-prova	40
TABELA 09: Informações referentes aos corpos-de-prova ensaiados	45
TABELA 10: Resistência à tração de fibras de vidro laminada com mamona	46
TABELA 11: Resistência à tração de fibras de vidro laminada com cascophen	46
TABELA 12: Resistência à tração de fibras de vidro laminada com epóxi	46
TABELA 13: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (duas camadas de tecido)	48
TABELA 14: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (quatro camadas de tecido)	49
TABELA 15: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (seis camadas de tecido)	50
TABELA 16: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro sem laminação (uma camada de tecido)	51
TABELA 17: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de carbono (duas camadas de tecido)	52
TABELA 18: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de carbono (quatro camadas de tecido)	53
TABELA 19: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de carbono (seis camadas de tecido)	54
TABELA 20: Valores médios e coeficientes de variação da resistência a tração de fibras de vidro	56
TABELA 21: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de vidro laminadas (2 lâminas de fibras)	57
TABELA 22: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de vidro laminadas (4 lâminas de fibras)	57
TABELA 23: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de vidro laminadas (6 lâminas de fibras)	57
TABELA 24: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de carbono laminadas (2 lâminas de fibras)	58
TABELA 25: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de	58

fibras de carbono laminadas (4 lâminas de fibras)

TABELA 26: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de 58
fibras de carbono laminadas (6 lâminas de fibras)

TABELA 27: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de 60
fibras de vidro sem adesivo

TABELA 28: Valores das forças máximas resistidas pelos adesivos na 64
interface fibra madeira

TABELA 29: Valores médios e coeficiente de variação das forças de 66
cisalhamento

TABELA 30: Valores de elasticidade utilizados no cálculo da inércia 72

TABELA 31: Valores de elasticidade e resistência de madeira 82

TABELA 32: Valores do parâmetro “k” 91

TABELA 33: Informações referentes às vigas de madeira 98

TABELA 34: Médias e coeficiente de variação 101

TABELA 35: Viga de Pinus seção 3x6 cm 102

TABELA 36: Viga de Pinus seção 3x12 cm 102

TABELA 37: Viga de Eucalipto seção 3x6 cm 103

TABELA 38: Viga de Eucalipto seção 3x12 cm 103

TABELA 39: Informações referentes às vigas de madeira 109

TABELA 40: Médias e coeficiente de variação 112

TABELA 41: Médias e coeficiente de variação 113

TABELA 42: Vigas de Pinus Caribea 113

TABELA 43: Vigas de Peroba Rosa 114

TABELA 44: Vigas de Pinus Caribea 116

TABELA 45: Vigas Peroba Rosa 116

TABELA 46: Vigas de Pinus Caribea 117

TABELA 47: Vigas Peroba Rosa 117

Lista de símbolos

Letras romanas maiúsculas

- A - Área do corpo-de-prova
- C1 e C2 – Forças de compressão resultantes na madeira;
- E - Módulo de Elasticidade
- E_1 - módulo de elasticidade da madeira
- E_2 - módulo de elasticidade da fibra
- E_c - módulo de elasticidade à compressão paralela da madeira
- E_t - módulo de elasticidade à tração paralela da madeira
- E_f - módulo de elasticidade à tração da fibra
- EI - Rigidez à flexão
- EI_r – Rigidez a flexão de vigas reforçadas
- $F_{máx}$ - Força máxima aplicada
- I - Momento de Inércia
- K - relação entre as deformações (ϵ_2/ϵ_1)
- L - distância entre apoios
- M_c - momento resistente à compressão
- M_t - momento resistente à tração
- M_u - momento último resistido pela viga
- $M_{r,u}$ - Momento último de vigas reforçadas
- P - força máxima
- TM - Força de tração resultante na madeira
- TF - Força de tração na fibra
- W - módulo de resistência da seção transversal transformada

Letras romanas minúsculas

- b - base
- b' - base equivalente

e - espessura da fibra

f_b - resistência da Madeira a Flexão

f_{c0} - resistência à compressão paralela às fibras da madeira

f_{t0} - resistência à tração paralela às fibras da madeira

f_{tu} - Resistência à tração

h - altura da viga

m - coeficiente angular

y_{cg} - distância do cg a borda comprimida

Letras gregas

d - deslocamento vertical

σ_c - tensão de compressão

ΔP - variação da força (10% e 50%)

Δv - variação da flecha (10% e 50%)

RESUMO

A necessidade de recuperação e reforço em estruturas de madeira, concreto e aço exigiu da construção civil uma procura por métodos mais eficientes que pudessem cumprir esse papel. Com este objetivo vários estudos estão sendo realizados utilizando fibras reforçadas com polímeros (FRP). Dentre estas fibras, as que vêm apresentando melhores resultados como reforço para peças estruturais de madeiras são as fibras de carbono e as fibras de vidro. Dentro deste escopo, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento estrutural de vigas de madeira de espécies nacionais reforçadas com fibras de carbono e com fibras de vidro, verificando a eficiência deste reforço e adequando modelos de cálculo para avaliação da resistência e da rigidez das vigas reforçadas, e também verificar a eficiência de uma formulação de adesivos à base de mamona e do adesivo Cascophen, para fixação das respectivas fibras na madeira, em substituição ao adesivo epóxi, normalmente utilizado. Foram efetuados ensaios de vigas de madeira reforçadas com polímeros, em modelo reduzido, e em protótipos, para diversas configurações de geometria e quantidade de fibras utilizadas. Os resultados obtidos indicam uma boa concordância entre os modelos teóricos para avaliar a resistência e a rigidez das vigas reforçadas, e os resultados experimentais, e a eficiência do reforço. Também foram conduzidos ensaios de tração em corpos-de-prova de fibras laminado com os adesivos, caracterizando a sua resistência e elasticidade e comparando o comportamento dos adesivos estudados. Os resultados indicaram o melhor comportamento do adesivo epóxi.

ABSTRACT

The necessity of rehabilitation and reinforcement in wood structures, concrete and steel demanded a search for more efficient methods that could carry this paper. With this objectives several studies are using fibers reinforced polymers (FRP). These fibers which presenting better results in structural reinforcement for structural pieces of wood are the fibers of carbon and the glass fibers. This work has as objective studies the structural behavior of wood beams of national species reinforced with carbon fibers and with glass fibers, verifying the efficiency of this reinforcement and adapting calculation models for evaluation of the strength and stiffness of the reinforced beams, and also to verify the efficiency of a formulation of adhesives to the castor oil and of the adhesive Cascophen, for fixation of the respective fibers in the wood, in substitution the adhesive epoxy, usually used. Experimental work was made with wood beams reinforced with polymeric, in reduced model, and in prototypes, for several geometry configurations and amount of used fibers. The obtained results indicate a good agreement among the theoretical models to evaluate the strength and stiffness of the reinforced beams, and the experimental results, and the efficiency of the reinforcement. Traction rehearsals were also led in body-of-proof of fibers laminated with the adhesives, characterizing your strength and elasticity and comparing the behavior of the studied adhesives. The results indicated the best behavior of the adhesive epoxy.

1 - INTRODUÇÃO

Problemas relacionados à baixa eficiência de elementos estruturais, aumento de sobrecarga e degradação por envelhecimento existem com bastante frequência na construção civil. Estas patologias vêm motivando o desenvolvimento de novas técnicas de reforço e recuperação para estruturas.

A recuperação estrutural abrange edificações abaladas por sinistros de qualquer natureza ou por falhas no planejamento, projeto, execução ou por empregos de materiais e componentes de baixa qualidade, procurando retornar às características originais de projeto, tornando as estruturas novamente aptas para uso. Já o reforço proporciona um aumento da capacidade de carga do elemento estrutural através da combinação de outros materiais com propriedades mecânicas iguais ou superiores as das estruturas originais.

Atualmente, em alguns casos mostra-se mais viável, em termos econômicos, promover a recuperação ou o reforço de estruturas e de edificações sem demoli-las. O reforço e a recuperação estrutural também podem ser utilizados para resolver problemas de envelhecimento de obras, sendo que muitas delas fazem parte do patrimônio histórico e arquitetônico.

Recentemente, materiais alternativos vêm sendo estudados para recuperar e reforçar estruturas. Uma maior atenção está sendo dada para o uso de fibras reforçadas com polímeros (FRP), que são materiais flexíveis, altamente resistentes e que podem substituir com vantagens, em alguns casos, as técnicas que já vem sendo utilizadas. Atualmente as fibras mais utilizadas são as fibras de carbono e as fibras de vidro.

Segundo Bakoss; Greenland (1998), apesar de ainda pequeno, o uso de (FRP) na construção civil vem crescendo, e as técnicas de aplicação estão sendo desenvolvidas rapidamente na América do Norte, Europa e Japão. Estas fibras, por apresentarem facilidade de composição com outros tipos de materiais, estão se associando aos tradicionais materiais da construção civil como madeira, concreto e aço, compondo estruturas mais resistentes e com um peso próprio levemente alterado. Além disso, o potencial para recuperação de estruturas de madeira é altamente significativo, devido a vários fatores como redução do custo de materiais quando usados adequadamente, aumento da durabilidade, redução da manutenção para elementos estruturais de madeira e capacidade de recuperar estruturas danificadas.

Segundo Dagher (2000), as propriedades físicas, mecânicas e químicas das FRP são muito versáteis. As fibras podem ser um complemento para as propriedades ortotrópicas da madeira. Ressalta ainda a possibilidade de uso do material em muitos processos de manufaturas, freqüentemente usados para produzir compósitos estruturais de madeira.

A utilização de FRP para recuperação e reforço estrutural é um campo extenso e tecnologicamente vasto, que proporcionará economia de tempo e de materiais na construção civil. Percebe-se, também, que a facilidade de associar a outros materiais, o baixo aumento no peso próprio da estrutura, o significativo aumento da resistência e da rigidez e a facilidade de aceitação do produto no mercado de todo o mundo, poderá fazer destas fibras um material bastante utilizado na recuperação e reforço de elementos estruturais.

É neste contexto, que o conhecimento a ser desenvolvido na presente pesquisa representa uma contribuição no sentido de ampliar o uso das madeiras nacionais, nativas e de reflorestamento, como material estrutural, estudando a aplicação de reforço de fibras de carbono e de vidro em vigas de madeira.

Este trabalho apresenta uma avaliação teórica e experimental de vigas de madeira de baixa e média densidade reforçada com fibras de vidro e com fibras de carbono e também uma verificação da eficiência de adesivos comerciais e a base de mamona na fixação das respectivas fibras à madeira.

1.1 Objetivos do trabalho

No contexto apresentado, este trabalho possui como objetivo:

- Estudar o comportamento estrutural de vigas de madeira reforçadas com fibras de carbono e com fibras de vidro, verificando a eficiência destes reforços e a adequação de modelos de cálculo para avaliação da resistência e da rigidez destes elementos estruturais;
- Avaliar a possibilidade de utilização dos adesivos à base de mamona e Cascophen, em substituição ao adesivo epóxi, normalmente empregado, para o reforço de vigas de madeira com fibras de vidro.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de situar os principais métodos de recuperação e reforço de estruturas de madeira, este capítulo apresenta um levantamento do conhecimento científico das técnicas mais utilizadas pela indústria da construção civil.

Com relação ao reforço com fibra, são apresentadas as propriedades mecânicas dos tecidos de fibra de vidro, de fibra de carbono e da fibra aramid, propriedades dos principais adesivos comerciais e à base de mamona, utilizados junto à madeira e também resultados de estudos teóricos e experimentais que verificaram a eficiência da respectiva técnica no reforço de elementos estruturais de madeira.

2.1 Métodos tradicionais para reforço e recuperação de estruturas de madeira

A idéia de reforçar estruturas de madeiras não é nova. Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos no campo de recuperação e reforço.

De acordo com Mettem; Robinson (1991) existem métodos para reparar estruturas de madeira, sem comprometê-las. As técnicas mais utilizadas para se fazer estas recuperações são:

- Método tradicional - a estrutura de madeira é recuperada com novas peças, que substituirão as degradadas, de dimensões e propriedades semelhantes às originais.
- Método mecânico - os reparos estruturais são feitos utilizando conectores metálicos.
- Método adesivo - são utilizadas variações de resinas epóxi combinadas com peças metálicas, para realizar a recuperação.

Em muitos casos, faz-se necessária a adoção de outras medidas, como a utilização de “camisas” de concreto, visando proteger regiões da estrutura expostas a condições severas de intemperismo. As razões para o sucesso deste tipo de reforço são o aumento da resistência à compressão e baixo custo do material empregado, (Dagher, 2000). A figura 01 apresenta um exemplo de reforço em pilar de madeira de uma ponte, situado na região correspondente à de variação do nível do rio (Ritter, 1990).

FIGURA 01: Pilar de madeira recuperado com reforço de "camisa" de concreto. Fonte: Ritter (1990)

Ritter (1990) também estudou outros tipos de recuperação pelo método mecânico, entre eles o reparo por emenda, que consiste em adicionar peças de madeira associadas com parafusos. Esta técnica é muito utilizada quando a peça estrutural apresenta rachaduras longitudinais.

Outro tipo de reparo, também muito utilizado em rachaduras longitudinais, consiste em introduzir chapas metálicas, fixando-as com parafusos ou com adesivo epóxi. A figura 02 mostra a fixação da chapa com parafusos. O objetivo desta técnica não é o de fechar a rachadura, mas sim, prevenir a separação da peça em duas partes.

Este método tem sido muito utilizado, pois não ocorre a redução da seção da peça estrutural. No entanto, quando a fixação da chapa metálica é feita com adesivo, foi observado que após muito tempo exposta a intempéries, pode ocorrer corrosão na sua interface com o adesivo, comprometendo a aderência entre os elementos. Esta patologia é muito difícil de ser identificada durante as inspeções de rotina.

FIGURA 02: Reforço com chapa metálica. Fonte: Ritter (1990)

Outra técnica, denominada protensão transversal, é muito utilizada para unir decks horizontais de tabuleiros de pontes. Muitas vezes os tabuleiros são danificados pelo aumento do tráfego de veículos, ou por rachaduras no asfalto, que possibilitam a penetração de água e consequentemente à deterioração das peças de madeira. A respectiva técnica consiste em introduzir uma tensão de protensão que reduz as distâncias entre as peças de madeira. A figura 03 ilustra o respectivo processo.

FIGURA 03: Modelo do processo de protensão transversal. Fonte: Ritter (1990)

De acordo com Ritter (1990), a técnica mais eficiente para recuperar peças de madeira é aquela que utiliza epóxi. O epóxi é um gel de betume, que pode ser injetado manualmente nas partes danificadas, promovendo o aumento da resistência da peça estrutural. Este material é usado para preencher rachaduras, superfícies atacadas por insetos e espaços vazios. O epóxi, além de vedar a área danificada, aumenta a capacidade de carga da estrutura e reduz o aparecimento de futuras rachaduras.

Forsberg (1996) utilizou epóxi em regiões danificadas de treliças de madeira, reparando a estrutura. Resultados satisfatórios de aumento de resistência dos componentes estruturais foram atingidos.

2.2 Fibras reforçadas com polímeros (FRP)

Recentemente, materiais alternativos vêm sendo estudados para recuperar e reforçar estruturas. Uma maior atenção vem sendo dada para o uso de fibras reforçadas com polímeros (FRP), que podem substituir as técnicas descritas anteriormente.

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

O emprego do tecido de fibra deve ser feito em conjunto com algum tipo de adesivo, formando um compósito que consiste na combinação de dois materiais para produzir um produto que exceda as propriedades individuais de cada um. Em particular, as fibras reforçadas com polímeros (FRP), são formadas pela combinação das fibras com uma matriz. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito,

e a matriz é o produto que as une, sendo responsável pela transmissão dos esforços, (Norris; Saadatmanesh, 1994).

2.2.1 Fibra de Vidro

Segundo Hull (1995) muitas composições de minerais têm sido utilizadas para produzir fibras. As fibras de vidro são produzidas a partir da sílica (SiO_2), através da adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Estas fibras são materiais amorfos e sua cristalização ocorre após prolongado tratamento com altas temperaturas.

Dentre as vantagens do uso de fibra de vidro em reforços de estruturas podem ser destacadas: baixo custo, em relação às fibras de carbono e as fibras aramid, (aproximadamente R\$ 5,00/m²), alta resistência ao impacto e à corrosão. Além disso, pode ser destacado como um produto que também é fabricado no Brasil.

As fibras de vidro se dividem em três categorias: E (electrical), C (chemical) e S (high tensile strength). Suas principais características e formas encontradas no mercado estão apresentadas nas tabelas 01 e 02.

TABELA 01: Características da fibra de vidro. Fonte: Hull (1995)

Fibra de Vidro	Características
E glass	Alta resistência e alto módulo de elasticidade; Boa condutividade elétrica.
C glass	Alta resistência a corrosão; Baixa propriedade de resistência.
S glass	Alto módulo de elasticidade; Resistente a altas temperaturas;

TABELA 02: Tipos de fibra de vidro para reforço. Fonte: (catálogo Saint-Gobain Vetrotex)

Fibra de Vidro	Características
Fios Têxteis	Formado por duas ou mais fibras simples de vidro, torcidos em sentidos inversos para formarem um único fio, bobinados em um suporte cônico.
Mantas de Fios Contínuos	Fabricadas com fios contínuos de vidro, dispostos de forma aleatória em múltiplas camadas e unidos por um ligante. São compatíveis com resinas poliéster, estervinílica, epóxi.
Mantas de Fios Picados	Fabricadas com fios picados de vidro, unidos por um ligante solúvel em estireno, que lhe confere uma excelente compatibilidade com resinas poliéster e epóxi.
Roving	Produzido a partir de fios de vidro indicados para aplicação por projeção simultânea.
Roving Direto	Produzido a partir de fios de vidro destinados a fabricação de produtos nos processos de moldagem por enrolamento.
Tecido Unidirecional (TRB)	Produzido a partir de mechas contínuas de fios de vidro com agentes de acoplamento compatíveis com resinas poliéster e epóxi. É utilizado na moldagem de peças em plástico reforçado e recomendado para laminação manual.

A figura 04 ilustra os produtos comerciais de fibra de vidro.

FIGURA 04: Produtos em fibra de vidro. Fonte: Saint-Gobain (2000)

Dentre os produtos derivados da fibra de vidro, os tecidos de fibras unidirecionais são os mais recomendados para reforço e recuperação de elementos estruturais. Dentre estes tecidos, os Multi-axiais, formados pela superposição de fibras unidirecionais unidas por uma costura de fio poliéster, são os que apresentam melhores condições para manuseio, além de apresentar excelentes propriedades mecânicas, em comparação aos outros produtos. A figura 05 ilustra o tecido Multi-axial.

FIGURA 05: Tecido Multi-axial de fibra de vidro

2.2.2 Fibra kevlar

As fibras orgânicas, também conhecidas por Kevlar, marca registrada da empresa Dupont apresentam três estruturas moleculares diferentes nylon, aramida e poliestireno.

Este tipo de fibra é utilizado principalmente na indústria aeroespacial e automobilística. Nos últimos anos, as fibras aramidas têm se tornado um material muito utilizado em construção de barcos, buscando-se maior rigidez e leveza. Quando comparadas com outros materiais, as fibras aramidas mostram uma

resistência específica (resistência/densidade) muito grande, acima de qualquer outro tipo de fibra disponível no mercado. A figura 06 ilustra este tipo de material.

FIGURA 06: Fibra Kevlar. Fonte: Barracuda (2000)

2.2.3 Fibra de Carbono

As fibras de carbono vêm sendo utilizadas nas indústrias aeroespaciais, automotivas e de equipamentos esportivos nos últimos cinquenta anos, principalmente por apresentarem altas propriedades mecânicas de resistência e rigidez, baixo peso e facilidade em associar a outros materiais.

2.2.3.1 Propriedades da fibra de carbono

As fibras de carbono são produzidas a partir de um componente básico conhecido como PAN (Poliacrilonitrila). Dependendo do tipo de tratamento recebido pela fibra básica, o qual inclui carbonização, oxidação e grafitação, é possível fabricar fibras de carbono em diversas configurações de resistência e de módulo de elasticidade (fibra tipo I e tipo II). Algumas são mais resistentes que o aço. Sua cor natural é preta.

