

**“A Fibra de Vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e Seu
Uso Estrutural em Construção Civil – O Estado-da-arte”**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**“A FIBRA DE VIDRO EM MATRIZES POLIMÉRICAS E CIMENTÍCIAS E SEU USO
ESTRUTURAL EM CONSTRUÇÃO CIVIL – O ESTADO-DA-ARTE”**

ALTIBANO ORTENZI JUNIOR

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos de Edificações.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

São Carlos

2007

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

O77fv

Ortenzi Junior, Altibano.

A fibra de vidro em matrizes poliméricas e cimentícias e seu uso estrutural em construção civil : o estado-da-arte / Altibano Ortenzi Junior. -- São Carlos : UFSCar, 2007.
205 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Compósitos. 2. Reforço estrutural. 3. Fibra de vidro. 4. GFRP. 5. GRC. 6. Construção civil. I. Título.

CDD: 620.118 (20ª)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

Via Washington Luís, Km 235 - CEP: 13.565-905 - São Carlos/SP/Brasil

Fone(16) 3351-8262- Ramal: 232 - Fax (16) 3351-8259

Site: www.ppgciv.ufscar.br Email: ppgciv@power.ufscar.br

**"A FIBRA DE VIDRO EM MATRIZES POLIMÉRICAS E CIMENTÍCIAS E SEU
USO ESTRUTURAL EM CONSTRUÇÃO CIVIL – O ESTADO-DA-ARTE."**

ALTIBANO ORTENZI JUNIOR

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 26 de julho de 2007

Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
Departamento de Engenharia Civil/PPGCIV/UFSCar
Orientador

Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira
Departamento de Engenharia Civil/PPGCIV/UFSCar
Examinador Interno

Prof. Dr. Jonas de Carvalho
Departamento de Engenharia Mecânica/EESC/USP
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho às crianças e adultos portadores de **SDAH** (Síndrome de Déficit de Atenção com Hiperatividade), que até poucos anos atrás era considerada como ação voluntária e arbitrária das pessoas (especialmente crianças e adolescentes) em não prestar atenção na aula, em conversar ou brincar. Isso só prova o quanto somos medíocres e ignorantes, apesar de pensarmos que temos conhecimento e somos donos da verdade.*

Graças às mentes brilhantes e iluminadas se descobriu a existência dessa disfunção que é tratável e permite que vivamos normalmente.

A verdade está aí para que todos a descubram. Depois de sofrer esse estigma por anos, deixo aqui minha solidariedade e apoio a todos que tenham ou convivam com que sofre dessa disfunção. Muitas vezes somos tomados de uma inquietação insuportável, sem saber o porquê desses acontecimentos e sensações que ocorrerem em nossas mentes. Qualquer pessoa pode sofrer isso, indistintamente. Só psicoterapia, amor, carinho e apoio de pai e de mãe ajudam no tratamento. Infelizmente só podemos lidar com fatos conhecidos. Com fatos desconhecidos, não temos como agir.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian, pela paciência e dedicação em me orientar;

Ao Prof. Dr. Marcelo A. Ferreira, pela paciência em me orientar informalmente;

Ao Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho, pelas conversas e aulas informais mais valiosas que qualquer disciplina;

Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho, Coordenador da Pós-graduação em Engenharia Mecânica da EESC-USP, que me aceitou como seu orientando no doutorado, me apoiando nessa nova etapa;

To Professor PhD. Stephen W. Tsai from the Department of Aeronautics and Astronautics of Stanford University, CA, Who I am thankful immensely for the support, books and articles donated for the development of my academic job and for the attention and devotion with that I was dealt. I sincerely wait to know it to thank its inestimable aid personally;

Ao Prof. Dr. Almir Sales, Coordenador do Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, pelo apoio recebido antes de ingressar no curso e no decorrer do mestrado;

Às empresas HEICHHOLD, através de José Luiz Calvo Filho, FIBERTEX, através de Telma Fernanda Biasi e VETROTEX - OWENS CORNING pelo material bibliográfico, boletins técnicos, fotos e amostras de material que ilustraram e ajudaram a complementar esta pesquisa;

A CAPES, pela bolsa concedida ao mestrado do DECiv – UFSCar.

Agradeço a felicidade, prazer e satisfação de ter convivido com todos vocês!

Aos professores, não tenho como expressar o quanto estou grato, por tudo o que aprendi e pelo que ainda irei aprender a cada vez que voltar a encontrá-los.

Alguns convivi mais - Guilherme, Chust, Marcelo e Alex, outros um pouco menos - Simar, Jasson, Sidney e Almir.

Quanto às amigas e aos amigos, só quero dizer que, sempre que vocês precisarem sabem que poderão contar comigo. A ordem é alfabética para evitar esquecer alguém: M.Sc. Abner, M.Sc. Aílton, M.Sc. Bruna, Bruno, Carlos (Beto), Carioca, Ciça, M.Sc. Cristina, Elza, Fábio N., Gisele, Igor, João, Leandro, Leonardo, M.Sc. Marcela C., M.Sc. Marcela K., Marcelo R., Mário, Natalia, Nathália, Nayara, M.Sc. Neiton, Olívia, Paulo, Rafael, M.Sc. Renê, Ricardo, Rita, Rodrigo, Solange (Sol), Terezinha, Ygor (nosso cinegrafista oficial), pessoal do 3º semestre da graduação da Civil, que não recordo o nome de todos e peço desculpas.

Rê, por tudo mesmo.

David, meu amigo e filho.

Sandril, minha irmã, mãe e agora pai.

Zappa, Nina, Zighy e Biba: só vocês conseguiam me arrancar do vácuo negro e silencioso em que eu mergulhava, durante várias vezes, com suas brincadeiras e carinhos que nenhum terráqueo entenderá jamais.

“É o vazio no interior do vaso que lhe dá a utilidade”

LAO TSE

“Le forme più semplice sono quelle più complesse”

Luigi Ortenzi

RESUMO

ORTENZI, Altibano (2007). “A Fibra de Vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e Seu Uso Estrutural em Construção Civil – O Estado-da-arte”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

Essa dissertação trata da utilização da fibra de vidro de duas formas distintas. A primeira como uma adição ao concreto para melhorar suas propriedades mecânicas num elemento estrutural qualquer, visando minimizar a propagação de fissuras por diversas ações. A segunda forma como reforço de polímeros diversos, os quais dão origem a elementos estruturais ou componentes de reforço estrutural interno ou externo de estruturas de concreto, em complemento ou substituição ao aço. É feita a revisão bibliográfica sobre as pesquisas e aplicações que representam hoje o estado-da-arte do uso desses materiais em construção civil. Em seguida, enumeram-se alguns processos de cálculo usuais para esse sistema construtivo. Posteriormente, são apresentados diversos exemplos de aplicação que fazem uso da fibra de vidro. do **GRC** ou dos **GFRP** como componentes estruturais, com enfoque para a construção civil. São abordados aspectos relativos à disseminação da tecnologia, aplicações no Brasil e dificuldades a serem transpostas. Com essa pesquisa espera-se aproximar o texto ao estado-da-arte até hoje.

Palavras-chave: Fibra de Vidro, Construção Civil, GFRP, GRC, Reforço Estrutural.

ABSTRACT

ORTENZI, Altibano (2007). Glass Fiber in Polymeric or Cimenticious Matrix and their Structural Use in Civil Construction – The State-of-Art. Dissertation (M.Sc.). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

This dissertation deals with the use of fiberglass as a concrete addition, in order to improve its mechanical properties such as better crack distribution, or as polymer reinforcement, in order to form a composite to be externally or internally used as reinforcement to other material as concrete or masonry or to use itself as a structural member.

The literature review presented is believed to achieve the current state-of-art of the fiberglass use in civil construction applications. Next, usual approaches to dimensioning structural members in GFRP are presented. Construction systems and processes using this material are assessed focused to civil construction. Themes as the technology spread up, Brazilian applications and eventual difficulties are focused.

With this research one expects to approach the text to the state-of-art up today.

Keywords: GRC, Fiberglass, Civil Construction, Structural Reinforcement, GFRP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Produção e consumo mundial de cimento. Fonte: SNIC (2005).....	9
Figura 2 – Fluxograma de uso da fibra de vidro em relação à matriz associada.....	15
Figura 3 – Esquema de fabricação da fibra de vidro	16
Figura 4 - Bobinas de <i>roving</i>	19
Figura 5 – “a” e “b” – Diferenças entre tecidos bidirecionais e unidirecionais	21
Figura 6 - “a” e “b” - Diferenças entre Mantas de Fios Contínuos e Picados.....	23
Figura 7 - “a” e “b” – Diferenças entre Fibra Moída e Picada	24
Figura 8 – relação ente os módulos de elasticidade longitudinal e transversal de diversos tipos de fibras	27
Figura 9 “a”, “b” e “c” – Exemplos de aplicações diversas	30
Figura 10 – Principais diferenças entre os polímeros termofixos e termomoldáveis.....	30
Figura 11 – Escamações provenientes de baixa temperatura de fusão em peças de polímeros injetadas.....	31
Figura 12 “a”, “b” e “c” – Mecanismos de Polimerização por Tipo de Ligação	35
Figura 13 “a” e “b” – Estrutura molecular e estereoquímica do Benzeno	37
Figura 14 – Seqüência de reação entre o poliéster, o estireno e o reagente.	38
Figura 15 – Cadeia química esquemática das resinas poliéster ortoftálicas.....	39
Figura 16 – Cadeia química esquemática das resinas poliéster tereftálicas	40
Figura 17 – Cadeia química esquemática das resinas poliéster isoftálicas.....	41
Figura 18 – Óxido de Etileno.	42
Figura 19 – Cadeia Química Esquemática das Resinas DGEBA Epóxi Básica.....	43
Figura 20 – Cadeia Química Esquemática das Resinas Poliéster Bisfenólicas.....	45
Figura 21 – Cadeia Polimérica Antes da Cura	48
Figura 22 – Cadeia Polimérica Após a Cura	48
Figura 23– Micrografia eletrônica de varredura indicando a formação dos cristais na hidratação.	55
Figura 24 – Esquema de distribuição dos cristais hidratados junto à superfície do agregado.	55
Figura 25 – Fluxograma de processo de caracterização dos compósitos	57
Figura 26 - Esquema de ataque às fibras de aço em regiões tracionadas	62
Figura 27 - Corpos de prova elaborados segundo as normas ISO 527-4 e ISO 527-5.....	64
Figura 28 - Curvas S-N, normalizadas para carregamento cíclico até a fadiga.....	65

Figura 29- Curvas características de tensão versus deformação	67
Figura 30 – Esquema de aplicação de múltiplas camadas de fibra de vidro	70
Figura 31 – Módulo e Resistência atingida, segundo o tipo de tecido e ângulo da camada	70
Figura 32 - Diagrama de transpasse entre 2 camadas de fibras.....	73
Figura 33 – Processo de Roletagem para consolidar camada de fibra	73
Figura 34 – Diagrama tensão versus deformação. Fonte: FIB (1998).....	83
Figura 35 - Diagrama de caracterização do GFRP	87
Figura 36- Fratura devido ao arrancamento por tração	88
Figura 37- Fratura devido ao cisalhamento interlaminar.....	89
Figura 38 – Alteração da tensão em função do direcionamento.....	90
Figura 39 “a” e “b” – Comprimento de flambagem para compósitos	96
Figura 40 “a” e “b” – Geometria das nervuras enrijecedoras.....	101
Figura 41 “a” e “b” – Tendência de ruptura com e sem ancoragem transversal.	107
Figura 42 - Ensaio de flexão em viga recuperada com reforço externo em GFRP	108
Figura 43 – Região de atuação das tensões máximas e cortantes máximas –	112
Figura 44 – Edificação construída na Nova Zelândia em 2003.....	118
Figura 45 – Aplicação de CGFRP sobre alvenaria.....	118
Figura 46 - Reforços de recuperação estrutural em construções antigas ou danificadas por sismos.	122
Figura 47 - Reforços em pilares, vigas e tabuleiros de pontes e viadutos.....	122
Figura 48 – Execução manual do laminado de GFRP	123
Figura 49– Roletes utilizados para extração de bolhas dos laminados.....	123
Figura 50 – Detalhe da pistola de laminação por projeção (<i>spray-up</i>).....	126
Figura 51 - Modelo esquemático de uma linha de produção de pultrusão	128
Figura 52 - Perfis produzidos pelo processo de pultrusão.....	128
Figura 53 - Equipamento de Enrolamento filamentar – <i>Filament Winding</i>	130
Figura 54 – Túnel construído com GRC projetado sobre concreto armado com GFRP	133
Figura 55 – Mesquita em Omã – Construída com painéis em GRC	133
Figura 56 “a” e “b” – Execução de laje e piso com GRC	134
Figura 57 “a”, “b” e “c” – Banheiros prontos pré-fabricados em GRC. Fonte	135
Figura 58 – Painéis GRC usados como fôrma perdida em pontes.....	136
Figura 59 – GRC associado à armadura estrutural em painéis estruturais	138
Figura 60 - Painéis curvos com aplicação de textura colorida.	138
Figura 61 “a” e “b” - Painéis de fachada arquitetônicos	139

Figura 62 - Restauração estrutural e da fachada - Catedral da Sé – SP.....	139
Figura 63 - Estrutura de GFRP recoberta com policarbonato	141
Figura 64 - Passarela para pedestres construída na Irlanda em 1999	141
Figura 65 – Passarela para pedestres construída no Reino Unido em 2005	142
Figura 66 “a” e “b” – Ponte “West Mill” Construída no Reino Unido	142
Figura 67 – Ponte “Tsukuyda”	143
Figura 68 – Detalhe de estrutura totalmente executada com perfis pultrudados em GFRP ...	144
Figura 69 – Pilar de ponte reforçado por GFRP por laminação manual helicoidal.....	145
Figura 70 – Detalhe reforço externo com perfil GFRP para recuperar viga de ponte dos E.U.A	145
Figura 71 – Reforço executado com barras chatas híbridas de GFRP e CFRP em ponte nos EUA.....	146
Figura 72 – Aplicação de barras circulares de GFRP como reforço estrutural	147
Figura 73 - Exemplo de barras estruturais e telas em GFRP e PRFC	148
Figura 74 - Estrutura de fundação para laboratório de hospital com.....	149
Figura 75 “a”, “b”, “c” e “d” – Exemplos de aplicação de barras pultrudadas em GFRP	151
Figura 76 – Ponte construída em Michigan – EUA.....	151
Figura 77 – Ponte em sistema construtivo híbrido – GFRP e laje alveolar de concreto protendido.....	152
Figura 78 - Resultados de ensaios com painéis e vigas de GRC.....	155
Figura 79 “a” e “b” - Cone de espalhamento da tensão de puncionamento de pilares em lajes.	156
Figura 80 - Comportamento dos corpos de prova reforçados com fibra de vidro.....	157
Figura 81 - Resultado dos ensaios de flexão biaxial para placas reforçadas.....	158
Figura 82 - Tipologias de aplicação de reforço externo em GFRP	159
Figura 83 - Ensaio de carregamento cíclico à flexão pura	160
Figura 84 “a”, “b”, “c” e “d” – análises de ligações realizadas por Mottram (2002).....	161
Figura 85 “a”, “b”, “c” e “d” – Ensaio executados com diversas ligações em GFRP.....	162
Figura 86 – Viga mista, GFRP – concreto sendo ensaiada	163
Figura 87 “a” e “b” – Detalhes da ruptura da viga.	164
Figura 88 – Viga de viaduto danificada por impacto de carrocerias ou cargas - EUA	164
Figura 89 - Detalhe da viga danificada para simular o dano real.....	165
Figura 90 – Aplicação de fibra por projeção (<i>spray-up</i>)	165
Figura 91 - Viga não danificada, de controle, sendo ensaiada	166

Figura 92 – Diagrama de Momento versus deflexão normalizados	167
Figura 93 “a”, “b” e “c” – modos de ruptura dos corpos de prova ensaiados	169
Figura 94 – Modos de ruptura de perfis parafusados	169
Figura 95 “a” e “b” – Ensaio de compressão e compressão diagonal.....	172
Figura 96 – Disposição das barras de reforço na alvenaria da “Ponte Postegiano”	172
Figura 97 - Diagrama Tensão compressiva diagonal versus deformação	173
Figura 98 – Diagrama cisalhamento diagonal x deformação angular	173
Figura 99 – Esquema de posicionamento do reforço em metade do Corpo de prova.	176
Figura 100 – Meio corpo de prova, com ranhura pra inserção.....	176
Figura 101 – Corpos de prova já unidos através do reforço de GFRP	177
Figura 102 – Corpo de prova sendo ensaiado.....	177
Figura 103 – Corpos de prova com 4 furos e 6 furos	178
Figura 104 “a” e “b” – Ruptura dos corpos de prova com 2, 4 e 6 furos	179
Figura 105 - Microfotografia de evolução de trincas em compósito.....	180
Figura 106 – Posicionamento dos elementos de laje para ensaios de flexão pura	181
Figura 107 – Elemento de laje colméia para ensaios de flexão pura.....	181
Figura 108 – Elemento após a ruína da mesa da laje no.....	182
Figura 109 – Elemento após a ruína total, na flexão transversal pura.....	183
Figura 110 – Aplicação do GFRP sobre o pilar de alvenaria	184
Figura 111 – Pilar reforçado com GFRP – Modo de ruptura I e II	185
Figura 112 – Pilar reforçado com GFRP – Modo de ruptura I e II	185
Figura 113 - Cópia das fissuras ocorridas na viga ensaiada para o domínio 3-4.	187
Figura 114 - Elemento estrutural submetido à simulação.	187
Figura 115 -Esquema de simulação por MEF e comparação com situação real de ensaio	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção e consumo mundial de cimento	8
Tabela 2 – Diferenciação entre os vários tipos de fibras de vidro produzidas	17
Tabela 3 – Composição média por tipo de vidro	18
Tabela 4 – Tipos e pesos dos <i>rovings</i> produzidos comercialmente.....	20
Tabela 5 – Tipo de tecido, gramatura e espessura de laminado por camada.....	21
Tabela 6 – Tipos de Manta e teor de vidro e espessura do laminado	23
Tabela 7 – Propriedades mecânicas comparativas entre diversos tipos de fibras sintéticas.....	25
Tabela 8 – Comprimento das fibras para atingir 95% da eficiência do reforço - disposição unidirecional	26
Tabela 9 – Relação de Peso, Espessura e Resistências entre GFRP, Aço e Alumínio.....	28
Tabela 10 – Alguns tipos de polímeros e algumas utilizações mais comuns	34
Tabela 11 – Principais grupos de resinas e aplicações comerciais usuais.....	42
Tabela 12 – Propriedades Mecânicas de Polímeros Curados sem reforço	46
Tabela 13 – Tempo de início de cura, por tipo de catalisador e acelerador	49
Tabela 14 – Temperatura de polimerização por tipo de catalisador	49
Tabela 15 – Variação de durabilidade de resinas poliéster com a temperatura.....	50
Tabela 16 – Características Típicas de Resinas Base Poliéster	51
Tabela 17 – sistemas de cura de resinas epóxi	52
Tabela 18 – Composição média do Clínquer.....	53
Tabela 19 – Dosagem de 2 tipos de GRC para ensaio de flexão comparado	58
Tabela 20 – Propriedades mecânicas de 2 compósitos em GRC.....	59
Tabela 21 - Valores obtidos em ensaio de tração monotônico como parâmetro da tensão no ELU	64
Tabela 22 - Rotina de Serviço Passo a Passo para execução de laminação	68
Tabela 23 - Codificação para seqüência de laminação com principais fibras e gramaturas	68
Tabela 24 – Propriedades mecânicas de laminados em GFRP.....	72
Tabela 25 – Densidade dos materiais constituintes dos compósitos	75
Tabela 26 – Valores característicos de GRC – Desvio de +/- 2,5%.....	79
Tabela 27 – Coeficientes em função da utilização dos elementos em GRC	80
Tabela 28 – Valores do coeficiente de flambagem segundo o tipo de restrição	97

Tabela 29 - Coeficientes dimensionais e de apoio para placas planas carregadas uniformemente.....	100
Tabela 30 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo meia-cana	102
Tabela 31 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo chapéu	102
Tabela 32 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo meia-cana	103
Tabela 33 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo chapéu	104
Tabela 34 – Resultados de valores recomendados pelos ensaios até 2007	162
Tabela 35 – Resultados obtidos com ensaios de perfis pultrudados para construção	168
Tabela 36 – Resultados dos ensaios de tração em ligações parafusadas.....	170
Tabela 37 – Características do material empregado na pesquisa.	171
Tabela 38 – Dimensão dos modelos de vigas ensaiados	174
Tabela 39 – Resultados médios obtidos nos ensaios com os CPs.	177
Tabela 40 – Resultados médios obtidos nos ensaios com os CPs.	179
Tabela 41 – Dimensão dos modelos de vigas ensaiados.	181
Tabela 42 – Resultados dos ensaios para os elementos com epóxi – S e epóxi – M.....	182
Tabela 43 – Ensaios transversais para os elementos construídos com epóxi – S e epóxi – M	183
Tabela 44 – Dimensões dos modelos de pilares de alvenaria ensaiados.....	184
Tabela 45 – Resultados dos ensaios para os elementos de pilar construídos	186
Tabela 46 – determinação das vigas do projeto segundo os domínios de deformação	186

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ :	Massa específica
μ :	Viscosidade dinâmica, em Ns/m ²
μm :	micrômetro (micron) – equivalente a 10 ⁻⁶ metro
η :	Viscosidade aparente (ou cinemática) = μ / ρ
ν :	Coefficiente de Poisson (quando diferente será indicado no texto)
C:	Carbono.
Co:	Solução de Cobalto – acelerador de cura utilizado com AAP, CHP e MEKP
COH ₄ :	Representação da fórmula química de um composto
H:	Hidrogênio
O:	Oxigênio
-OH:	Representação química das hidroxilas
R:	Representação do radical ou cátion presente na reação
S-N:	Curvas derivadas de ensaios de fluência (<i>Stress versus Number of Cycles</i>)
T_g :	Temperatura de Transição Vítrea
T_m :	Temperatura de fusão
Z:	Representação do íon presente na reação.
S	Valor representativo ou característico de carregamento
γ_f	Fator de majoração de carga
S_d	Valor das ações de projeto
R	Resistência representativa
γ_m	Fator de minoração do material
R_d	Valor resistente de projeto para o material específico
ε	Deformação calculada em função das tensões e das deformações restringidas.
ε_d	Valor da deformação máxima de projeto
ε_{wk}	Deformação característica do material
ε_{wk}	Obtido a partir de medições no decorrer da vida útil do material ou ensaios
P_{RUP}	É a força máxima atingida em ensaio de flexão pura (ensaio de 4 pontos)
L	É o vão livre entre apoios

b	Largura da peça ensaiada (na região de ruptura caso seja seção variável)
d	Altura da peça na região de ruptura (caso seja seção variável)
P_e	Ponto em que o diagrama tensão versus deformação deixa de ser proporcional
Y_e	Deflexão medida ao atingir o limite de proporcionalidade do material.
ρ_k	Densidade do k-ésimo material constituinte que se queira determinar o volume
V_k	Fração de volume do k-ésimo material que se queira determinar
M_k	Fração de massa do k-ésimo material que se queira determinar
E_{11}	módulo de elasticidade longitudinal às fibras;
E_{22}	módulo de elasticidade na direção transversal;
ν_{12}	coeficiente de Poisson (deformação y,x)
G_{12}	módulo cortante longitudinal;
ν_{21}	coeficiente de Poisson (deformação x,y)
σ_{1u}	Tensão de ruptura total no sentido longitudinal;
σ_{fu}	Tensão de ruptura das fibras;
V_m	Fração de volume da matriz = $1 - V_f$;
σ_{mu}	Tensão de ruptura da matriz.
σ_c	Tensão se tração no compósito;
σ_l	Tensão de tração na lâmina;
τ_l	Tensão de cisalhamento devida à tração nas lâminas.
σ_{tr}	Tensão transversal às fibras;
σ_m	Tensão última de ruptura da matriz;
σ'_1	Tensão última de ruptura das fibras.
V_f	Fração de volume de fibra.
σ_b	Tensão crítica de flambagem
σ_{bcomp}	Tensão crítica de flambagem do compósito
E_x	Módulo de elasticidade do compósito em x (E_{11})
G_{xz}	Módulo de elasticidade transversal em xz (G_{13})
d	Espessura
l	Comprimento
b	Largura

t_k	Espessura do laminado em milímetros
w_f	Massa da fibra em kg / m ²
w_m	Massa da matriz polimérica, em kg/m ²
δ_f	Densidade da fibra de vidro, em g/cm ³
δ_m	Densidade da matriz de resina, em g/cm ³
W_f	Fração em massa da fibra, em % em relação ao peso ou volume total
σ_{cr}	Tensão crítica de flambagem
η	E_t / E
E_r	Módulo resultante
β	Coefficiente de restrição de movimentação do elemento estrutural considerado
y	Flecha máxima admissível (em cm)
K_1 e K_2	Coefficientes dependentes do tipo de apoio e geometria da peça
a	largura da placa ou raio, se circular (em cm)
E'	o módulo de elasticidade na flexão
M	o momento fletor máximo (no engaste ou no meio do vão)
t	espessura do laminado (em cm)
q	carga lateral uniforme (em Kg/cm ²)