O polímero reforçado com fibras de carbono, ou mais especificamente carbon fiber reinforced polymers (CFRP), é o material que vem sendo utilizado como alternativa para reforçar peças estruturais, mostrando-se altamente promissor no desempenho desta função, além de apresentar uma excelente resistência à corrosão [Taylor et al., (1994) apud Beber et al., (1999)].

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.

De acordo com Hull (1995) a alta resistência à tração e o alto módulo de elasticidade se devem ao paralelismo entre os eixos das fibras. Seus diâmetros estão entre 7 e 8 μm e são formadas por mono cristais, que se juntam e formam o grafite, que é uma forma alotrópica do carbono. Possuem arranjo hexagonal, os planos são alinhados e possuem forma de empilhamento ABAB (figura 07). Entre os átomos de carbono as ligações são covalentes (ligações químicas fortes) e entre os planos existe ligações do tipo Van der Waals (ligações fracas).

O alto módulo de elasticidade e a alta resistência das fibras de carbono se devem à orientação dos planos do grafite e também às ligações covalentes (ligações fortes) entre os átomos. Os respectivos planos possuem um alinhamento paralelo ao eixo das fibras. Muitos modelos vêm sendo propostos para ilustrar a estrutura das fibras de carbono, (Matthews, 1996).

FIGURA 07: Arranjo HCP dos átomos de carbono. Fonte: Matthews (1996)

Tingley ; Cegelka (1996) informam que são as fibras de vidro, carbono e aramid que vêm sendo utilizadas em reforço de estruturas de madeira. A mais popular delas é a fibra de vidro por possuir um custo bastante baixo em relação as outras fibras de carbono e aramid. Afirmam, porém, que são as fibras de carbono que possuem maior resistência e maior durabilidade.

2.2.3.2 Sistemas de reforço com fibra de carbono

Existem no mercado nacional três sistemas de reforços que utilizam as (CFRP) [Robery ; Innes, 1997 apud Beber et. al., (1999)]:

- 1 Lâminas de CFRP de alta resistência impregnadas com resina epóxi ou poliéster, que resultam em perfis contínuos dos mais diversos e complexos formatos que são, então, coladas sobre a superfície a ser reparada;
- 2 Fios de fibra de carbono, enrolados sob tensão, que são colados como filamentos sobre a superfície ou enrolados a seco e então curados a quente;
- 3 Tecidos pré-impregnadas (prepreg), com espessura similar a do papel de parede que são coladas sobre a superfície a ser reparada com resina, seguindo exatamente a curvatura do elemento e permitindo a aplicação em cantos vivos.

O sistema de reforço com tecidos pré-impregnados é fabricado a partir de filamentos de fibra de carbono esticados unidirecionalmente e levemente impregnados com resina. Este material é o que vem sendo utilizado com maior frequência para reforço de estruturas.

Os dois tipos de materiais mais utilizados (tecido e lâmina de fibra de carbono) pouco diferem em desempenho e modo de aplicação (BEBER et.al., 1999). A diferença principal está na forma de apresentação do produto. Enquanto o tecido de fibra de carbono apresenta espessura de 0,5mm e largura de aproximadamente 1,5m, as lâminas de fibra de carbono possuem espessura que varia de 1,2 a 1,4 mm e largura que varia de 5 a 10 cm. Para melhor ilustrar estes produtos a figura 08 apresenta os respectivos materiais.

FIGURA 08: Tecido unidirecional. Fonte (do autor) e Lâmina de fibra de carbono. Fonte: Sika (2000)

Tanto as lâminas quanto os tecidos de CFRP (carbon fiber reinforced polymer) podem ser colados depois da preparação da superfície da madeira e do concreto, não necessitando nenhuma instalação adicional. São empregados quando estas estruturas apresentarem as seguintes condições:

TABELA 03: Emprego de FRP em estruturas (Fonte: SIKA 2000)

Emprego de FRP em estruturas de madeira e concreto	
Sobrecargas	<ul style="list-style-type: none">• Aumento dos valores das ações;• Crescimento do tráfego de veículos em pontes;• Estruturas com vibrações;• Mudanças de uso da estrutura.
Estruturas danificadas	<ul style="list-style-type: none">• Envelhecimento dos materiais usados na construção;• Corrosão das armaduras;• Impacto de veículos;• Incêndio.
Melhoria no funcionamento da estrutura	<ul style="list-style-type: none">• Redução das deformações;• Redução da fadiga das armaduras;• Redução da largura das fissuras.
Alteração do sistema estrutural	<ul style="list-style-type: none">• Remoção de paredes ou pilares;• Seccionamento de laje para criar aberturas.
Defeitos de construção ou projeto	<ul style="list-style-type: none">• Armaduras insuficientes na estrutura;• Profundidade estrutural insuficiente.

Segundo Belperio et al. (1999) que avaliaram o uso de lâminas de fibra de carbono, com espessura de 1,2 mm e largura de 50 mm, o produto apresenta uma excelente resistência à tração (2400 MPa), e seu módulo de elasticidade variando de 155 GPa a 300 GPa, semelhante ao do aço ($E_{aço}=210$ GPa).

2.2.4 Comparação entre propriedades das fibras

Segundo Beber (1999) é a fibra de carbono, combinada com uma matriz polimérica (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer), que apresenta as melhores características para desempenhar função de recuperação e reforço de estruturas, devido aos altos valores de sua resistência e módulo de elasticidade. A tabela 04 apresenta valores de propriedades das fibras de vidro, das fibras de carbono e do kevlar.

TABELA 04: Características dos tecidos de fibras a 20°C (Fonte: Barracuda 2000)

Fibras	Características		
	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Unidirecional vidro (E)	900	76	2,55
Orgânica (Kevlar)	1500	125	1,44
Unidirecional carbono	2200	160-300	1,75
Lâmina carbono	2400	165-300	1,90

Para o uso em reforço de estruturas, as fibras devem ser laminadas com algum tipo de adesivo formando desta forma um compósito FRP (Fiber Reinforced Polymers). Entre os adesivos mais utilizados na laminação destes tecidos pode-se destacar as resinas poliéster, vinílicas e epoxídicas.

Segundo Askeland (1996), os materiais compósitos são formados através da combinação de propriedades de resistência, rigidez, densidade, condutividade, resistência à corrosão entre outras.

Os fabricantes das respectivas fibras estão constantemente melhorando as propriedades mecânicas de resistência e rigidez, impulsionando sua associação aos materiais da construção (Jang, 1994).

2.2.5 Análise de custos

Com relação ao emprego de tecido de fibra de carbono e de fibra de vidro em reforço de estruturas de madeira, cabe ao projetista avaliar a relação custo benefício da técnica em questão, em alguns casos torna-se mais vantajoso realizar o reforço e a recuperação da estrutura ao invés de substituir os elementos degradados.

Com relação aos tecidos de fibra de carbono o maior entrave para sua popularização como reforço estrutural no Brasil não são as limitações do sistema, mas o preço do material. Um dos motivos do alto custo desses reparos está na origem dos materiais, todos importados do Japão, Estados Unidos e Suíça.

Devido ao alto custo, os reforços normalmente não cobrem toda a superfície da peça. A instalação do material em faixas racionaliza o gasto com fibras e diminui bastante o preço final da obra (Beber et al., 1999).

Porém, os tecidos de fibra de vidro apresentam um custo de aproximadamente 1/20 do custo do reforço com fibra de carbono. A tabela 05 apresenta um custo aproximado dos tecidos e lâminas de fibra de carbono e do tecido de fibra de vidro.

TABELA 05: Custo das fibras

Fibras	Custo (U\$)
Tecido de Fibra de Carbono	60,00/m ²
Lâmina de Fibra de Carbono	60,00/m linear
Tecido de Fibra de Vidro	3,00/m ²

2.3 Adesivos

A definição do melhor adesivo para ser utilizado em conjunto com fibra de carbono e fibra de vidro, sua classificação e os tipos existentes no mercado é de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho que tem por objetivo determinar o adesivo que apresenta melhor desempenho no conjunto madeira - fibra.

Adesivo é definido como: “substância capaz de unir materiais através do contato entre suas superfícies”. A capacidade de unir os materiais não é uma

propriedade intrínseca da substância, mas depende do contexto em que a substância é utilizada.

Os adesivos são classificados em vários tipos. De acordo com sua composição química podem ser inorgânicos e orgânicos.

2.3.1 Adesivos Inorgânicos

Os adesivos inorgânicos são geralmente à base de silicatos, e proporcionam uma ligação entre os materiais com elevada resistência mecânica, ficando difícil diferenciar o adesivo e o cimento. Nos adesivos a ligação se dá pela desidratação do solvente. O cimento, no entanto, é formado através de reações químicas (Mantilla Carrasco, 1984).

2.3.2 Adesivos Orgânicos

Dentre os adesivos mais recomendados para serem utilizados na madeira, destacam-se os de origem orgânica. Estes adesivos dividem-se em dois grupos, o primeiro de origem natural e o segundo de origem sintética (Olmos, 1992). Dentre os de origem natural pode-se destacar: animal, amido, caseína e albumina de proteína vegetal. O grupo sintético é o mais importante e o mais empregado pela indústria madeireira, por apresentar grande resistência à ação da água e por não sofrerem à ação de microorganismos. Estes adesivos podem ser classificados em termofixos e termoplásticos.

2.3.3. Termofixos

Adesivos termofixos são aqueles que endurecem por meio de reações químicas ativadas pela temperatura ou catalisadores. Possuem elevada resistência a umidade e ao calor. Dentre eles pode destacar: resorcinol-formaldeído, fenol-formaldeído, uréia formaldeído, poliuretanos e epóxi.

- Resorcinol-Formaldeído

São empregados geralmente em estruturas de madeira expostas à temperatura ambiente ou pouco aquecidas. Quando a colagem é feita com aquecimento moderado, estes são misturados com resinas fenólicas, formando o fenol-resorcinol-formaldeído.

São comercializados na forma líquida, utiliza-se um agente endurecedor que deve ser adicionado pouco antes do seu uso, evitando o endurecimento rápido e a perda de material. Segundo Peterson (1964) apud Henriques de Jesus (2000), este tipo de adesivo veio preencher as necessidades do mercado por um adesivo impermeável e usado a baixas temperaturas. Sua resistência estrutural é elevada, superando a da própria madeira.

Segundo Henriques de Jesus (2000) este tipo de adesivo suporta quaisquer condições a que venha a ser exposta, mesmo as alterações climáticas, mantendo sua capacidade resistente em relação ao carregamento.

São empregados quando as condições de impermeabilidade são obrigatórias e onde as colas fenólicas, cuja cura ocorre em altas temperaturas, não forem adequadas. A colagem de vigas e painéis estruturais e a colagem de laminados marítimos são algumas das aplicações.

- Fenol-Formaldeído

São adesivos formados a partir de resinas fenólicas sintéticas (Mantilla Carrasco, 1984), necessitam de altas temperaturas para cura (130 a 160°C), sendo

comercializados em filmes secos, reconstituídos pela ação da água. Necessitam de um endurecedor a ser dosado com a resina, produzindo boa resistência das uniões coladas mesmo que atuem em condições extremamente adversas. Estas condições podem ser: longo tempo de exposição à água quente ou fria, ciclos de secagem e de endurecimento, variações extremas de temperaturas e umidade relativa, temperaturas em torno da temperatura de carbonização da madeira, ataque de microorganismos e exposição à ação de vários tipos de componentes, como aqueles usados na preservação de componentes (Kollmann et al., 1975).

Segundo Henriques de Jesus (2000) se os processos de colagem e endurecimento forem adequadamente conduzidos, as colagens feitas com adesivos fenólicos apresentarão grande durabilidade, podendo ultrapassar a da própria madeira. Sua linha de cola possui coloração escura e um dos fatores negativos é o alto custo do fenol, cuja matéria prima é o petróleo.

- Uréia-Formaldeído

São classificados como resistentes à ação da umidade, no entanto perdem resistência quando atuam sob a ação da umidade por tempo relativamente curto. Dessa forma exposições repetidas a ambientes com alto teor de umidade, temperaturas iguais ou superiores a 65°C, poderão provocar um mau desempenho das peças, afetando-as negativamente.

São apresentados freqüentemente na forma líquida, adicionando-se um catalisador, ou na forma de pó, quando se emprega um catalisador combinado, necessitando apenas serem misturados com água (Samlaic, 1983).

- Poliuretanos

Este adesivo foi muito utilizado na década de 60 para produção de chapas de madeira aglomerada. Estas chapas apresentavam as mesmas características das

produzidas com adesivos fenólicos e usadas externamente. Segundo Henriques de Jesus (2000), alguns estudos desenvolvidos indicaram que o emprego dessas chapas coladas com adesivos à base de poliuretano, apresentavam propriedades superiores às chapas coladas com adesivo fenólico.

- Epóxi

Segundo Pardini (1990) as resinas epóxi são polímeros que se caracterizam pela presença de pelo menos dois grupamentos epóxi na molécula.

A propriedade mais singular das resinas epóxi é sua habilidade em transformar-se em um sólido termorrígido, tendo como ponto de partida o estado líquido. A viscosidade é então parâmetro de particular importância em resinas líquidas.

Conclui ainda, que as resinas epóxi em seu estado termoplástico são caracterizadas principalmente pela sua viscosidade, ponto de fusão, porcentagem de insaturação, peso molecular e distribuição de peso molecular.

Henriques de Jesus (2000) relata que este tipo de adesivo é produzido a partir de resinas à base de epíclorítina e resinas formadas por peroxidação, tem pouca utilização na indústria madeireira devido ao seu alto custo e a dificuldade de afinidade com algumas espécies. Tem aplicação em ligações com concreto, metais, vidros e cerâmica.

Alguns estudos referentes à utilização de adesivos termofixos para fixação de tecidos de fibras de carbono à madeira estão sendo realizados, entre eles pode-se destacar o de Belperio; Grad (1999). Neste estudo, testou-se três tipos de adesivos para confecção de vigas laminada colada: Resorcinol Formaldeído (com nome

comercial Cascophen), Resorcinol Sikadur (epóxi) e um poliuretano, combinando-os com fibra de carbono. Como conclusão, pode-se dizer que o adesivo Resorcinol Formaldeído apresentou baixo desempenho na interface fibra - madeira, contrariando o desempenho admirável deste adesivo entre elementos estruturais de madeira. O adesivo Sikadur apresentou dificuldade na aplicação. Já o poliuretano utilizado foi o que apresentou melhor desempenho.

2.3.4 Adesivo epóxi AR-300

Este tipo de adesivo é constituído por resina e endurecedor, e foi desenvolvido para fornecer uma excelente penetração a todos os tipos de fibras. Possui uma viscosidade extremamente baixa, possuindo um manuseio semelhante a uma resina poliéster. Este sistema de resina não desenvolve uma superfície pegajosa após o processo de cura, possibilitando laminações sucessivas de outras camadas de fibras.

2.3.5 Termoplásticos

A característica principal dos adesivos termoplásticos é a sua cura reversível. Podem ser fundidos ou amolecidos quando é aumentada a temperatura, tornando a solidificar ao serem resfriados. São usados como solução ou em dispersão em água.

O grupo dos acetatos sintéticos polivinílicos, que são adesivos pré-polimerizados, é empregado em colagem de madeira onde a cura é feita por perda do solvente dispersante. Tem vida útil muito longa devido à alta estabilidade química e física da dispersão. Com grande resistência à ação de microorganismos, não mancham a madeira. São facilmente manuseados, apresentando propriedades de contato e prensagem semelhantes aos adesivos anteriormente citados e exigindo

pouca pressão de prensagem. Não devem ser aplicados em construções pesadas, onde a resistência das juntas deve ser alta e em peças coladas de construções expostas ao intemperismo. (Henriques de Jesus, 2000).

Os adesivos que se enquadram neste grupo são: adesivos animais, albumina de sangue, caseína, soja, tanino. Dentre estes os que apresentam melhores características para fins estruturais são os de caseína e tanino, porém não são resistentes a ambientes agressivos.

2.3.6 Adesivo poliuretano à base de mamona

Outro tipo de adesivo que pode vir a ser empregado em reforços com fibras de carbono a madeira, no Brasil, foi estudado por Henriques de Jesus (2000). Este adesivo poliuretano à base de mamona, foi testado em vigas de madeira laminadas coladas e apresentou resultados satisfatórios quanto à adesão.

O adesivo de mamona utilizado é a resina poliuretânica originária de óleo vegetal (*Ricinus communis*), constituída a partir de um poliol 25040 e um pré-polímero A249 formulado com óleo de mamona e MDI (p-fenileno dimetil diisocianato). A resina é do tipo bicomponente de cura a frio, não é agressivo ao homem e ao meio ambiente, além do óleo de mamona ser obtido de um recurso natural e renovável. Os dois componentes devem ser misturados segundo proporções cabíveis para cada caso, dependendo da aplicação e das necessidades técnicas.

2.4 Mecanismos de adesão

Houwink; Solomon (1965) definem adesão como sendo a atração entre uma superfície sólida e uma segunda fase. Esta segunda fase pode consistir de partículas

individuais, como pequenas gotas, pó ou de uma película líquida ou sólida. Pode-se dizer também que adesão é a força atrativa entre moléculas de substâncias diferentes, ao contrário de coesão que é a força de atração verificada entre moléculas ou átomos de uma mesma substância.

Segundo Mantilla Carrasco (1984) as forças de adesão têm sua origem nas ligações químicas primárias (interatômicas) e nas ligações atrativas secundárias (intermoleculares). As forças produzidas pelas ligações primárias são de natureza essencialmente eletrônica (ligações entre átomos ou íons), podendo ser: ligações metálicas, ligações eletrovalentes, ligações covalentes e ligações coordenadas covalentes. As ligações atrativas secundárias são de natureza eletrostática ou magnética, associam as moléculas entre si, de maneira razoavelmente forte, mas não são suficientemente capazes de formarem uma nova individualidade química.

Segundo Oliveira ; Freitas (1995), a adesão é atribuída a várias e diferentes forças, como as forças moleculares e forças de Van der Waals. Estas só podem ser desenvolvidas quando as moléculas estão muito próximas entre si. Por esta razão aplica-se pressão sobre as superfícies das juntas a serem coladas, tanto para colagem a frio, quanto para colagem a quente.

Sabe-se que existe três mecanismos de adesão definidos: a adesão mecânica, a adesão específica e a adesão química.

Segundo Galaz (1979) apud. Henriques de Jesus (2000), a adesão mecânica se dá entre superfícies porosas baseadas no entrelaçamento da cola endurecida na junta de colagem e nos poros do aderente. A colagem fica então dependente da estrutura superficial do substrato, da pressão, da viscosidade etc.

Já a adesão específica ocorre entre duas superfícies lisas, onde as forças básicas de adesão entre as macromoléculas existem devido as ligações químicas secundárias de atração.

Na adesão química, as forças básicas envolvidas são as de ligações primárias, de natureza essencialmente eletrônica (ligações entre átomos ou íons, podendo ser ligações metálicas, eletrovalentes e covalentes).

2.5 Emprego de FRP em reforços de estruturas de madeira

Segundo Belperio et al. (1999), atualmente as FRP vêm sendo estudadas, como material para adequar estruturas de madeira, de concreto e de aço, para novos usos, com a finalidade de cumprir normas não atendidas no projeto (aumento de sobrecarga), e em reparos devidos a acidentes, envelhecimento, ataques químicos e erros de cálculo estrutural.

De acordo com Taylor et al. (1994) apud Beber et al. (1999) a principal razão em utilizar reforços com polímeros é aumentar a rigidez e a resistência das peças estruturais.

Abdel-Magid et al. (1994) avaliaram o comportamento de vigas de madeira reforçadas com fibra de carbono, kevlar 49 e kevlar 49 prepreg, verificando o incremento de resistência e rigidez. Os tecidos de fibras utilizados como reforço eram unidirecionais e foram aplicados paralelamente às fibras da madeira, utilizando um adesivo epóxi. Este adesivo apresentou excelente resultado de adesão entre as fibras e a madeira. As propriedades mecânicas das fibras utilizadas estão apresentadas na tabela 06.