LISTA DE ABREVIATURAS

AAP:	Peróxido de Acetil-Acetona – catalisador para cura a frio.
AFRP:	Aramida Fiber Reinforced Polymer – Polímero reforçado com fibra aramida.
ARI:	Cimento de alta resistência inicial.
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ABCP:	Associação Brasileira do Cimento Portland.
ASTM:	American Standards for Testing and Materials.
BPO:	Peróxido de Benzoíla – catalisador para cura a frio ou térmica.
BMC:	Bulk Molding Compound – Moldagem por compressão do compósito.
CFRP:	Carbon Fiber Reinforced Polymer – Polímero reforçado com fibra de carbono.
CHP:	Peróxido de Ciclohexanona – catalisador.
DMA:	Dimetil anilina – acelerador de cura utilizado com BPO.
ELS:	Estado Limite de Serviço.
ELU:	Estado Limite Último.
FRP:	Fiber Reinforced Polymer – Polímero reforçado com algum tipo de fibra.
GFRP:	Glass Fiber Reinforced Polymer – Polímero reforçado com fibra de vidro.
GRC:	Glass fibre Reinforced Concrete – Concreto reforçado com fibras de vidro.
GFRC:	Glass Fiber Reinforced Concrete – Variação de GRC no inglês americano.
HPC:	Hidroperóxido de Cumila – catalisador para cura térmica.
ISO:	International Standards Organization.
MEKP:	Peróxido de Metil-Etil-Cetona.
NPG:	Neo Pentil Glicol.
PGRC:	Projected Glass Fiber Reinforced Concrete – Concreto projetado reforçado com fibra de vidro.
PTBPB:	Peróxido Terciário de Butil-perbenzoato – catalisador para cura térmica.
PTBPC:	Peróxido Terciário de Butil-cumila – catalisador para cura térmica.
PTBPO:	Peróxido Terciário de Butil-peroctoato – catalisador para cura térmica.
RTM:	Resin Transfer Molding - Moldagem por transferência de resina.
SMC:	Sheet Molding Compound – Moldagem por compressão de folhas pré-impregnadas submetidas à compressão e calor.
TEX:	Unidade de medida de massa por comprimento dos fios das bobinas de <i>roving</i>

SUMÁRIO

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	5
1.3 Desenvolvimento do Trabalho	5
1.4 Método Utilizado	6
1.4.1 Dados Sobre a Fibra de Vidro	7
1.4.2 Dados Sobre o Cimento Portland	8
1.4.3 Dados Sobre os Polímeros	9
1.4.4 Compilação dos Dados	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 O Vidro Sob a Forma de Fibras	10
2.2 Os Polímeros	11
2.3 O Concreto Reforçado com Fibras – GRC	13
2.4 Conceituação e caracterização	13
2.4.1 A Fibra de Vidro	14
2.4.1.1 Tipos de Fibra de Vidro	17
2.4.1.2 Propriedades Mecânicas das Fibras	25
2.4.2 Os Polímeros	28
2.4.2.1 Poliéster	37
2.4.2.2 Epóxi	42
2.4.2.3 Fenóis (Bisfenóis)	44
2.4.3 Propriedades Mecânicas dos Polímeros	45
2.4.3.1 O Processo de Cura dos Polímeros Insaturados	46
2.4.4 O Cimento Portland e o Concreto	52

2.4.4.1	Efeitos Sobre o Concreto	53
2.4.5	Compósitos em Matrizes cimentícias e Poliméricas	56
2.4.5.1	Compósitos em Matrizes Cimentícias	57
2.4.5.2	Compósitos em Matrizes Poliméricas	63
2.4.5.2.1	Características construtivas do CFRP	74
2.4.5.2.2	Regra das Misturas	76
2.4.6	Recomendações ao Projetar Estruturas em GRC	78
2.4.7	Recomendações ao Projetar em GFRP	84
2.4.7.1	Modelos Baseados em Hollaway e Piggott	86
2.4.7.2	Tração uniaxial Longitudinal	87
2.4.7.3	Tração Transversal e Força de Cisalhamento	88
2.4.7.4	Laminados Isotrópicos Homogêneos	91
2.4.7.5	Laminados Ortotrópicos Homogêneos	91
2.4.7.6	Compressão em Compósitos	95
2.4.7.7	Dimensionamento Proposto em Owens Corning® (1996)	98
2.4.7.8	Modelo Desenvolvido pelo NPL - UK (1999)	108
2.4.7.9	Modelos de Análise de Falha por Ruptura	110
2.4.7.10	Modelos de Dimensionamento e Análise Computacional	113
2.4.7.11	Outros Modelos de Dimensionamento e Análise	115
3.	Técnicas de Aplicação dos Compósitos	117
3.1	Técnicas de Aplicação do GRC	117
3.2	Técnicas de Aplicação do GFRP	119
3.2.1	Laminação Manual	120
3.2.2	Laminação por Projeção Spray-up	125
3.2.3	Pultrusão	127
3.2.4	Outras Técnicas de Aplicação	129
4.	Exemplos de Aplicações	132
4.1	Aplicações em GRC	132
4.2	Aplicações em GFRP	140
4.2.1	Aplicações Como elementos Estruturais Autônomos	140
4.2.2	Aplicações de GFRP Como Reforço Externo	144
4.2.3	Aplicações de GFRP Como Reforço Interno	147

5.	Pesquisas Recentes	153
5.1	Pesquisas Realizadas em GRC	153
5.2	Pesquisas Realizadas	158
5.3	Pesquisas Necessárias	188
6.	Conclusões	190
6.1	Sobre a Caracterização dos Materiais	190
6.2	Sobre as Pesquisas Recentes	191
6.3	Sobre Aplicações Recentes na Construção Civil	192
6.4	Conclusão Final	192
	Referências Bibliográficas	194
	Bibliografia Complementar	198
	Glossário	200
	ANEXO I	204
	ANEXO II	205

1. INTRODUÇÃO

De todos os setores industrializados, a construção civil continua sendo o menos avançado, seja nos processos produtivos, seja nos processos construtivos. No seu caso, o processo produtivo é inverso ao da indústria manufatureira, onde o resultado da produção é o próprio protótipo e ao mesmo tempo o produto final. É um setor, em geral, resistente a mudanças. Assim, inovações dos processos, materiais e métodos construtivos demandam maior tempo para serem absorvidos pelo setor.

Outra característica, é que as construções são únicas enquanto produtos acabados, dificultando obter uma padronização ou modulação global (TOLEDO et al., 1999). Esse fato já ocorre mesmo na concepção dos loteamentos urbanos que, apesar de possuírem dimensões em planta similares, as elevações podem ser substancialmente diferentes, segundo a topografia da região, dificultando ainda mais a adoção de projetos padronizados, considerando o conjunto de um município ou região.

Existem inúmeros casos em que a produção serial das edificações pode ser obtida, como nos conjuntos habitacionais, onde a repetição dos módulos edificados e das unidades habitacionais confere ao produto caráter de industrialização, no sentido mais amplo do termo. Nesse sentido, o uso de métodos e técnicas construtivas mais eficientes, com menor índice de desperdícios e que favoreçam o aumento da qualidade e durabilidade devem ser sempre buscados, seja pelos empresários, seja pelos pesquisadores.

A despeito das técnicas construtivas, tipologias utilizadas e das tecnologias desenvolvidas, na construção propriamente dita, as demais indústrias que compõem outras etapas (instalações, revestimentos e demais acabamentos) dessa ampla cadeia, por se caracterizarem por indústrias seriadas, atingiram níveis tecnológicos, na produção de matérias-primas, de alta tecnologia e desempenho. Exemplo disso são os chamados porcelanatos, pisos de altíssima dureza, resistência a riscos e extremo brilho, similares aos granitos, fabricados pelas indústrias de revestimentos cerâmicos.

Em relação aos materiais básicos, isto é, cimento, agregados, e componentes de vedação, desde blocos de concreto até painéis de gesso acartonado, pouco se avançou em comparação com os componentes de acabamento e de instalações. Como exemplo, se verifica que o concreto de alto desempenho ainda está restrito às tipologias construtivas mais arrojadas, de alto valor agregado, em residências de alto padrão, em obras de arte e infraestrutura ou na indústria de pré-moldados.

Sob este prisma, são necessárias pesquisas no sentido de facilitar os métodos e processos construtivos, através do desenvolvimento de produtos e sistemas que permitam maior rapidez da construção. Devem, também, transferir essa evolução para que as empresas responsáveis pela construção. Dessa forma, essas passariam atuar como verdadeiras montadoras de subsistemas, através da criação de processos, métodos e tecnologias, viabilizando a modernização e serialização do todo ou de parte do conjunto edificado, como ocorre no sistema de pré-moldados de concreto ou estruturas metálicas.

A aplicação de fibra de vidro na construção civil pode ocorrer nas variadas etapas citadas, podendo ser utilizada em vários dos subsistemas construtivos (instalações, acabamentos, estrutura). Como aplicação em instalações prediais pode-se citar tubulações de água e esgoto, quadros de distribuição de energia, *shafts*, entre outras. Como acabamento, ela pode ser utilizada como painel de vedação interna ou externa, trazendo benefícios como leveza e durabilidade.

Ainda que sejam sistemas construtivos bem mais aprimorados, em relação ao concreto armado e à alvenaria convencional, os sistemas pré-fabricados, no Brasil, ainda possuem um custo elevado de montagem. Dessa forma, sua utilização está restrita a empreendimentos industriais ou comerciais de grande porte. Outra dificuldade para a descentralização de sua aplicação deve-se aos custos dos equipamentos de elevação, os gabaritos das rodovias e das vias urbanas que limitam as dimensões das peças, para seu transporte.

Em relação às estruturas em aço, as maiores dificuldades são devidas à sua disseminação enquanto sistema construtivo, aceitabilidade em determinadas regiões do Brasil e a centralização das unidades produtoras do aço estrutural junto às principais jazidas de ferro e manganês. Além disso, os sistemas de vedações em alvenaria necessitam ser compatibilizados, devido a sua rigidez em relação à estrutura de aço, para que não ocorram patologias. Isso requer alto grau de detalhamento das ligações entre a estrutura e as vedações, que podem aumentar o custo da obra, em alguns casos.

Para ambos os sistemas acima, a aplicação de painéis em GFRP ou GRC é uma alternativa que porta os benefícios da construção seca, isolamento termo-acústico e a facilidade de montagem e fixação em sistemas construtivos em pré-fabricados de concreto ou em aço. A redução substancial do peso próprio dos elementos possibilita criar mecanismos mais compactos para efetuar as diversas ligações necessárias. Isso pode ser revertido como valor agregado, ou redução dos custos de produção. Contudo, as soluções descritas aqui devem ser criteriosamente analisadas sob o ponto de vista de custo global dos diversos

sistemas construtivos, da finalidade de uso e do ambiente no qual a estrutura estará sendo utilizada.

Antes de dar continuidade, para evitar confusões de leitura ou interpretação, deve-se esclarecer o uso dos seguintes termos, especificamente para o presente trabalho, dissociando-os dos conceitos que lhes sejam atribuídos na nossa linguagem culta ou coloquial:

- **Matéria-prima** – utilizado aqui como um produto que já tenha passado por um ou mais processos de industrialização, para formar um novo material, utilizado como componente de um terceiro produto, por exemplo, o cimento Portland, que passa por processos industriais complexos na sua produção, mas serve de matéria-prima para produzir o concreto. Também a fibra de vidro, que deriva basicamente de areia pré-selecionada onde são acrescentados alguns outros elementos com o Boro e Silício para realizar correções e derretida para processar o vidro.
- **Insumo** – se refere aos materiais “in natura”, como minerais diversos e agregados, utilizados para produzir o cimento, o concreto e o vidro, compostos químicos inorgânicos como Peróxido de Hidrogênio, ou subprodutos orgânicos derivados do petróleo, como o Benzeno, que se constituem de compostos químicos utilizados para a fabricação dos polímeros.

1.1 JUSTIFICATIVA

A justificativa dessa pesquisa é o crescente interesse em aplicações envolvendo compósitos, para o setor da construção civil.

Apesar de já ser corrente o uso de fibra de vidro em alguns sub-setores da construção civil, como o de instalações e de acabamentos isso só começou ocorrer a partir de meados da década de 1990, quando se verificou um aumento nas aplicações desse tipo de material, no Brasil.

Em outras aplicações, como reforço estrutural, seu uso é bem menor, ainda que comparado a outros compósitos mais nobres, como o de fibra aramida ou de carbono, não produzidos em larga escala no Brasil. Contudo, seus custos são bem inferiores que o das outras fibras citadas.

Entende-se que esse contra-senso está ligado principalmente ao fato das pesquisas sobre a aplicação desse material serem recentes e pouco divulgadas. Percebe-se

então a necessidade de informar, de maneira objetiva, consistente e detalhada, projetistas, engenheiros, empresários, técnicos e fornecedores de matérias-primas da construção civil sobre a aplicação desse material. A difusão da informação é a forma mais eficiente para a transferência de novas tecnologias, processos ou métodos de aplicação de novos materiais que ainda não tenham sido conhecidos completamente em relação às propriedades físicas, mecânicas, desempenho estrutural e custos de aplicação.

Este texto, ao abordar o uso da fibra de vidro como reforço estrutural sob as diversas formas de aplicação, justifica-se como ferramenta de divulgação de material cujo potencial de uso, com ganhos técnicos e econômicos, é grande.

Romper barreiras tecnológicas e econômicas, através do esclarecimento e conhecimento das vocações desse material na construção civil, permitirá difundir seu uso, buscando sempre a melhor qualidade, produtividade e segurança das edificações e obras de infra-estrutura no Brasil.

Como benefícios imediatos podem-se citar:

- Ganho com tempo de execução;
- Equipamentos de transporte mais leves;
- Mão-de-obra qualificada, melhorando a qualidade final do produto;
- Redução de peso próprio das estruturas;
- Menor custo com fundações;
- Menor volume de movimentação do solo original com menor impacto ambiental;
- Redução proporcional de parte dos insumos básicos utilizados na construção civil, gerando menor agressão ao ambiente (exceção da areia);
- Maior resistência aos ataques ambientais ou químicos.

A necessidade de redução dos volumes ocupados e dos espaços úteis nas construções motiva as pesquisas por materiais que permitam obter resultados eficientes com desempenho similar ou superior aos materiais tradicionais, ou que permitam a utilização conjunta com esses, melhorando as características mecânicas dos mesmos. Isso resulta em menor consumo em volume e em área, fatores que aumentam os índices de aproveitamento do espaço edificado. Além disso, a tendência mundial é ficarem cada vez mais escassos os materiais mais tradicionais usados da construção civil, entre eles:

- Areia;
- Argila;
- Rochas diversas.

A principal razão disso é o elevado custo energético para obter insumos derivados desses minerais ou matérias-primas dos mesmos, como tijolos, telhas, cimento e concreto.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo descrever o atual estado-da-arte sobre o uso da fibra de vidro no setor da construção civil, como reforço estrutural. Como objetivos secundários apresentou-se a caracterização dos diversos materiais constituintes desse material compósito, em suas várias tipologias e os modelos mais utilizados no dimensionamento das estruturas constituídas parcial, ou totalmente, de fibra de vidro dispersa em matrizes poliméricas ou cimentícias. Além disso, buscou apresentar soluções correntes no Brasil e no mundo, em construção civil, assim como, soluções alternativas que ainda encontram-se sob investigação ou monitoramento para posterior validação ou invalidação do uso de materiais avançados, ou compósitos, em construção civil. Finalmente, propôs novas pesquisas visando ampliar a compreensão sobre o tema aqui discutido e também disseminar informações técnicas ao mercado da construção civil, que possam ser absorvidas pelos projetistas e construtoras. Portanto, o foco deste trabalho são as aplicações estruturais a seguir descritas:

- Material de reforço externo em vigas, pilares, lajes e alvenarias em polímero reforçado com fibras de vidro - *Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP;
- Elementos estruturais produzidos exclusivamente em GFRP;
- Elementos estruturais de concreto reforçados internamente com fibras de vidro picadas ou com armaduras de GFRP.

1.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo são informadas a proposta da pesquisa, a organização do trabalho e o método de elaboração do mesmo. O capítulo 2 descreve o método aplicado na elaboração da pesquisa, discriminando a seqüência das atividades e como essas foram realizadas, apresentando uma revisão bibliográfica e um quadro-resumo sobre o tema proposto e suas subdivisões. Posteriormente, se faz uma retrospectiva histórica resumida sobre o surgimento do vidro, dos polímeros e do concreto, os componentes principais dos materiais tratados neste trabalho.

O capítulo 3 destaca o uso da fibra de vidro em todo o seu contexto, isto é, como insumo para produção de materiais compósitos e como ocorre sua interação com outras matrizes. Também são caracterizados os demais materiais com os quais a fibra de vidro está associada. Além disso, são abordados aspectos químicos, físicos e mecânicos desses materiais, para que se compreenda de que forma ocorrem as interações. No capítulo 4 serão tratadas aplicações que representam até o momento, o estado-da-arte no uso da fibra de vidro na construção civil, bem como as pesquisas já realizadas até o momento em relação ao uso da fibra de vidro construção civil. O capítulo 5 apresentará a discussão sobre as pesquisas recentes. Serão feitas considerações sobre as possibilidades de aplicação mais imediatas do material.

No capítulo 6 se encontram as conclusões finais e propostas para novas pesquisas.

1.4 MÉTODO UTILIZADO

Esta pesquisa se desenvolveu conforme os seguintes quesitos:

- Revisão bibliográfica pertinente ao tema;
- Definição das nomenclaturas e os conceitos químicos relacionados;
- Obtenção de dados sobre todos os insumos e produtos, ou subprodutos derivados;
- Compilação das informações obtidas de acordo com suas características;
- Caracterização dos materiais subdivididos pelas matrizes principais;
- Propriedades mecânicas do **GFRP** para uso em dimensionamento estrutural;
- Propriedades mecânicas do **GRC** - “**Glass fiber Reinforced Concrete**” para uso em dimensionamento estrutural;
- Exemplos de cálculo estrutural para **GFRP** e para o **GRC**;
- Exemplos de aplicações em construção civil de **GFRP** e **GRC**;
- Discussão da análise realizada;
- Conclusão e proposições para novas pesquisas.

Foram divididos em três grupos principais os dados obtidos, iniciando pela fibra de vidro, posteriormente os polímeros e finalmente o cimento. Posteriormente dois subgrupos se formaram, sendo o primeiro da fibra em matriz polimérica e o segundo da fibra em matriz cimentícia.

1.4.1 DADOS SOBRE A FIBRA DE VIDRO

As pesquisas referentes aos fabricantes de fibra de vidro foram direcionadas por entrevistas almejando obter, dos mesmos, informações relacionadas à utilização da fibra de vidro na construção civil. Paralelamente, realizou-se o levantamento das pesquisas recentemente concluídas, que fossem úteis ao tema do trabalho, para posteriormente apresentar os resultados e, eventualmente, conclusões e propostas para aplicações da fibra de vidro na construção civil.

Apesar de terem sido fornecidos diversos elementos para fundamentar o trabalho, notou-se que o interesse do fabricante está em aplicar algo já pesquisado e verificar suas potencialidades comerciais.

Outro aspecto importante é o fato do produtor ser uma empresa multinacional cujas atividades no Brasil vêm recebendo menor interesse por parte de seus gestores no desenvolvimento de pesquisas e produtos. Isso pode afetar negativamente, no futuro, o desenvolvimento do mercado da fibra de vidro no Brasil.

Dados sobre os polímeros

Em relação aos fabricantes de polímeros foi adotado o mesmo método de pesquisa referente ao fabricante de fibra de vidro. Porém, a diferença básica, foi o fato de existirem dezenas de fabricantes de polímeros no país, facilitando a obtenção de dados para o trabalho.

Dentre as empresas pesquisadas, os dados obtidos foram invariáveis, apesar de existirem algumas diferenças de formulação para um mesmo polímero – por exemplo, uma resina éster vinílica – de um fabricante para outro.

Os aditivos e agentes complementares são os constituintes que fazem a diferença entre os fabricantes.

Tecnicamente, são os processos e as técnicas de execução, componente e o resultado final esperado para alguma aplicação, os fatores determinantes da seleção de um ou outro tipo de polímero. Além desses, o tipo de fibra a ser utilizado também é fator fundamental na seleção do polímero, pois está relacionada à maior ou menor compatibilidade entre os materiais.

Deve ser ressaltado que o presente trabalho tratou apenas de polímeros termofixos, que possuem ligações cruzadas através da reação entre um agente catalisador e os compostos poliméricos que pertencem aos polímeros insaturados.

1.4.2 DADOS SOBRE O CIMENTO PORTLAND

Pela amplitude da indústria do cimento no Brasil, os dados necessários para a pesquisa foram mais facilmente obtidos junto aos fabricantes de cimento, ou à ABCP – Associação Brasileira do Cimento Portland.

Além disso, o vasto material de pesquisas acadêmicas recentes disponíveis, já permite elevado grau de aprofundamento do tema, o qual será abordado apenas em relação aos agentes que influenciam na interação entre o cimento, o concreto e as fibras de vidro.

Alguns dados relacionados a questões econômicas também são bem mais fáceis de obter em relação ao cimento, do que em relação aos demais materiais que compõem as aplicações aqui pesquisadas. Isso ocorre, em parte, pelo tempo transcorrido entre as primeiras aplicações do cimento como material aglomerante até os dias atuais. Outro aspecto é a quantidade utilizada desse material no mundo - em relação aos demais materiais utilizados na construção civil - conjuntamente com os agregados graúdos e miúdos, insumos básicos para produção do concreto.

Segundo o SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, em 2005, o volume da produção mundial de cimento classificava o Brasil como o 11º colocado entre os maiores produtores mundiais. Nesse período, o volume total produzido chegava a 117 bilhões de toneladas, aproximadamente. A Tabela 1 mostra a evolução do consumo mundial de cimento entre 2000 a 2004.