TABELA 06: Características das fibras aramid e vidro. (Fonte: Abdel-Magib et al. 1994)

Tipo de Fibra	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência a Tração (MPa)
Carbono AS4	58000	612
Kevlar 49	28100	407
Kevlar 49 prepreg	62540	936

Concluíram que o reforço com fibra de carbono foi o que acarretou o aumento mais significativo na resistência das vigas de madeiras (acrécimo de 31,5 %). Porém, foi a fibra kevlar 49 prepreg que apresentou maior aumento da rigidez (acrécimo de 21,7 %) das vigas. Outro fator identificado refere-se ao modo de ruptura das vigas que foi inicialmente por compressão das fibras superiores seguida por uma ruptura por tração das fibras inferiores.

Segundo Bakoss; Greenland (1999), apesar de pequeno, o uso de (FRP) na construção civil vem avançando, e as técnicas de aplicação estão sendo desenvolvidas rapidamente na América do Norte, Europa e Japão. Estas fibras, por apresentarem facilidade de composição com outros tipos de materiais, estão se associando aos tradicionais materiais da construção civil como madeira, concreto e alvenaria, compondo estruturas mais resistentes e com um peso próprio levemente alterado. Acrescenta também que o potencial para a sua utilização em estruturas de madeira na Europa e na América do Norte é altamente significativo, devido a vários fatores: redução do custo de materiais quando usados adequadamente, aumento da durabilidade e redução da manutenção para elementos estruturais de madeira, capacidade de reparar e reforçar estruturas danificadas.

Tingley; Cegelka (1996), relatam que estas fibras vêm sendo utilizadas em maior quantidade para reforço de peças estruturais de madeira (pilar e viga), devido principalmente a: queda do preço do material, baixa variação dimensional do

material, de aproximadamente 0,1%, facilidade de aceitação do produto pelo mercado do mundo todo, surgimento de novos adesivos para serem utilizados junto com fibras de carbono.

Tingley; Gilham (1994) estudaram o comportamento de vigas de pontes de madeira reforçadas com fibra mistas de carbono e aramid, sujeitas à ação do peso próprio, das cargas acidentais e das variações dos fatores do meio ambiente como umidade e temperatura. Obtiveram os seguintes resultados: aumento da resistência estrutural das peças reforçadas, redução no custo de reabilitação, em torno de 25% a 30%, devido ao baixo grau de substituição de madeira, diminuição de custos com tratamento, utilização de pouca madeira para recuperação e conseqüente diminuição do peso próprio, uso de seções menores, que apresentam as mesmas propriedades de resistência e rigidez a seções maiores sem reforço.

A figura 09 ilustra a aplicação de fibra de carbono em vigas de ponte de madeira.

FIGURA 09: Aplicação do reforço de lâminas de fibra de carbono em vigas de ponte de madeira

Triantafillou; Deskovic (1992) avaliaram vigas maciças de madeira reforçadas com tecido unidirecional de fibra de carbono fixados com adesivo epóxi. Utilizaram tecidos com espessura variando de 0,55 a 0,75mm. Optaram pela utilização deste tipo de material para reforçar estruturas por apresentar alta resistência, baixa densidade, resistência à corrosão, combinando as vantagens oferecidas pelos materiais compósitos com a eficiência dos reforços externos, resultando em peças estruturais com excelentes propriedades mecânicas de resistência, rigidez e ductilidade. Conseguiram um aumento de 20% a 40% na capacidade de carga da peça estrutural reforçada.

Bakoss et al. (1998) estudaram o comportamento de vigas retangulares de pinho e vigas I reforçadas com tecido de fibra de carbono fixados com resina epóxi. Foi avaliado o aumento da resistência e da rigidez das peças, chegando a valores até 135% superiores aos apresentados pelas vigas sem o reforço.

Dagher (1999) estudou a utilização de reforço com lâminas de fibras de carbono (espessura 1,5mm) em vigas laminadas coladas, com o objetivo de avaliar o aumento da capacidade de carga dos elementos estruturais. Estas fibras proporcionaram um melhor desempenho estrutural às peças, permitindo uma maior utilização deste tipo de viga na construção civil.

O ensaio de flexão realizado nas vigas tinha o objetivo de avaliar deformações lentas. Para isso adotou um sistema bi-apoiado com duas forças concentradas localizadas a $1/3$ dos apoios. As fibras foram aplicadas entre as duas lâminas inferiores, por ser a região submetida a maiores tensões. Avaliaram-se três tipos de amostras de controle, a primeira sem nenhum tipo de reforço, a segunda com uma camada de reforço e a terceira com três camadas de fibra.

Resultados positivos de aumento da resistência foram conseguidos. Para vigas reforçadas com uma camada de reforço o incremento na capacidade de carga foi de 25% e para vigas reforçadas com três camadas o incremento foi de 60%.

Bergmeister, K.; Luggin, W. (2001) estudaram vigas de madeira laminada colada reforçadas com tecido de fibra de carbono. Durante os ensaios experimentais observaram a ocorrência de dois tipos de ruptura nas vigas reforçadas. Ruptura por tração das fibras inferiores da madeira, após a ocorrência de plastificação da seção comprimida da viga. E também a ocorrência de ruptura na linha de cola.

Tingley, D.; Kent, S (2001), avaliaram vigas de seção caixão reforçadas com fibras aramid aplicadas ao longo da direção longitudinal das fibras da madeira. Estas fibras possuíam valor de módulo de elasticidade igual a 59.000 MPa e de resistência a tração igual a 1034 MPa. Como resultado observou um aumento de 21,5% na resistência e 4,69% na rigidez, comparando com resultados obtidos para vigas sem reforço. O tipo de ruptura que ocorreu nas vigas reforçadas foi por compressão nas fibras superiores, após a ocorrência de uma grande deformação plástica. Diferente da ruptura das vigas sem reforço, que foi por tração.

Tingley et al., (1996) nos seus estudos sobre reforços em vigas de madeira e viga laminada colada, identificaram alguns problemas a serem considerados:

1. Comportamento da união fibra-madeira;
2. Estabilidade dimensional da madeira em relação à fibra;
3. Porosidade da fibra utilizada e a da madeira;

Segundo Dagher (2000), as propriedades físicas, mecânicas e químicas das FRP são muito versáteis. As fibras podem ser um complemento para as propriedades ortotrópicas da madeira. Conseqüentemente problemas de incompatibilidade entre madeira e reforço são minimizados. Ressalta ainda a possibilidade de uso do material

em muitos processos de manufaturas, freqüentemente usados para produzir compósitos estruturais de madeira. Apesar de existirem estes problemas, a utilização de FRP para reforço de elementos estruturais de madeira, é uma alternativa promissora, pois se trata de um material resistente a corrosão, que proporciona boa economia e um pequeno aumento do peso próprio.

Martin et al (2000) avaliaram a resistência e rigidez de decks de madeira de baixa densidade reforçados com FRP. Foram utilizadas fibras mistas vidro-aramid, e apenas fibras aramid, cujas propriedades mecânicas estão apresentadas na tabela 07.

TABELA 07: Características das fibras aramid e vidro. (Fonte: Martin et al. 2000)

Tipo de Fibra	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência a Tração (MPa)	Espessura (mm)
Aramid	80.000	986	1,78
Vidro-Aramid	55.000	241	1,27

Os ensaios de flexão realizados nas peças de madeira permitiram concluir que ocorreu um aumento de 40 a 70% na rigidez das peças e um aumento de 85-140% na resistência, para espécies de madeira de baixa densidade.

De acordo com Tichy (1998) a utilização destas fibras reforçadas com polímeros (FRP) para reforço e recuperação de estruturas de madeira é uma tendência para este século. Acrescenta a necessidade de se criar um ecossistema sustentável e renovável, onde, certamente, a madeira é o centro desse processo, por ser o material da construção civil mais amigo do meio ambiente. Por isso, a utilização destas fibras para reabilitação de estruturas de madeira não é uma ameaça para o meio ambiente, mas sim, uma nova tendência de se recuperar estruturas danificadas, preservando a natureza.

Alguns trabalhos que vem sendo desenvolvidos avaliam o potencial de utilização de FRP para reforço de elementos de ligações.

Bui; Miller (1996) testaram a utilização de fibra de vidro laminadas com adesivo epóxi como reforço de juntas dentadas (finger joints) de vigas de madeira laminada colada, conforme mostra a figura 10.

FIGURA 10: Fibra reforçando juntas de viga laminada colada. Fonte: Ritter (1990)

Nas regiões inferiores das vigas, as tensões de tração atuantes são elevadas, e as emendas apresentam uma resistência inferior à da peça maciça. Dessa forma, a realização de reforços de emendas localizadas nesta região proporciona um aumento de resistência e de rigidez, facilitando a utilização de peças com maiores dimensões.

A avaliação destes reforços foi feita através da aplicação de ensaio de tração nas respectivas peças, avaliando o aumento de resistência e rigidez, com a introdução da fibra, conforme mostra a figura 11.

FIGURA 11: Ensaio de tração para verificar a resistência das peças. Fonte: Ritter (1990)

Concluem que com um baixo custo e com um aumento mínimo da seção da peça, obtêm-se valores de resistência à tração da ligação finger joint, 60% superiores, em média, aos obtidos sem a utilização de reforço.

Chi-Jean (2000) verificou o comportamento mecânico da fibra de vidro no reforço de ligações entre elementos estruturais de madeira. A figura 12 apresenta algumas destas possibilidades.

FIGURA 12: Possibilidades de reforço com fibra de vidro em ligações

Observou um melhor comportamento mecânico das ligações reforçadas. Aumento da resistência ao embutimento de aproximadamente 44%, em relação às ligações sem reforço, quando utilizadas duas camadas de fibra. Afirma também que a associação destes materiais possibilita a execução de projetos mais ousados em madeira.

2.6 Efeitos de altas temperaturas em reforços com FRP

Tingley et al. (1999) verificaram o efeito de altas temperaturas em reforços com polímeros em vigas de madeira. A verificação foi realizada por meio de ensaios, fornecendo calor ao sistema até atingir a temperatura de 104°C, e monitorando o comportamento das vigas.

Concluíram que o reforço externo com fibra de carbono não é aceitável para altas temperaturas, pois as juntas de cola aumentam e se abrem, soltando a fibra da madeira.

Já em vigas onde as fibras são protegidas com uma lâmina de madeira, o seu comportamento é melhor. Usando este tipo de proteção, consegue-se manter a temperatura das fibras abaixo de 80% da aplicada diretamente sobre a peça de madeira.

Constatou ainda que o módulo de elasticidade e a resistência da fibra diminuem em temperaturas elevadas. Recomenda-se, portanto, a utilização de algum tipo de proteção sobre o reforço de fibra de carbono, para garantir um melhor desempenho durante toda a sua vida útil.

Martin; Tingley (2000) avaliaram a resistência ao fogo de um total de trinta (30) vigas de madeira, sendo que vinte e seis (26) eram reforçadas com FRP e quatro (4), não possuíam reforço. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E 199-88 (1993) – Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction Materials. Três diferentes tipos de fibras foram avaliadas, entre elas Aramid, carbono-aramid e vidro-aramid. Conclusões relatam que as fibras apresentaram uma boa resistência ao fogo. No entanto, esta resistência varia para cada tipo de material utilizado. As fibras que foram protegidas por uma lâmina de

madeira apresentaram melhor desempenho em relação às aquelas que estavam em contato direto com o fogo.

2.7 Critério para dimensionamento de vigas de madeira reforçadas com fibras

Belperio; Grad (1999) apresentam uma análise teórica comparando a deformação sofrida por vigas de madeira laminada colada com duas espécies diferentes de madeira reforçadas com FRP e vigas laminadas sem reforço.

A análise das vigas sem reforço é baseada na teoria da seção transformada, considerando o material elástico-linear.

O momento resistente da viga sem reforço é dado por:

$$M_u = f_b \cdot W$$

onde:

M_u = Momento último resistido pela viga

f_b = Resistência da Madeira a Flexão

W = Módulo de resistência da seção transversal transformada

Considerando que o carregamento é composto por uma força concentrada no meio do vão da viga, a máxima força resistida pela viga pode ser determinada por:

$$M_u = \frac{PL}{4} \qquad P = \frac{4 \cdot M_u}{L}$$

onde:

L = Comprimento do vão

P = Força Máxima

O deslocamento vertical no meio do vão é estimado por:

$$d = \frac{P \cdot L^3}{48EI}$$

onde:

I= Momento de Inércia da seção transformada

E= Módulo de Elasticidade

Para a análise das vigas reforçadas, o método da seção transformada foi utilizado apenas para avaliação da rigidez. Para o cálculo da resistência, foi utilizada uma analogia similar à utilizada no cálculo de vigas de concreto armado.

A figura 13 apresenta a distribuição de tensões assumida pelo modelo na seção da viga reforçada, na fase de ruptura. Nesta aproximação, foi considerado que cada região atua com a resistência máxima. A parte da seção acima da linha neutra se encontra solicitada pela resistência máxima de compressão (observa-se que existem dois materiais diferentes, o que causa dois níveis diferentes de tensões de compressão). Abaixo da linha neutra, a região tracionada da madeira é considerada com distribuição linear de tensões, atuando em conjunto com a força resultante do material de reforço.

FIGURA 13: Distribuição de tensões em vigas reforçadas

Com o valor do momento último das vigas reforçadas, pode-se determinar a máxima força resistida pela viga através da seguinte equação:

$$P = \frac{4 \cdot M_{r,u}}{L}$$

onde:

L = Comprimento do vão

P = Força Máxima

$M_{r,u}$ = Momento último de vigas reforçadas

Conclusões relatam que os valores de deslocamentos estimados pela teoria da seção transformada foram próximos aos valores obtidos com a realização dos ensaios. Porém os valores experimentais, para força máxima resistida pela viga, apresentaram-se inferiores aos estimados pela teoria.

2.8 Conclusões da revisão

Uma análise da revisão bibliográfica permite concluir que existem vários métodos de recuperação e reforço de elementos estruturais de madeira. Dos métodos

de recuperação apresentados o mais utilizado é o método tradicional. Para o método mecânico, a chapa metálica não deve ser fixada com adesivo pois ocorre um acúmulo de umidade nestas regiões, provocando uma degradação mais intensa da peça de madeira. Pode-se dizer também que o método de recuperação mais eficiente é o que utiliza variações de resina epóxi. Este material é usado para preencher rachaduras, superfícies atacadas por insetos e espaços vazios. Além de vedar a área danificada, aumenta a capacidade de carga da estrutura e reduz o aparecimento de futuras rachaduras.

Estudos em andamento indicam que as FRP (fibras reforçadas com polímeros) são um excelente material para atuar em reforço de estruturas. O uso destas fibras proporciona um ganho significativo de resistência e rigidez à estrutura, reduz o custo de recuperação, em torno de 25% a 30%, devido ao baixo grau de substituição de madeira, diminui os custos com tratamento, utiliza pouca madeira para recuperação e conseqüentemente ocorre uma diminuição do peso próprio, proporciona o uso de seções menores, que apresentam as mesmas propriedades mecânicas das seções maiores sem reforço.

De acordo com os trabalhos anteriormente apresentados, pode-se dizer que os tecidos de fibras de vidro, apesar de possuírem propriedades mecânicas inferiores aos de fibras de carbono, apresentam uma boa eficiência quando aplicados em reforço de elementos estruturais de madeira.

Sugere-se a colocação de uma peça de madeira para proteção da fibra contra altas temperaturas.

O critério de dimensionamento apresentado utiliza a teoria da seção transformada para determinar o valor da rigidez de vigas reforçadas, obtendo valores

satisfatórias quando comparados com valores obtidos experimentalmente. Com relação à ruptura, o critério apresentado não conduz a resultados apropriados.

As FRP devem ser aplicadas na face inferior das vigas, por ser a região solicitada por maiores esforços de tração. Cabe salientar que a correta aplicação dos respectivos tecidos de fibras reforçadas com polímeros, garante o bom desempenho do sistema estrutural reforçado. A definição do melhor adesivo para fixar fibras à madeira é importante para garantir o sucesso do reforço com fibras.

3 – DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FIBRAS DE VIDRO E DE FIBRAS DE CARBONO LAMINADAS COM ADESIVOS COMERCIAIS E A BASE DE MAMONA

Este capítulo apresenta o método de ensaio de tração e resultados de resistência e de rigidez para fibras de vidro e fibras de carbono laminadas com adesivo epóxi, cascophen, mamona e sem laminação.

3.1 - Materiais e métodos

O método de ensaio empregado foi o da norma ASTM D3039-95 – Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", da American Society for Testing and Materials, que especifica os procedimentos para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compósitos reforçados com matriz polimérica. Um resumo do método do ensaio está apresentado a seguir, abordando os aspectos referentes ao trabalho desenvolvido.

Formas e dimensões

Para que os corpos-de-prova tenham um número suficiente de fibras na seção transversal, que represente as propriedades do material, devem ser estabelecidas dimensões mínimas para os mesmos.

As dimensões mínimas dos corpos-de-prova para serem utilizados nos ensaios de tração estão apresentadas na figura 14. A tabela 08 exemplifica algumas destas dimensões, em função da direção das fibras.

Os corpos-de-prova com fibras unidirecionais devem ser confeccionados com abas, as quais previnem o aparecimento de falhas prematuras durante a aplicação de

forças. Alguns cuidados devem ser tomados ao confeccionar as abas, tais como: alinhamento da aba, material a ser utilizado, ângulo de aplicação, tipo de adesivo, tipo de garra, pressão na garra e alinhamento da garra.

FIGURA 14: Dimensões de corpos-de-prova para ensaio de tração. Fonte: ASTM D3039/95

TABELA 08: Geometria dos corpos-de-prova. Fonte: ASTM D3039/95

Geometrias recomendadas para ensaio de tração em fibras						
Orientação das fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Esp. (mm)	Comp. Aba (mm)	Esp. Aba (mm)	Angulo da Aba (°)
0° Unidirecional	15	250	1,0	56	1.5	7 ou 90
90° Unidirecional	25	175	2,0	25	1.5	90
Fios Descontínuos	25	250	2,5	-	-	-

Aplicação do carregamento

O ensaio de tração de fibras reforçadas com polímeros deve ser feito com velocidade constante de deformação igual a 2mm/min.

Cálculo da resistência e do módulo de elasticidade

O cálculo da resistência de fibras reforçadas com polímeros deve ser feito de acordo com a formulação apresentada a seguir.

$$f_{tu} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A}$$

Onde:

f_{tu} – Resistência à tração (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima aplicada (N)

A - Área do corpo-de-prova(mm^2)

O módulo de elasticidade é calculado a partir do diagrama tensão x deformação, sendo igual ao coeficiente angular do mesmo.

3.1.1 Materiais utilizados para a confecção dos corpos-de-prova

Para a confecção dos corpos-de-prova utilizaram-se os seguintes materiais:

Fibras

Os ensaios de tração foram feitos com tecido unidirecional de fibras de carbono(VGW 095) e de fibras de vidro (VEW 130). As figuras 15 e 16 mostram estes dois tipos de materiais, respectivamente.

FIGURA 15: Tecido de fibras de carbono

FIGURA 16: Tecido de fibras de vidro

Adesivos

Para a laminação dos corpos-de-prova foram utilizados três (3) tipos de

adesivos: adesivo à base de óleo de mamona, Phenol Resorcinol Formaldehyde (com nome comercial Cascophen) e resina epóxi AR-300.

3.1.2 Confeção dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram confeccionados com as dimensões estabelecidas na tabela 08, para orientação unidirecional das fibras;

As fibras foram cortadas na direção paralela, obtendo-se tiras com largura igual a 15 mm e comprimento igual a 250 mm. Foram dispostas sobre uma superfície impermeável para aplicação do adesivo sobre as mesmas, com o auxílio de um pincel. Retirou-se o ar do material com a utilização de um rolo de desaeração.