Tabela 1 – Produção e consumo mundial de cimento

Evolução da produção, do consumo e do comércio mundial do cimento (em milhões de toneladas)				
ANO	PRODUÇÃO	CONSUMO	EXPORTAÇÃO	IMPORTAÇÃO
2000	1.654	1.646	127	127
2001	1.698	1.694	131	130
2002	1.815	1.813	129	129
2003	1.964	1.961	137	136
2004	2.139	2.139	147	146
Fonte: Cembureau (2005)				

A Figura 1 apresenta a produção mundial de cimento para o mesmo ano. Pela média brasileira por habitante em relação à média mundial. De 2002 a 2006 o país passou de importador de cimento para exportador, além de continuar suprindo a demanda interna.

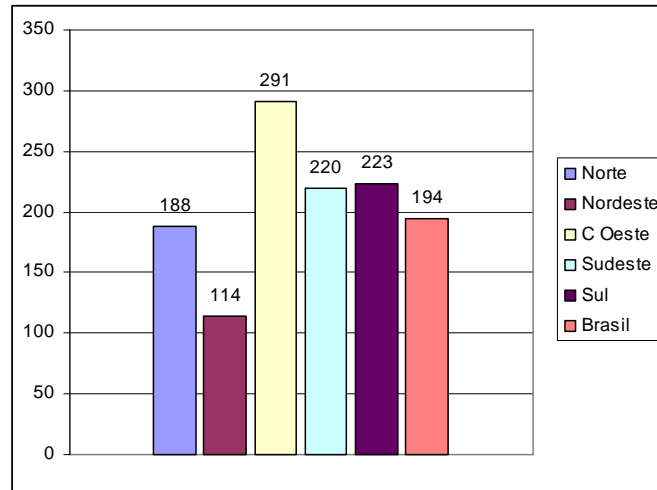


Figura 1– Produção e consumo mundial de cimento. Fonte: SNIC (2005)

1.4.3 DADOS SOBRE OS POLÍMEROS

Os dados referentes aos polímeros foram separados em duas partes. A primeira aborda os polímeros em geral e faz algumas subdivisões até que se chegue aos polímeros de interesse do tema.

A segunda parte caracteriza os polímeros que podem constituir a matriz na qual as fibras de vidro são utilizadas como reforço, originando assim o **GFRP** sob diversas formas.

1.4.4 COMPILAÇÃO DOS DADOS ANALISADOS

Os dados coletados e analisados foram agrupados segundo a aplicação, o tipo de compósito, isto é, fibras em matriz cimentícia ou em matriz polimérica, técnicas de aplicação ou execução e processos usuais de dimensionamento de cada tipologia analisada. Finalmente, fez-se um levantamento das aplicações correntes no mundo, e, da mesma forma, apresentam-se as pesquisas mais recentes sobre o tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas envolvendo a fibra de vidro em matrizes poliméricas estão constantemente evoluindo, mesmo fazendo mais de 60 anos desde que os primeiros compósitos foram utilizados comercialmente. Contudo, na construção civil o número de pesquisas é muito menor que em outras áreas de conhecimento aplicadas, como na engenharia mecânica, aeronáutica ou naval. Os itens a seguir resumem as origens dos materiais abordados pela pesquisa e como evoluíram até os dias atuais, caracterizando cada um individualmente e, posteriormente, enquanto material compósito.

2.1 O VIDRO SOB FORMA DE FIBRAS

Ao estudar-se a fibra de vidro está se referindo a um material cujas origens remontam o Egito há mais de 4500 anos, quando lá, pelo que se sabe, foi processado pela primeira vez o vidro e suas fibras. Foram descobertos, em escavações arqueológicas, vasos e ânforas junto aos sarcófagos dos faraós, onde se verificou que naqueles objetos foram inseridas fibras de vidro junto à cerâmica, confirmando que desde aquele tempo os egípcios já haviam descoberto as propriedades mecânicas das fibras de vidro. Contudo, essa evolução se interrompeu com a decadência das dinastias ou sua absorção pelo império romano.

Não é surpresa que a mais antiga produção comercial de vidro surgiu e se firmou em Roma, através do imperador Tibério. Posteriormente, em Murano na Itália, firmou-se como a capital mundial do vidro e do cristal e a partir de lá, a tecnologia se distribuiu por alguns pontos da Europa antiga, como Bélgica, Áustria e França.

Em contrapartida, as fibras de vidro e a tecnologia para sua fabricação não evoluíram, senão a partir do início do século XX.

As pesquisas realizadas no começo do século criaram as condições para a fabricação da fibra de vidro, ainda bem diferentes do que conhecemos atualmente. Porém, ainda não haviam sido determinadas aplicações que realmente tirassem proveito do potencial daquele material.

A partir das pesquisas na área de petroquímica e a evolução das pesquisas com as borrachas naturais se desenvolveram os diversos polímeros. Esses materiais se mostraram perfeitamente ajustáveis a trabalhar em conjunto com as fibras de vidro. Entretanto, até a segunda guerra mundial, ainda não haviam surgido necessidades de

aplicação desses materiais. Em plena segunda guerra mundial, na década de 1940, os americanos já pesquisavam aplicações militares para esse novo material, que passou a ser tratado de compósito que, analogamente ao concreto, é uma matéria-prima de nível secundário, com a qual se produzem inúmeros bens de consumo.

A escassez do aço, em parte, contribuiu para o desenvolvimento de materiais alternativos. As pesquisas ocorriam na direção de se encontrar um material que pudesse ser associado aos plásticos, sendo capaz de estruturá-los, pois esses careciam das propriedades resistentes necessárias aos elementos estruturais que fossem similares ao aço. Neste período foram desenvolvidos diversos outros materiais que possibilitaram uma vasta gama de aplicações para a fibra de vidro.

Com o fim da guerra e, em seguida, o início da corrida espacial, deu-se um novo direcionamento nas pesquisas para o uso da fibra de vidro.

A fibra de vidro, sob as formas que se conhece hoje, está presente na mais ampla variedade de aplicações. Seu uso já está consagrado em aplicações dos setores aeroespacial, naval, químico, de saneamento e de transportes (MAZUMDAR 2001).

Este trabalho descreve seu uso genérico no decorrer da última metade do século XX para, posteriormente, concentrar-se nas associações relativas à construção civil até os dias de hoje.

Podem surgir no andamento da análise, aplicações com outros tipos de fibras sintéticas, as quais serão mencionadas com o mesmo objetivo anterior, além de demonstrar a evolução do subsetor produtivo das fibras sintéticas de alto desempenho.

2.2 OS POLÍMEROS

Os primeiros polímeros, com cadeia parecida ao que se conhecem hoje só surgiram por volta de 1840, através de Berzelius¹.

Ainda no século XIX, foi patenteado comercialmente, nos Estados Unidos, por volta de 1870, o primeiro tipo de polímero, derivado da nitratação da celulose, o celulóide. Contudo, esse material ainda não permitia sua fusão e modelagem (ESTEVES, 2004).

A partir do século XX, as pesquisas com polímeros aumentaram e nas décadas de 1930 a 1940, inúmeros polímeros foram criados, conforme Ram (1997).

¹ Jöns Jacob Berzelius – Químico sueco (1779-1848) estudou inúmeros compostos, desenvolveu teorias sobre a eletrólise e os radicais orgânicos, entre outros trabalhos.

Juntamente com a indústria aeroespacial, a indústria aeronáutica, a de material bélico e a marinha, continuavam suas pesquisas com compósitos fabricados com resinas fenólicas e fibras. A indústria petroquímica, por sua vez, acompanhou essa evolução através de várias descobertas surgidas nas décadas de 50 e 60 do século passado aprimorando a fabricação dos diversos tipos de polímeros ou, na nomenclatura usual, plásticos.

O mercado mundial começou a conhecer a versatilidade de uso desses produtos cuja aplicação se expandiu aos mais variados setores industriais.

Hoje, o plástico está presente em todas as atividades humanas, sem exceção. Medicina, indústria têxtil, aeroespacial, automobilística, mecânica, naval, alimentícia e todas as demais, do setor primário ao terciário e de serviços.

Um material compósito é composto por materiais diferentes que possuem algumas afinidades físico-químicas que permitam ser misturados entre si para obter-se um novo material composto, no sentido macromolecular. Cabe lembrar que, no sentido micromolecular, os compostos ocorrem na natureza ou nas indústrias química e petroquímica, ao serem produzidos os ácidos, álcalis, aromáticos derivados do petróleo e tantos outros produtos químicos.

O uso de materiais compósitos ocorre desde tempos remotos, inclusive na natureza. O exemplo mais significativo dessa ocorrência na natureza é o do pássaro “João-de-Barro”, que através de sua saliva, o barro e o capim, constrói uma habitação perfeita sob todos os aspectos: geometria, conforto térmico, resistência, durabilidade e estabilidade estrutural.

Nos últimos anos, o interesse pelos compósitos aumentou substancialmente, espalhando-se por inúmeras áreas onde os materiais tradicionais até então dominavam soberanamente o mercado. Nas tubulações industriais o uso do aço, das estruturas de saneamento, e na construção civil, o concreto.

Atualmente novos materiais são utilizados como compósitos e o termo extrapolou seu uso tradicional, isto é, do plástico reforçado com fibras de vidro. Mesmo as fibras evoluíram com o desenvolvimento das fibras aramida e de carbono. Pode-se citar o uso de fibras com cimento Portland e com borrachas naturais, ao mesmo tempo em que temos os plásticos reforçados com fibra de vidro, aramida, carbono, sisal, coco e outras tantas.

2.3 O CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS - GRC

O reforço do concreto com fibras não é novo. A retomada dos estudos sobre o cisalhamento e a consideração do efeito de retenção das fissuras como um dos mecanismos atuantes no cisalhamento data da década de 1970, segundo a literatura (FURLAN JR., 1996 e outros), através dos estudos sobre o efeito de pino e o de engrenamento dos agregados.

A aplicação de fibras metálicas em elementos construtivos, estruturais ou arquitetônicos, já é relativamente usual, contudo, o número de pesquisas sobre adição de fibras ao concreto, utilizando fibras metálicas ou de polímeros termomoldáveis, como o polietileno ou o polipropileno, são bem maiores que aquelas envolvendo a fibra de vidro.

Em parte isso se deve ao maior cuidado necessário para o encapsulamento das fibras para que resistam aos álcalis, pois como é notado, segundo Furlan Jr. (1996), existe uma perda acelerada da resistência pelos ataques químicos desses compostos à superfície das fibras. Esse ataque ocorre de forma mais acentuada nas primeiras idades, mas o dano é acentuado.

Várias pesquisas vêm sendo feitas nos últimos 25 anos e já existem diversas empresas no mundo, especialmente no Reino Unido e Japão, fabricantes de elementos estruturais e não estruturais voltados para o mercado da construção civil.

Os principais produtos produzidos em **GRC** são: painéis de fachada arquitetônicos, painéis de vedação auto-portantes, módulos de banheiros prontos e pisos industriais para ambientes agressivos. Com o maior entendimento sobre o comportamento e da interação entre as fibras e a matriz cimentícia é possível que as fibras sejam adicionadas a elementos estruturais para conter microfissuras de retração ou devidas às ações térmicas, especialmente em pré-fabricados. Nesse sentido, como será visto, alguns cuidados devem ser tomados para sua utilização adequada.

Outro fator importante que deve ser considerado ao **GRC**, é que “a metodologia para o estudo do comportamento de compósitos de concreto com fibras deve se basear em modelos numéricos capazes de justificar, mecanicamente, o interesse nesse tipo de aplicação”, conforme Rossi & Wu (1992 apud de FURLAN JR., 1996, p. 3-51).

2.4 CONCEITUAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Neste item serão conceituados todos os materiais diretamente relacionados à fibra de vidro, bem como ao cimento. Alguns deles serão abordados com maior detalhamento

para estabelecer os agentes presentes que permitem as respectivas associabilidades ou interações entre os materiais.

É importante esclarecer que o foco principal do trabalho é estudar as aplicações associadas a reforço estrutural, seja externo, seja como substituto do aço ou, ainda, como complemento ao uso do aço, através das seguintes matrizes:

- Matriz de concreto reforçado com fibras de vidro;
- Matriz de polímeros reforçados com fibra de vidro.

2.4.1 A FIBRA DE VIDRO

A fibra de vidro é obtida a partir de alguns compostos químicos abundantes na natureza com os quais é fabricado o próprio vidro. A base principal para sua obtenção é a areia, o calcário, o óxido de alumínio e o óxido de magnésio. A mistura nas proporções adequadas e a fusão desses minerais dão origem aos diversos tipos de vidros, assim como às fibras.

A fibra de vidro, como material de reforço estrutural dos plásticos teve seu uso iniciado durante a segunda guerra mundial.

A marinha americana desenvolveu processos e tecnologias construtivas que permitissem a fabricação de materiais compósitos de plástico reforçado com fibra de vidro, **GFRP** ou **GRP**, para produzir mais rapidamente embarcações de patrulha, que fossem mais ágeis e leves que as tradicionais em aço.

Terminada a guerra um novo material havia surgido, com enorme potencialidade comercial, cuja primeira indústria a utilizá-lo massivamente foi a aeroespacial.

As fibras de vidro podem ser fabricadas para diversas finalidades, e dependendo do processo de filamentação resulta em produtos variados, como:

- Feltros para isolamento termo-acústico;
- Fios para tecelagem de tecidos especiais diversos;
- Fios para fabricação de mantas e tecidos com finalidades estruturais.

A Figura 2, a seguir, apresenta, através de um fluxograma, os principais processos analisados de acordo com o tipo de matriz associada à fibra.

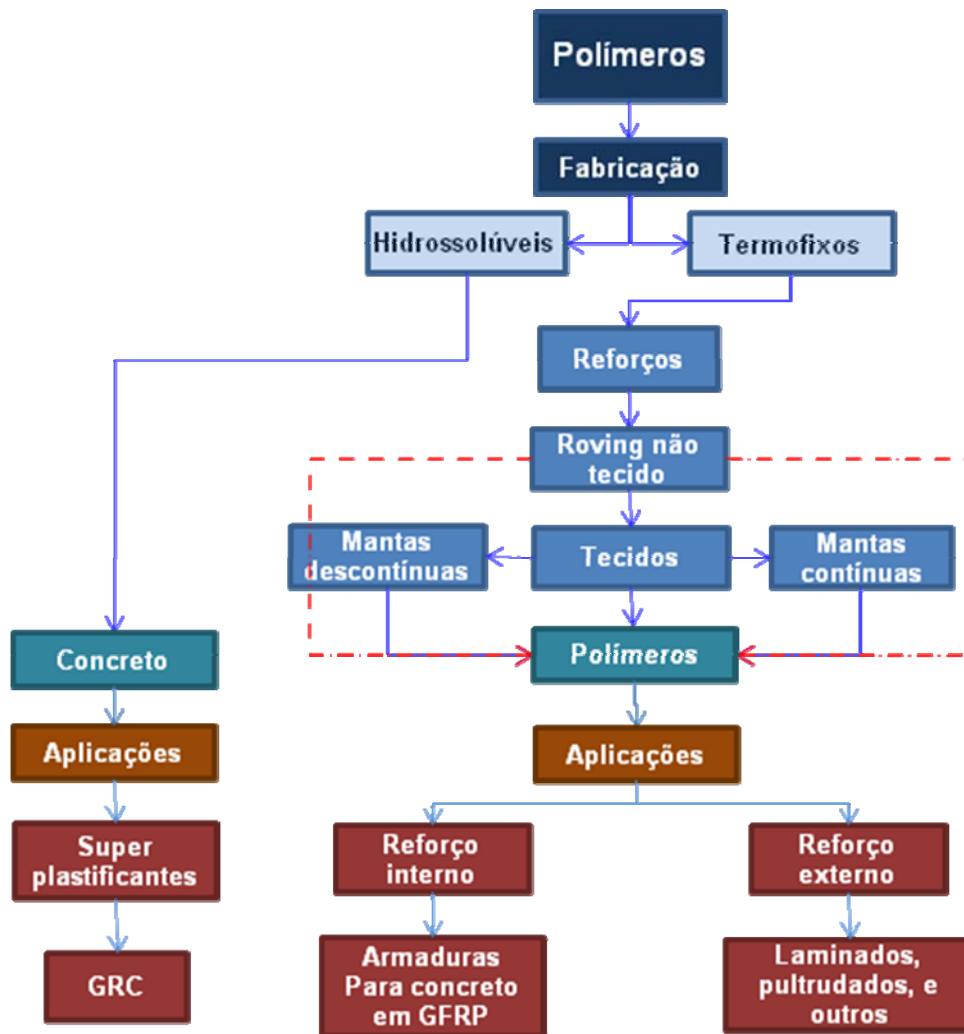


Figura 2 – Fluxograma de uso da fibra de vidro em relação à matriz associada

A Figura 3, em seguida, apresenta um esquema de produção a partir dos insumos básicos até a fabricação da matéria-prima básica que é o filamento de vidro. A partir desse filamento, podem ser obtidos inúmeros subprodutos conforme se observa na mesma Figura.

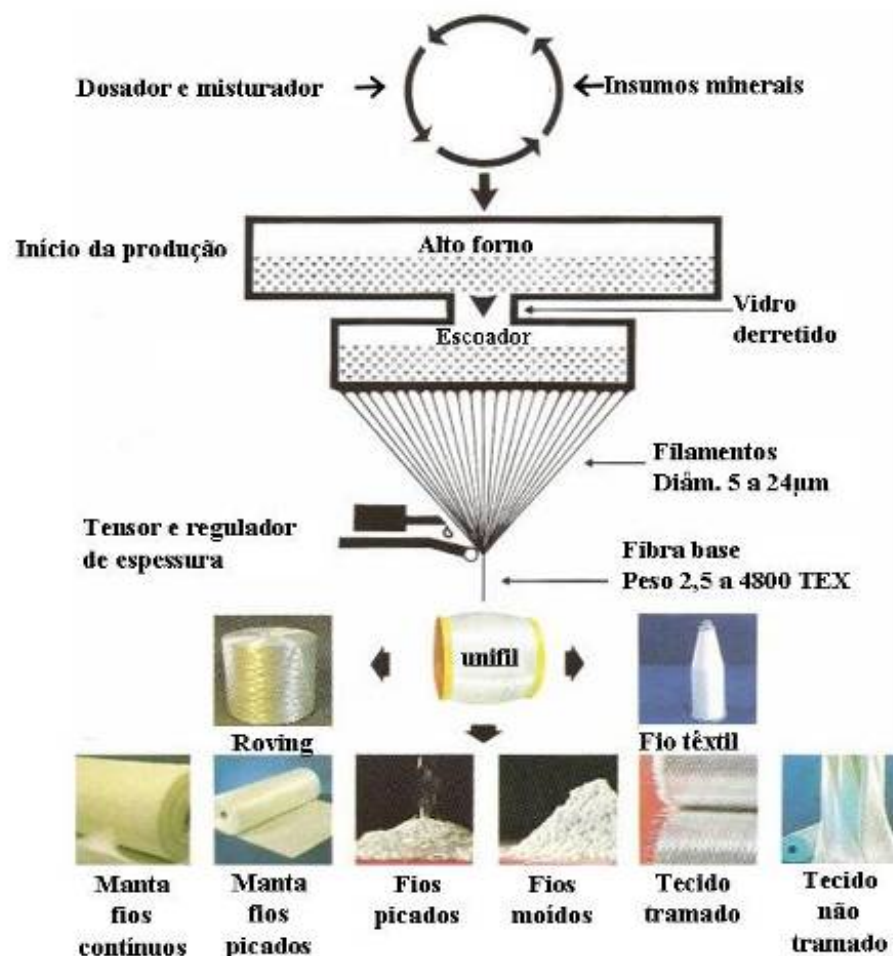


Figura 3 – Esquema de fabricação da fibra de vidro
 Fonte: Saint-Gobain-VETROTEX®

Na segunda fase o vidro, já em fusão, atravessa por peneiras metálicas (ligas de platina) circulares com milhares de orifícios entre 1 mm e 2 mm que irão gerar filamentos e a partir desse ponto esses filamentos são resfriados em meio de água ou ar, conforme mostrado na Figura 3.

Ao saírem pelos orifícios, pela simples ação da gravidade, esses filamentos são estirados mecanicamente até adquirir o diâmetro final.

Um sistema tensor, composto por enroladores que tracionam os filamentos para carretéis a uma velocidade aproximada de 80km/h, deixa os filamentos com diâmetro entre 5 a 30 µm. Durante esse processo pode ser efetuado o controle de espessura dos filamentos que serão a matéria-prima básica para a confecção das chamadas fibras de vidro.

Em decorrência da utilização das fibras no compósito, os filamentos terão maior ou menor diâmetro.

A diversidade de aplicações decorativas e estruturais dos diversos tipos de vidro torna-o um material bastante versátil.

Dentre as tipologias acima, estarão sendo analisados neste trabalho somente as fibras com finalidades estruturais, apesar das outras tipologias também serem utilizadas, de alguma forma, na construção civil, mas como matérias-primas de outros subprodutos ou componentes.

As fibras de vidro utilizadas na construção civil e em outros tantos setores produtivos são, em sua maioria, produzidas a partir dos filamentos de vidro E. Após a mistura dos componentes “in natura”, esses sofrem um aquecimento em alto forno na temperatura de 1500 °C e assim são mantidos no decorrer do processo de derretimento e mistura dos minerais, conforme Quinn (2002). Após a saída do forno o material sofre um pré-resfriamento para 1200 °C, a partir de onde inicia o processo de fabricação dos filamentos de vidro.

2.4.1.1 Tipos de Fibra de Vidro

Atualmente são produzidos quatro tipos de vidro, considerando sua composição química, através dos quais são produzidos os filamentos que dão origem às fibras.

Entre esses, destacam-se os tipos descritos na Tabela 2:

Tabela 2 – Diferenciação entre os vários tipos de fibras de vidro produzidas

Tipo de vidro	Características principais	Resistência mecânica	Resistência química
E	Isolamento eletro-magnético	muito boa	boa
AR	Álcali-resistente	boa	ótima
S	Alta resistência mecânica/térmica	ótima	muito boa
C	Alta resistência química	boa	ótima

Fonte: Owens Corning (1993); Saint-Gobain (2002)

Essas propriedades são obtidas pelas proporções dos compostos utilizados na fabricação de cada vidro, especialmente pelos minerais como boro, sílica e o quartzo.

Entre os quatro tipos de vidro apresentados, atualmente são produzidos em larga escala industrial os vidro tipo “E” e o vidro tipo “AR”. O vidro tipo “S” está restrito a produção específica para a indústria aeroespacial, enquanto o vidro tipo “C” está sendo substituído por outros tipos de fibras mais eficazes e de custo mais competitivo para uso em ambientes de alta agressividade química.

A Tabela 3 apresenta a composição química média por tipo de vidro. É possível notar, por exemplo, o que torna o vidro AR mais resistente à alcalinização. O menor teor de óxido de cálcio, óxido de magnésio e óxido de alumínio, melhora suas propriedades para ser utilizado em ambientes alcalinos. Por outro lado, o vidro “R”, possui o maior teor de óxido de alumínio e óxido de magnésio de todos ou outros tipos, conferindo ao mesmo, resistência mecânica superior aos demais.

Tabela 3 – Composição média por tipo de vidro

COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA POR TIPO DE VIDRO					
Composição média em % por peso	AR Álcali-resistente	E-D Baixa condutividade	C Resistência química	R Resistência mecânica	S Resistência térmica
Areia, calcário, Óxido de silício	72,1	54,3	64,4	64,2	65
Óxido de alumínio	0,6	15,2	4,1	24,8	25
Óxido de boro	-	8	4,7	0,01	-
Óxido de magnésio	2,5	4,7	3,3	10,27	10
Óxido de cálcio	10	17,2	13,2	0,01	-
Óxido ferroso	-	-	-	0,21	-
Óxido de sódio	14,3	0,6	7,7	0,3	-
Óxido de potássio	-	-	1,7	-	-
Óxido de bário	-	-	0,9	0,2	-
Outros	0,5	-	-	-	-

Fontes – Saint-Gobain, Owens Corning (1998)

No caso da fabricação das fibras estruturais, podemos dizer que os filamentos de vidro irão produzir quatro classes ou categorias de fibras, dependendo da continuidade do processo pelo qual passam os filamentos.

Na etapa subsequente, que se pode numerar como segunda fase, é a fabricação dos *rovings* pela união desses filamentos, em mechas não torcidas, sendo adicionados agentes ligantes, normalmente silanos, de anti-estática, microfilmes plásticos e outros que propiciem perfeita compatibilidade entre o vidro e os diversos tipos de polímeros ou cimento.

Ao finalizar o processo a bobina de *roving* fica com o aspecto da Figura 4 a seguir.

Esse tipo de fibra pode ser descrito como fibras de primeira classe, uma vez que são utilizadas na produção de elementos, mas são também precursores de outros tipos de fibras.



Figura 4 - Bobinas de *roving*
Fonte: Saint-Gobain – VETROTEX – 2006

As bobinas vistas na Figura 4 são medidas em TEX, podendo ter entre 600 e 9600 TEX, ou 600 e 9600 g/km, segundo Quinn (2002). No caso de aplicações pelo sistema “*spray-up*” as bobinas possuem TEX entre 2800 e 4000 com aproximadamente 60 a 70 mechas.

Os *rovings* podem ser do tipo direto ou normal como o da Figura 4 já descrita. A diferença é notada na quantidade de feixes por bobina e a forma de bobinamento. Os *rovings* diretos são compostos por um único feixe onde os filamentos são unidos de forma normalmente paralela, evitando-se a torção no momento de bobinagem. Já nos *rovings* normais a quantidade de feixes por bobina é variável e no momento da bobinagem ocorre alguma torção entre os feixes para assegurar um fio relativamente unido, com alguma tenacidade.

No primeiro tipo, a ausência de torção e de múltiplos feixes assegura maior rapidez de condução do fio pelos processos de fabricação. Já os processos que usam o *roving* normal prescindem da existência de um único feixe e do paralelismo perfeito dos filamentos.

Os *rovings* são utilizados na fabricação de peças pelos sistemas de pultrusão, enrolamento contínuo, centrifugação e laminação por “*spray-up*”. Em qualquer um

dos processos o teor mínimo de vidro por peso chega a 55 % do peso total, com exceção da aplicação por “*spray-up*”, que varia entre 25% e 35% a quantidade de vidro por peso de laminado. Alguns sistemas permitem atingir até 80% de teor de vidro.

Todos os sistemas acima serão detalhados no capítulo que trata das tecnologias de aplicação.

A partir dos *rovings* é possível trabalhar-se com processos para várias aplicações. Os demais subprodutos são elaborados a partir dos filamentos iniciais. Tecidos de várias espessuras, sendo mais comuns os *rovings* tecidos (*woven rovings*) e os tecidos (*woven cloths*), que são tramados de diversas formas podendo ser bidirecionais ou unidirecionais e aos quais podemos considerar como sendo a segunda classe de fibras.

A Tabela 4 apresenta os tipos comercializados de *rovings* destinados aos sistemas de laminação por pultrusão, enrolamento filamentar e centrifugação, que serão vistos adiante.

Tabela 4 – Tipos e pesos dos *rovings* produzidos comercialmente

Nome	TEX	kTEX
600	600 g/km	0,6 g/km
1200	1200 g/km	1,2 g/km
2400	2400 g/km	2,4 g/km
4800	4800 g/km	4,8 g/km
9600	9600 g/km	9,6 g/km

Fonte: QUINN (2002)

A Tabela 5 apresenta os tecidos de fibra de vidro industrializados no Brasil, de uso estrutural geral, com as respectivas gramaturas, espessura média de laminado por camada e teor de vidro correspondente no laminado. Esses tecidos são fornecidos em rolos com largura de 1,1 m ou 1,20 m e comprimento até atingir o peso de 110 kg.

Existem outras gramaturas mais finas, chegando até 80 g/m², porém esses tecidos são para usos especiais e não são fabricados no Brasil. Além disso, não são do interesse, pelo menos inicialmente, para a construção civil.

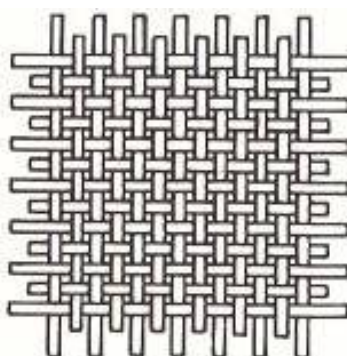
Tabela 5 – Tipo de tecido, gramatura e espessura de laminado por camada.

Tipo	Espessura por camada (mm)	Gramatura g/m ²	Teor de vidro no laminado (por peso)		
			Mínimo	Médio	Máximo
Tecido 800	0,9 – 1,1	800	40	50	65
Tecido 600	0,8 – 1,0	600	40	50	65
Tecido 330	0,4 – 0,6	330	40	50	65

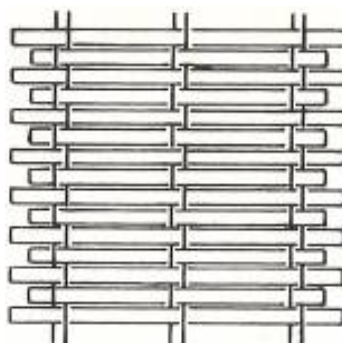
Fonte: Owens Corning (1993)

Os tecidos bidirecionais se caracterizam pela equidistância dos fios que compõem a trama, enquanto os tecidos unidirecionais se caracterizam pela diferenciação entre a quantidade de feixes que compõem cada sentido da trama.

Na Figura 5 “a” e “b” é possível visualizar a diferença entre os dois tipos de tecidos. Enquanto os tecidos bidirecionais possuem resistências idênticas nos dois eixos da trama, o mesmo não ocorre com os tecidos unidirecionais, pela diferença entre quantidade de feixes de vidro numa e noutra direção.



a – Tecido tramado bidirecional entrelaçado



b - Tecido tramado unidirecional

Figura 5 – “a” e “b” – Diferenças entre tecidos bidirecionais e unidirecionais

Fonte – Saint-Gobain – VETROTEX ® (2006)

Esses últimos possuem diferentes resistências em cada sentido ortogonal. A diferença entre o sentido transversal e o longitudinal chega a atingir a relação 1:8. Os tecidos unidirecionais são utilizados em estruturas que estejam submetidas a esforços de tração ou flexão desproporcionais em relação aos eixos ortogonais do laminado ou elemento estrutural.

As estruturas constituídas com os tecidos unidirecionais utilizam menor relação entre o percentual de resina e o de vidro.

No capítulo que trata das aplicações será abordado com maior detalhe esse aspecto.

Basicamente os tecidos podem ser diferenciados pelos seguintes tipos:

- Unidirecionais;
- Bidirecionais;
- *Rovings* não entrelaçados;
- Tecidos finos.

Nos *rovings* não entrelaçados não existe o cruzamento entre os feixes de fibra, como ocorre nos tecidos tramados ou entrelaçados. Isso permite melhor acabamento superficial em aplicações onde existe essa exigência.

As mantas (*mats*) se subdividem em mantas de fios picados (*chopped strand mats*) e mantas de fios contínuos (*continuous filament mats*). Podem ser consideradas como a terceira categoria de fibras de vidro, possuindo dois processos de fabricação.

O primeiro processo se caracteriza pela disposição dos filamentos de vidro continuamente sobre uma esteira e, após, esses filamentos recebem uma pulverização de agentes ligantes e passam através de pares de rolos para sua compactação. A quantidade depositada de filamentos pode variar, ao variar-se a velocidade da esteira ou, então, depositando-se camadas subseqüentes para se atingir a quantidade de vidro requerida.

O outro processo inicia-se pela deposição dos fios previamente picados a partir de *rovings*, com o comprimento de 50 milímetros, também sobre uma esteira. Após a deposição dos fios picados são adicionados os mesmos agentes ligantes, geralmente silanos e estireno, e posteriormente compactados.

No caso das mantas de fios picados (*chopped strand mats*) a espessura é obtida pela velocidade com que a esteira passa sob os picotadores, permitindo maior ou menor

quantidade de fios picados por metro quadrado. As duas diferenças básicas nas mantas, quanto aos tipos, são:

- Fios contínuos dispersos aleatoriamente, em uma ou mais camadas;
- Fios descontínuos dispersos aleatoriamente numa única camada, com espessura obtida pelo tempo de deposição por área.

A característica desses dois tipos de fibra é a resistência muito próxima em qualquer ângulo do plano dos laminados, tanto para os fios contínuos como para os fios picados. A continuidade garante um acréscimo de resistência à tração por não possuir pontos de interrupção da transmissão dos esforços.

A Figura 6, “a” e “b”, adiante, apresenta a diferença visual entre um trecho de manta de fios contínuos e de fios picados.

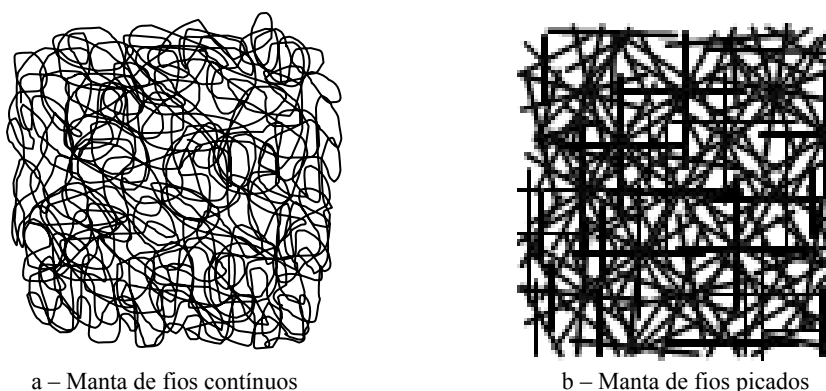


Figura 6 - “a” e “b” - Diferenças entre Mantas de Fios Contínuos e Picados

As mantas são subdivididas pela sua gramatura, isto é, pelo seu peso em relação à área. A comercialização é feita na forma de rolos com 1,10 m ou 1,30 m de largura e comprimento contínuo até atingir aproximadamente 90 kg. A Tabela 6 a seguir mostra os diversos tipos de mantas e suas respectivas gramaturas:

Tabela 6 – Tipos de Manta e teor de vidro e espessura do laminado

Tipo	Espessura por camada (mm)	Gramatura g/m ²	Teor de vidro no laminado (por peso)		
			Mínimo	Médio	Máximo
Manta 450	1,0 -1,1	450	25	30	45
Manta 300	0,7 – 0,9	300	25	30	45
Manta 225	0,5 -0,7	225	20	30	40

Fonte: Owens Corning (1993)

A quarta classe, ou categoria, de fibras se constitui dos fios picados (*chopped strands*) e os fios moídos (*milled fibers*), que complementam a gama de subprodutos derivados dos filamentos de vidro. Os fios picados e moídos, assim como os demais tipos de fibra, possuem diferenças quanto à película química de recobrimento, que varia de acordo com a aplicação. Exemplo é o caso de fibras utilizadas com plásticos termomoldáveis ou com plásticos termofixos.

Cada fibra recebe, ao ser produzida, um banho químico especial para adequá-la à aplicação, compatibilizando as fibras aos polímeros.

Em relação à geometria, os fios possuem como única diferença fundamental, conforme a seguir:

- Fibras moídas – cortadas com comprimentos entre 1 mm e 3 mm;
- Fibras picadas – cortadas com comprimento entre 12 mm e 50 mm.

Tanto as fibras moídas quanto as picadas são utilizadas para reforço em plásticos termomoldáveis. Já as fibras picadas, em dimensões superiores a 10 milímetros são utilizadas como reforços de argamassas e concreto. Da mesma forma que os demais subprodutos, serão dados maiores detalhes no capítulo que trata das aplicações.

A Figura 7, “a” e “b”, a seguir, exemplifica as diferenças entre os dois tipos de fibra de vidro, onde nota-se mais nitidamente o comprimento dos fios picados que dos fios moídos.



a: Fibra moída



b: Fibra Picada

Figura 7 - “a” e “b” – Diferenças entre Fibra Moída e Picada
Fonte: Saint-Gobain – VETROTEX (2006)

2.4.1.2 Propriedades Mecânicas da Fibra de Vidro

As fibras de vidro utilizadas como reforço estrutural se constituem basicamente de feixes de filamentos.

As principais normas de ensaios de caracterização e propriedades mecânicas para as fibras são as normas editadas pela American Society for Testing and Materials (ASTM), de onde as demais normas se derivaram.

A caracterização das fibras de vidro pode ser feita direta ou indiretamente.

No primeiro caso, são ensaiados os filamentos de vidro em relação ao diâmetro médio, uniformidade, resistência ao fogo, resistência a agentes químicos e compatibilidade aos polímeros e outros materiais. No segundo caso, os ensaios são realizados em associação com a matriz onde a fibra está acomodada ou dispersa, conforme o caso.

Os ensaios mecânicos da fibra de vidro associada a uma matriz devem considerar sempre a direção da disposição das fibras, o tipo de fibra, o percentual de fibra em relação à matriz e a técnica de elaboração dos corpos de prova. Todos esses aspectos influenciam conjuntamente para que a fibra associada à matriz tenha maior ou menor resistência e rigidez, além de outras propriedades como aderência fibra versus matriz, que poderá influenciar no início das falhas do material compósito.

A Tabela 6 mostra algumas propriedades mecânicas entre alguns tipos de fibras de vidro e outras fibras sintéticas impregnadas conforme a ASTM D-2343.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas comparativas entre diversos tipos de fibras sintéticas

Tipo de Vidro	Peso Específico (g/cm ³)	Resistência à Tração - ELU (MPa)	Módulo na Tração (GPa)	Deformação até a ruptura (%)
Vidro – E	2,58	3330	72,5	2,5
Vidro –S	2,48	4600	88,0	3,0
Vidro – R	2,62	4400	86,0	3,0
Aramida (K-49)	1,44	3620	131,0	2,9
Carbono (AS4C)	1,80	3790	234,0	1,7

Fonte: Owens Corning (1995)

Na Tabela 7, Piggott (2002) compara o comprimento necessário de diversos tipos de fibras para que seja atingida a eficiência do reforço correspondente a 95% do módulo

de elasticidade (E). Os resultados são válidos para volume de fibra de 5% e empacotamento hexagonal em relação à matriz associada, formada pelos três materiais do lado direito da tabela.

Tabela 8 – Comprimento das fibras para atingir 95% da eficiência do reforço - disposição unidirecional

Tipo de Fibra ou escamas			Comprimento da fibra na matriz, para o módulo indicado junto ao material da matriz		
Reforço	E_f (GPa)	$d(\mu m)$	Epóxi (2.5 GPa)	Alumínio (71 GPa)	LAS ² (100 GPa)
Vidro – E	72	10	1.2	0.23	0.19
Aço	212	100	21.0	4.0	3.2
Aramida (K-49)	130	12	1.7	-	-
Polietileno ¹	170	27	5.1	-	-
Carbono (AS4)	233	8	1.8	0.33	0.27
Al ₂ O ₃ (Saffil)	300	3	0.76	0.14	0.11
SiC (SCS6)	410	140	41.0	7.8	6.2
Carbono (El. Rigidez)	827	10	4.2	0.79	0.63
SiC (lascas)	840 ³	1	0.42	0.079	0.063
Al ₂ O ₃ (lascas)	2250 ³	1	0.69	0.13	0.1

Notas: 1. Marca comercial SPECTRA 100; 2. Lítio-Alúmino-Silicato (cerâmica); 3. Lascas com maior módulo E .

Fonte: Piggott (2002)

Sabe-se que o módulo de elasticidade é a razão entre a força aplicada e a deformação ocorrida. Para o caso das fibras de vidro a rigidez é o fator crítico ao se dimensionar qualquer elemento estrutural. Isso parece ser um obstáculo para uso como estrutura, contudo, conforme a Figura 8, a fibra de vidro possui características similares tanto para o módulo longitudinal, quanto para o transversal. Isso favorece a homogeneidade dos compósitos produzidos com esse tipo de fibra, ao contrário de fibras com alto módulo longitudinal, mas baixo módulo transversal, que requerem maior cuidado na orientação dos laminados como, por exemplo, os carbonos P100 e P55.

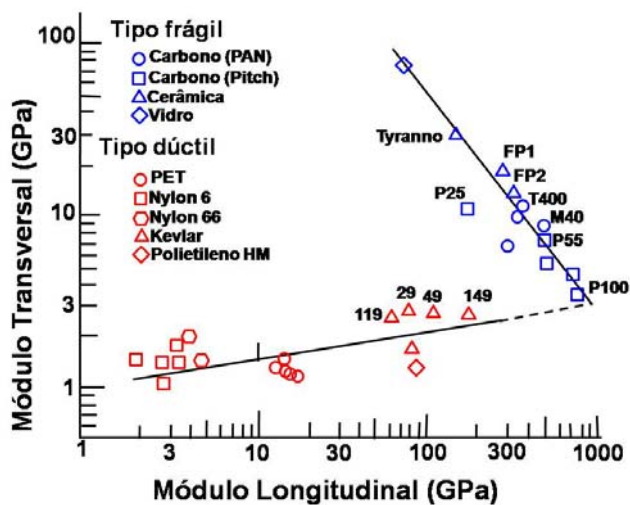


Figura 8 – relação entre os módulos de elasticidade longitudinal e transversal de diversos tipos de fibras
Adaptado de PIGGOTT (2002)

A principal preocupação dos projetistas, ao trabalharem com compósitos dessa natureza, está em adequar os requisitos de resistência aos de rigidez para então dimensionar os elementos para a finalidade a que serão destinados.

É possível se traçar um paralelo entre os reforços de **GFRP** e os concretos. Ao se projetar edificações em concreto armado, não é necessário ao calculista, determinar a granulometria ou demais quesitos para projetar, bastando somente estabelecer a resistência estimada para o carregamento e demais ações na estrutura.

No caso de estruturas em **GFRP**, o calculista deve determinar como a estrutura deverá atuar e as direções principais das ações, para que o dimensionamento seja feito de acordo com os esforços atuantes na estrutura, bem como, para conduzir as ações na direção mais próxima possível dos eixos principais das ações. Esse procedimento, em parte, permite maior flexibilidade de cálculo, enquanto, em parte, exige dos profissionais maior conhecimento acerca dos materiais com os quais ele está trabalhando.

A Tabela 8 faz uma correlação, conforme consta no American Concrete Institute - ACI (1996), entre um laminado usando fibras aleatórias (**GFRP¹**), um com fibras unidirecionais (**GFRP²**), um aço estrutural e alumínio, em referência ao peso e espessura de cada material, ao se manter as resistências à tração e flexão idênticas entre eles.

Tabela 9 – Relação de Peso, Espessura e Resistências entre GFRP, Aço e Alumínio

Material	Mesma resistência à Tração		Mesma Resistência à Flexão	
	Espessura	Peso	Espessura	Peso
Aço (equiv. a CA50)	1,0	1,0	1,0	1,0
Alumínio	1,8	0,3	1,5	0,5
GFRP ¹	2,4	0,07	3,0	0,6
GFRP ²	0,3	0,1	1,9	0,5

Fonte: ACI (1996)

2.4.2 OS POLÍMEROS

Plástico é o nome comum dado aos diversos polímeros derivados dos hidrocarbonetos, produzidos a partir do refino do petróleo, misturados a outros grupos de hidrocarbonetos como ácidos carboxílicos (ácido fórmico, ácido acético e ácido oxálico), cetonas, óxidos e alcoóis que contenham um ou mais grupos de - OH (hidroxilas).

Pode-se considerar que o plástico é a evolução tecnológica da borracha natural. Essa perdeu sua força com o advento da borracha sintética derivada do petróleo.

Após longo período de estagnação a borracha natural voltou a ser produzida em larga escala, sendo inclusive misturada à borracha sintética, pois o desenvolvimento das pesquisas mostrou os benefícios das propriedades do látex inexistentes na borracha derivada do petróleo, na composição de inúmeras ligas dos chamados elastômeros.

Atualmente, com a evolução dos processos de análise química, já é possível obter-se polímeros a partir de vegetais em volumes economicamente viáveis.

O látex também experimenta novas gamas de aplicação, além das aplicações tradicionais já difundidas no mundo.

Os plásticos, pela versatilidade de aplicações, composições e ligas possíveis de serem produzidas, passaram a exercer papel fundamental no mundo moderno, especialmente após a segunda guerra mundial, permitindo a criação de inúmeros produtos até então de difícil fabricação e altos custos.

A cada dia são inventados novos polímeros com propriedades específicas para atender os mais diversos ramos de atividades. Podem-se mencionar alguns dos principais usos a seguir:

- Adesivos e polímeros impermeáveis para madeiras e derivados de madeira;
- Selantes, polímeros e adesivos para a construção naval;

- Adesivos e produtos para a indústria calçadista;
- Selantes, produtos e adesivos para indústria automobilística;
- Selantes e adesivos resistentes à alta temperatura e pressão;
- Selantes, polímeros e adesivos para a indústria aeroespacial;
- Selantes, polímeros e adesivos para a construção civil;
- Selantes e adesivos para uso doméstico.

Em 2000, o volume em peso na produção de plásticos já havia ultrapassado o da produção de aço, e o crescimento não pára. Apesar da maioria deles derivarem do petróleo, já existem inúmeras pesquisas que avançam na direção de novos polímeros baseados em fontes renováveis, como é o caso do poliuretano produzido a partir do óleo de mamona.

A possibilidade de se construir estruturas mais leves, com a mesma resistência e segurança, com custos globais mais competitivos, faz dos plásticos os polímeros de maior crescimento e desenvolvimento tecnológico atualmente.

Apesar da extrema flexibilidade e moldabilidade, o baixo módulo de rigidez e a baixa tenacidade dos plásticos são as principais propriedades melhoradas ao utilizar-se fibras diversas como reforço estrutural, formando os materiais compósitos.

Exemplo da versatilidade de uso desses materiais pode ser visto pelos exemplos de aplicações, com tecnologia de ponta, mostrados na Figura 9 “a”, “b” e “c”, como fuselagem de planadores, placas de circuitos impressos e inúmeras peças industriais, como eixos, conectores e carcaças de ferramentas elétricas manuais.



a – Aeronáutica



b – Circuitos Impressos



c – Peças Industriais

Figura 9 “a”, “b” e “c” – Exemplos de aplicações diversas
 Fonte: Saint-Gobain - VETROTEX (2002)

Este trabalho aborda analiticamente os polímeros termofixos, porém, para entendê-los é necessário caracterizá-los, comparativamente, aos polímeros termoplásticos para em seguida detalhar os tipos de polímeros termofixos existentes. Inicialmente deve-se observar uma oposição importante entre os polímeros termofixos e os termomoldáveis. Os primeiros são formados por cadeias insaturadas enquanto os últimos são formados por cadeias químicas saturadas. Os primeiros são polimerizados quimicamente, enquanto os últimos são polimerizados fisicamente. A Figura 10 mostra, esquematicamente, as diferenças entre os polímeros termomoldáveis e os termofixos.