O procedimento foi repetido, para a laminação da segunda camada de fibra, obtendo-se um compósito de fibras reforçadas com polímero. A quantidade de adesivo utilizada foi cerca de 3,2 gramas por corpo-de-prova. Este procedimento foi adotado para os adesivos epóxi, cascophen e mamona.

A figura 17 ilustra o procedimento descrito, mostrando a laminação das fibras de vidro com resina epóxi. A figura 18 mostra os corpos-de-prova de fibras de carbono feitos com resina epóxi.

FIGURA 17: Laminação de corpos-de-prova de fibras de vidro com resina epóxi

FIGURA 18: Corpos-de-prova de fibras de carbono laminados com duas camadas de tecido

3.1.3 Equipamentos utilizados no ensaio

As dimensões, largura e espessura, foram determinadas com paquímetro digital com resolução de centésimos de milímetro.

Os ensaios preliminares foram realizados utilizando máquina universal de ensaios, marca AMSLER, com capacidade para 250 kN. Os ensaios principais foram realizados na máquina universal de ensaios, marca DARTEC; com capacidade para 100 kN, servocontrolada, conectada a um computador que, por meio de um software específico, gerencia as operações do atuador e registra automaticamente os valores de força, deslocamentos e deformações.

As medidas de deformações foram feitas por meio de extensômetros elétricos do tipo “Clip-gage” marca Dartec, modelo EXA 50-5, amplitude de deslocamentos igual a ± 5 mm, erro de medida $\pm 0,2$ %. As deformações foram obtidas em um comprimento de 25 mm, posicionado na região central do corpo-de-prova. Para evitar danos no equipamento, foram medidos valores de deformação até a aproximadamente 50% do valor da força máxima.

3.1.4 Determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade

Na determinação das tensões atuantes foram utilizadas duas maneiras para o

cálculo da área da seção transversal dos corpos-de-prova laminados: a primeira considera a espessura final da seção transversal do corpo-de-prova (método A); a segunda considera a espessura das fibras utilizadas (método B), que são: $e = 0,20$ mm (fibras de vidro), $e = 0,25$ mm (fibras de carbono).

Assim, são determinados dois valores para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade.

3.1.5 Ensaio realizado

O ensaio de tração foi realizado com corpos-de-prova laminados com adesivo de mamona, cascophen e resina epóxi AR-300. A figura 19 ilustra o corpo-de-prova sendo ensaiado na máquina de ensaio DARTEC.

FIGURA 19: Ensaio de tração em fibras de carbono

Um segundo tipo de ensaio de tração, realizado com tecido unidirecional de fibras de vidro, objetivava caracterizar este material quanto à resistência e rigidez, determinando apenas as propriedades das fibras, desconsiderando a influência do adesivo. Neste caso, a laminação com resina epóxi, foi realizada apenas na parte da aba do material, para facilitar o ensaio e impedir o esmagamento das fibras na região da garra. A figura 20 ilustra os corpos-de-prova com laminação apenas na aba.

FIGURA 20: Corpos-de-prova de fibras de vidro sem laminação

A tabela 09 apresenta informações referentes aos corpos-de-prova ensaiados: materiais empregados na confecção; número de camadas de fibras utilizadas na laminação e quantidade.

Optou-se por realizar os ensaios preliminares apenas com tecido de fibras de vidro devido ao custo deste material ser aproximadamente vinte vezes menor às fibras de carbono.

Para avaliar a influência do número de camadas do tecido na resistência e na rigidez, foram realizados ensaios de tração para corpos-de-prova com duas, quatro e seis camadas, utilizando o adesivo epóxi.

TABELA 09: Informações referentes aos corpos-de-prova ensaiados

Materiais utilizados	Número de camadas de fibras	Quantidade de corpos-de-prova
Fibras de vidro – mamona*	1	3
Fibras de vidro – cascophen*	1	3
Fibras de vidro – epóxi*	1	3
Fibras de vidro - epóxi	2	12
Fibras de vidro - epóxi	4	12
Fibras de vidro - epóxi	6	10
Fibras de vidro sem adesivo	1	12
Fibras de carbono – epóxi	2	12
Fibras de carbono – epóxi	4	12
Fibras de carbono - epóxi	6	12

* ensaios preliminares

3.2 Resultados obtidos

3.2.1 Ensaios preliminares (corpos-de-prova com adesivo de mamona, cascophen e epóxi)

Os resultados dos ensaios de tração realizados nos tecidos unidirecionais de fibras de vidro laminados com adesivo de mamona, cascophen e epóxi são apresentados nas tabelas 10, 11 e 12 respectivamente. Estes ensaios iniciais foram realizados na máquina de ensaio AMSLER (controle manual), obtendo-se apenas o valor da força de ruptura. Para o cálculo da resistência a tração, considerou-se a espessura das fibras (método B).

TABELA 10: Resistência à tração de fibras de vidro laminada com adesivo de mamona

Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência à Tração (MPa)
1	0,20	16,95	3,39	1915	565
2	0,20	15,84	3,168	1438	454
3	0,20	16,22	3,244	1346	415

TABELA 11: Resistência à tração de fibras de vidro laminada com cascophen

Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência à Tração (MPa)
1	0,20	15,85	3,17	2060	650
2	0,20	15,63	3,126	2141	685
3	0,20	16,72	3,344	1990	595

TABELA 12: Resistência à tração de fibras de vidro laminada com epóxi

Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência à Tração (MPa)
1	0,20	16,47	3,28	3806	1160
2	0,20	16,36	3,27	3985	1218
3	0,20	16,12	3,22	3725	1157

3.2.2 Ensaaios principais

3.2.2.1 Corpos-de-prova laminados com resina epóxi

As tabelas 13, 14 e 15 apresentam os resultados obtidos para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade, determinados de duas formas distintas, de acordo com o especificado no item 3.1.5. Estes corpos-de-prova foram laminados com duas, quatro e seis camadas de fibras respectivamente.

3.2.2.2 Corpos-de-prova sem adesivo

A tabela 16 apresenta os resultados obtidos para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade nos corpos-de-prova feitos com uma camada de fibras de vidro sem adesivo, neste caso os corpos-de-prova possuíam apenas uma lâmina.

3.2.2.3 Corpos-de-prova de fibras de carbono laminados com resina epóxi

As tabelas 17, 18 e 19 apresentam os resultados obtidos para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade de corpos-de-prova feitos com duas, quatro e seis camadas de fibras de carbono, laminados com resina epóxi.

TABELA 13: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (duas camadas de tecido)

Tecido unidirecional de fibras de vidro										
Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo-de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade(MPa)	
							Método A	Método B	Método A	Método B
1	0,40	1,19	16,69	6,676	19,86	6790	341	1017	29658	72505
2	0,40	1,13	17,41	6,964	19,36	8396	434	1205	27771	68643
3	0,40	1,23	16,95	6,78	20,85	7778	373	1147	32065	75349
4	0,40	1,17	16,37	6,548	19,15	7515	392	1148	31536	79959
5	0,40	1,00	17,14	6,856	17,14	8194	478	1195	30265	74516
6	0,40	1,21	16,91	6,764	20,46	8281	405	1224	30248	72465
7	0,40	1,01	16,38	6,552	16,54	6847	422	1045	27366	66371
8	0,40	1,05	16,85	6,740	17,69	8274	465	1228	29985	73925
9	0,40	1,12	17,26	6,904	19,33	8076	417	1170	27955	69887
10	0,40	1,25	17,86	7,144	22,32	8304	372	1162	27436	68589
11	0,40	1,08	17,96	7,184	19,39	8087	417	1126	27840	69599
12	0,40	1,15	18,31	7,324	21,05	8525	405	1164	28127	70317

TABELA 14: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (quatro camadas de tecido)

Tecido unidirecional de fibras de vidro										
Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo-de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade(MPa)	
							Método A	Método B	Método A	Método B
1	0,8	2,08	15,88	12,704	33,030	15120	458	1190	26300	69800
2	0,8	2,15	15,42	12,336	33,153	15000	452	1216	26016	69917
3	0,8	2,07	15,15	12,12	31,361	12554	400	1036	26865	69513
4	0,8	2,05	15,29	12,232	31,345	13780	440	1127	27916	71534
5	0,8	2,05	15,32	12,256	31,406	15079	480	1230	28896	74045
6	0,8	2,08	15,19	12,152	31,595	15290	484	1258	29118	75708
7	0,8	2,03	15,70	12,56	31,871	14080	442	1121	28631	72651
8	0,8	2,17	15,15	12,12	32,876	14332	436	1183	26235	71163
9	0,8	1,95	15,07	12,056	29,387	14700	500	1219	31052	75688
10	0,8	1,96	15,28	12,224	29,949	12413	414	1015	25460	62377
11	0,8	2,13	15,37	12,296	32,738	15030	459	1222	33600	89460
12	0,8	2,03	15,23	12,184	30,917	14600	472	1198	28868	73252

TABELA 15: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (seis camadas de tecido)

Tecido unidirecional de fibras de vidro										
Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo-de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade(MPa)	
							Método A	Método B	Método A	Método B
1	1,2	2,95	15,95	19,14	47,05	18039	383	942	27150	71240
2	1,2	3,19	15,96	19,15	50,91	20100	395	1049	26762	71141
3	1,2	3,06	15,58	18,69	47,67	18690	392	1000	27268	69534
4	1,2	3,16	15,50	18,60	48,98	20680	422	1112	27715	72984
5	1,2	3,03	15,16	18,19	45,93	19310	420	1061	28029	70773
6	1,2	3,21	15,57	18,68	49,98	21250	425	1137	27261	72923
7	1,2	3,26	15,51	18,61	50,56	19485	385	1047	26032	70721
8	1,2	2,88	15,56	18,67	44,81	20660	461	1106	29344	70426
9	1,2	2,91	15,79	18,95	45,95	20080	437	1060	31013	75206
10	1,2	3,27	15,32	18,38	50,10	21120	422	1149	27297	74385

TABELA 16: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro sem laminação (uma camada de tecido)

Tecido unidirecional de fibras de vidro							
Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo-de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	F _{t0} (espessura da fibras) (MPa)	E (espessura da fibras) (MPa)
1	0,20	14,99	2,998	14,99	1579	526	69277
2	0,20	14,00	2,80	14,00	1789	639	64945
3	0,20	14,64	2,93	14,64	1400	478	75531
4	0,20	14,97	2,99	14,97	1617	541	61385
5	0,20	15,87	3,17	15,87	1834	578	77553
6	0,20	13,97	2,79	13,97	1743	625	70412
7	0,20	13,58	2,72	13,58	1808	665	67973
8	0,20	14,64	2,93	14,64	1609	349	61804
9	0,20	15,37	3,074	15,37	1773	577	75071
10	0,20	14,31	2,86	14,31	1659	580	73913
11	0,20	14,90	2,98	14,90	1569	526	68720
12	0,20	14,17	2,83	14,17	1579	558	68215

TABELA 17: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de carbono (duas camadas de tecido)

Tecido unidirecional de fibras de carbono										
Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo-de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade(MPa)	
							Método A	Método B	Método A	Método B
1	0,50	1,33	16,93	8,465	22,51	21145	939	2498	61084	166895
2	0,50	1,56	16,94	8,470	26,42	21076	798	2488	48826	151540
3	0,50	1,62	16,86	8,430	27,31	17681	647	2097	50805	162952
4	0,50	1,68	16,75	8,375	28,14	19146	680	2286	50043	161320
5	0,50	1,57	17,01	8,505	26,70	19837	743	2332	49625	155537
6	0,50	1,65	16,86	8,430	27,82	20218	727	2398	55830	157486
7	0,50	1,37	16,87	8,435	23,11	21805	943	2585	57118	157017
8	0,50	1,30	16,91	8,455	21,98	19210	874	2272	61191	157674
9	0,50	1,49	15,92	7,960	23,72	22454	946	2656	60603	180775
10	0,50	1,33	16,95	8,475	22,54	21660	961	2556	61453	157941
11	0,50	1,28	16,84	8,420	21,55	21066	977	2503	62761	160761
12	0,50	1,34	16,63	8,315	22,28	21187	951	2510	58910	157931

TABELA 18: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de carbono (quatro camadas de tecido)

Tecido unidirecional de fibras de carbono										
Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo-de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade(MPa)	
							Método A	Método B	Método A	Método B
1	1	2,36	15,37	15,37	36,27	35000	965	2277	82706	195185
2	1	2,38	15,71	15,71	37,39	34320	918	2184	77561	184586
3	1	2,47	15,38	15,38	37,99	33680	886	2190	72390	178804
4	1	2,36	15,07	15,07	35,56	34120	959	2264	73808	174187
5	1	2,54	15,56	15,56	39,52	34340	869	2207	69581	176735
6	1	2,41	14,93	14,93	35,98	33020	918	2212	75039	180844
7	1	2,34	15,32	15,32	35,85	34620	966	2260	76014	177872
8	1	2,8	16,76	16,76	46,93	32090	895	1915	59131	165573
9	1	2,6	16,51	16,51	42,93	33700	785	2041	65222	169594
10	1	2,73	16,20	16,20	44,23	34660	784	2139	63305	172839

TABELA 19: Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de carbono (seis camadas de tecido)

Tecido unidirecional de fibras de carbono										
Corpo-de-prova	Espessura da fibras (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo-de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade(MPa)	
							Método A	Método B	Método A	Método B
1	1,5	3,57	16,01	24,015	57,156	42650	746	1776	67358	160316
2	1,5	3,44	15,76	23,64	54,214	43570	804	1843	69170	158629
3	1,5	3,47	15,42	23,13	53,507	45910	858	1984	71486	165369
4	1,5	3,43	15,78	23,67	54,125	45770	846	1933	69284	158428
5	1,5	3,39	15,67	23,505	53,121	47320	891	2013	72005	162731
6	1,5	3,42	15,42	23,13	52,736	42430	805	1834	72531	165369
7	1,5	3,46	15,68	23,52	54,253	43840	808	1863	72346	166879
8	1,5	3,41	15,45	23,175	52,685	43780	831	1889	71652	162891
9	1,5	3,51	15,94	23,91	55,949	44980	804	1881	71047	166248
10	1,5	3,54	15,47	23,205	54,764	45500	832	1960	69388	163758

3.3 Análise dos resultados

3.3.1 Comparação da eficiência dos adesivos na laminação dos corpos-de-prova (ensaios preliminares)

Os adesivos de mamona e Cascophen não apresentaram bons resultados no processo de laminação. Uma avaliação visual identificou que ambos adesivos não reagem com as fibras, apenas criam uma camada de cola superficial. Foi possível perceber vazios de adesivo entre as fibras. As figuras 21 e 22 ilustram corpo-de-prova de fibras de vidro laminado com cascophen e adesivo de mamona.

FIGURA 21: Corpo-de-prova de fibras de vidro laminado com cascophen.

FIGURA 22: Corpo-de-prova de fibras de vidro laminado com adesivo de mamona.

O adesivo epóxi foi o que apresentou melhores resultados no processo de laminação. A figura 23 mostra os corpos-de-prova de fibras de carbono e fibras de vidro laminados com adesivo epóxi.

FIGURA 23: Corpos-de-prova de fibras de carbono e de fibras de vidro laminados com epóxi.

A tabela 20 apresenta a média e o coeficiente de variação dos resultados da resistência à tração, relacionados nas tabelas 10, 11 e 12 do item 3.1.1.

TABELA 20: Valores médios e coeficientes de variação da resistência à tração de fibras de vidro

	Tipo de adesivo		
	Mamona	Cascophen	Epóxi
Valor médio da resistência à tração (MPa)	478	640	1178
Coeficiente de variação (%)	16,3	7,1	1,9

Os resultados mostrados na tabela 20 indicam que o adesivo epóxi é o que apresenta melhores resultados para laminação de fibras de vidro.

3.3.2 Resistência à tração e módulo de elasticidade para fibras de carbono e

fibras de vidro laminadas com adesivo epóxi

As tabelas 21 a 26 apresentam, respectivamente, os resultados da média e do coeficiente de variação da resistência a tração e do módulo de elasticidade de fibras de vidro e fibras de carbono laminadas com adesivo epóxi correspondentes aos resultados apresentados nas tabelas 13, 14, 15, 17, 18, 19.

TABELA 21: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de vidro laminadas (2 lâminas de fibras)

	Resistência		Módulo de elasticidade	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Média (MPa)	410	1153	29187	71844
Coeficiente de variação (%)	9,0	5,4	5,4	4,9

TABELA 22: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de vidro laminadas (4 lâminas de fibras)

	Resistência		Módulo de elasticidade	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Média (MPa)	453,2	1168	28423	73210
Coeficiente de variação (%)	6,1	6,3	7,9	8,2

TABELA 23: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de vidro laminadas (6 lâminas de fibras)

	Resistência		Módulo de elasticidade	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Média (MPa)	414	1066	27787	71933
Coeficiente de variação (%)	5,7	5,6	4,8	2,4

TABELA 24: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de carbono laminadas (2 lâminas de fibras)

	Resistência		Módulo de elasticidade	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Média (MPa)	849	2432	56521	160652
Coeficiente de variação (%)	13,8	6,2	9,0	4,4

TABELA 25: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de carbono laminadas (4 lâminas de fibras)

	Resistência		Módulo de elasticidade	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Média (MPa)	894,5	2169	71276	177622
Coefficiente de variação (%)	7,1	4,9	9,4	4,4

TABELA 26: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de carbono laminadas (6 lâminas de fibras)

	Resistência		Módulo de elasticidade	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Média (MPa)	822,5	1897,6	70627	163062
Coefficiente de variação (%)	4,5	3,7	2,3	1,8

Analisando as tabelas 24, 25, e 26, pode-se dizer que os valores médios da resistência à tração e do módulo de elasticidade dos tecidos de fibras de carbono são aproximadamente 100% maiores que os das fibras de vidro, para duas camadas de fibras.

Para fibras de vidro a variação do número de camadas de fibra não interfere no valor da resistência, a qual permanece constante.

Para as fibras de carbono, o aumento não foi proporcional, pois ocorria ruptura prematura do corpo-de-prova próximo a garra e também porque a força envolvida era bastante superior em relação a força necessária para romper corpos-de-prova com duas camadas de fibras. O valor da resistência para corpos-de-prova com seis camadas foi aproximadamente 25% inferior ao valor da resistência dos corpos-de-prova confeccionados com duas lâminas de fibras.

Observa-se, também, uma maior uniformidade nos valores calculados a partir do método B, que considera a espessura das fibras. Notou-se que a espessura do corpo-de-prova laminado apresenta variações. Assim, parece mais interessante obter os resultados

em função da espessura das fibras, com o intuito de especificar o reforço em termos do número de camadas.

O gráfico da figura 24, que representa a força aplicada em relação ao deslocamento da cabeça do pistão da máquina de ensaios, permite comparar as forças máximas resistidas pelos corpos-de-prova de fibras de vidro e de fibras de carbono (duas camadas de tecido) laminados com resina epóxi.

FIGURA 24: Gráfico comparativo entre forças máximas resistidas por corpos-de-prova de fibras de carbono e de fibras de vidro

As figuras 25 e 26 apresentam gráficos ilustrativos de tensão por deformação para cada uma das fibras. No cálculo da tensão, foi considerada a espessura das fibras.

FIGURA 25: Curva tensão x deformação fibras de vidro laminadas

FIGURA 26: Curva tensão deformação fibras de carbono laminadas

3.3.3 Fibras de vidro sem adesivo

A tabela 27 apresenta os resultados da média e do coeficiente de variação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de fibras de vidro sem adesivo.

TABELA 27: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade de fibras de vidro sem adesivo

	Resistência	Módulo de elasticidade
Média (MPa)	553	69566
Coeficiente de variação (%)	14,4	7,2

Os valores de resistência à tração para corpos-de-prova sem adesivo são aproximadamente 50% menores que os encontrados para corpos-de-prova laminados com adesivo epóxi e também que os resultados apresentados na literatura. Esse resultado evidencia que o adesivo proporciona um aumento na resistência do material, principalmente na fase de ruptura, por proporcionar distribuição de tensões mais uniforme entre as várias fibras.