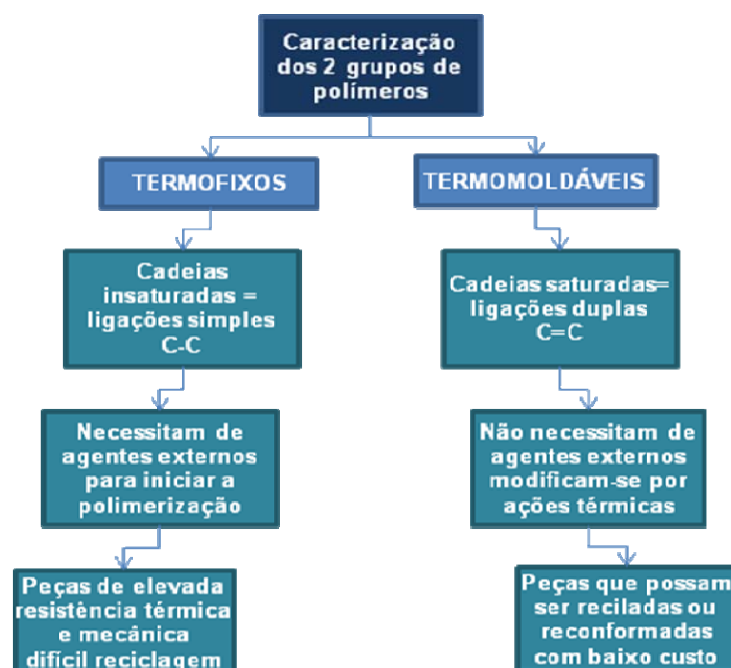


Figura 10 – Principais diferenças entre os polímeros termofixos e termomoldáveis

Para ilustrar a dificuldade de se trabalhar com polímeros, um termomoldável apresenta três comportamentos distintos em cada fase.

Na primeira, o seu estado natural é sólido. Na segunda, ou fase de transição, esses se comportam como fluidos não-newtonianos, até atingirem sua respectiva T_m (temperatura de fusão cristalina). Na terceira fase, ao atingirem seu ponto de fusão, comportam-se como fluidos newtonianos.

O conhecimento do comportamento nas mudanças de fase é extremamente importante ao se desenvolver processos de fabricação de peças injetadas, uma vez que os equipamentos devem prover condições para que o plástico entre com uma temperatura adequada e sua viscosidade aparente “ η ” se mantenha constante durante o processo de moldagem ou injeção. Do contrário poderão ocorrer falhas devidas ao cisalhamento do polímero, por viscosidade elevada para o fluxo, em função da baixa temperatura operacional ou, inversamente, peças deformadas pelo escoamento mais livre causado por um menor valor de “ η ” (viscosidade aparente), no interior dos equipamentos, se o polímero estiver aquecido acima do ideal.

Normalmente esse fenômeno se apresenta sob a forma de “escamações” superficiais que causam fissuras e a ruína da peça ou elemento estrutural, razão pela qual é necessário que os projetistas conheçam o comportamento reológico de cada tipo de polímero com o qual iram trabalhar.

A Figura 11 mostra um detalhe do fenômeno descrito.

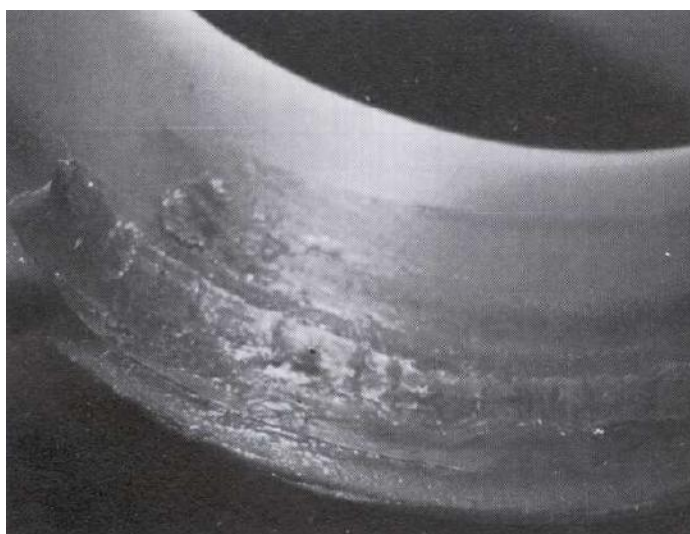


Figura 11 – Escamações provenientes de baixa temperatura de fusão em peças de polímeros injetadas
Fonte: Meyers (1999)

No caso dos plásticos termofixos, segundo Fox e McDonald (1996), são fluídos não-newtonianos tixotrópicos, vale dizer que tais fluídos apresentam um decréscimo de “ η ” com o tempo sob uma tensão tangencial constante (ou de cisalhamento) logo que são aplicados. Porém, ao iniciar-se o processo de cura tais fluídos passam a se comportar como reopéticos, id. (1996), significando que “ η ” passa a aumentar com o tempo para uma tensão tangencial constante.

O aumento da viscosidade, obedece a um comportamento não linear em relação ao tempo até que o plástico deixe de ser fluído e passe ao estado sólido definitivamente. Deixando de ser função entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento.

Outra característica dos termofixos, é que esses possuem comportamento similar aos gases que aumentam sua viscosidade com o aumento da temperatura.

O comportamento mecânico dos polímeros e compósitos, em geral, vem sendo analisado sob o enfoque dos modelos reológicos, especialmente em relação às ações combinadas de fluência e fratura. De acordo com Meyers (1999):

“os polímeros, em geral, possuem temperatura de transição vítrea (T_g) que variam entre $-100\text{ }^\circ\text{C}$ e $+200\text{ }^\circ\text{C}$. Isso acarreta um comportamento visco-elástico que, em alguns casos, varia sensivelmente com a temperatura, causando a fluência viscosa e a ruína estrutural do material”.

Uma das variáveis associadas à fluência e à fratura é o fenômeno de deslocamento interatômico na microestrutura. Esse fenômeno está relacionado à energia necessária para que haja separação entre os átomos do material. Esse efeito é mais evidente em metais puros, devido à organização da estrutura cristalina dos mesmos, bem como nos polímeros saturados, com T_g e T_m baixas.

A organização cristalina favorece a ocorrência de volumes cheios e vazios. Esses volumes sofrem movimentações devido ao reagrupamento ou reposicionamento dos cristais quando o material sofre qualquer tipo de ação externa, inclusive temperatura e pressão.

Outra variável é o fenômeno da energia superficial, que está relacionada às adesões interatômicas superficiais insatisfatórias num dado material. Essas adesões podem sofrer alterações em razão de forças eletrostáticas ou eletrolíticas (reação dos átomos de hidrogênio na superfície), iniciando processos de microfissuras superficiais que podem causar a fratura ou acelerar a fluência.

Não serão abordados neste trabalho os aspectos da mecânica dos fluidos, mas é importante reconhecer as diferenças sutis de comportamento variável entre os dois grupos de plásticos, especialmente no momento de dimensionar peças e processos seja com termomoldáveis, seja com termofixos.

Com a evolução tecnológica e das pesquisas no campo dos polímeros, os plásticos se separaram em dois grandes grupos, a seguir caracterizados:

- Termofixos – São plásticos insaturados, isto é, sua cadeia molecular é composta por duplas ligações. São sólidos mantidos em estado líquido viscoso pela adição de algum tipo de solvente para permitir sua trabalhabilidade. Para serem moldados, e a peça adquirir sua forma final, necessitam da adição de algum componente reagente, denominado catalisador², que ativa a polimerização. A polimerização ocorre com a reacomodação das moléculas, através de um dos mecanismos de reação, por exotermia, havendo a liberação de oxigênio e hidrogênio em conjunto (água) ou separadamente, como radical livre, conforme o tipo de reagente e da cadeia molecular. Uma vez misturados aos reagentes, o processo de endurecimento ou cura inicia-se e o plástico não pode ser revertido à sua forma anterior;
- Termomoldáveis³ – são os plásticos saturados, isto é, não possuem duplas ligações e quando produzidos, seu estado final de equilíbrio é sólido com variados graus de dureza. Para serem moldados necessitam de aquecimento e confinamento em moldes fechados onde são injetados no estado líquido viscoso. Após a conclusão do processo o plástico volta ao estado sólido com a geometria do molde utilizado. Esse processo é quase totalmente revertido, necessitando apenas alguma limpeza da peça e sua trituração para reaproveitamento. A perda de material pode ser considerada nula, caso os processos de fabricação adotem controle de qualidade adequado. No decorrer do processo de fabricação as peças defeituosas podem voltar imediatamente para o receptáculo de material, dependendo do sistema de produção e das dimensões do equipamento.

Existem inúmeras aplicações em que é feito o uso dos plásticos termomoldáveis associados à fibra de vidro, ou outras fibras, para aumentar suas propriedades mecânicas.

² Vide descrição no item 3.3.3.

³ Termomoldável foi considerado como termo mais adequado em relação ao processo pelo qual ocorre a fabricação das peças e componentes, isto é, por injeção do plástico liquefeito pelo aquecimento, dentro de moldes onde adquire seu formato final. O termo Termoplástico, adaptado do inglês: *thermoplastic* pode gerar confusão, pois existem os termoplásticos com propriedades isolantes térmicas.

Notadamente na indústria automobilística esse compósito participa com grande relevância, contribuindo para reduzir substancialmente o peso dos veículos. A inserção da fibra melhora a resistência e estabilidade dimensional desses plásticos, aumentando a capacidade de absorção de choques.

Esses compósitos não serão enfocados neste trabalho, por não terem representatividade, em percentual, para a construção civil, ao contrário dos termofixos, até esse momento.

A tabela 10 a seguir, apresenta alguns tipos mais comuns de polímeros termomoldáveis e termofixos, mais utilizados nos dias de hoje, mencionando uma pequena parcela da totalidade de aplicações dos dois grupos de plásticos, mas nota-se que está presente em grande parte das atividades humanas.

Tabela 10 – Alguns tipos de polímeros e algumas utilizações mais comuns

TERMOFIXOS	USOS COMUNS	TERMOMOLDÁVEIS	USOS COMUNS
Poliéster Insaturado	Compósitos, adesivo, peças decorativas.	PE - Polietileno	Embalagens, tubos flexíveis, utensílios
Poliuretano	Compósitos, peças mecânicas espumas.	PVC – Policloreto de Vinila	Tubos e mangueiras de Embalagens de alimentos
Fenol	Adesivos diversos.	PET – Polietileno Tereftalato	Emb. Diversas e de alimentos
Epóxi	Compósitos especiais e adesivos.	Polipropileno HD	Peças industriais compósitos injetados
Acrílicos	Substituto do vidro, utensílios	Nylon	Tecidos e peças mecânicas industriais
Éster vinílica	Compósitos de maior resistência.	EVA – Etileno Vinil Acetato	Calçados, materiais esportivos
Bisfenólica	Adesivos, abrasivos, discos de corte.	Poliestireno	Isolamento, embalagens, constr. Civil

Compilado de Quinn (2002) e Mazumdar (2001)

Atualmente, já existem os plásticos biodegradáveis, que se dissolvem quase instantaneamente na água, ou os biopolímeros, (FARRAR, 2006), que são absorvidos totalmente pela estrutura óssea e vêm sendo pesquisados para uso em próteses e pinos de fixação em medicina.

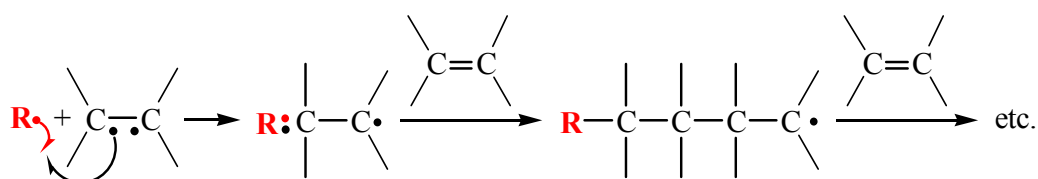
Nos próximos itens serão abordados os plásticos termofixos em geral com ênfase para os tipos que mais são utilizados na construção civil ou que possuem maior potencial para sua utilização.

É necessário, para entender a diferença química entre os plásticos, segundo McMurry (2000), determinar suas origens e a razão da existência dos dois grupos acima descritos.

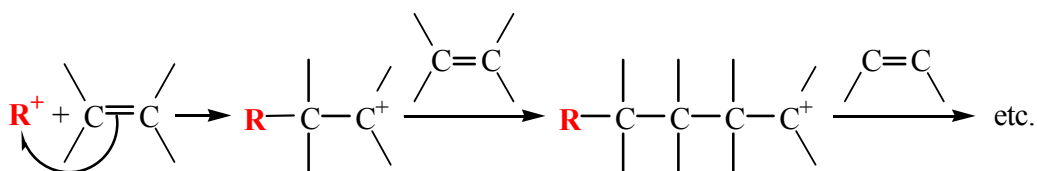
Os compostos poliméricos são obtidos a partir dos hidrocarbonetos aromáticos. O mecanismo de polimerização ocorre segundo alguns critérios, mas, em geral, por adição.

Esses podem ser mecanismos radicais, mecanismos catiônicos ou mecanismos aniônicos. Ou, segundo McMurry (2000), reações polares, reações radicais e reações pericíclicas.

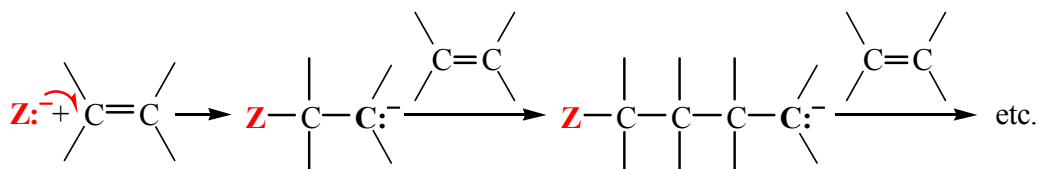
A Figura 12 “a”, “b” e “c” a seguir apresenta o processo de polimerização segundo cada um deles. Esse processo é de extrema importância no que concerne aos plásticos termofixos, uma vez que eles sempre são polimerizados por adição de reagentes que desencadeiam a reação interna liberando radicais, cátions ou íons.



a – Polimerização radical



b – Polimerização catiônica



c – Polimerização aniônica

Figura 12 “a”, “b” e “c” – Mecanismos de Polimerização por Tipo de Ligação
 Compilado de: Chemistry Course at YALE UNIVERSITY (2001)

Além dos mecanismos citados, outra característica que influencia nas reações de polimerização é a estereoquímica molecular dos compostos. Ela é responsável pela organização das moléculas e, conseqüentemente, dos cristais que se formam conferindo aos polímeros suas propriedades mecânicas, de interesse direto para a engenharia.

Dividem-se em vários grupos, mas para o interesse deste texto, serão descritos os carboidretos parafínicos que dão origem aos polímeros saturados e os carboidretos olefínicos, que dão origem aos polímeros insaturados.

A composição básica dos carboidretos parafínicos segue a fórmula geral a seguir:



Onde “n” é o número de átomos de carbono na molécula. Outra característica desses compostos é que são saturados. Isso se deve ao fato de que suas moléculas possuem ligações simples dos átomos de carbono, ou seja, por pares de elétrons.

De outro lado, os carboidretos olefínicos, também chamados de etilênicos ou alquenos, possuem nas suas moléculas duplas ligações entre os átomos de carbonos, ou por dois pares de elétrons, sendo, por isso, insaturados.

A fórmula geral desses carboidretos é a seguinte:



Onde “n” é a quantidade de átomos de carbono na molécula.

Dessa forma, podem-se constituir diversos compostos, pela adição de átomos de carbono à molécula anterior.

Desses grupos principais chega-se aos seus compostos derivados como alcoóis, fenóis, éteres, cetonas e para o interesse deste trabalho, os ácidos carboxílicos.

Ao misturar-se álcool a um ácido carboxílico, como álcool etílico e ácido acético (vinagre), ocorre uma reação denominada esterificação. Desta reação resultam: água, álcool, ácido acético e **ÉSTER**. Os ésteres são a base de fabricação dos polímeros insaturados como será visto adiante.

Cabe esclarecer que os polímeros aqui caracterizados possuem todos os anéis de benzeno em sua composição. A cadeia molecular do benzeno se apresenta, esquematicamente, sob o contorno de um hexágono com um círculo circunscrito.

Essa geometria indica os pares de ligações covalentes H-C=C-H e de ligações simples H-C-C-H . Elas ocorrem alternadamente no benzeno e, conforme a ligação com outros átomos, de Carbono e Hidrogênio, e a posição em relação ao anel, resulta num composto diverso do anterior.

Sua estrutura molecular está representada na Figura 13 a seguir. A partir dele outros carboidretos aromáticos são formados e esses podem conter de um a vários anéis benzeno em sua cadeia molecular, como se verá.

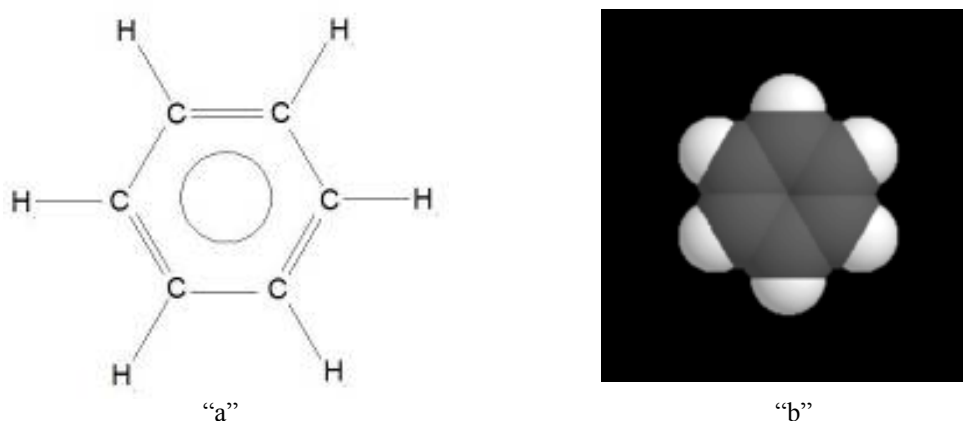


Figura 13 “a” e “b” – Estrutura molecular e estereoquímica do Benzeno
Adaptado de McMurry (2000)

2.4.2.1 Poliéster

O poliéster é um polímero que pode ser produzido na forma saturada ou insaturada.

Poliésteres saturados podem ser formados em duas etapas, condensação do ácido e do álcool, formando uma resina solúvel e, após, a adição de um agente de interligação, para formar uma resina termoestável. Esse processo cria os filmes de poliéster (*Mylar*®, *Terkron*® e *Terphane*®) ou fibras têxteis (*Teijin-Tetron*® e *Dacron*®), todos eles nomes comerciais. Os filmes de poliéster são similares aos filmes de polietileno e polipropileno utilizados para fabricação das fibras desses plásticos termomoldáveis.

As fibras são utilizadas em larga escala na indústria têxtil, para fabricação de tecidos mistos com fibra de algodão ou totalmente sintéticos.

Não caberá neste trabalho conhecer as propriedades das fibras desses polímeros, uma vez que o tema central é a utilização da fibra de vidro, todavia, conhecimento mais detalhado poderá ser encontrado na literatura (McMURRY 2000; SOLOMONS, 2002).

Os poliésteres insaturados são ésteres complexos formados pela reação de um diálcool (glicol) e um anidrido ou ácido dibásico (diácido) com liberação de uma molécula de água como radical. Em virtude da reação ocorrer nas duas extremidades da cadeia, é possível ter moléculas muito compridas e obter-se uma multiplicidade de grupos de ésteres.

O poliéster insaturado é obtido quando pelo menos um dos compostos a serem misturados contém insaturações. A denominação insaturado é proveniente da presença de duplas ligações presentes na sua cadeia molecular, como já visto anteriormente. A insaturação do poliéster é fornecida, geralmente, pelo ácido ou anidrido maléico, assim como pelo seu isômero, como já definido, ácido fumárico, ambos pertencentes à classe dos ácidos carboxílicos.

Neste texto será conceituado o poliéster insaturado na sua fase solúvel, tendo como solvente e agente de interligação, o monômero de estireno, que também possui insaturações na sua composição.

Esse composto dá origem às resinas líquidas catalisáveis à temperatura ambiente ou com pequena elevação para torná-los termoestáveis sem a necessidade de sistemas complexos de catalisação e transformação como nos filmes de poliéster.

As duplas ligações são quebradas pela adição de um catalisador (MEKP - peróxido de metil etil cetona), podendo ou não ser acompanhado de calor ou radiação. Essa segunda reação, que é a que interessa diretamente ao tema abordado, dá origem a um polímero tridimensional de características termoestáveis e, portanto, infusíveis e irreversíveis, ao contrário do que ocorre com os polímeros termomoldáveis.

As fases pelas quais passam os poliésteres, desde a sua produção até a polimerização ou cura, são esquematizadas pela Figura 14.

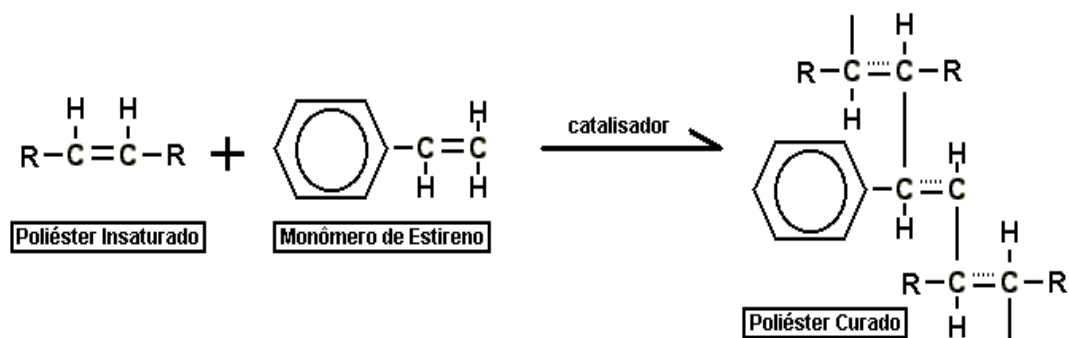


Figura 14 – Seqüência de reação entre o poliéster, o estireno e o reagente.
Adaptado de McMurry (2000)

Existem diversas variações de polímeros insaturados, que são desenvolvidas periodicamente para necessidades específicas. São formulados para aumento da resistência química, bromados (características anti-chamas ou auto-extinguíveis), “*low-profile*” (baixa contração por volume), emulsionados (baixo teor de estireno) e ainda com aditivos para melhorar a tixotropia (aumento da viscosidade), visando melhorar a trabalhabilidade, principalmente em regiões inclinadas ou verticais, evitando o escorrimento.

A modificação básica nas cadeias químicas ocorre junto aos anéis de benzeno e a posição em que o restante da cadeia está ligada a ele, conforme visto.

As resinas tratadas neste tópico são as mais utilizadas comercialmente para uso geral e especial. No caso de aplicações mais específicas e com outras exigências de resistência mecânica ou química, são utilizadas as resinas que serão vistas adiante.

■ Resinas Ortoftálicas

São aquelas que, na sua composição, são utilizadas como ácidos modificadores, o ácido ftálico ou seu anidrido. Suas propriedades mecânicas e químicas são inferiores às demais, devido à dificuldade de se obter polímeros de alto peso molecular e cadeias longas e bem ordenadas. A anidrido ftálico tem forte tendência de se regenerar a partir dos meios ésteres do ácido ftálico (reação reversível), fato que incrementa a presença de espécies de baixo peso molecular, altamente sensíveis ao ataque químico. Contudo, é o tipo ideal de resina para uso geral, por se constituir de um composto abundante se comparado com alguns fenóis ou glicóis e mesmo com o ácido tereftálico puro. Como os demais polímeros, sua insaturação (ou desestabilização química) é obtida pela adição de Monômero de Estireno (SOLOMONS, 2002). A Figura 15 resume uma repetição da cadeia molecular desse polímero. O índice *n*, junto aos parênteses, representa o número de repetições dessa cadeia química, que varia em função dos ácidos e glicóis ou polióis utilizados na reação.

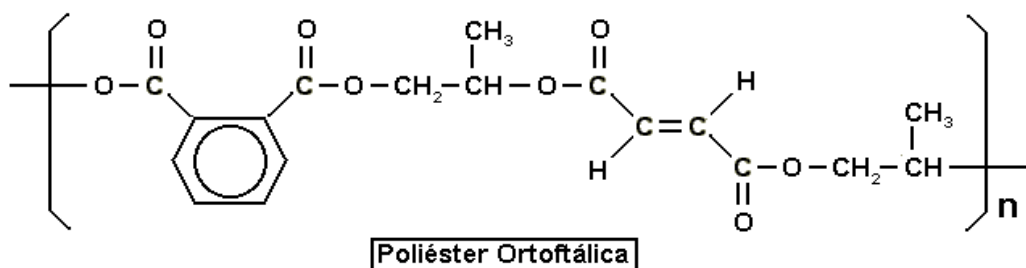


Figura 15 – Cadeia química esquemática das resinas poliéster ortoftálicas
Adaptado de Solomons (2002)

■ Resinas Tereftálicas

São resinas onde parte dos ácidos é substituída por ácido tereftálico, apresentando desempenho similar às resinas isoftálicas, quanto à resistência química, hidrólise e térmica. Porém possuem baixa resistência a UV, amarelando com facilidade. Outro aspecto desfavorável é o custo de produção a partir do ácido tereftálico, pois o tempo de fabricação é o triplo do tempo de uma resina isoftálica. Seu uso se destina a componentes que receberão uma cobertura superficial de “gel coat”. Também é comum aplicações em locais onde a coloração e opacidade não sejam barreiras estéticas ou funcionais como fabricação de telhas de fibra de vidro translúcidas, por exemplo, ou onde permanecerão ao abrigo da incidência direta da luz solar, na maior parte do dia.

No Brasil, o desenvolvimento dessa resina ganhou força, pelo aproveitamento da reciclagem de garrafas PET (polietileno tereftalato) que é utilizado em substituição do ácido tereftálico, permitindo o processamento no mesmo tempo que as resinas isoftálicas um dos componentes da formulação da mesma. Dessa forma, é a resina de melhor relação custo *versus* benefício para uma vasta gama de aplicações onde a resistência química média e baixa e a hidrólise fraca devam ser previstas.

A Figura 16 mostra sua cadeia molecular reduzida, com *n* indicando o número de repetições da cadeia.

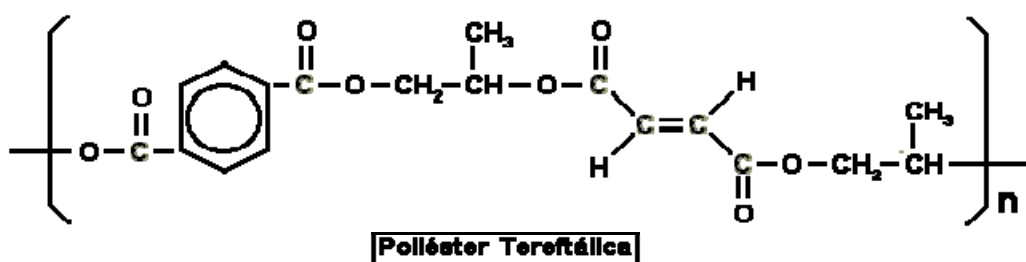


Figura 16 – Cadeia química esquemática das resinas poliéster tereftálicas
Adaptado de Solomons (2002)

■ Resinas Isoftálicas

O ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, não sofre a desvantagem de degeneração, como no caso das ortoftálicas, e conseqüentemente, podem ser obtidos poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas (vale dizer, com maior número *n* de repetições). Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, por possuir maior capacidade para absorver os impactos. Conseqüentemente, em razão da

sua estereoquímica, tornam-se polímeros de maior resistência química e térmica que os polímeros já vistos anteriormente.

A Figura 17 representa a cadeia molecular desse tipo de termofixo:

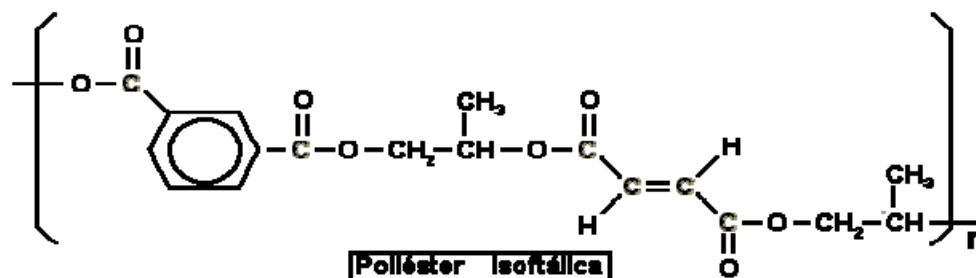


Figura 17 – Cadeia química esquemática das resinas poliéster isoftálicas
Adaptado de Solomons (2002)

■ Resinas Isoftálicas com Neo Pentil Glicol (NPG)

Para melhorar a resistência à hidrólise pelo poliéster, substituiu-se o glicol por neo pentil glicol. Em todo o processo de fabricação das resinas sobram glicóis residuais. O NPG possui baixo teor de hidroxilas livres em sua cadeia, fato que favorece a hidrólise do poliéster e sua degradação e "solubilização". Ao ser curada a resina, as ligações entre o estireno e os ácidos ocorrem em maior número, causando um maior entrelaçamento da cadeia. Dessa maneira, esse tipo de resina se torna indicada em situações onde o polímero vai estar continuamente exposto à umidade e ações químicas leves. Também é indicada em áreas cujos vapores ou atmosfera contenham alto teor de umidade, salinidade ou resíduos em suspensão na água, segundo Solomons (2002).

A seleção da resina a ser utilizada depende exclusivamente do fim específico a que se propõe a peça final, envolvendo diversos parâmetros que devem ser previamente analisados. Esses parâmetros serão vistos no capítulo que trata das aplicações.

Pode-se dizer que a análise preliminar básica envolve a tecnologia utilizada, a finalidade e o volume de produção que seja necessário atingir, o teor de vidro constituinte do compósito e o ambiente ao qual ficará exposto o elemento produzido.

Em resumo, cada aplicação depende do custo *versus* benefício de uma determinada resina, sendo que algumas das várias possibilidades de uso das resinas poliéster mais utilizadas em compósitos no Brasil são as apresentadas na Tabela 10.

Tabela 11 – Principais grupos de resinas e aplicações comerciais usuais

Ortoftálica	Bijuterias, artesanato, laminação em reforço de fibra, <i>gel coat primer</i> ;
Tereftálica	Laminação em reforço de fibra, embutimento eletrônico, artesanato;
Isoftálica	<i>Gel coat</i> para exteriores, laminados exposto as intempéries;
Isoftálica com NPG	Peças e laminados expostos a ataques químicos leves e contato direto com água;
Tereftálica com NPG	Mesmas aplicações que a Isoftálica com NPG, mas em peças que serão recobertas por <i>gel coat</i> .

2.4.2.2 Epóxi

O epóxi se origina basicamente da interligação de um átomo de oxigênio entre dois de Carbono dentro da cadeia C-H. Desse processo deriva o seu nome. Óxido de etileno.

Os polímeros epoxídicos podem aparecer em diversos graus de complexidade, conforme Smith (2001), sendo que a cadeia mais simples é a formada por um anel triangular do Óxido de Etileno, como mostrado na Figura 18.

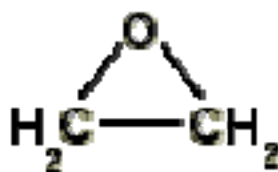


Figura 18 – Óxido de Etileno.
Adaptado de Solomons (2002)

No exemplo da Figura acima, o Óxido de Etileno também pode ser chamado de 1,2-epóxi ou A-epóxi. Outras cadeias mais complexas são formadas seguindo o mesmo processo de ligações desse composto.

As resinas epoxídicas, ou epóxi, mais utilizadas, são resultantes da mistura entre os compostos de óxidos de algum alceno, como a Epicloridrina e do grupo glicidil e algum fenol, como o Bisfenol com Ácido Fumárico, dando origem ao Diglicidil Éster de Bisfenol - A, comercialmente conhecido como **DGEBA**. Contudo, ainda não existe uma terminologia internacional comum aos anéis epoxídicos, tendo maior predominância os nomes comerciais desses compostos patenteados pelos seus fabricantes.

As cadeias das resinas epóxi são modificadas por amins alifáticas e fenóis, conforme os processos de cada fabricante, para conferir trabalhabilidade, adequar a viscosidade e molhabilidade das superfícies e fibras e permitir processo adequado de cura.

Esses compostos modificadores são, em geral, segredo industrial uma vez que eles são os principais responsáveis pela qualidade final das resinas, conferindo a viscosidade adequada, a maior ou menor eficiência na cura e o desempenho mecânico diferenciado.

A cadeia de uma resina epóxi antes do processo de cura e modificação acima citado, apresenta a conformação da Figura 19.

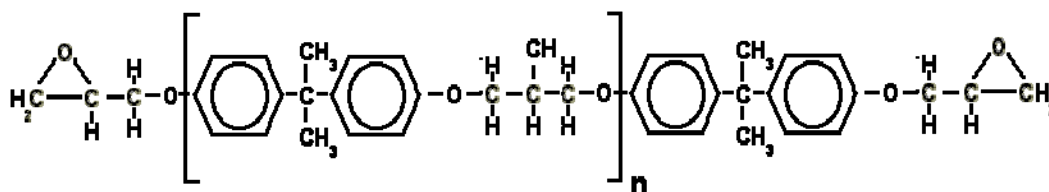


Figura 19 – Cadeia Química Esquemática das Resinas DGEBA Epóxi Básica
Adaptado de Solomons (2002)

Como descrito, uma das propriedades das resinas epóxi, ainda não modificadas por fluidificantes, é sua viscosidade extremamente alta, sendo por essa razão de difícil trabalhabilidade. Enquanto as resinas poliéster possuem viscosidade média variando entre 2,5 dPa.s e 25 dPa.s, as resinas epóxi apresentam viscosidade muito maior. Dessa forma, são aditivadas para se tornarem mais fluidas. O principal fluidificante dessas resinas é o éster vinil.

As resinas mistas epóxi-éster vinílicas possuem viscosidade da ordem de 0,4 mPa.s, conforme encontrado na literatura, manuais de fabricantes e em Quinn (2002), deixando-a com isso, com viscosidade pouco mais próxima à das resinas poliéster.

As resinas epóxi, puras ou compostas com vinil ésteres, são as mais propícias para uso em ambientes agressivos, em aplicações que exijam resistências mecânica, química e térmica simultaneamente, e em aplicações onde as resinas isoftálicas não consigam atingir satisfatoriamente o desempenho e especificações de projeto.

A principal desvantagem, no Brasil, ainda é seu custo elevado em relação às resinas poliéster vistas anteriormente. As resinas poliéster chegam a custar 75% menos que as resinas epóxi. Isso ocorre porque ainda não são produzidas resinas epóxi em escala industrial

que possam competir com o poliéster no Brasil, sendo a maioria delas importadas e somente embaladas no nosso país.

Por possuírem uma parte dos compostos fabricados no Brasil, as resinas mistas epóxi-vinílicas, geralmente, têm preços menores que os epóxios puros.

Outro fator que contribui para o custo elevado do epóxi é que o mesmo é usado em segmentos industriais que produzem produtos de alto valor agregado e, nesse caso, o custo da matéria-prima resina significa muito pouco no valor final do produto acabado.

Entre eles, destacam-se a indústria aeronáutica, a naval e a esportiva de alto desempenho.

Como exemplo, tomemos o setor náutico que mais utiliza as resinas epóxi. Pode-se estimar o preço de venda de uma embarcação de lazer, a motor, com 50 pés de comprimento (aproximadamente 15 metros), como aproximadamente US\$400 mil (quatrocentos mil dólares), em média, considerando que os padrões de acabamento, motores e outros equipamentos sejam os convencionais.

O custo da resina epóxi chega a 15% desse valor. Se utilizar-se resina poliéster, não chega a 8% do mesmo valor. Esse exemplo ilustra a representatividade da matéria-prima resina em relação ao preço do produto, relacionando dois tipos diferentes de matérias-primas para a mesma função.

O mesmo pode ocorrer com aplicações de reforço estrutural, contudo, cada caso deve ser criteriosamente analisado com uma avaliação precisa das condições de trabalho local, da disponibilidade de mão de obra, da disponibilidade de matérias-primas no local e da complexidade geométrica da obra.

Esses critérios de seleção serão colocados com detalhes nos capítulos subseqüentes.

2.4.2.3 Fenóis (Bisfenóis)

As resinas fenólicas mais comuns são as utilizadas para a fabricação dos laminados melamínicos (Fórmica ®). Fazem parte do grupo mais antigo de resinas comercialmente fabricadas. Sua fórmula básica foi patenteada na Alemanha pela empresa Bakelite, a qual produz o isolante térmico de mesmo nome, utilizado até hoje em cabos de utensílios domésticos, ferramentas utilizadas em áreas expostas ao calor intensivo e capas ou invólucros de produtos ou peças sujeitas a aquecimento pelo uso contínuo.

Essas resinas são resultantes da reação simplificada do óxido de propileno e o bisfenol - A, resultando no bisfenol - A propoxilato que depois reagirá com um ácido insaturado. Por isso este tipo de resina possui poucos pontos sujeitos a hidrólise. Sua estrutura com anéis aromáticos deixa o polímero com uma estrutura mais fechada, tornando-a mais resistente térmica e quimicamente, além de conferir grande rigidez. Recomendada principalmente para peças que vão sofrer ataques químicos, grandes variações de temperatura e umidade na presença de vapor.

Com cadeia molecular muito parecida com as resinas epóxi, sua principal diferença é a presença dos polióis na cadeia ao contrário das cadeias vinílicas anteriores. A Figura 20 apresenta a cadeia molecular desse tipo de resina. Como nos polímeros anteriores, n significa o número de repetições da cadeia.

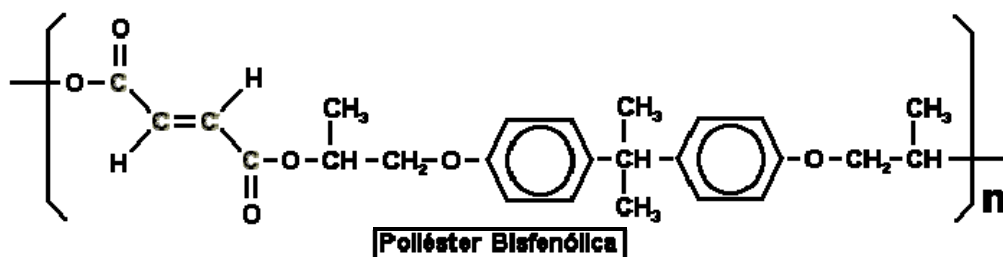


Figura 20 – Cadeia Química Esquemática das Resinas Poliéster Bisfenólicas
Adaptado de Solomons (2002)

2.4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS POLÍMEROS TERMOFIXOS

São utilizados diversos métodos de ensaios, de acordo com as exigências do mercado consumidor. Em geral são utilizadas as normas da International Standards Organisation – ISO 75, ISO 178, ISO 527 e ASTM D2583 (American Standards for Testing and Materials), para os ensaios mecânicos das resinas não reforçadas com fibras.

Alguns países adotam além dessas, suas normas nacionais para complementar os requisitos, de acordo com o desenvolvimento e disseminação do uso desses produtos.

O Reino Unido utiliza as normas BSI (British Standards International), como complemento às normas ASTM. A Tabela 12, a seguir, mostra um resumo das propriedades mecânicas dos polímeros termofixos, do tipo poliéster insaturado mais comum no Brasil.

Tabela 12 – Propriedades Mecânicas de Polímeros Curados sem reforço

Propriedades	Poliéster	Vinil-Éster	Epóxi
Resistência máxima à tração (MPa)	40 a 105	45 a 140	60 a 90
Módulo de elasticidade na tração (GPa)	105 a 450	220 a 280	330 a 350
Alongamento máximo (%)	1,7 a 2,3	2 a 8	2 a 5
Resistência à Flexão (MPa)	115 a 125	110 a 135	70 a 100
Módulo de elasticidade na flexão	3,3 a 3,5	3,0 a 4,5	3,0 a
Dureza (ASTM D-785) (ASTM D-676)	40 a 50 (barcol)	>A95 (shore)	107 a 112 (rockwell)
Contração linear (%)	2,0	2,0	1,2 a 1,8
Temperatura de termodistorção (°C)	110 a 170	100 a 300	140 a 290
Resistência ao impacto método IZOD com entalhe (N*m/m)	9,6 a 42,8	693 a 907	16 a 26,7
Valores para resinas curadas sem reforço			

Fontes: REICHHOLD (2006); SHACKELFORD (2001)

Ainda que macroscopicamente os polímeros possuam características isotrópicas, microscopicamente, a maioria deles se constituem de materiais ortotrópicos. Isso se deve às ligações interatômicas, já descritas, pelas longas cadeias moleculares. Essa característica diferencia as propriedades mecânicas de um tipo de polímero para outro.

A variação e posicionamento dessas ligações conferem maior ou menor tenacidade aos polímeros em geral. Outro aspecto que muito influencia na variabilidade da resistência e rigidez desses materiais é a baixa T_g (temperatura de transição vítrea) em relação ao concreto, à fibra de vidro e ao aço. Alguns polímeros se aproximam da T_g de alguns metais e ligas, mas estruturalmente baixas para determinadas finalidades.

Além das propriedades micromoleculares inerentes aos polímeros em geral, os polímeros insaturados, que dependem de agentes químicos externos para que ocorra a polimerização, também podem ter suas propriedades mecânicas alteradas em razão do processo de seu processo de cura.

2.4.3.1 O processo de Cura dos Polímeros Insaturados

Como já descritos anteriormente, os polímeros são compostos orgânicos divididos em dois grupos. Aqui trataremos dos compósitos baseados numa matriz polimérica termofixa, isto é, o polímero se solidifica num processo irreversível, ao contrário dos polímeros termo-moldáveis.

Para que seja possível a utilização dos polímeros insaturados, eles devem estar solubilizados. O principal solvente utilizado é o monômero de estireno, o qual tem dupla função:

- Promover a solubilização do plástico e;
- Promover o entrelaçamento das ligações químicas no momento da cura.

A partir do momento em que o polímero é solubilizado, passa a receber o nome usual, já consagrado, de resina.

As resinas insaturadas são polímeros já preparados com diversos aditivos que servem para reduzir a exotermia, aumentar a tixotropia, acelerar a cura e alterar a coloração, conforme as necessidades de cada aplicação.

Similarmente ao concreto, os compósitos necessitam de agentes promotores da cura, denominados catalisadores.

O principal agente de cura se denomina **MEKP** – Peróxido de Metil Etil Cetona. O processo de endurecimento (cura) é iniciado pelo grupo de radicais livres que estão presentes nas moléculas peróxidos [O-O] ou hidroperóxidos [O-O-H], segundo Carvalho (2002), são utilizados agentes aceleradores para desmontar a cadeia do peróxido e liberar as hidroxilas (radicais livres) à temperatura ambiente, (idem). Disso, pode-se concluir que a temperatura exerce grande influência no processo de cura do **GFRP**.

É importante frisar que a ação dos aceleradores de cura se dá sobre os catalisadores e não sobre o polímero.

A reatividade entre esses compostos é extremamente alta e exotérmica, por conta da instabilidade existente no Peróxido de Hidrogênio – H_2O_2 , presente na composição do **MEKP**. É possível notar a presença de algumas moléculas de Monômero de Estireno (Azuis) não reagidas, após a cura. Isso pode ser melhorado através de processos de pós-cura, especialmente quando os processos de cura foram realizados à temperatura ambiente.

A pós-cura completa a formação de algumas cadeias e provoca a evaporação de uma pequena parcela de estireno residual superficial. As Figuras 21 e 22, a seguir, representam, esquematicamente, as cadeias moleculares antes e após a cura das resinas, por meio dos catalisadores.

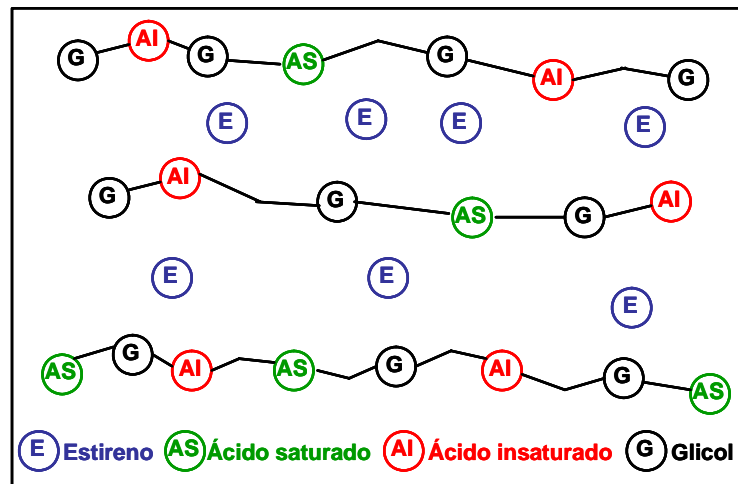


Figura 21 – Cadeia Polimérica Antes da Cura
Compilado de CARVALHO (2002)

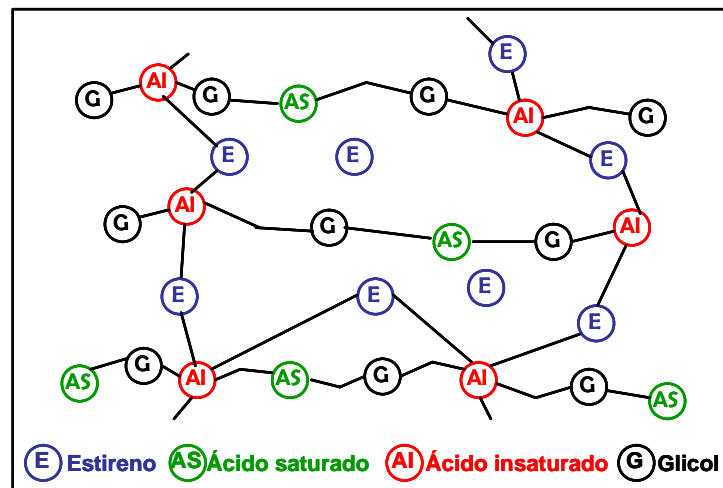


Figura 22 – Cadeia Polimérica Após a Cura
Compilado de CARVALHO (2002)

Além do **MEKP**, outros catalisadores também são utilizados. O **BPO** – Peróxido de Benzoíla, para efeito de cura, é o mais eficiente, porém, sendo sólido é mais difícil de misturar. Ele também causa o amarelamento do laminado no processo de cura (que não é inconveniente se a peça não é translúcida ou aparente). O **AAP** – Peróxido de Acetil Acetona, similar ao **MEKP**, com pequena diferença na cadeia do Etileno.

A formulação básica dos catalisadores, ou agentes de polimerização inclui, portanto, um ou mais grupo Peróxido (**O-O**) ou Hidroperóxido (**OHO**). Os aceleradores de cura, por outro, são sais metálicos, dos quais o mais utilizado é o Cobalto. A única exceção é o **DMA** (Dimetilanilina).

A Tabela 13 apresenta as alternativas de uso dos catalisadores, combinados com os aceleradores, como parâmetro de cálculo de dosagem, que devem ser adicionados para cada 100 g de resina. Esses valores típicos são válidos para cura de laminados a frio, isto é, sem pré-aquecimento das formas ou da região que receberá o material.

Os valores a seguir valem para resinas poliéster não aceleradas. Tais dados são fornecidos pelos fabricantes junto com a ficha técnica do produto. Os ensaios de dosagens foram realizados num ambiente com 50% de umidade relativa e temperatura de 25 °C.