Comparando os resultados obtidos para o módulo de elasticidade de fibras de vidro laminadas e fibras de vidro sem laminação, percebe-se que não há uma grande variação entre eles pois os mesmos foram determinados na fase elástica. Porém, o

coeficiente de variação dos resultados obtidos para os corpos-de-prova laminados é inferior ao dos corpos-de-prova sem laminação. Provavelmente, isto se deve a existência do adesivo que transfere de forma mais uniforme os esforços aplicados no material.

4 – AVALIAÇÃO DE ADESIVOS NA INTERFACE FIBRA MADEIRA

Este capítulo apresenta a avaliação dos adesivos a base de mamona, cascophen e epóxi na interface fibra madeira, objetivando avaliar a eficiência dos respectivos adesivos na fixação de fibras de vidro à madeira.

4.1 Materiais e métodos

Foram realizados ensaios de tração, para verificar a eficiência dos adesivos na interface fibra madeira. Confeccionaram-se corpos-de-prova de madeira, previamente cortados na direção transversal. A ligação entre as duas partes do corpo-de-prova foi feita com fibras de vidro cortadas com comprimentos de aproximadamente 7 cm e largura 1,5 cm (área de cola aproximadamente igual a 10,5 cm²), laminadas com adesivo. Este comprimento foi definido a partir de ensaios preliminares realizados com madeira da espécie Eucalipto Grandis, de forma a garantir ruptura por cisalhamento na interface de colagem.

4.1.1 Confeção dos corpos-de-prova

O ensaio foi realizado com corpos-de-prova de madeira da espécie Pinus elliottii (Pinus elliotti) e Eucalipto Grandis (Eucalyptus grandis), com forma semelhante aos utilizados nos ensaios de tração paralela às fibras, especificados no anexo B da norma NBR (7190/97) - Projetos de Estruturas de Madeira.

Os adesivos verificados foram: adesivo à base de mamona, Cascophen e adesivo epóxi AR 300. A figura 27 ilustra o procedimento de colagem das fibras de vidro nos

corpos-de-prova de madeira.

FIGURA 27: Colagem de fibras de vidro nos corpos-de-prova de madeira adesivo cascophen

4.1.2 Ensaio realizado

O ensaio de tração para verificar a eficiência do adesivo junto à madeira foi realizado na máquina de ensaio Dartec, com velocidade constante de deformação igual a 2mm/min.

Com este ensaio foi possível medir o valor da força máxima necessária para que ocorresse cisalhamento na linha de cola entre fibra e madeira. A figura 28 ilustra o respectivo ensaio.

FIGURA 28: Ensaio de tração em corpos-de-prova de madeira (adesivo de mamona)

Foram ensaiados 36 corpos-de-prova de Pinus e 36 corpos-de-prova de Eucalipto. Para estes corpos-de-prova, variou-se apenas o tipo de adesivo. Como a área de colagem é igual para todos, os resultados obtidos podem ser comparados diretamente

com a força de ruptura obtida nos ensaios.

4.2 Resultados obtidos

Os valores das forças de ruptura obtidos nos ensaios são apresentados na tabela 28.

Para os corpos-de-prova de Eucalipto grandis, a forma de ruptura observada em todos os ensaios foi de cisalhamento na interface madeira fibra.

Para os corpos-de-prova de Pinus, a ruptura por cisalhamento ocorreu apenas com os adesivos de mamona e Cascophen. Para o adesivo epóxi, observou-se a ruptura por tração da madeira, em todos os corpos-de-prova conforme mostra a figura 29.

TABELA 28: Valores das forças máximas resistidas pelos adesivos na interface fibra madeira

Corpo de Prova	Área de colagem (cm ²)	Força máxima Pinus (kN)			Força máxima Eucalipto (kN)		
		Cascophen	Mamona	Epóxi	Cascophen	Mamona	Epóxi
1	10,50	7,07	4,06	7,46	5,83	2,89	13,91
2	10,50	6,95	3,94	7,29	4,70	2,21	13,05
3	10,50	5,41	5,58	9,86	4,68	2,77	13,35
4	10,50	6,06	5,10	6,88	3,54	3,09	14,49
5	10,50	6,59	4,14	8,55	5,34	2,16	13,37
6	10,50	5,72	3,41	10,10	5,13	3,06	13,72
7	10,50	6,19	3,65	7,89	4,30	2,16	14,22
8	10,50	5,25	4,03	10,40	4,46	2,19	14,59
9	10,50	3,02	3,51	11,18	4,90	2,91	15,06
10	10,50	6,38	4,38	10,97	3,72	3,90	13,69
11	10,50	5,33	3,75	8,87	3,91	2,66	13,10
12	10,50			7,83	3,63		15,13

Observa-se que na tabela 28, os valores referentes ao corpo-de-prova de número 12, não são apresentados, pois o mesmo apresentou problemas durante o ensaio.

FIGURA 29 Formas de ruptura para adesivo epóxi – ruptura na madeira (Pinus) e ruptura por cisalhamento (Eucalipto)

A figura 30 apresenta corpos-de-prova de Eucalipto nos quais ocorreu cisalhamento na interface fibra madeira.

FIGURA 30: Formas de ruptura para adesivo de mamona e cascophen

4.3 Análise dos resultados

A tabela 29 apresenta os valores médios e o coeficiente de variação das forças de cisalhamento na interface fibra madeira.

TABELA 29: Valores médios e coeficiente de variação das forças de cisalhamento

	Força máxima Pinus (kN)			Força máxima Eucalipto (kN)		
	Mamona	Cascophen	Epóxi	Mamona	Cascophen	Epóxi
Média (MPa)	4,41	5,42	8,94	2,73	4,71	13,97
Coefficiente de variação (%)	16%	19%	17%	19%	16%	5%

Os valores médios de força de tração apresentados no item 4.3 estão ilustrados nas figuras 31 e 32.

FIGURA 31: Comparação da resistência dos adesivos em corpos-de-prova de Pinus elliotti

FIGURA 32: Comparação da resistência dos adesivos em corpos-de-prova de Eucalipto Grandis

Pode-se constatar, a partir dos dados apresentados na tabela 29, que os corpos-de-prova de Pinus suportam uma força maior na interface fibra – madeira quando são

utilizados os adesivos de mamona e Cascophen, em comparação aos corpos-de-prova de Eucalipto. Esta diferença ocorre por se tratar de madeira com diferentes densidades: o Eucalipto grandis possui densidade, a 12% de umidade, de ($\rho=640 \text{ kg/m}^3$); o Pinus elliotti ($\rho=560 \text{ kg/m}^3$), de acordo com a referência da NBR 7190/97. Usualmente, madeiras menos densas são mais aptas à colagem.

Pode-se observar, também, que os corpos-de-prova de Eucalipto, confeccionados com adesivo de mamona e Cascophen, suportaram uma força de tração aproximadamente três vezes menor que a força resistida pelos corpos-de-prova feitos com adesivo epóxi.

A diferença entre os valores de resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova de Pinus laminados com adesivo epóxi não foi tão significativa como no caso dos corpos-de-prova de Eucalipto. Isto ocorreu devido ao aumento na resistência dos adesivos à base de mamona e Cascophen para o Pinus, pelos motivos já observados, aliados ao fato da ruptura observada, no caso do adesivo epóxi, ter sido na madeira.

5 – MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO E ANÁLISE DE VIGAS REFORÇADAS COM FIBRA

Para a análise da rigidez de vigas de madeira será utilizado o método da seção transformada, o qual conduz a bons resultados. Já com relação à determinação do momento último, o método de dimensionamento apresentado na revisão bibliográfica, segundo os dados apresentados por Belperio; Grad (1999), conduz a resultados superiores aos determinados experimentalmente. Dessa forma foi desenvolvido um modelo mais preciso, considerando a compatibilidade de deformações entre os diferentes elementos que compõem a seção.

Será apresentado, também, uma avaliação teórica do comportamento das vigas reforçadas, quanto a resistência e a rigidez, utilizando estes modelos de cálculo.

5.1 Introdução

O desenvolvimento de um modelo de cálculo para o caso de vigas de madeira reforçadas com fibras é importante para a utilização correta e segura do material em reforço e recuperação de estruturas. Também possibilita ampliação do seu uso na construção civil.

A norma NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira está baseada no Método dos Estados Limites para verificação da segurança estrutural. Para o caso específico das vigas, os seguintes estados limites devem ser verificados:

- estado limite de utilização, referente ao deslocamento vertical (flecha) máximo;
- estado limite último referente às tensões normais devidas ao momento fletor;

- estado limite último referente às tensões tangenciais devidas ao esforço cortante.

Para a verificação do estado limite de utilização, os deslocamentos verticais serão determinados a partir da rigidez à flexão avaliada segundo um modelo elástico linear de cálculo (método da seção transformada).

Para a determinação do momento fletor último será utilizado um modelo teórico que considera comportamento elasto-plástico para a madeira solicitada à compressão, e comportamento elasto-frágil para a madeira tracionada e para a fibra de reforço.

Na avaliação da resistência quanto ao esforço cortante, será desprezada a contribuição da fibra, considerando-se a peça de madeira como sendo responsável pela absorção total deste esforço.

5.2 Análise da rigidez à flexão das vigas

A seguir é apresentado um modelo teórico de cálculo da rigidez de vigas de madeira reforçadas com fibra utilizando o método da seção transformada.

5.2.1 Cálculo da seção transformada

A determinação da rigidez teórica de vigas de madeira constituiu em avaliar vigas com seção retangular (b x h) reforçadas com fibra.

As vigas de madeira, sem reforço, apresentam momento de inércia (I) igual a:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

As vigas reforçadas serão analisadas de acordo com a teoria clássica da flexão, que considera os alongamentos e encurtamentos das fibras longitudinais proporcionais

às suas distâncias ao eixo neutro, considerando o material no regime elástico linear. Para este tipo de viga, constituída por dois materiais diferentes basta determinar a seção equivalente da viga idealizada constituída por apenas um dos materiais. A seção retangular mostrada na figura 33 (a), constituída por madeira (material 1) e fibra (material 2) ilustra este modelo. Para o reforço de fibra será estabelecida largura igual à da viga de madeira e espessura “e”.

FIGURA 33: Viga constituída por dois materiais diferentes (a) e seção equivalente (b)

A seção transversal equivalente, apresentada na figura 33 (b), é considerada como sendo constituída apenas pelo material 1 (madeira). A largura b' é determinada pelo produto da relação dos módulos de elasticidade da fibra (E_2) e da madeira (E_1) pela largura b .

$$b' = b \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (2)$$

Para a seção equivalente, foi determinada a posição do centro de gravidade da peça (y_{cg}), cotado em relação à borda superior da viga de madeira.

$$y_{cg} = \frac{(b \cdot h) \cdot (h/2) + (b \cdot E_2 \cdot e / E_1) \cdot (h + e/2)}{(b \cdot h) + (b \cdot e \cdot E_2 / E_1)} \quad (3)$$

Chamando de n a relação entre a espessura da fibra e a altura da viga ($n = e/h$), obtêm-se:

$$y_{cg} = \frac{(h/2 + (1 + n/2) \cdot (n \cdot E_2 / E_1))}{(1 + (n \cdot E_2 / E_1))} \quad (4)$$

O valor do momento de inércia para a seção equivalente da viga com reforço (I_r) é dado por:

$$I_r = \frac{bh^3}{12} + bh(y_{cg} - h/2)^2 + \frac{b \cdot E_2 \cdot e^3}{E_1 \cdot 12} + b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot e \cdot (e/2 + (h - y_{cg}))^2 \quad (5)$$

$$I_r = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_{cg} - h/2)^2 + \frac{b \cdot E_2 \cdot n \cdot h^3}{E_1 \cdot 12} + b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot n \cdot h \cdot (n \cdot h/2 + h - y_{cg})^2 \quad (6)$$

5.2.2 Análise da eficiência do reforço

O aumento da rigidez à flexão de vigas reforçadas, em comparação com as vigas sem reforço, será determinado por meio da relação entre os momentos de inércia:

$$\frac{I_r}{I} = \frac{h^3/12 + h \cdot (y_{cg} - h/2)^2 + E_2 \cdot (n \cdot h)^2 / 12 \cdot E_1 + E_2 \cdot (n \cdot h) / E_1 (n \cdot h + h - y_{cg})^2}{(h^3/12)} \quad (7)$$

As figuras 34 e 35 mostram a relação entre os momentos de inércia de vigas de madeira com reforço e sem reforço, em função do número de camadas de fibra. Para estes cálculos foram consideradas vigas de madeira com três diferentes tipos de densidade, baixa, média e alta, com seção (6x12 cm, 6x16 cm e 6x20 cm). As espécies adotadas na análise são *Pinus hondurensis* (*Pinus caribea* var. *Hondurensis*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*) e Jatobá (*Hymenaea* spp). Os valores dos módulos de elasticidade das fibras e da madeira utilizados nos cálculos estão apresentados na tabela

30, estes últimos foram retirados na norma NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira. Para os tecidos de fibra de vidro e de fibra de carbono os valores apresentados são os determinados no capítulo 03.

Os cálculos do momento de inércia foram feitos considerando apenas a espessura da fibra, não foi considerado o acréscimo na espessura devido à aplicação do adesivo.

TABELA 30: Valores de elasticidade e resistência

	Pinus caribea var. hondurensis	Eucalipto grandis	Jatobá		Fibras	
					Vidro	Carbono
E (MPa)	9.868	12.513	23.607	E (GPa)	70	170
f_{co} (MPa)	42,3	40,3	93,3	f_t (GPa)	1.200	2.400
f_{to} (MPa)	50,3	70,2	157,5			
r (g/cm³)	0,535	0,640	1,074	r (g/cm³)	2,2	1,4

FIGURA 34: Variação do momento de inércia - reforço com fibra vidro

FIGURA 35: Variação do momento de inércia reforço com fibra de carbono

5.2.3 Comentários

Observando as figuras 34 e 35 pode-se avaliar o aumento do momento de inércia em função da espessura da fibra. O maior aumento ocorre para as vigas reforçadas com fibra de carbono, devido ao seu maior módulo de elasticidade. Este aumento fica em torno de 70% para vigas de madeira de baixa densidade reforçadas com dez camadas de fibra.

Para as vigas reforçadas com fibra de vidro, o maior aumento do momento de inércia para vigas de baixa densidade é de aproximadamente 35%. Observa-se também que, para vigas de madeira com alta densidade e alto módulo de elasticidade, o aumento da inércia de vigas reforçadas é muito inferior ao observado para madeira de baixa densidade.

5.3 Análise da resistência

Para a determinação do momento fletor último será utilizado um modelo teórico que considera comportamento elasto-plástico para a madeira solicitada à compressão, e comportamento elasto-frágil para a madeira tracionada e para a fibra de reforço.

5.3.1 Cálculo do momento fletor último

Para a avaliação do momento fletor último será considerado os estados limites de ruptura por tração e por compressão da madeira. Este modelo é obtido a partir da hipótese de Navier/Bernoulli (seções planas permanecem planas após a deformação), conforme ilustra a figura 36.

FIGURA 36: Diagrama de deformação na seção transversal

O valor do estado limite de compressão foi estipulado até o ponto que o corpo-de-prova possa absorver esforços. Este valor foi avaliado experimentalmente em ensaios de compressão paralela às fibras. A figura 37 apresenta um dos ensaios realizados, mostrando o diagrama tensão x deformação. A relação entre a deformação total (ϵ_2) e a deformação na fase elástica do modelo elastoplástico (ϵ_1) idealizado é denominada como "k".

FIGURA 37: Diagrama $\sigma \times \epsilon$ na compressão paralela às fibras

Para a madeira tracionada e para o reforço de fibra é considerado um comportamento elasto-frágil, admitindo-se que a deformação específica máxima da madeira é igual à da fibra. Então, a relação entre a máxima tensão atuante na fibra e a máxima tensão atuante na madeira é igual à relação entre os módulos de elasticidade da fibra e da madeira. Como esta relação sempre é muito inferior à relação observada para a resistência à tração da fibra e da madeira, pode-se concluir que a ruptura por tração sempre ocorrerá na madeira.

A seguir são apresentadas as deduções das expressões para avaliação do momento fletor último, considerando os estados limites de compressão e de tração na madeira. Obviamente, o momento fletor último deve ser avaliado pela expressão que fornecer o menor valor.

Para as duas avaliações (ruptura por compressão ou por tração), são feitas as seguintes considerações:

a) para $\epsilon_1 \leq \epsilon \leq \epsilon_2$, a tensão de compressão na madeira é igual a:

$$\sigma_c = f_{c0} \quad (8)$$

b) a deformação na fibra é igual à deformação máxima de tração na madeira, desprezando-se a variação da deformação ao longo da espessura da fibra.

Foram estabelecidas as seguintes denominações:

C1 e C2 – Forças de compressão resultantes na madeira;

TM – Força de tração resultante na madeira

TF – Força de tração na fibra

h – altura da viga

e – espessura da fibra

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras da madeira

f_{t0} – resistência à tração paralela às fibras da madeira

E_c – módulo de elasticidade à compressão paralela da madeira

E_t – módulo de elasticidade à tração paralela da madeira

E_f – módulo de elasticidade à tração da fibra

$$s = \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m}$$

$$p = \frac{f_{t0}}{E_t \cdot m}$$

5.3.1.1 Modo de ruptura: compressão

Considera-se atingido o estado limite último na compressão quando a máxima deformação na parte comprimida atingir o valor ϵ_2 . A partir das relações estabelecidas entre tensões e deformações, a figura 38 apresenta a distribuição de tensões quando este limite é atingido, bem como as forças resultantes destas tensões e suas posições:

FIGURA 38: Distribuição de tensões na seção transversal (ruptura por compressão)

O valor das forças resultantes de compressão e de tração é igual a:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= f_{c0} \cdot b \cdot s \cdot (k-1) \\
 C_2 &= f_{c0} \cdot \frac{b \cdot s}{2} \\
 T_m &= \frac{b}{2} \cdot (h-ks) \cdot E_t \cdot \left(m \cdot h - \frac{kf_{c0}}{E_c} \right) \\
 T_f &= b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(m \cdot h - \frac{kf_{c0}}{E_c} \right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

A partir da condição de equilíbrio de forças horizontais, substituindo os valores de "s" na equação 9 e rearranjando os termos, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 m^2 \cdot (h^2 E_t E_c^2 + 2 E_c^2 E_f e h) + m(-2 h E_t k f_{c0} E_c - 2 E_c e E_f k f_{c0}) + \\
 (k^2 f_{c0}^2 E_t - 2 E_c f_{c0}^2 (k-1) - (E_c f_{c0}^2)) = 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

Após a determinação de "m", por meio da equação 10, pode ser avaliado o valor

do momento resistente, a partir da soma dos momentos das forças. Foi adotada a posição da linha neutra para se fazer à somatória das forças envolvidas no problema, obtendo-se:

$$\begin{aligned}
 M_c = & \left[b \cdot \frac{f_{c0}^2}{E_c \cdot m} \cdot (k-1) \right] \cdot \left[\left(-\frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} + \left(\frac{f_{c0}}{2 \cdot E_c \cdot m} \cdot (k-1) \right) \right) \right] + \left[\left(\frac{f_{c0}^2 \cdot b}{2 E_c \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] + \\
 & \left[\frac{b}{2} \cdot \left(h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot E_t \cdot \left(mh - \frac{k f_{c0}}{E_c} \right) \cdot \left(h - \frac{k f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] + \\
 & \left[b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(mh - \frac{k f_{c0}}{E_c} \right) \cdot \left(h + \frac{e}{2} - \frac{k f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right]
 \end{aligned} \quad (11)$$

5.3.1.2 Modo de ruptura - tração

Considera-se atingido o estado limite de tração na madeira, quando a máxima tensão atuante de tração na madeira é igual a sua resistência à tração. A partir das relações estabelecidas entre as tensões e as deformações, a figura 39 apresenta a distribuição de tensões quando este estado limite é atingido, bem como as forças resultantes destas tensões e suas posições.