Tabela 13 – Tempo de início de cura, por tipo de catalisador e acelerador

Catalisador	Peso (g)	Acelerador	Peso (g)	Gel time
MEKP (50%)	2,0	Cobalto (1%)	0,5	20 – 30
AAP (50%)	2,0	Cobalto (1%)	0,5	40
BPO (50%)	2,0	DMA	0,2	30
CHP (50%)	2,0	Cobalto (1%)	0,5	Acima de 60

Fonte: HOECHST (1996)

Em determinadas situações é recomendado, e necessário, realizar a cura a quente. Novamente aqui é possível se fazer uma analogia à cura do concreto.

A diferença está no sistema de aquecimento. Enquanto nos elementos de concreto a cura é com vapor, no caso de **GFRP** a cura ocorre por aplicação de ar seco quente, aplicado diretamente na peça quando o molde é aberto ou nas ferramentas onde serão produzidos os compósitos, por meio de transferência de ar quente ou resistência elétrica. Nesses casos, o que é fundamental é o controle da temperatura mínima para início da polimerização e a temperatura máxima de cura do componente.

A Tabela 14 resume os valores em peso dos catalisadores e as temperaturas necessárias para iniciar a polimerização de 100g de resina poliéster não acelerada.

Tabela 14 – Temperatura de polimerização por tipo de catalisador

Catalisador	Peso (g)	Temperatura necessária para início da polimerização (°C)	Temperatura de cura (°C)
BPO	2,0	80 – 90	130 – 140
PTBPO	2,0	75	130
PTBPB	2,0	95	145
PTBC	2,0	100	150

Fonte: HOECHST (1996)

De fato, as resinas insaturadas possuem um “*shelf-life*” (prazo de validade) extremamente curto, quando comparadas ao cimento, supondo que em ambos os casos os cuidados de preservação na armazenagem sejam tomados.

Em geral, os fabricantes emitem seus boletins técnicos atestando que o prazo de validade para uma resina de base poliéster é de 4 meses após a data de fabricação, desde que mantida sob temperatura igual ou inferior que 25 °C.

A Tabela 15 a seguir demonstra a diferença entre tempo de vida e temperatura. Esse fato afeta qualquer tipo de resina, de maneira mais ou menos agressiva, conforme a formulação e a condição de armazenagem. Para contornar essa dificuldade a solução ideal é o planejamento do uso desses produtos, uma vez que acondicionamento em baixas temperaturas requer maior consumo energético e aumento de custos.

Tabela 15 – Variação de durabilidade de resinas poliéster com a temperatura

Tipo de resina	Temperatura de armazenagem (°C)	Validade (dias)
Isoftálica NPG Não acelerada	18 – 25	120
Isoftálica NPG Não acelerada	50	30
Ortoftálica Pré-acelerada	15 – 20	120
Ortoftálica Pré-acelerada	50	20

Fonte: HOECHST (1996)

Enquanto para o cimento o fator crítico é a umidade, para as resinas o fator crítico são as temperaturas elevadas. Nas últimas, a rotatividade dos estoques deve ser alta e o volume produzido merece planejamento logístico acurado e uma ligação quase simbiótica entre os fornecedores e consumidores.

A Tabela 16, a seguir, mostra as principais características de um grupo de resinas de base poliéster encontradas no Brasil. As variações de um fabricante para outro não sofrem variações significativas para um mesmo grupo de resinas. As diferenças estão nos índices de tixotropia, sistemas de cura e prazos e métodos mais adequados de pós-cura.

Tabela 16 – Características Típicas de Resinas Base Poliéster

Viscosidade (Brookfield) dPa.s	400 a 650
Matéria seca a 105 °C (%)	58 a 60
Índice de acidez (mg KOH/g)	9 a 15
Coloração	Amarelo a esverdeado
Curva Exotérmica	
Gel Time (min.)	10 a 15
Temperatura Máxima (°C)	170 a 190
Tempo mínimo de cura (min.)	21 a 27
Valores para 100g de polímero 0,5 % de Solução de Cobalto com 6% de metal 1,0% de Peróxido de Metil Etil Cetona	

Fontes: REICHHOLD (2006); HOECHST (1996); HUTCHINSON (2003)

O que foi descrito sobre a cura, até aqui, vale para as resinas poliéster e éster vinílicas. Para as resinas epóxi, não são utilizados os agentes iniciadores de cura ou, catalisadores.

As resinas epóxi são produzidas em dois componentes. Um deles é a resina propriamente dita, e o outro endurecedor. São chamados de sistemas e são fornecidos em proporções previamente balanceadas de resina e endurecedor, as quais devem ser particionadas de acordo com a relação solicitada ou comprada. Essas proporções devem ser rigorosamente seguidas para que a resina cure. Ao se reunir os dois componentes para utilização, a mistura deve ficar perfeitamente homogênea, pois a reação ocorrerá pela proximidade entre as moléculas de cada um dos compostos.

Pelo princípio regido pelas forças de Van der Waals, as moléculas mais afastadas não possuem mobilidade suficiente para se atraírem. Também não ocorrem as quebra de moléculas e o seu rearranjo, como acontece nas resinas poliéster e éster vinílicas.

A Tabela 16 apresenta as relações entre adesivo e endurecedor possíveis e os tempos aproximados de cura. A principal causa de delaminação, ou perda da adesão, segundo os fabricantes, em laminados com resinas epóxi está na deficiência da mistura entre os dois componentes. Deve ser notado que os valores são médios referentes às temperaturas entre 20 °C e 25 °C, para uma quantidade de 100 g de polímero e endurecedor já misturados.

Tabela 17 – sistemas de cura de resinas epóxi

Relação resina / endurecedor	Tempo aprox. de cura (min.)
1:1	10 a 15
2:1	20 a 30
4:1	30 a 45
5:1	45 a 60

Fonte: Fiberlay (2004)

2.4.4 O CIMENTO PORTLAND E O CONCRETO

Por se tratar da matéria-prima principal na construção civil o cimento possui normalização bem estruturada e fundamentada, em relação a seu comportamento macro estrutural.

A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - complementarmente ao INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia - e em conjunto com a ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland - estabeleceu inúmeras normas de especificações, algumas de desempenho e atualizações de outras normas já existentes, referentes às características físico-químicas do material. Isso favorece ainda mais a difusão de sua aplicação. O mesmo não ocorrendo com outros materiais que são também, extremamente utilizados na construção civil, como os materiais cerâmicos, como os blocos para alvenaria e os materiais para revestimento.

O cimento Portland hoje recebe em sua composição uma grande parcela de resíduos derivados de outras indústrias. Podem ser relatadas como exemplo as escórias siderúrgicas e as cinzas, segundo Metha e Monteiro (1994).

Não será detalhada a interação entre a pasta cimentícia e os demais constituintes do concreto, contudo, é necessário fazer algumas observações sobre sua interação com a fibra de vidro. Isso será feito no item que trata dos materiais compósitos, considerando também os concretos como materiais compósitos.

Pelo descrito aqui, é necessário visualizar-se a composição química presente no cimento, para que se consiga compreender o processo químico que relaciona sua cura, pela hidratação, e como esse processo pode interferir nas misturas entre o cimento e seus agregados e com outras adições, nesse caso, as fibras de vidro.

Nota-se que a grande maioria dos compostos presentes no cimento são sais ou óxidos. A presença do oxigênio em todos os compostos indica como se processa a reação de hidratação. A sinterização causa o desprendimento das moléculas de água, e junto, parte das hidroxilas.

Devido à composição química e às instabilidades das ligações interatômicas, ao entrar em contato com a água, ao se produzir as argamassas e o concreto, os sais quebram as moléculas e se associam às hidroxilas que se reagrupam sob a forma de novos compostos.

Parte da água não reagida é eliminada pela evaporação, outra parcela vai reagindo durante longo período de tempo, enquanto uma terceira parte acaba confinada nos vazios intersticiais entre a pasta e agregados.

A Tabela 17, conforme Almeida (2002), apresenta a composição média do clínquer, em relação aos compostos minerais, em percentual por peso, assim como algumas propriedades físicas que cada composto determina para o comportamento do cimento antes e após a cura.

Tabela 18 – Composição média do Clínquer

Minerais	Sigla	Fórmula química	Percentual no Clínquer	Propriedades Físicas
Silicato tricálcico (Alita)	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	50 - 65	Alto calor de hidratação; alta resistência inicial; endurecimento rápido.
Silicato dicálcico (Belita)	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	15 - 25	Baixo calor de hidratação; baixa resistência inicial; endurecimento lento.
Aluminato tricálcico (Aluminato)	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	6 - 10	Alto calor de hidratação; alta retração; baixa resistência final; pega rápida, necessita gesso; não resiste a sulfatos.
Ferro-aluminato tetra-cálcico (Ferrita)	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	3 - 8	Não contribui para resistência, cor escura; endurecimento lento resiste aos meios sulfatados.
Cal livre	C	CaO	0,5 a 1,5	Aumento de volume, grande exotermia e, conseqüentemente, fissuras.
Sódio	Na	Na ₂ O	0 - 1,5	Álcalis
Potássio	K	K ₂ O	0 - 1,5	
Magnésio	Mg	MgO	08 - 6,5	Podem ocasionar aumento de volume

Fonte: Almeida (2002)

2.4.4.1 Efeitos Sobre o Concreto

As propriedades vistas até aqui trataram o cimento enquanto principal aglomerante hidráulico. A seguir será necessário colocar a interação entre a pasta cimentícia e os demais componentes do concreto para que se possa compreender como as adições favorecem as propriedades mecânicas desse material.

No momento que a água é adicionada à mistura, inicia-se o processo de cura. A cura é a reação de hidratação da pasta cimentícia ao entrar em contato com a água. Esse contato faz com que os sais presentes nos grãos de cimento se dissolvam e saturem a água com suas partículas. Nesse período ocorrem várias reações entre os sais solubilizados pela água e as hidroxilas, partículas ionizadas que quebram as moléculas dos sais originais.

Parte dos compostos originais que não entraram em contato com a água da mistura permanece inalterada até que, em algum momento, entrem em contato com a água, reiniciando o processo. Esse processo continua até que toda água interna reaja com os outros compostos, ou, seja extraída por evaporação.

Os principais compostos formados pela hidratação são, segundo Metha & Monteiro (1994):

- O Silicato de Cálcio Hidratado – C-S-H;
- O Hidróxido de Cálcio – Portlandita – C-H;
- O Sulfoaluminato de Cálcio, que gera o Trissulfato Hidratado de Cálcio, ou Etringita – C-S-A-H;
- Grãos de Clínquer não hidratados.

Após a cura forma-se uma barreira entre o agregado graúdo e a pasta, tanto maior quanto foi maior a quantidade de água ali retida. Essa interface, chamada zona de transição é responsável, em grande parte, pelo início dos processos de ruptura, por ser a região mais fraca da pasta. Isso pode ser contornado pela adição de compostos para controlar a liberação da água disponível, permitindo que as reações mais lentas ocorram durante a cura e, também, que o Hidróxido de Cálcio e a Etringita, cristais de evolução mais rápida, tenham sua velocidade de reação diminuída.

A alcalinidade presente na pasta pode atacar alguns tipos de agregados, especialmente aqueles constituídos por compostos de Silício ou que possuam outros minerais associados, mas sejam morfologicamente mal constituídos, de acordo com Ferraris (1995). Esse problema, crítico em relação às fibras de vidro, pode ser reduzido pela adição de material pozolânico ou cinzas com alto teor de sílica ativa (METHA & MONTEIRO, 2001).

A Figura 23 mostra a formação dos cristais no processo de hidratação do cimento e a Figura 24 mostra a conformação esquemática desses cristais junto à zona de transição, com grande presença de C-S-A-H e C-H, principais agentes que causam a baixa aderência entre pasta e agregado.

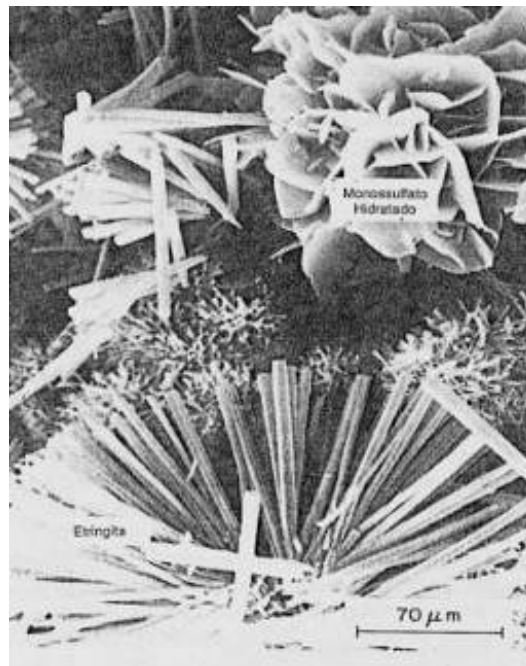


Figura 23– Micrografia eletrônica de varredura indicando a formação dos cristais na hidratação.
Adaptado de Metha & Monteiro (1994)

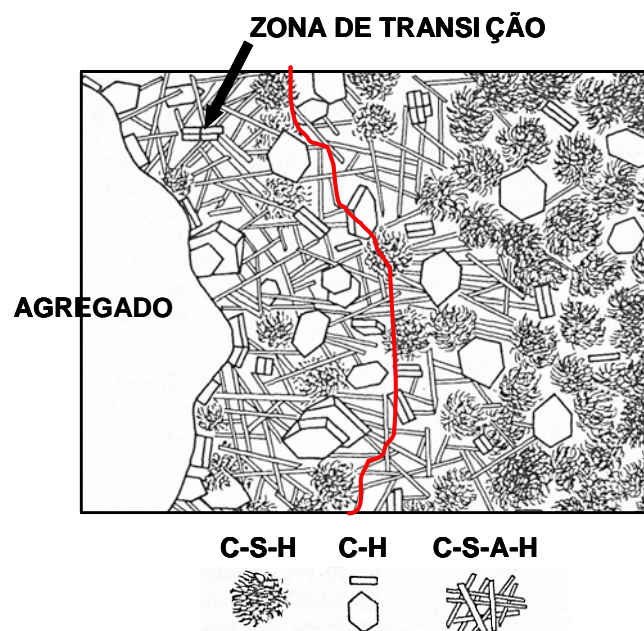


Figura 24 – Esquema de distribuição dos cristais hidratados junto à superfície do agregado.
Adaptado de Metha & Monteiro (1994)

A adição de sílica ativa foi estudada por Peruzzi (2002), visando minimizar o ataque dos álcalis, especialmente o C-H, às fibras de vidro tipo E. A sílica ativa promove uma absorção maior da água livre, além de preencher os interstícios entre os grãos de cimento

e as fibras, dispersas aleatoriamente na pasta. Como conseqüência, o C-H passa a reagir com a sílica, retardando o ataque às fibras, especialmente nas horas iniciais de cura, que é o período crítico durante o qual as fibras de vidro reagem em maior intensidade.

Foi visto que a hidratação gera sais incompatíveis com a estrutura molecular do vidro tipo **E**, já caracterizado anteriormente.

Algumas pesquisas têm sido realizadas no Brasil e no exterior visando contextualizar esses problema e encontrar soluções para minimizar ou eliminar a interferência dos álcalis sobre as fibras de vidro. Esse ataque ocorre nas primeiras idades, uma vez que posteriormente parcelas desses sais também se recombina.

Conforme demonstrado (id., 2002), a utilização de látex-estireno-butadieno como película de revestimento aos filamentos das fibras retarda de forma considerável o ataque dos álcalis nas primeiras horas (PURNELL, 2000, apud PERUZZI, 2002) a degradação das fibras de vidro em contato com a pasta cimentícia, deve-se principalmente à presença de CaOH_2 durante a hidratação, além da densificação da matriz na interface, reduzindo a flexibilidade das fibras.

A utilização do cimento CP – III, de escórias de alto-forno, também foi demonstrado, (id. 2002), como sendo o mais adequado para receber adição de fibras de vidro, por produzir a menor quantidade de Portlandita na sua hidratação.

Em geral, em todos os países que produzem elementos estruturais em concreto reforçado com fibra de vidro, é utilizado o vidro **AR** – Álcali-resistente. No Brasil, não existe mercado consumidor no setor da construção civil, uma vez que esse tipo de fibra chega a custar 3 vezes mais que as fibras de vidro tipo **E**, desestimulando sua aplicação pelo setor. Outro fator que inibe o uso desse produto é a falta de disseminação de informação técnica que assegure aos projetistas o desempenho que se espera, como ocorre com as fibras metálicas.

2.4.5 COMPÓSITOS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS E POLIMÉRICAS

O termo compósito pode se referir às inúmeras combinações de materiais que, ao serem processados, em conjunto, tornam-se uma nova matéria-prima. Analisando os aspectos físico-químicos e mecânicos, o concreto e as argamassas são materiais compósitos. Contudo, o termo se disseminou no meio científico e industrial para se referir aos diversos polímeros (ou plásticos) reforçados com fibras.

Neste texto, será utilizada a sigla **GFRP** – “*Glass fiber reinforced polymer*” - Polímero Reforçado com Fibra de Vidro – para denotar esse tipo de compósito em particular, enquanto será utilizada a sigla **GRC** – “*Glass fiber reinforced concrete*” - Concreto Reforçado com Fibra de Vidro, para denotar esse compósito da mesma forma que o anterior.

O diagrama da Figura 25 a seguir esquematiza as diferentes fases de caracterização dos materiais para fabricação dos elementos estruturais compósitos, em função da matriz.

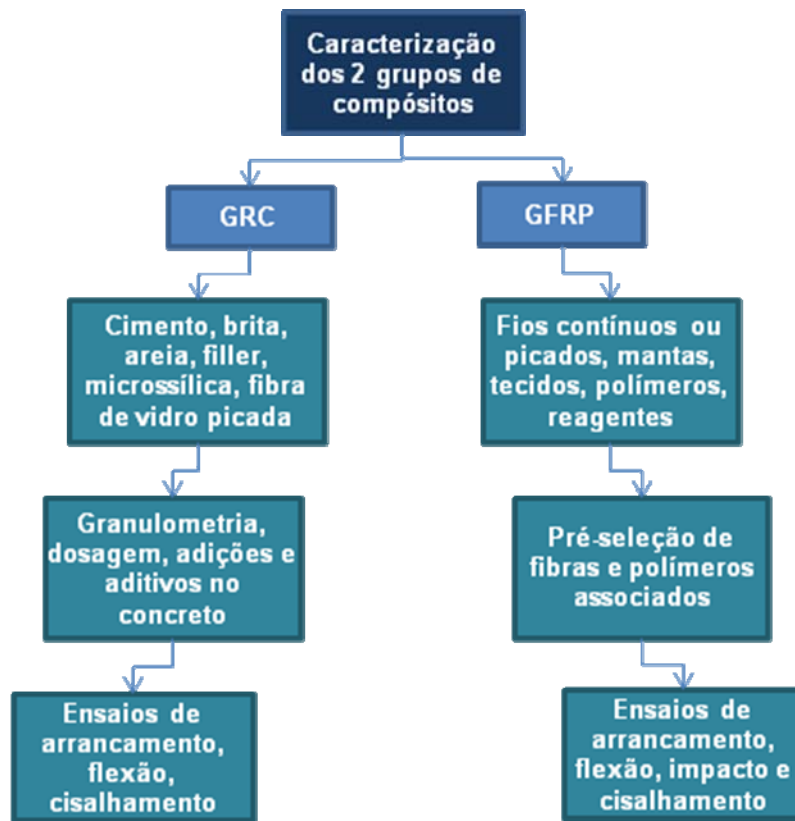


Figura 25 – Fluxograma de processo de caracterização dos compósitos

2.4.5.1 Compósitos em Matrizes Cimentícias

O principal problema a ser contornado quando se adiciona a fibra de vidro em um concreto é a reação que ocorre pelo ataque dos álcalis liberados durante o processo de hidratação da pasta cimentícia, nas fibras dispersas. Várias pesquisas abordaram essa questão e diversas soluções já foram encontradas.

Dentre algumas recomendações feitas pela FIB (1998), destacam-se, para efeito de melhorar as propriedades e a interação entre o concreto e as fibras de vidro, a adição

de microssílica, metacaulim e polímeros acrilatos. Tais adições contribuem para a diminuição da alcalinidade e protegem as fibras por encapsulamento, no decorrer das primeiras horas do processo de cura.

A literatura relata (ROSSIGNOLO, 2004; PERUZZI, 2002; FIB, 1998), que é fundamental o controle do fator água / cimento em concretos que utilizem fibras sintéticas como adição. Além disso, o uso de superplastificantes também é recomendado para permitir a fluidez necessária ao concreto e possibilitar melhor dispersão dessas fibras na massa.

A quantidade usual de fibras picadas adicionada ao concreto se situa em torno de 0,6 kg / m³, segundo os fabricantes.

A fibra utilizada para misturar ao concreto é vendida em envelopes com dosagem pré-determinada, como ocorre no Brasil com as argamassas prontas.

Alguns cuidados devem ser tomados ao se adicionar as fibras no concreto:

- Garantir a homogeneização dos agregados;
- Espalhar o conteúdo do pacote sobre o concreto, evitando a concentração num único ponto;
- Seguir as recomendações em relação ao fator água/cimento e em relação ao tempo de mistura;
- Utilizar, sempre que disponível, aditivos fluidificantes para melhorar a trabalhabilidade;
- Respeitar o tempo de mistura;
- Respeitar o tempo de adensamento, caso o concreto não seja auto-adensável.

A Tabela 19, a seguir, demonstra uma análise de ensaios de flexão, comparativos entre um concreto preparado com fibras de vidro **AR** e outro com fibras de vidro **E** aditivadas com polímero.

Tabela 19 – Dosagem de 2 tipos de GRC para ensaio de flexão comparado

Composição do concreto	Densidade (kg/dm ³)	AR - GRC		PGRC	
		% em peso	% em volume	% em peso	% em volume
Cimento	3,15	40,1	26,9	47,7	30,6
Areia	2,65	40,1	31,9	23,7	18,3
Água	1,00	14,8	31,5	14,2	24,3
Polímero *	1,13			8,3	15,0
Vidro AR	2,78	5,0	3,8		
Vidro E	2,55			6,9	5,0
Ar	-		5,9		7,1

* O polímero possui 51% de sólidos dispersos em meio aquoso.

Adaptado de FIB (1998)

A tabela anterior apresenta variações de dosagem do cimento, da areia e da água, além da adição do polímero no caso do **PGRC**. Essas alterações não mantiveram o volume nem o peso constantes nos corpos de prova ensaiados. Portanto, não servem para comparar os dados obtidos entre eles.

Por outro lado, é possível ter uma estimativa de comportamento para idade jovem e avançada, através de ensaio acelerado de envelhecimento, como consta em FIP (1998), para os dois tipos de concretos mostrados anteriormente, através da Tabela 19.

O resultado mais expressivo é a redução substancial da resistência ao impacto, após um ano. Em ambos os ensaios a resistência aos 28 dias era 400% maior que a resistência após um ano.

Outro resultado expressivo foi a redução da taxa de deformação para idades avançadas, representando assim uma perda da ductilidade do material tornando-o mais frágil.

A consequência direta desse fato é a diminuição da previsibilidade de falhas no elemento, com tendência de ocorrer de forma mais abrupta.