FIGURA 39: Distribuição de tensões na seção transversal (ruptura por tração na madeira)

O valor das forças resultantes de compressão e de tração é igual a:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= f_{c0} \cdot b \cdot (h - s - p) \\
 C_2 &= f_{c0} \cdot \frac{b \cdot s}{2} \\
 T_m &= f_{t0} \cdot \frac{b}{2} \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right) \\
 T_f &= b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t} \right)
 \end{aligned} \tag{12}$$

A partir da condição de equilíbrio de forças horizontais, substituindo os valores de "s" e "p" na equação 12 e reorganizando os termos, obtém-se:

$$m = \frac{f_{t0}^2 \cdot E_c + 2 \cdot E_t \cdot f_{c0}^2 + 2 \cdot E_c \cdot f_{c0} \cdot f_{t0} - f_{c0}^2 \cdot E_t}{2 \cdot f_{c0} \cdot h \cdot E_t \cdot E_c - 2 \cdot E_c \cdot e \cdot E_f \cdot f_{t0}} \tag{13}$$

Após a determinação de "m", por meio da equação 13, pode ser avaliado o valor do momento resistente, a partir da soma dos momentos das forças. Foi adotada a posição da linha neutra para se fazer a somatória das forças envolvidas no problema, obtendo-se:

$$\begin{aligned}
 M_t &= f_{c0} \cdot b \cdot \left[\left(h - \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} - \frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} + \left(\frac{h}{2} - \frac{f_{t0}}{2 \cdot E_t \cdot m} - \frac{f_{c0}}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \right) \right] + \left[\left(\frac{f_{c0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \right. \\
 &\quad \left[\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{f_{t0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot f_{t0}}{3 \cdot E_t \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{b \cdot e \cdot E_f \cdot f_{t0}}{E_t} \right) \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} + \frac{e}{2} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{14}$$

5.3.2 Análise de vigas reforçadas com fibras, utilizando o modelo teórico

Com o objetivo de avaliar a influência do número de camadas de reforço na

resistência de vigas de madeira, são apresentados gráficos elaborados a partir do modelo teórico deduzido para tração e para compressão. Para este último foi variada a magnitude de plastificação (parâmetro k).

5.3.2.1 Reforço com fibra de vidro

As figuras 40, 41 e 42 apresentam os resultados da avaliação teórica descrita anteriormente, para três espécies de madeira (*Pinus caribea* var. *hondurensis*, *Eucaliptus Grandis* e *Jatobá*), com baixa, média e alta densidade.

Para as madeiras, utilizaram-se os valores estabelecidos pela norma NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, para as fibras os valores do módulo de elasticidade das fibras de vidro e das fibras de carbono são os apresentados determinados no capítulo 03, conforme apresentado na tabela 30, item 5.2.2. Salienta-se que, segundo a recomendação da NBR 7190/97, não é feita distinção entre os módulos de elasticidade na tração e na compressão.

As figuras 40, 41 e 42 relacionam momento x número de camadas de fibra de vidro, para vigas de madeira das espécies *Pinus*, *Eucalipto* e *Jatobá*, com seções 6x12 cm, 6x16 cm e 6x20 cm.

São apresentados resultados para os modelos de ruptura por tração e também para os modelos de ruptura por compressão sendo, neste caso, considerados valores do parâmetro k variando de 1 a 4.

Observa-se que o valor do parâmetro k igual a um ($k=1$) equivale a considerar um comportamento elasto-frágil para a compressão.

Para a avaliação da resistência da viga sem o reforço, também foi considerado a plastificação na compressão no modelo de ruptura, que é equacionado de forma semelhante aos casos com reforço, apenas não considerando a atuação da fibra.

FIGURA 40: Relação entre momento x número de camadas de fibra de vidro

FIGURA 41: Relação entre momento x número de camadas de fibra de vidro

FIGURA 42: Relação entre momento x número de camadas de fibra de vidro

De acordo com as figuras 40, 41 e 42 observa-se um aumento linear crescente, no valor do momento de ruptura de vigas de madeira reforçadas com fibra de vidro.

Para madeiras com alta densidade o ganho de resistência é baixo (aproximadamente 30%), em comparação com o ganho conseguido para madeiras de baixa densidade (aproximadamente 70%), para vigas reforçadas com vinte camadas de tecido. Conclui-se pela vantagem de aplicação do reforço neste tipo de madeira.

5.3.3.2 Reforço com fibra de carbono

A mesma análise apresentada anteriormente foi realizada para vigas de madeira reforçadas com fibra de carbono. As figuras 43, 44 e 45 apresentam a variação do momento máximo resistido em relação ao número de camadas de fibras.

Para esta análise também foram utilizadas três espécies de madeira com baixa, média e alta densidade. *Pinus caribea* var. *hondurensis*, *Eucaliptus Grandis* e Jatobá.

FIGURA 43: Relação entre momento x número de camadas de fibra de carbono

FIGURA 44: Relação entre momento x número de camadas de fibra de carbono

FIGURA 45: Relação entre momento x número de camadas de fibra de carbono

De acordo com as figuras 43, 44 e 45, nota-se um ganho mais significativo no aumento da resistência e da rigidez das vigas reforçadas com fibra de carbono, em comparação com as vigas reforçadas com fibra de vidro. Isso ocorre, pois a fibra de carbono apresenta valores de módulo de elasticidade e de resistência à tração superiores aos da fibra de vidro.

Para ilustrar, vigas de Pinus de seção (6x12 cm) reforçadas com dez camadas de fibra de vidro apresentaram um ganho de resistência de aproximadamente 50%. Já a mesma viga reforçada com 10 camadas de fibra de carbono o ganho na resistência foi de 100%.

5.3.2.3 Comentários

Vale ressaltar que o estado limite último mais crítico será o de tração, na grande maioria dos casos. Isto ocorre, pois uma pequena magnitude de plastificação já conduz a ocorrência do estado limite último por tração.

Quanto maior a diferença entre as resistências de compressão e de tração, maior deverá ser o valor de “k”, para que o estado limite último seja por tração.

Apesar da resistência da madeira à tração ser superior a resistência à compressão, a norma NBR 7190/97 – Projeto de estruturas de madeiras, considera coeficientes de ponderações diferentes, conduzindo a valores iguais.

5.3.3 Avaliação do parâmetro “k”

Para o modelo de ruptura por compressão, o cálculo considera a relação entre as deformações, $\epsilon_2/\epsilon_1 = k$. Este valor foi avaliado experimentalmente por meio de ensaios de compressão paralela às fibras da madeira. Foram avaliadas as espécies Pinus caribea

var. hondurensis, Eucalipto grandis, Jatobá e Peroba rosa, ensaiando 6 corpos-de-prova para cada uma delas. A tabela 32 apresenta os valores do parâmetro “k” obtidos experimentalmente.

Foram apresentados valores do parâmetro “k” para Peroba Rosa, pois foi a madeira utilizada na avaliação experimental.

TABELA 32: Valores do parâmetro “k”

	Pinus caribea var. hondurensis	Eucalipto grandis	Jatobá	Peroba Rosa
Valores K (e_2/e_1)	3,00	4,80	2,20	3,25
	4,00	3,50	2,35	2,60
	4,00	3,20	2,50	2,30
	3,00	3,10	1,90	2,80
	3,40	4,50	2,00	2,25
	3,20	3,70	1,85	2,25
Média	3,43	3,80	2,13	2,60

Os gráficos de tensão por deformação ilustram o comportamento dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de compressão paralela as fibras da madeira.

FIGURA 46: Diagrama tensão por deformação

5.3.4 Análise comparativa dos reforços de fibra de vidro e de fibra de carbono

Uma análise comparativa entre o reforço com fibra de vidro e com fibra de carbono está apresentada nas figuras 47, 48 e 49. Com esta comparação será possível estimar o ganho de resistência com o reforço de fibra de vidro e de fibra de carbono, possibilitando estimar o número de camadas correspondentes aos dois tipos de materiais.

Nesta comparação, foram utilizados parâmetro $k=3$ para Pinus e Eucalipto que são madeiras mais deformáveis, e parâmetro $k=2$ para Jatobá, pois esses são os valores obtidos experimentalmente, por meio de ensaios com corpos-de-prova de compressão paralela às fibras da madeira, conforme apresentado no item 5.3.3.

FIGURA 47: Gráficos comparativos entre os reforços com fibra de vidro e fibra de carbono

FIGURA 48: Gráficos comparativos entre os reforços com fibra de vidro e fibra de carbono

FIGURA 49: Gráficos comparativos entre os reforços com fibra de vidro e fibra de carbono

5.3.4.1 Comentários

Para as três espécies de madeira analisadas, o ganho de resistência obtido com duas camadas de fibra de carbono é equivalente ao ganho de resistência conseguido com seis camadas de fibra de vidro.

Analisando as figuras 47, 48 e 49, observa-se que o reforço proporcionou uma melhor eficiência, quanto à resistência, às vigas de madeira de menor densidade e com menor resistência, como é o caso do pinus ($\rho=0,535 \text{ g/cm}^3$), em comparação às vigas de alta densidade.

Para o jatobá, o modo de ruptura mais crítico foi por compressão, parâmetro $k=2$. Para este tipo de madeira, recomenda-se que o cálculo do momento último seja feito considerando o modo de ruptura por compressão.

6 – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS REFORÇADAS COM FIBRAS

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios para avaliação da resistência e da rigidez à flexão de vigas de madeira reforçadas com fibra de vidro e com fibra de carbono. Foram realizados ensaios preliminares em vigas de madeira das espécies *Pinus caribea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis* com vão igual a um metro e seção transversal 3x6 cm e 3x12 cm, variando o número de camadas de fibras de vidro. Com estes ensaios foi possível verificar o aumento da resistência e da rigidez das vigas reforçadas com diferentes camadas de fibras. Os ensaios principais foram realizados em vigas com dimensões estruturais de *Pinus caribea* var. *hondurensis* e de *Peroba Rosa* com seções 6x12 cm e 6x16 cm, reforçadas com seis camadas de fibras de vidro ou duas camadas de fibra de carbono as quais foram fixadas com resina epóxi.

Os resultados experimentais são comparados com os teóricos obtidos pelo modelo de cálculo apresentado no capítulo 05, possibilitando uma avaliação do respectivo modelo de cálculo.

6.1 Ensaios preliminares

Estes ensaios foram realizados com o objetivo de verificar o comportamento de vigas de madeira reforçadas com fibras de vidro, a partir de ensaios em elementos de menores dimensões, possibilitando a retirada de uma série de corpos-de-prova de uma mesma peça de madeira, o que diminui a variabilidade esperada para as propriedades dos mesmos.

6.1.1 Materiais utilizados para a confecção das vigas

Para a confecção das vigas dos ensaios preliminares foram utilizadas madeiras das espécies *Pinus caribea* var. *hondurensis* e *Eucaliptus grandis*, com comprimento de um metro. As seções transversais das vigas e a quantidade de vigas ensaiadas de cada espécie são apresentadas na tabela 33.

TABELA 33: Informações referentes às vigas de madeira ensaiadas

Espécie de madeira	Seção transversal	Número de vigas confeccionadas
<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	(3x6)	8
<i>Eucalipto grandis</i>	(3x6)	8
<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	(3x12)	8
<i>Eucalipto grandis</i>	(3x12)	8

Três pares de vigas foram reforçados com fibra de vidro, variando-se o número de camadas do tecido. Tanto as vigas de *Pinus* como as de *Eucalipto* foram reforçadas com duas, quatro e seis camadas de fibras de vidro.

6.1.2 Equipamentos utilizados no ensaio

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios, marca AMSLER, com capacidade para 250 kN.

6.1.3 Método de ensaio empregado

As vigas de madeira foram caracterizadas preliminarmente sem reforço e posteriormente com reforço, por meio de ensaios de flexão. Para a realização destes ensaios foi utilizado um esquema estático de viga simplesmente apoiada, com aplicação de cargas iguais localizadas nos terços do vão (figura 50), conforme apresenta a norma ASTM D198/84 – Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes.

A velocidade de aplicação da força foi feita de modo que se tenha uma variação igual a 10 MPa por minuto, na tensão normal máxima.

FIGURA 50: Modelo do ensaio de flexão em vigas simplesmente apoiadas

Para a determinação da rigidez à flexão, a norma NBR – 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira estipula que devem ser efetuados ciclos de carregamento.

Para tanto, deve ser estimada a força de ruptura ($F_{M,est}$) a partir de um ensaio de um corpo-de-prova gêmeo. A providência dos ciclos é necessária para os casos nos quais se deseja avaliar a rigidez à flexão. Esta rigidez é determinada no último ciclo de carregamento, utilizando o incremento de deslocamento vertical ocorrido quando há incremento da força aplicada, de um valor igual a $0,1 F_{M,est}$ até $0,5 F_{M,est}$, conforme mostrado na figura 51.

FIGURA 51: Ciclo de carregamento

Para que os resultados obtidos no ensaio do primeiro corpo-de-prova sem reforço pudessem ser utilizados na comparação da rigidez à flexão, o valor de $F_{M,est}$ foi estipulado como sendo igual ao dobro da força correspondente a uma flecha de $L/200$, sendo L o vão da viga. Com este procedimento, garantiu-se que a avaliação da rigidez à flexão foi feita no regime elástico linear da viga.

Com os valores de força aplicada e correspondente deslocamento vertical no meio do vão foi possível determinar a rigidez à flexão(EI) de vigas bi apoiadas com cargas concentradas nos terços do vão, de acordo com a seguinte equação:

$$EI = \frac{23 \cdot L^3 \cdot \Delta P}{1296 \cdot \Delta v} \quad (15)$$

Onde:

L – distância entre apoios

ΔP – variação da força (10% e 50%)

Δv – variação da flecha (10% e 50%)

Após a colagem do reforço de fibra, repetiu-se o ensaio de flexão, respeitando os mesmos incrementos de força aplicadas nas vigas antes do reforço. Desta forma determinou-se o valor da rigidez a flexão de vigas de madeira reforçadas com fibra.

Os ensaios de caracterização mecânica das vigas de madeira, utilizadas nos ensaios de flexão, foram realizados de acordo com as especificações da norma NBR 7190/97 – Projetos de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Foram determinados os valores de resistência à compressão e à tração paralela às fibras e módulo de elasticidade à compressão e à tração paralela às fibras da madeira. Os corpos-de-prova foram retirados depois da realização dos ensaios de flexão, de

regiões da viga, não danificadas.

6.1.4 Método de aplicação de FRP

O bom desempenho do reforço de fibras reforçadas com polímeros (FRP), está diretamente ligado ao processo de laminação utilizado. Para reforço em estruturas de madeira, concreto ou aço, utilizando fibras, deve-se realizar o processo de laminação manual, onde a resina é aplicada diretamente sobre a superfície a ser reforçada e também sobre o respectivo tecido. Como produto final obtém-se um material laminado (fibra + resina).

O primeiro passo para realizar a aplicação do reforço com fibras é verificar o estado em que se encontra a estrutura. No caso da madeira, a superfície deve estar limpa, seca, livre de partículas soltas, contaminações de graxas e óleos. Se houver cavidades ou buracos na superfície, estes deverão ser preenchidos com algum tipo de argamassa epóxi. Inicialmente, aplica-se uma camada de resina utilizando um rolo de impregnação (lã) ou pincel, sobre a superfície de madeira. Em seguida coloca-se uma camada de fibra sobre a superfície a ser reparada. Com um rolo de desaeração de alumínio deve-se pressionar a fibra contra o adesivo, eliminando desta forma bolhas de ar que possam existir e prejudicar o reforço. Sobre a fibra aplica-se uma nova camada de resina. Em seguida repete-se o procedimento acima descrito. A cura demanda cerca de 24 a 48 horas.

FIGURA 52: Procedimento de aplicação de fibras de vidro em vigas de madeira

Vale ressaltar que as resinas epóxi perdem aderência quando expostas a altas temperaturas. Ambientes em que a temperatura ultrapasse 60°C devem ser isolados para a aplicação da fibra.

A umidade do ar é outro fator que requer cuidados. Em ambientes com umidade acima de 80%, a cura da resina pode ser mais lenta. Em locais molhados, deve-se isolar a área durante a aplicação.

6.1.5 Realização do ensaio

Para determinar o aumento da resistência proporcionado pelo reforço com fibra, foram ensaiadas vigas de madeira com e sem reforço. As vigas de madeira foram extraídas da mesma peça, para se ter corpos-de-prova com menor variabilidade de propriedades. Para obter o incremento na rigidez das peças, foram realizados ensaios de flexão antes e depois da aplicação da fibra, para todas as peças. A figura 53 ilustra o ensaio realizado em uma viga com reforço aplicado em sua face inferior.

FIGURA 53: Ensaio de flexão e vigas reforçadas com fibras

6.1.6 Resultados obtidos

A tabela 34 apresenta valores médios de resistência e elasticidade a compressão e a tração paralela às fibras e os respectivos coeficientes de variação de três corpos-de-prova de Pinus e de Eucalipto.

Vigas de Pinus

Tabela 34: Médias e coeficiente de variação

Resistências(MPa)			Módulos de elasticidade (MPa)	
	f_{c0}	f_{t0}	E_{c0}	E_{t0}
Pinus	40 (4,5)	67 (6,2)	11.593 (3,8)	10.940 (8,1)
Eucalipto	36 (6,3)	70 (8,5)	14.292 (5,2)	19.064 (6,7)

Onde:

f_{c0} – resistência à compressão paralela

f_{t0} – resistência à tração paralela

E_{c0} – modulo de elasticidade a compressão paralela

E_{t0} – módulo de elasticidade a tração paralela

As tabelas 35, 36, 37 e 38 apresentam os valores de momento máximo

experimental resistido pelas vigas, valores de rigidez à flexão (EI) e o modo de ruptura das vigas de Pinus e de Eucalipto.

Tabela 35: Viga de Pinus seção 3x6 cm

Nº de camadas de fibra	Viga	Seção (mm)		Momento de ruptura (kN.cm)	DP	DV	EI (kN.cm ²)		Modo de ruptura
							sem reforço	com reforço	
Sem reforço	1	29,0	61,4	138	0,85	0,36	42.116		Tração
	2	30,2	61,2	133	0,85	0,41	37.401		Tração
2 camadas	3	30,3	61,6	157	0,85	0,31	48.501	49.296	Compressão
	4	30,9	61,3	158	0,85	0,31	47.883	50.118	Compressão
4 camadas	5	30,8	61,2	174	0,85	0,27	55.277	63.980	Compressão
	6	31,4	57,8	177	0,85	0,38	39.053	47.731	Compressão
6 camadas	7	30,4	58,9	177	0,85	0,30	49.296	60.141	Tração
	8	30,6	60,2	183	0,85	0,45	33.045	46.262	Compressão

Tabela 36: Viga de Pinus seção 3x12 cm

Nº de camadas de fibra	Viga	Seção (mm)		Momento de ruptura (kN.cm)	DP	DV	EI (kN.cm ²)		Modo de ruptura
							sem reforço	com reforço	
Sem reforço	1	9,4	120,3	450	3,58	0,26	244.363		Tração
	2	30,2	120,2	466	3,58	0,30	211.781		Tração
2 camadas	3	30,3	119,6	512	3,58	0,25	249.154	250.135	Tração
	4	30,4	120,2	500	3,58	0,34	235.312	254.137	Tração
4 camadas	5	30,4	120,0	500	3,58	0,25	270.359	295.508	Compressão
	6	31,3	119,6	517	3,58	0,27	184.157	219.084	Compressão
6 camadas	7	30,1	119,9	520	3,58	0,23	254.137	302.544	Compressão
	8	30,2	120,6	533	3,58	0,23	270.359	325.817	Compressão

Vigas de eucalipto

Tabela 37: Viga de Eucalipto seção 3x6 cm

Nº de camadas de fibra	Viga	Seção (mm)		Momento de ruptura (kN.cm)	DP	DV	EI (kN.cm ²)		Modo de ruptura
							sem reforço	com reforço	
Sem reforço	1	29,4	60,4	118	1,40	0,40	61.348		Tração
	2	30,2	60,2	108	1,40	0,39	64.201		Tração
2 camadas	3	30,3	59,6	153	1,40	0,38	65.384	69.016	Compressão
	4	30,4	61,2	163	1,40	0,36	69.016	69.988	Compressão
4 camadas	5	30,4	61,0	190	1,40	0,29	85.675	93.758	Compressão
	6	31,3	57,6	203	1,40	0,37	67.700	74.837	Compressão
6 camadas	7	30,1	59,9	225	1,40	0,36	76.449	90.348	Tração
	8	30,2	60,6	193	1,40	0,32	69.016	85.675	Tração

Tabela 38: Viga de Eucalipto seção 3x12 cm

Nº de camadas de fibra	Viga	Seção (mm)		Momento de ruptura (kN.cm)	DP	DV	EI (kN.cm ²)		Modo de ruptura
							sem reforço	com reforço	
Sem reforço	1	29,4	120,3	423	7,16	0,37	338.849		Tração
	2	30,2	119,2	458	7,16	0,35	357.939		Tração
2 camadas	3	30,3	120,3	527	7,16	0,31	403.392	409.898	Cisalhamento
	4	30,4	121,2	483	7,16	0,36	423.562	435.166	Cisalhamento
4 camadas	5	30,4	120,2	680	7,16	0,30	348.133	379.309	Tração
	6	31,3	119,8	563	7,16	0,28	453.816	494.430	Cisalhamento
6 camadas	7	30,1	120,9	517	7,16	0,34	368.315	423.562	Tração
	8	30,2	119,6	533	7,16	0,37	343.428	423.562	Tração

A diferença nos resultados apresentados nas tabelas 35, 36, 37 e 38 se deve a variabilidade da madeira, que apresentava defeitos.

O emprego do reforço de fibras propicia um aumento dos deslocamentos

verticais na fase da ruptura. A figura 54 ilustra uma viga de Pinus com flecha bastante acentuada.

FIGURA 54: Flecha viga de Pinus

6.1.7 Análise dos resultados

Este item apresenta uma análise comparativa entre valores experimentais e teóricos de resistência e rigidez. Os valores teóricos foram determinados segundo o modelo de cálculo proposto no capítulo 05. Esta análise permite verificar a eficiência do modelo de cálculo proposto.

6.1.7.1 Análise do momento máximo resistido - experimental e teórico

As figuras 55 e 56 apresentam valores de momento de ruptura experimental e teórico em relação ao número de camadas de fibras. Os resultados teóricos apresentados foram determinados pelo modo de ruptura por tração, por ser o modelo de cálculo que apresentou valores mais críticos. O valor do módulo de elasticidade do tecido de fibra de vidro utilizado no cálculo do momento de ruptura e da rigidez a flexão (EI) é

apresentado na tabela 30.

FIGURA 55: Comparação entre momento fletor de ruptura (experimental e teórico)

FIGURA 56: Comparação entre momento fletor de ruptura (experimental e teórico)

Observando os valores apresentados nas figuras 55 e 56, para vigas de Pinus com seção (3x6cm) reforçadas com seis camadas de fibra de vidro, o aumento no momento fletor de ruptura foi de aproximadamente 35%, em relação a viga sem reforço. Para as vigas de eucalipto de mesma seção, o aumento do momento fletor foi ainda mais significativo, sendo da ordem de 90%. O modelo teórico conseguiu avaliar o comportamento de maneira satisfatória. Os valores determinados experimentalmente são aproximadamente 10% superiores aos teóricos estando, portanto a favor da segurança estrutural.

Para as vigas de seção (3x12cm), o aumento do momento fletor de ruptura, tanto para vigas de Pinus como para vigas de eucalipto, foi no máximo de 30%, para seis camadas de reforço.

6.1.7.2 Análise da rigidez à flexão

Este item apresenta uma comparação entre a rigidez à flexão (EI) experimental e teórica. O momento de inércia teórico foi determinado de acordo com o modelo de

seção transformada. Os valores experimentais são próximos dos valores teóricos, conforme ilustra as figuras 57 e 58 para o Pinus e o Eucalipto, respectivamente. Na maioria das vigas o valor experimental ficou acima do valor teórico, garantindo que o valor da rigidez à flexão calculado, esteja a favor da segurança.

Também pode ser visualizado nas mesmas figuras, o aumento da rigidez à flexão das vigas sem reforço e reforçadas com duas, quatro e seis camadas de fibra.

FIGURA 57: Valores EI (reforço)/ EI x número de camadas

FIGURA 58: Valores EI (reforço)/EI x número de camadas

6.2 Ensaios principais

Estes ensaios objetivam verificar o aumento da resistência e rigidez de vigas estruturais de madeira reforçadas com fibra de vidro e com fibra de carbono e também avaliar o modelo teórico de cálculo proposto.

6.2.1 Materiais utilizados para a confecção das vigas

As vigas foram confeccionadas com madeiras das espécies *Pinus caribea* (*Pinus caribea* var. *hondurensis*) e *Peroba Rosa* (*Aspidosperma polyneuron*). As seções

transversais das vigas, comprimento e quantidade estão apresentadas na tabela 39.

Estas duas espécies de madeiras foram escolhidas por apresentarem baixa e média densidade.

TABELA 39: Informações referentes às vigas de madeira

Número da viga	Espécie de madeira	Dimensões	Tipo de reforço
01	Pinus Caribea	6x12x300	Fibra de vidro
02	Pinus Caribea	6x12x300	Fibra de vidro
03	Pinus Caribea	6x12x300	Fibra de carbono
04	Pinus Caribea	6x12x300	Fibra de carbono
05	Pinus Caribea	6x16x300	Fibra de vidro
06	Pinus Caribea	6x16x300	Fibra de vidro
07	Pinus Caribea	6x16x300	Fibra de carbono
08	Pinus Caribea	6x16x300	Fibra de carbono
09	Pinus Caribea	6x12x300	Fibra de vidro
10	Peroba Rosa	6x12x200	Fibra de vidro
11	Peroba Rosa	6x12x200	Fibra de vidro
12	Peroba Rosa	6x12x200	Fibra de carbono
13	Peroba Rosa	6x12x200	Fibra de carbono

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 capítulo 5, 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.

6.2.2 Caracterização das peças de madeira

As peças de madeira utilizadas foram caracterizadas preliminarmente sem o reforço, por meio de ensaios de flexão. Para a realização destes ensaios foi utilizado um cilindro hidráulico com capacidade de 50 kN para aplicar o carregamento. A força aplicada foi medida por meio de um anel dinamométrico com capacidade para 50 kN (figura 59). O método de ensaio utilizado foi o mesmo apresentado no item 6.1.3.

FIGURA 59: Esquema dos ensaios de flexão nas vigas

Após a realização dos ensaios de flexão das vigas reforçadas, foram retirados corpos-de-prova de regiões não danificadas, das próprias vigas, para a realização dos ensaios de caracterização mecânica da madeira. Estes ensaios foram realizados de acordo com as especificações da norma NBR 7190/97 – Projetos de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Foram determinados os valores de resistência e módulo de elasticidade à compressão e à tração paralela às fibras da madeira.

6.2.3 Instrumentação das vigas

Nos ensaios de flexão das vigas reforçadas, foram medidos os deslocamentos verticais no meio do vão (flechas), por meio de um relógio comparador, de sensibilidade 0,01 mm no centro da viga, em sua face inferior.

Com o objetivo de obter a distribuição de deformações nas vigas, as seguintes oito vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos:

- vigas: 01, 02, 03, 04, 09 (Pinus, seção 6x12 cm)
- vigas: 06 e 08 (Pinus, seção 6x16 cm)
- viga: 11 (Peroba Rosa, seção 6x12 cm)

Os extensômetros elétricos são da marca Kyowa do tipo KFG-10-120-C1-11. As leituras das deformações foram feitas utilizando um medidor analógico Strainmeter-Kyowa, ligado à mesa de canais Kyowa. Foram instalados cinco extensômetros por viga, fixados nas posições indicadas na figura 60.

FIGURA 60: Posição dos extensômetros na seção transversal da viga

Salienta-se que na viga 01, que foi a primeira a ser testada, não foi instalado o extensômetro 4. Após a avaliação dos resultados deste primeiro ensaio, notou-se uma grande variação de deformação entre os extensômetros 2 e 3 instalados na madeira e o extensômetro 5, instalado na fibra. Isto motivou a instalação do extensômetro 4, possibilitando medir a deformação na madeira praticamente na mesma posição da fibra.

Alguns cuidados especiais foram tomados com este extensômetro. Antes da

colagem do tecido de fibra de vidro o extensômetro foi protegido com fita isolante. Desta forma impediu-se que o mesmo fosse danificado pela resina.

6.2.4 Resultados obtidos

Os resultados apresentados nas tabelas 40 e 41 são referentes à caracterização mecânica da madeira e aos ensaios de flexão de vigas de Pinus e Peroba Rosas reforçadas com fibra de vidro e com fibra de carbono.

As tabelas 40 e 41 apresentam valores de resistência e de módulo de elasticidade à compressão e à tração paralela às fibras da madeira.

Tabela 40: Médias e coeficiente de variação

Viga	Pinus Caribea var. Hondurensis			
	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (MPa)	
	f_{c0}	f_{t0}	E_{c0}	E_{t0}
01	36 (5,6)	73 (9,65)	12.410 (9,3)	12.109 (6,9)
02	45 (4,9)	69 (8,9)	15.087 (6,7)	12.771 (2,4)
03	41 (2,4)	62 (15,1)	10.492 (9,0)	8.002 (9,0)
04	48 (0,7)	68 (4,1)	13.044 (5,8)	13.442 (1,7)
05	38 (2,2)	42 (5,2)	11.841 (7,3)	9.426 (10,9)
06	40 (2,1)	56 (10,4)	10.995 (2,8)	8.702 (10,8)
07	42 (2,2)	65 (4,4)	11.921 (2,4)	12.458 (13,7)
08	34 (1,6)	44 (7,4)	10.685 (11,1)	10.835 (8,2)
09	39 (3,6)	59 (5,3)	12.446 (8,1)	14194 (7,8)

Tabela 41: Médias e coeficiente de variação

Viga	Peroba Rosa			
	Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (MPa)	
	f_{c0}	f_{t0}	E_{c0}	E_{t0}
10	73 (3,1)	97 (4,6)	16.892 (2,3)	17.928 (4,2)
11	61 (2,0)	95 (9,1)	10.250 (7,5)	16.267 (14,6)
12	76 (3,2)	92 (2,8)	12.398 (11,7)	15.801 (3,5)
13	72 (6,0)	96 (3,9)	12.878 (8,6)	18.609 (6,2)

As tabelas 42 e 43 apresentam valores de momento de ruptura experimental, de rigidez à flexão (EI) e o tipo de ruptura apresentado pelas vigas de Pinus e de peroba, respectivamente.

Com relação à deformação, os valores estão apresentados no anexo A e de forma gráfica no item 6.2.5.3.

Tabela 42: Vigas de Pinus Caribea

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

Tabela 43: Vigas de Peroba Rosa

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

Observa-se que o emprego do reforço de fibra propicia que a ruptura ocorra na presença de grandes deslocamentos verticais, conforme mostrado na figura 61, aumentando a segurança.

Figura 61: Flecha na viga

Para as vigas reforçadas, apesar do esmagamento das fibras superiores por compressão, 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 62: Ruptura por tração na madeira

6.2.5 Análise dos resultados

Este item apresenta uma análise comparativa entre valores experimentais e teóricos para a resistência e a rigidez à flexão. Os valores teóricos foram determinados segundo o modelo de cálculo proposto no capítulo 05.

6.2.5.1 Análise do momento de ruptura - experimental e teórico

As tabelas 44 e 45 apresentam valores de momento de ruptura experimental e teórico, este último determinado segundo o modelo de ruptura por tração, por ser o modelo que apresentou valores mais críticos. É apresentada, também, uma comparação entre os valores de momento de ruptura experimental e teórico. Os valores de módulo de elasticidade dos tecidos de fibra de vidro e de fibra de carbono, utilizados no cálculo do momento de ruptura teórico, são os apresentados na tabela 30.

Tabela 44: Vigas de Pinus Caribea

Reforço	Viga	Momento de ruptura experimental (kN.cm)	Momento de ruptura teórico (kN.cm)	Relação $M_{exp}/M_{teórico}$
Fibra de vidro	1	920	871	1,05
	2	1051	938	1,12
Fibra de carbono	3	978	934	1,04
	4	1071	935	1,14
Fibra de vidro	5	1094	1085	1,00
	6	1301	1400	0,93
Fibra de carbono	7	1491	1474	1,01
	8	1060	1144	0,93
F. vidro	9	1118	1056	1,06

Tabela 45: Vigas Peroba Rosa

Reforço	Viga	Momento de ruptura experimental (kN.cm)	Momento de ruptura teórico (kN.cm)	Relação $M_{exp}/M_{teórico}$
Fibra de vidro	10	1258	1243	1,01
	11	1195	1021	1,17
Fibra de carbono	12	1211	1075	1,12
	13	1351	1109	1,21

Os resultados de momento de ruptura, apresentados nas tabelas 44 e 45, indicam uma proximidade entre os valores teóricos e experimentais tanto para vigas de Pinus como para vigas de Peroba Rosa. Na maioria dos casos observados percebe-se uma uniformidade entre os valores. Pode-se concluir que o modelo de cálculo proposto é válido para avaliar vigas de madeira reforçadas com fibras. Observa-se que as vigas de Pinus de números 06 e 08 apresentam valores experimentais abaixo dos valores teóricos. Isto ocorreu, pois estas vigas apresentavam defeitos (nós) nas regiões centrais da peça, que influenciaram de maneira negativa na resistência da viga.

6.2.5.2 Análise da rigidez à flexão

As tabelas 46 e 47 apresentam os valores de rigidez a flexão denominados a seguir, bem como uma comparação entre eles.

- EI_{exp} - valor experimental de rigidez à flexão da viga sem reforço;
- $EI_{r,exp}$ - valor experimental de rigidez à flexão da viga com reforço;
- EI_r - valor teórico de rigidez à flexão da viga com reforço;

O valor da rigidez a flexão teórico da viga reforçada (EI_r), foi determinado de acordo com o modelo de seção transformada, apresentado no item 5.2.1 do capítulo 05.

Tabela 46: Vigas de Pinus Caribea

Rigidez a flexão EI (kN.cm²)						
Reforço	Viga	EI_{exp} (exp.)	$EI_{r,exp}$ (c/reforço)	EI_r (teórico)	$EI_{r,exp}/EI_r$	$EI_{r,exp}/EI_{exp}$
Fibra de vidro	1	556.371	711.534	645.390	1,10	1,28
	2	958.128	1.081.958	1.073.103	1,01	1,13
Fibra de carbono	3	705.910	914.934	847.092	1,08	1,30
	4	1.054.281	1.236.808	1.222.966	1,02	1,17
Fibra de vidro	5	1.303.614	1.463.894	1.473.084	0,99	1,12
	6	1.450.813	1.669.113	1.653.927	0,99	1,15
Fibra de carbono	7	1.999.199	2.279.938	2.239.103	1,02	1,14
	8	1.389.845	1.611.869	1.570.524	1,03	1,16
F. vidro	9	913.062	1.440.282	1.396.985	1,03	1,58

Tabela 47: Vigas Peroba Rosa

Rigidez a flexão EI (kN.cm²)						
Reforço	Viga	EI_{exp} (exp.)	$EI_{r,exp}$ (c/reforço)	EI_r (teórico)	$EI_{r,exp}/EI_r$	$EI_{r,exp}/EI_{exp}$
Fibra de vidro	10	1.125.733	1.220.987	1.272.078	0,96	1,08
	11	732.921	927.283	911.021	1,02	1,26
Fibra de carbono	12	929.454	1.102.436	1.099.544	1,01	1,19
	13	1.102.280	1.269.827	1.278.645	0,99	1,15

A análise da rigidez das vigas sem reforço e reforçadas com fibra compara valores obtidos em ensaios experimentais com valores teóricos determinados de acordo com o modelo de seção transformada. Verifica-se, de maneira geral, que os resultados experimentais apresentam boa concordância em relação a rigidez à flexão teórica estimada. Pode-se concluir que o modelo de seção transformada é válido para determinar a rigidez de vigas de madeira reforçadas com fibra de vidro.

Para as vigas de Pinus reforçadas com seis camadas de fibra de vidro ou com duas camadas de fibra de carbono o aumento da rigidez da seção transversal variou entre 15% e 30%.

Para a viga de Pinus reforçada com vinte camadas de fibra de vidro o aumento da rigidez foi significativo, aproximadamente 60%.

Para as vigas de Peroba Rosa o aumento da rigidez foi de 10% a 25%.

Na maioria das vigas o valor experimental ficou acima do valor teórico, garantindo que o valor da rigidez à flexão calculado esteja a favor da segurança.

6.2.5.3 Análise das deformações

As figuras 64 a 66 apresentam a variação da deformação em função da variação do momento fletor para vigas de Pinus e de Peroba Rosa sem reforço e reforçadas com fibras de vidro e com fibras de carbono. As vigas sem reforço foram ensaiadas até o limite de flecha igual a $L/200$ do vão.

FIGURA 63: Força x deformação específica de vigas Pinus seção (6x12 cm)

FIGURA 64: Força x deformação específica de vigas Pinus seção (6x16 cm)

FIGURA 65: Força x deformação específica de vigas Pinus seção (6x12 cm) – 20 camadas de fibra

FIGURA 66: Força x deformação específica de vigas de Peroba Rosa seção (6x16 cm)

As figuras 67 a 74 permitem visualizar a distribuição de deformação ao longo da altura da seção das vigas, para vários estágios de força aplicada.

Para os extensômetros 02 e 03, localizados na mesma posição vertical da viga, foi utilizada a média entre os valores de deformações.

FIGURA 67: Variação da deformação ao longo da altura da seção transversal da viga 01 sem reforço e reforçada

FIGURA 68: Variação da deformação a longo da altura da seção transversal da viga 02 sem reforço e reforçada

FIGURA 69: Variação da deformação ao longo da altura da seção transversal da viga 03 sem reforço e reforçada

FIGURA 70: Variação da deformação ao longo da altura da seção transversal da viga 04 sem reforço e reforçada

FIGURA 71: Variação da deformação ao longo da altura da seção transversal da viga 06 sem reforço e reforçada

FIGURA 72: Variação da deformação ao longo da altura da seção transversal da viga 08 sem reforço e reforçada

FIGURA 73: Variação da deformação ao longo da altura da seção transversal da viga 09 sem reforço e reforçada com 20 camadas de fibra

FIGURA 74: Variação da deformação ao longo da altura da seção transversal da viga 11 sem reforço e reforçada

Observando a variação da deformação apresentada nas figuras 67 a 74, pode-se dizer que a seção praticamente permaneceu plana, indicando a validade da hipótese adotada no modelo teórico.

Na maioria dos casos a diferença entre as deformações na madeira e na fibra foi pequena (extensômetros 4 e 5).

7 - CONCLUSÕES

A utilização de fibras reforçadas com polímeros (FRP) coladas à madeira surgiu devido à necessidade de reforçar estruturas em uso, ou para compor um novo elemento estrutural, com propriedades mecânicas superiores às iniciais. Com as FRP as estruturas de madeira passam a contar com uma técnica de reforço onde a madeira em união com as fibras forma um material compósito com ótimas propriedades mecânicas.

Tanto o tecido de fibra de vidro como o de fibra de carbono avaliado, apresentaram bom desempenho em reforço de vigas. O uso das fibras proporcionou um incremento nas propriedades mecânicas de resistência e rigidez da madeira.

Apesar do tecido de fibra de vidro possuir propriedades mecânicas inferiores às do tecido de fibra de carbono, resultados significativos de aumento de resistência e rigidez são conseguidos com o uso de um número maior de camadas de fibras. Tendo em vista o seu menor custo, em relação à fibra de carbono, a sua utilização parece ser mais indicada.

Por meio das análises teóricas e experimentais constatou-se que o aumento de resistência e de rigidez é proporcional ao aumento do número de camadas, e que o uso de uma camada de fibra de carbono equivale ao uso de três camadas de fibra de vidro.

Os adesivos Resorcinol Formaldeído (Cascophen) e o adesivo à base de mamona não apresentaram bons resultados na laminação das fibras e na colagem das fibras à madeira, recomendado-se o uso de adesivo epóxi, que apresentou desempenho superior aos adesivos de mamona e Cascophen tanto na laminação quanto na fixação das fibras a madeira.

Um fator importante a salientar é quanto ao modo de ruptura do compósito, observado experimentalmente: inicialmente, ocorre esmagamento da madeira na região comprimida da seção transversal, com conseqüente abaixamento da Linha Neutra, e posterior ruptura por tração e/ou cisalhamento da madeira.

Por este motivo, as vigas de madeira reforçadas com fibras apresentaram grandes deslocamentos na proximidade da ruptura, em comparação às vigas de madeira sem reforço. Este comportamento da estrutura reforçada é positivo, pois garante uma maior segurança estrutural, uma vez que a ruptura é anunciada por grandes deslocamentos.

O modelo teórico para avaliação da rigidez, baseado no método da seção transformada, e o modelo teórico desenvolvido, baseado na hipótese de Navier-Bernoulli, apresentaram boa concordância com os valores obtidos experimentalmente, demonstrando a validade dos mesmos.

Tendo em vista os comentários e conclusões apresentados ao longo deste trabalho, conclui-se pela viabilidade de aplicação das fibras de vidro e das fibras de carbono no reforço e na recuperação de vigas de madeira. Esta técnica, além de fácil execução, proporciona um aumento da resistência e da rigidez dos elementos estruturais reforçados. Além disso, propicia uma maior confiabilidade ao sistema, diminuindo a possibilidade de ruptura por tração devido a defeitos.

Como continuidade deste trabalho, propõe-se o estudo de vigas de madeira laminada colada (MLC) reforçadas com fibra de vidro. O reforço de fibra deve ser aplicado nas linhas de cola das regiões solicitadas por maiores tensões de tração. Entre as vantagens deste sistema, está a diminuição do peso próprio dos elementos estruturais e também uma maior economia de materiais, devido à otimização da seção.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-MAGID, B.; DAGHER, H.J.; and KIMBALL, T. “*The Effect of Composite Reinforcement on Structural Wood*”. ASCE 1994. MATERIALS ENGINEERING CONFERENCE, INFRASTRUCTURE: NEW MATERIALS AND METHODS FOR REPAIR, San Diego, Califórnia, nov. 14-19.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. (1993). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction Materials. ASTM E 199-88 (1993). Philadelphia, PA.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. (1984). Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes. ASTM D198-84. Philadelphia, PA.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. (1995). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D3039-95.
- ASKELAND, D.R.. The Science and Engineering of Materials. (1996). Chapman & Hall.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190-Cálculo e execução de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190-Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.
- BAKOSS, S., GREENLAND, A., CREWS, K. *Aplication of Advanced Fibre Reinforced Plastic Composites To Structural Timber*. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 17-20 august 1998, Montreux, Switzerland. Anais. v.2, p.716-717.
- BARRACUDA (2000). Tecidos Prepregs. <http://www.barracudatec.com.br>
- BEBER, A.J., Campos, A .F., Campagnolo, J.L., *Flexural Strengthening of R/C Beams with CFRP Sheets*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 1999, London, ECS Publications (CD-ROM).
- BELPERIO, R., GRAD, IE. *The Performance of Glulam Beams Reinforced with Carbon Fibre*. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, 14-18 march 1999, New Zeland. Anais. v.2, p.99-106.
- BERGMEISTER, K., LUGGIN, W. *Innovative Strengthening of Timber Structures Using Carbon Fibres*. In. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING, March 2001, Malta, Anais. p. 361-366.
- BUI, Q.D., MILNER, H.R., WILLIAMS, J.M. *Fibre Reinforced Finger Joints*. In: INTERNACIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, October 1996,

- New Orleans, Louisiana, USA. Anais. v.1, p.427-430.
- BULLEIT, W.N. *Reinforcement of wood materials a review*. Wood and Fiber Sci. 16 (3), 391-397, (1994).
- CASTRO, C.H., NASCIMENTO, J.F.F., PINTO, R.S., ANDRADE, W.P., Reparos em Estruturas de Concreto – Avaliação da Eficiência de Resinas Epóxi: In: 41º IBRACON, 1999, Salvador – BA.
- CARVALHO, W.S.. *Otimização da Interface/Interfase de Fibra de Carbono/Termoplástico*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 1998.
- CHI-JEAN, Chuan. *Mechanical Behavior of Fiberglass Reinforced Timber Joints*. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING WCTE, 31 July – 03 August 2000, Canada. Anais.
- DAGHER, H.J., *FRP- Reinforced Wood in Bridge Applications*. In: 1st RILEM Symposium TIMBER ENGINEERING, 13-15 September 1999, Stockholm, Sweden. Anais. p.591-598.
- DAGHER, H.J., *High – Performance Wood Composites for Construction*. In: VII EBRAMEM, julho 2000, São Carlos – Brasil. Anais.
- DAVIDS, W.G., *Experimental and Numerical Study on Creep of FRP Reinforced Glulam Beams*. In: 1st RILEM Symposium TIMBER ENGINEERING, 13-15 September 1999, Stockholm, Sweden. Anais. p.581-590.
- FORSBERG, T.E. Long-Span Timber Trusses – Evaluating a Repair Method. Practice Periodical on Structural Design and Construction, May 1996.
- HENRIQUES DE JESUS, J.M, CALIL JR, C., CHIERICE, G.O. *Adesivo poliuretano alternativa para uso em MLC*. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6, Florianópolis, 1998. Anais, vol1, p337-343.
- HENRIQUES DE JESUS, J. M. *Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)*. Dissertação (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, Jul 2000.
- HOUWINK, R.; SALOMON, G. (1965). *Adhesion and adhesives*. 2ed. New York, Elsevier Publishing Company.
- HULL, D., AN INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS. Cambridge University (1995). 246p.
- JANG, B.Z.. *Advanced Polymer Composites*. ASTM International (1994).
- KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. *Principles of wood science and technology*. V2. (1975). New York, Springer-Verlag.
- MANTILLA CARRASCO, E.V. *Ligações estruturais de madeira por adesivos*. São

- Carlos, 2v. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, jul 1984.
- MARTIN, Z.A.; STITH, J.K.; TINGLEY, D.A. *Strength and stiffness performance of FRP reinforced White*. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING WCTE, 31 july – 03 august 2000, Canada. Anais.
- MARTIN, Z.A.; TINGLEY, D.A. *Fire resistance of FRP reinforced glulam beams*. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING WCTE, 31 july – 03 august 2000, Canada. Anais.
- MATTHEWS, F.L. RAWLINGS, R.D., *COMPOSITE MATERIALS: ENGINEERING AND SCIENCE*. (1996). London. P.29-53
- METTEM, C.J.; ROBINSON, G.C., *The Repair of Structural Timber*. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE LONDON, 2-5 September 1991, London. Anais. p.4.56-4.65.
- NORRIS, T.; SAADATMANESH, H. (1994). Improving the Serviceability of Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets, FHA, Grant No. DDEGRF-93-P-05.
- OLIVEIRA, J.T.; FREITAS, A.R. (1995). Painéis à base de madeira. São Paulo, Boletim Técnico BT/PCC/149, Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP.
- OLMOS, M.A.C. *Equipamento e Processo de Fabricação de Chapas Aglomeradas a Partir de Resíduos de Madeira*. Dissertação de Mestrado, EESC-USP. 22 outubro 1992, 112p.
- PARDINI, L.C. (1990). Comportamento Dinâmico-Mecânico e à Fratura de Materiais Compostos Epoxi/ Elastômero/ Fibra de Carbono. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos-UFSCar
- PIGGOTT, M.A. Load-Bearing Fibre Composites. University of Toronto (1996). 277p.
- RITCHIE, P.; THOMAS, D.; LU, W.L.; AND CONNELLY, G. (1991). “External Reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics” ACI STRUCTURAL JOURNAL, ACI, Vol. 88, pp 490-500.
- RITTER, Michael A., TIMBER BRIDGES: DESIGN, CONSTRUCTION, INSPECTION, AND MAINTENANCE. Washington (1990), DC. 944p.
- SAMLAIC, J. *Os atuais problemas e as possibilidades dos adesivos para madeira*. REVISTA DA MADEIRA Nº374 (1993), p.7-10.
- SUNDERS, K.J. Polymer Chemistry, 2ª ed. Ed. Chapman & Hall, (1988). Pág.144-146.
- SIKA (2000) Colagem rígida a base de epóxi. <http://www.sika.com.br>

SIKA (2000). Catálogo – Technology and Concepts for Sika Carbodur Structural Strengthening Systems.

Saint – Gobain Vetrotex (2000) – Catálogo.

TICHY, R., *Properties and Applications of Wood-Plastic Composites*. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 17-20 august 1998, Montreux, Switzerland. Anais. v.2, p.616-623.

TINGLEY, D., GILHAM, P. *Long Term Load Performance of FRP Reinforced Glulam Bridge Girders*. In: NATIONAL CONFERENCE on WOOD TRANSPORTATION STRUCTURES, 1994, Anais. v.1, p.201-206.

TINGLEY, D., CEGELKA, S. *High-Strength-Fiber-Reinforced-Plastic Reinforced Wood*. In: INTERNACIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, 28-31 October 1996, New Orleans, Louisiana, USA. Anais. v.3, p.57-64.

TINGLEY, D., KENT, S. *Structural Evaluation of fiber reinforced hollow wood beams*. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING, March 2001, Malta, Anais. p. 367-372.

TRIANTAFILLOU, T. and DESKOVIC, N. “*Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members*”. JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, (1992) ASCE, 118 (5), 1270-1284.

ANEXO A

VIGAS SEM EXTENSÔMETROS				
Viga de Pinus				
Força (kN)	Viga 05		Viga 07	
	S/reforço	C/Reforço	S/reforço	C/Reforço
	Flecha (mm/100)			
0	0	0	0	0
0,93	330	310	320	355
1,86	665	610	670	645
2,79	1010	910	990	950
3,72	1360	1225	1335	1260
4,66	1700	1530	1660	1530

VIGAS SEM EXTENSÔMETROS						
Viga de Peroba Rosa						
Força (kN)	Viga 10		Viga 12		Viga 13	
	S/reforço	C/Reforço	S/reforço	C/Reforço	S/reforço	C/Reforço
	Flecha (mm/100)					
0	0	0	0	0	0	0
0,93	346	265	215	165	262	245
1,86	703	540	418	390	558	485
2,79	1042	800	622	585	828	715
3,72	1380	1060	825	770	1109	945
4,66	1711	1300	1059	935	1392	1155

VIGA 01 – Pinus sem reforço					
Força (kN)	Flecha (mm/100)	Deformação (me)			
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄
0	0	0	0	0	
0,23	158	115	65	65	
0,47	309	205	120	140	
0,70	439	290	175	200	
0,94	587	385	235	265	
1,17	711	465	285	330	
1,41	854	560	345	395	
1,64	990	640	405	460	
1,88	1134	735	455	510	
2,11	1279	820	510	580	
2,35	1423	905	560	650	

VIGA 01 – Pinus reforço – reforço com seis camadas de fibra de vidro					
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)			
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄
0	0	0	0	0	0
0,47	240	160	90	120	160
0,94	487	320	180	230	310
1,41	724	480	270	340	460
1,88	966	640	360	450	620
2,35	1216	810	450	560	770
2,81	1456	960	550	670	930
3,29	1703	1130	640	770	1080
3,75	1955	1300	730	880	1240
4,22		1460	830	1000	1400
4,69		1630	930	1110	1550
7,51		2625	1480	1750	2425
8,45		2970	1690	1970	2810

9,39		3320	1870	2180	3110
10,32		3640	2050	2390	3410
12,20		4430	2450	2790	4070
13,14		4900	2690	3010	4450
15,02		6020	3150	3500	5350

VIGA 02 – Pinus sem reforço						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e₁	e₂	e₃	e₄	e₅
0	0	0	0	0	0	
0,47	245	160	110	120	130	
0,94	448	280	200	210	240	
1,41	662	420	290	310	360	
1,88	878	560	390	420	470	
2,35	1092	690	480	510	580	
2,81	1310	830	580	620	690	
3,28	1534	970	670	720	800	

VIGA 02 – Pinus reforço – reforço com 06 camadas de fibra de vidro						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e₁	e₂	e₃	e₄	e₅
0	0	0	0	0	0	0
0,47	215	130	90	90	110	120
0,94	413	260	160	170	210	220
1,41	602	380	240	250	310	330
1,88	800	500	320	330	410	440
2,35	997	640	390	410	510	550
2,82	1298	760	460	500	620	680
3,28	1397	900	560	600	720	790
3,75	1602	1030	630	680	820	900
4,22	1801	1150	720	770	930	1020

4,69	2008	1280	800	860	1030	1140
5,63		1560	960	1040	1250	1400
6,57		1810	1120	1210	1450	1640
7,51		2080	1280	1390	1660	1880
8,45		2350	1440	1570	1870	2130
9,39		2630	1610	1750	2080	2370
10,32		2910	1770	1930	2290	2630
11,26		3180	1920	2110	2500	2860
12,20		3470	2080	2300	2730	3110
13,14		3770	2250	2490	2950	3320

VIGA 03 – Pinus sem reforço						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e₁	e₂	e₃	e₄	e₅
0	0	0	0	0	0	
0,46	395	190	160	190	180	
0,93	800	380	320	370	370	
1,39	1180	580	480	560	550	
1,86	1675	760	630	750	740	
2,33	1980	950	790	940	920	

VIGA 03 – Pinus reforço – reforço com 02 camadas de fibra de carbono						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e₁	e₂	e₃	e₄	e₅
0	0	0	0	0	0	0
0,46	310	160	135	130	160	150
0,93	625	330	260	260	330	390
1,40	945	500	395	400	490	530
1,86	1250	660	525	540	660	690
2,34	1565	830	660	680	820	840
2,79	1885	1000	790	820	1000	1100
3,26	2210	1170	925	960	1160	1260
3,73	2545	1340	1060	1100	1320	1430
4,19	2885	1520	1195	1250	1480	1520
4,66		1710	1335	1400	1660	1710
6,05		2300	1775	1880	2200	2210
7,45		2900	2205	2350	2730	2790
8,85		3450	2610	2800	3210	3340
10,25		4070	3135	3400	3890	4120
11,65		4680	3580	3960	4460	4800
13,04		5610	4115	4580	5150	5620

VIGA 04 – Pinus sem reforço						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e₁	e₂	e₃	e₄	e₅
0	0	0	0	0	0	
0,69	342	240	180	160	210	
1,39	695	470	370	310	420	
2,09	1018	680	540	440	610	
2,79	1380	930	730	610	820	
3,49	1740	1180	920	770	1040	

VIGA 04 – Pinus reforço – reforço com 02 camadas de fibra de carbono						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e₁	e₂	e₃	e₄	e₅
0	0	0	0	0	0	0
0,69	340	230	150	160	220	210
1,39	655	440	290	300	400	410
2,09	992	680	450	460	610	640
2,79	1275	880	585	600	790	810
3,49	1578	1100	730	750	980	1020
4,19	1895	1330	875	900	1170	1310
5,59	2531	1790	1170	1210	1560	1850
6,98	3000	2230	1460	1520	1930	2320
8,38	3500	2690	1750	1820	2300	2810
9,78	4000	3150	2035	2120	2680	3310
11,18	4500	3640	2210	2420	3040	3790
12,58	5000	4180	2480	2750	3430	4320
13,98	5500	4720	2915	3080	3820	4850
15,37	6000	5350	3050	3460	4270	5480
16,77		6020	3700	4000	4880	6380

VIGA 06 – Pinus sem reforço						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	
0,93	310	240	200	190	240	
1,86	611	460	390	380	470	
2,79	918	710	590	570	710	
3,72	1228	950	790	770	950	
4,66	1541	1200	990	970	1190	

VIGA 06 – Pinus reforço – reforço com 06 camadas de fibra de vidro						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	0
0,93	260	210	165	160	210	210
1,86	530	430	315	310	410	410
2,79	795	650	475	470	610	610
3,72	1080	880	640	640	830	820
4,65	1330	1100	800	800	1040	1040
6,52	1890	1560	1125	1130	1450	1470
8,38	3000	2020	1435	1460	1860	1930
10,25	3500	2500	1765	1780	2260	2360
12,11	4000	3000	2080	2100	2670	2810
13,98	4500	3620	2435	2460	3130	3310
15,84	5000	4300	2810	2840	3620	3850
17,70	6000	5170	3220	3250	4170	4440
19,57	7000	6070	3670	3750	4870	5200

VIGA 08 – Pinus sem reforço						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	
0,93	335	200	210	210	250	
1,86	643	380	410	390	480	
2,79	962	580	630	600	730	
3,72	1284	780	840	800	980	
4,65	1620	970	1040	1000	1220	

VIGA 08 – Pinus reforço – reforço com 02 camadas de fibra de carbono						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	0
0,93	275	180	165	170	220	280
1,86	550	360	320	330	440	560
2,79	725	540	490	510	680	730
3,72	1110	720	665	690	920	1060
4,65	1383	900	835	870	1140	1230
6,52	1922	1250	1160	1210	1570	1650
8,38	2474	1600	1495	1560	2000	2100
10,25	3200	1930	1810	1890	2430	2500
12,11	4200	2240	2135	2240	2880	3010
13,98	5000	2550	2470	2600	3320	3500
15,84		2800	2850	3090	4000	4260
17,70		3080	3255	3550	4570	4750
19,57		3360	3705	4060	5250	5420

VIGA 10 – Pinus sem reforço						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	
0,46	262	160	170	130	210	
0,93	502	300	300	250	400	
1,40	756	450	440	380	600	
1,86	1000	600	580	510	800	
2,34	1240	730	710	640	980	

VIGA 10 – Pinus – reforço com 20 camadas de fibra de vidro						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	0
0,46	262	120	80	90	120	130
0,93	502	230	140	150	220	240
1,40	756	340	210	220	320	360
1,86	1000	440	260	280	410	460
2,34	1240	560	330	350	530	580
4,66		1140	680	710	1060	1180
6,52		1610	960	980	1480	1660
8,39		2060	1220	1250	1900	2130
10,25		2510	1490	1540	2320	2640
12,11		2900	1760	1820	2760	3130
13,98		3300	2020	2120	3210	3680
15,84		3600	2280	2440	3700	4200
17,70		3910	2560	2790	4280	4950
19,57		4000	2860	3190	4940	5700

VIGA 11 – Peroba rosa sem reforço						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	
1,39	283	310	350	300	350	
2,79	551	610	680	580	700	
4,19	824	910	1030	870	1040	
5,59	1097	1220	1370	1160	1390	
6,98	1359	1520	1710	1430	1730	

VIGA 11 – Peroba rosa – reforço com 06 camadas de fibra de vidro						
Força (kN)	Flecha (mm)	Deformação (me)				
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅
0	0	0	0	0	0	0
1,39	230	270	200	270	270	280
2,79	456	550	400	540	550	560
4,19	669	800	620	800	820	840
5,59	882	1050	820	1050	1080	1100
6,98	1086	1290	1020	1300	1330	1360
8,38	1285	1540	1210	1550	1590	1600
9,78	1490	1780	1400	1800	1850	1850
11,18		2020	1600	2050	2100	2100
13,04		2350	1860	2390	2450	2450
14,91		2720	2140	2750	2820	2830
16,77		3050	2420	3120	3190	3210
18,64		3430	2720	3500	3580	3630
20,50		3760	3020	3900	3980	4050
22,36		4150	3330	4300	4400	4480
24,23		4520	3660	4720	4850	4950
26,09		4970	4000	5150	5310	5430
27,95		5580	4400	5680	5900	6050
29,82		6240	4870	6300	6570	6780