Tabela 20 – Propriedades mecânicas de 2 compósitos em GRC

Propriedade	Unidade	AR - GRC		PGRC	
		28 dias	1 ano	28 dias	1 ano
Res. Compressão	MPa	65+/-15	75	55	60
Flexão (ELU)	MPa	26+/-5	13+/-2	30+/-3	25./-2
Flexão (LP)	MPa	9+/-1,5	10+/-2	13+/-2	17+/-2
Def. Flexão (Ruptura)	‰	10+/-2	0,7+/-0,1	6+/-1,5	3,5+/-0,5
Tração (ELU)	MPa	9,5+/-1,5	5,5+/-0,5	13+/-1	11+/-1
Tração (LP)	MPa	6+/-1	5,5+/-0,5	6+/-1	8+/-1
Def. tração (Ruptura)	‰	10+/-2	0,4+/-0,1	5+/-1	2+/-0,3
Módulo (E)	GPa	15+/-5	25+/-3	10+/-1	13+/-1
Cisalhamento					
No plano	MPa	9,5+/-1,5	5,5+/-0,5	11+/-1	10+/-1
Interlaminar	MPa	4+/-1	4+/-1	4+/-1	4+/-1
Punção	MPa	32+/-12	40	>30	-
Res. Impacto (Charpy)	MPa	17+/-7	4	6+/-2	1,5+/-0,3
Fator de fluência (após 1 ano)	kJ/m ²	2	1,5	1,7	-
Densidade	kg/dm ³	2+/-0,1	2+/-0,1	1,85	1,90

Adaptado de FIB (1998)

O **GRC**, com fibras de vidro tipo **AR**, tinha uma deformação 1/10 menor após um ano que a deformação na flexão aos 28 dias, enquanto o **GRC** com fibras de vidro tipo **E** reduziu para 1/2 da deformação na flexão aos 28 dias. Outro aspecto importante é a resistência à flexão entre os dois modelos, onde o modelo com fibras **AR** apresentou uma

resistência de 26 MPa aos 28 dias, caindo para 13 MPa no ensaio acelerado para 1 ano. Já o modelo com Fibras E com adição de polímero, apresentou uma resistência de 30 MPa aos 28 dias, caindo para 25 MPa posteriormente. Ambos os modelos, provavelmente pelo aumento da resistência do concreto, tiveram suas resistências à compressão aumentadas no ensaio acelerado para um ano.

Em relação à resistência à fadiga para painéis de **GRC**, segundo a FIB (1998), ensaios de carregamento cíclicos de baixa frequência com 10^6 ciclos, não houve perigo de falha ou ruína por fadiga do material. Para frequências mais altas e carregamentos dinâmicos são necessários maiores estudos (id. 1998).

O **GRC**, como é denominado usualmente o concreto reforçado com fibras, tem seu maior desenvolvimento tecnológico no Reino Unido. A grande vantagem do uso das fibras ocorre pelo aumento da capacidade do concreto resistir à tração e ao impacto, aumentando a capacidade em absorver e dissipar a energia, bem como a possibilidade de uso da estrutura no estado pós-fissurado, conforme Savastano Jr. (1992) e Gray e Johnston (1992, apud SAVASTANO JR., 1992), é descrito que se mantendo o percentual fixo de fibras e melhorando a seleção dos agregados e o fator água / cimento, atinge-se um aumento de até 20% na resistência da matriz.

A durabilidade, para o estado limite de serviço - **ELS** pode ser o maior ganho, considerando-se que a vida útil média de uma construção seja de 50 anos, ao se computar a economia com os custos de manutenção e recuperação estrutural, uma vez que a probabilidade de deterioração do revestimento será menor. Porém, são necessárias avaliações de médio e longo prazo para analisar, por exemplo, os efeitos da fluência do concreto e como ela afetará as fibras.

Sabe-se, pela físico-química, que as forças de interação interatômicas são eletromagnéticas. A ação dessas nos corpos ocorre por repulsão, forças Coulombianas⁴ ou atração, forças de Van der Waals (outras forças como dipolos induzidos, também ocorrem como variações posteriores às duas primeiras).

Segundo Metha & Monteiro (1994), na região da zona de transição as forças de Van der Waals são mais fracas. Com isso, levando em conta o efeito da fluência, que age como se

⁴ Charles Augustin de Coulomb – Físico francês do século XVII que estabeleceu a equação de equilíbrio eletromagnético, onde 2 partículas se atraem ou se repelem proporcionalmente às suas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas;

fosse um (ou vários) sistema mola – amortecedor existe um limite onde o material perde a sua capacidade de coesão.

Enquanto o material está ainda sob o efeito dos fenômenos reológicos, a fluência se caracteriza como viscosa, isto é, pode ocorrer de forma tixotrópica⁵ ou reopética⁶, conforme sua intensidade e a distância entre as moléculas que estão interagindo. Nesse sentido, o concreto em estado fresco apresenta justamente um comportamento reopético, ou seja, aumento da viscosidade com o aumento do tempo de cura.

Em materiais dúcteis as forças de atração intermoleculares são suficientemente fortes para garantir a adesão e coesão macromolecular. De outro lado, para materiais frágeis, tais interações possuem menor capacidade de conter o afastamento sem que ocorra um rearranjo molecular na estrutura atômica, daí onde ocorrem as fissuras, inicialmente microscópicas.

Quando uma viga está submetida a carregamentos, em nível macroscópico, os esforços tracionam e comprimem o concreto e o aço. Em nível atômico, o que está ocorrendo é a atuação interatômica entre os átomos, que estão se atraindo ou se repelindo, conforme a energia e as cargas eletromagnéticas de cada átomo em contato, com sua vizinhança interatômica. Esse efeito deve ser previsto em relação às fibras, de maneira geral, uma vez que essa perda de coesão leva à perda da capacidade aderente do entorno.

Ainda que existam outras forças que possam atuar (como dentes de cisalhamento entre agregados, travando o escorregamento), as ações, ao longo do tempo poderão causar o escorregamento lento das fibras em relação à posição original. Dessa forma, ensaios acelerados de fluência são importantes para prever estas ocorrências, especialmente no concreto que, considerando a ciência dos materiais, constitui-se de um material compósito.

Uma vantagem indiscutível das fibras sintéticas em relação às de aço, é que as últimas podem ser afetadas por corrosão e efeitos eletrolíticos nas zonas de amarração, se ocorrerem microfissuras, essencialmente nas fibras que estiverem muito próximas às faces dos elementos. Outra desvantagem das fibras metálicas é o fato de haverem partes dessas fibras junto às faces de elementos estruturais, corroborando para que fenômenos de degradação por agentes ambientais possam ocorrer.

⁵ Tixotrópico – Comportamento que consiste no aumento da fluidez com o aumento do tempo de cisalhamento da estrutura molecular de um fluido qualquer, até que a viscosidade atinja um novo patamar estável;

⁶ Reopético – Comportamento inverso ao comportamento tixotrópico, isto é, aumento da viscosidade com o aumento do tempo de cisalhamento.

Apesar das mesmas atuarem como “grampos” impedindo a propagação da trinca, através do denominado “efeito de pino”, podem perder a resistência pela corrosão do aço e romperem quando sua seção transversal atingir um diâmetro mínimo crítico, conforme esquematiza a Figura 26.

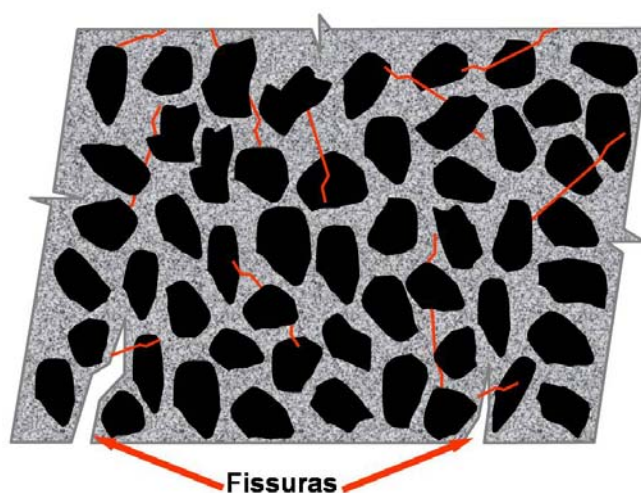


Figura 26 - Esquema de ataque às fibras de aço em regiões tracionadas de elementos estruturais e nas faces dos elementos

Conforme relatado por Nordström (2000), sobre o comportamento e durabilidade das fibras metálicas em concretos projetados para aplicação em encostas e túneis, essas sofrem corrosão em razão da menor espessura dos elementos de concreto e pela movimentação causada por variações térmicas de grandes amplitudes ocasionando muitas fissuras. Nessas obras a dificuldade de controlar a abertura de fissuras é muito maior que em construções habitacionais, devido o tráfego de veículos.

Tanto os sais e os cloretos como a carbonatação, decorrente dos gases emitidos, podem agir causando a corrosão das fibras. Isso ocorre mesmo com concretos que tenham qualidade superior aos concretos usuais, como adição de sílica ativa, cinzas volantes, agentes de cura e plastificantes. É afirmado ainda (id. 2000), que são necessárias outras pesquisas para investigar o percentual de degradação ao longo do tempo em obras de infraestrutura, uma vez que essas estão mais sujeitas às agressões ambientais e aos sais, nos países de clima temperado.

Em estruturas de rodovias as fissuras admissíveis não devem ser maiores que 0,1mm, pois causam sérios danos às fibras e sua rápida corrosão. Em ambientes normais fissuras de até 0,2mm causam corrosão moderada das fibras, segundo resultados obtidos em ensaios acelerados (id. 2000).

Assim como demais casos já descritos aqui, são necessárias pesquisas que avaliem a degradação em função do tempo. Outro resultado importante é a contribuição para a maior degradação em fibras de maior extensão, pois acentuam o efeito de “pilha”, isto é, formação de Cátodo e Anodo. Esse efeito foi notado pela comparação dos resultados entre fibras com 30mm e fibras com 40mm de extensão.

No Reino Unido e Austrália a tecnologia de fabricação de elementos em GRC está muito evoluída. Por outro lado, Japão, Estados Unidos e Canadá avançam na direção do uso de chapas de reforço em diversos tipos de fibras, não se restringindo às fibras de vidro, mas principalmente as constituídas de tecidos unidirecionais de fibras de carbono.

2.4.5.2 Compósitos em Matrizes Poliméricas

Existem inúmeras vantagens na utilização do **GFRP** em construção civil. As principais vantagens se referem aos processos de execução, tempo, durabilidade e resistência desse material, quando comparado aos sistemas construtivos usuais de concreto armado, protendido ou pré-moldado. Uma variedade de polímeros se adequam aos mais diversos usos desde aplicações de elevado teor de umidade ou temperatura, até ambientes quimicamente agressivos.

As desvantagens também existem, sendo as principais o investimento inicial em material e o custo da mão de obra, mais especializada. Quanto à mão de obra é questionável o seu custo mais elevado, se a qualidade é incomparavelmente maior que a mão de obra da construção civil.

Estruturalmente, os critérios de análise dos reforços em **GFRP** nas estruturas de concreto podem ser feitos pelo critério das tensões máximas ou das deformações máximas. No segundo caso, é importante considerar a geometria dos reforços, visando aumentar a rigidez. Contudo, o comportamento na ruína sob condições extremas, nos compósitos (como nos metais), deve ser conhecido ao se produzir elementos de reforço estrutural, em **GFRP**, **AFRP** ou **CFRP**.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas para verificar o comportamento de polímeros reforçados com fibras, no âmbito dos carregamentos cíclicos.

As condições de carregamento de pontes estão sujeitas a esse tipo de ações. Por essa razão, se faz necessário apresentar algumas informações sobre o comportamento dos compósitos nessas situações.

Broughton & Lodeiro (2000) realizaram diversos ensaios com **GFRP** e **CFRP** para estimar os ciclos de vida até a ruína no material, segundo as normas ISO 527-4 e ISO 572-5. A partir desses ensaios, traçaram curvas **S-N** (*Stress versus Number of cycles*) normalizadas pela tensão limite de ruptura. Foram realizados 5 ensaios duplicados para cada grupo de laminado.

Durante o carregamento cíclico, foram conduzidos ensaios a 80%, 70%, 55%, 40% e 25% do **ELU** do material, respectivamente. Nessas condições os ciclos foram distribuídos entre 10^1 e 10^7 vezes. As falhas ocorreram quando os ciclos se repetiram por 10^7 vezes, com carregamento de 25% do **ELU**, nos corpos de prova.

Os ensaios foram conduzidos à temperatura de 23 °C e umidade relativa de 50%.

A Figura 27 mostra dois corpos de prova, cada um com a geometria prescrita por cada norma, com a ruptura do material por fadiga. A Tabela 21, na seqüência, apresenta os resultados para os dois exemplos.



Figura 27 - Corpos de prova elaborados segundo as normas ISO 527-4 e ISO 527-5
Fonte: Broughton & Lodeiro (2000)

Tabela 21 - Valores obtidos em ensaio de tração monotônico como parâmetro da tensão no ELU

Material - Vidro tipo E – 913 laminação em $[0^\circ, 90^\circ]_{45}$	Módulo de Tração (GPa)	Coefficiente de Poisson	Resistência à Tração (MPa)
CP sem estreitamento	28.0 ± 1.3	0.154 ± 0.008	545 ± 8
CP com estreitamento	27.2 ± 1.0	0.152 ± 0.001	502 ± 19

Fonte: Broughton e Lodeiro (2000)

Conforme se nota pela figura acima, a amostra superior, sem diminuição da seção transversal, iniciou o processo de falha pela borda inferior, tendo propagado as falhas interlaminares seguindo uma forma elíptica. Isso significa que ao centro houve maior dissipação de energia e transferência dos esforços de tração. Por outro lado, a amostra inferior, com diminuição da seção transversal, teve uma ruptura mais frágil, onde em alguns

pontos houve, provavelmente, perda de aderência entre as lâminas ou o efeito de “*pull out*”, isto é, perda de aderência entre a fibra e a matriz polimérica.

A Figura 29 apresenta as curvas S-N, normalizadas, traçadas para os corpos de prova constantes da Tabela 23, para o tipo de vidro utilizado (Tecido pré-impregnado 913 – unidirecional), o teor de vidro, **W**, foi de 72,16 % (+/- 0,48 %), enquanto a densidade do compósito, ρ , foi 1957 kg/m³, (*/- 62 kg/m³).

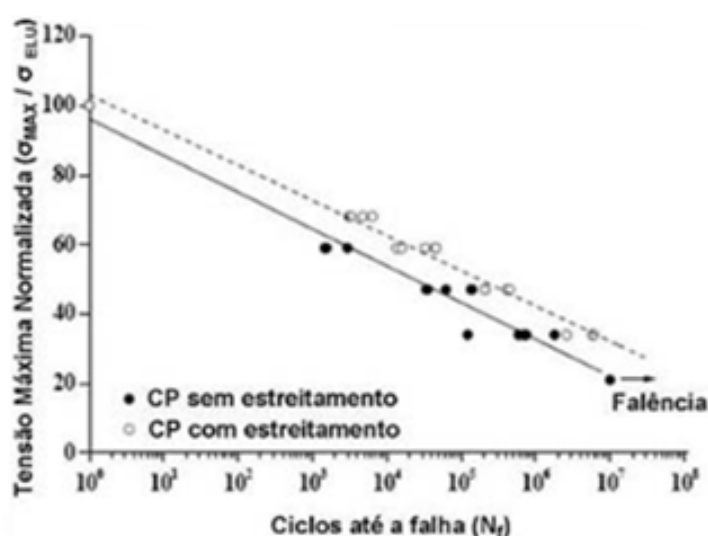


Figura 28 - Curvas S-N, normalizadas para carregamento cíclico até a fadiga
Fonte: Broughton & Lodeiro (2000)

O comportamento à fadiga dos compósitos também foi estudado por Bathias (2006), tendo sido verificado uma pequena diferença entre as curvas S-N apresentadas pelas duas pesquisas analisadas.

Segundo Bathias (2006), outra característica que envolve a análise da fadiga em compósitos é a dificuldade de se diferenciar a fadiga de baixo ciclo e a fadiga de alto ciclo. Isso ocorre por não haver uma mudança acentuada no comportamento do material, pois o processo de início e continuação da propagação de trincas ocorre de forma completamente diversa do que ocorre com metais. De fato, os compósitos mantêm um comportamento similar entre os dois níveis de fadiga, ao contrário dos metais.

Os estudos sobre a fadiga são importantes, pois a energia de dissipação dos compósitos atua numa seção transversal notavelmente menor que nas estruturas de concreto, considerando a energia dos esforços de tração e de compressão, respectivamente, para cada material. Dessa forma, é necessário se considerar, também, esses fatores ao se projetar uma estrutura em compósito.

No concreto, a dosagem de cimento, o fator água/cimento, o adensamento e a cura são os principais requisitos para que sejam mantidas suas propriedades mecânicas nas primeiras idades e posteriormente, do decorrer da vida útil.

No **GFRP** são requisitos: o teor de fibras em relação ao peso total, a orientação da aplicação das fibras, o polímero utilizado na matriz e o sistema de cura utilizado.

Ainda influenciam de forma considerável, as impurezas superficiais depositadas entre as camadas ou na superfície que receberá o reforço e a umidade ambiental e do elemento que receberá o reforço. Por outro lado, é possível, eliminando esses dois últimos fatores, poder corrigir e aumentar a espessura ou comprimento de um determinado reforço, de forma que a peça continue trabalhando monoliticamente, ao contrário das peças de concreto ou cerâmica.

Sabe-se que os compósitos de **GFRP** e outras fibras são anisotrópicos. Para melhorar suas propriedades, é possível orientar as fibras no sentido das solicitações às quais uma estrutura estará submetida.

Para que se obtenha o máximo de desempenho estrutural dos compósitos, os projetistas devem conhecer profundamente os tipos de fibras, as configurações, conforme já foi mostrado, e as matrizes poliméricas adequadas para cada uso específico.

É de extrema importância a especificação do direcionamento das fibras em cada camada de laminado, pois alterações no alinhamento das fibras podem transformar um laminado em ortotrópico, isotrópico transversal ou em anisotrópico. Além disso, essa ortotropia só é válida para geometrias simples em que seja possível determinar claramente os eixos de ação das forças.

No caso de pilares retangulares ou circulares e vigas retangulares ou vigas que recebam reforços na face inferior, a ortotropia é válida. Porém, em peças de geometria complexas esse conceito deixa de ser exato, devendo adotar-se modelos matemáticos mais complexos, modelos reológicos de comportamento visco-elástico não lineares ou, segundo Vanalli (2004), modelos visco-plásticos.

A Figura 29 apresenta algumas curvas de Tensão-Deformação características de diversas fibras sintéticas comparadas ao aço para reforço estrutural e para protensão. As siglas no gráfico correspondem: HS – Alta resistência, HM – Alto módulo e IM – Módulo intermediário.

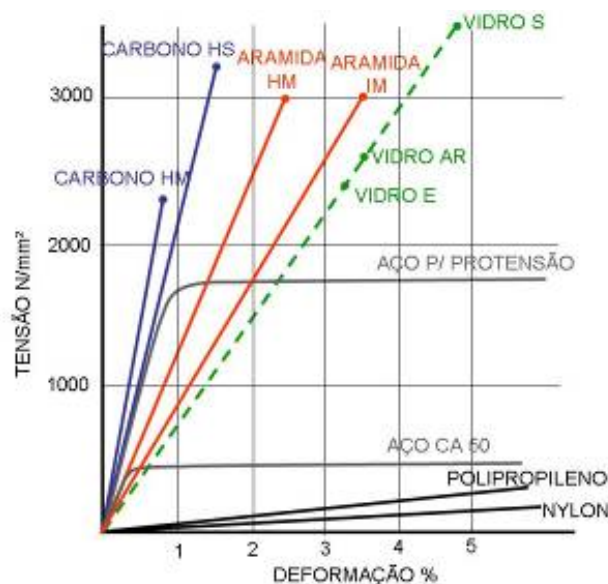


Figura 29- Curvas características de tensão versus deformação
Fonte: ACI (1996)

Como método de estruturação de procedimentos, ao iniciar um projeto visando utilizar compósitos com finalidade estrutural, o profissional deve estar atento não só ao cálculo, mas também aos métodos de aplicação, aos tempos determinísticos, aos prazos de execução e à ordem de execução dos procedimentos.

É interessante manter uma memória de procedimentos, desde o início do projeto, com intuito de prover a equipe de trabalho de todos os passos necessários para a execução dos serviços, sejam eles internos ou executados por um fabricante de perfis.

Já foi discutido anteriormente que alguns procedimentos são imprescindíveis e devem ser acompanhados pelo responsável. Para que o responsável tenha ferramentas para orientar e corrigir eventuais falhas do processo, caso não seja o mesmo profissional de projeto, é fundamental que ele tenha um roteiro em mãos.

A seguir, a Tabela 22, a seguir, exemplifica um roteiro básico, normalmente denominado em construção naval por “SSR” (*step by step routine*). A partir desse modelo, o procedimento pode ser complementado com as atividades que lhes sejam relevantes.

A tabela se divide em duas partes: a superior com as atividades gerais e a inferior específica para o processo de laminação ou fixação do reforço.

O que se deve ater, pelo modelo, é a forma pela qual os diversos tipos de fibras são codificados e são indicados aos técnicos que irão utilizar o material.

Caso o processo seja por meio de barras produzidas fora da obra e fixadas por adesivo (perfis extrudados), devem ser indicados os códigos fornecidos pelos respectivos fabricantes.

Tabela 22 - Rotina de Serviço Passo a Passo para execução de laminação

Obra:		Local:		Data início:			
Resp.:			Encarregado:			Nº Func.:	
Tel.:		Resumo Atividade:					
At.	Descrição da Atividade	Hora in.	Hora Térm.	° C	UR %		
1	Limpeza preliminar do local a ser reforçado						
2	Lavagem com ácido						
3	Lavagem com solvente / detergente						
4	Secagem						
...		
n	n-ésima atividade						
Laminação manual							
Camada	Tipo de reforço	Qtde.	Data				
L1	M 225	1	1/3/07	8:00	11:00	19	55
L2	T 800	1	1/3/07	11:12	14:25	26	53
L3	M225	1	1/3/07	14:45	16:10	23	51
L4	UD 0° 330	1	1/3/07	16:30	17:50	20	52
L5	UD 90° 330	1	2/3/07	8:15	10:45	18	56
L6	UD +45° 180	1	2/3/07	11:00	13:50	27	52
L8	M 225	1	2/3/07	14:00	16:20	25	52
...
Ln	n-ésima camada						

Fonte: Ortenzi (1990)

A codificação mnemônica básica de produção é apresentada na Tabela 23, em seguida. Essa codificação, assim como outros procedimentos envolvendo o projeto de materiais compósitos, não é uma padronização, representando apenas um guia, segundo práticas operacionais de outros setores produtivos que utilizam fibras diversas, para haver coerência e unicidade nas informações prestadas pela equipe de projeto à equipe de obra.

Tabela 23 - Codificação para seqüência de laminação com principais fibras e gramaturas

Tipos de Fibras	Materiais	Código Mnemônico	Gramaturas padrão (g/m ²)
Manta	Vidro	M	225, 300, 450
Tecido bidirecional	Vidro	T	180, 220, 280, 360, 600, 800
Tecido bidirecional	Carbono	C	60, 80, 100, 160 (outros)
Tecido bidirecional	Aramida	A	100, 120, 160, 240, 320
Tecido unidirecional	Vidro	UD-V	120, 160, 220, 330, 400
Tecido unidirecional	Carbono	UD-C	60, 80, 100, (outros)
Tecido unidirecional	Aramida	UD-A	120, 160, 220, 320 (outros)
Tecido híbrido bidirecional	Vidro-Carbono	TH-VC	Encomenda / ou importado
Tecido híbrido bidirecional	Vidro-Aramida	TH-VA	idem
Tecido híbrido unidirecional	Vidro-Carbono	UDH-VC	idem
Tecido híbrido unidirecional	Vidro - Aramida	UDH-VA	idem

Fonte: Ortenzi (1990)

A Tabela 25 serve para indicar, numa linha, o código da fibra, a gramatura e o teor de fibras, por peso total, com dois algarismos e sem o sinal de percentual, separados por hífen, como no exemplo a seguir:

UD-A-160-50 = Tecido unidirecional de fibra aramida com 160 g/m² e teor de fibra de 50% em relação ao peso total do laminado (resina + fibra).

Os compósitos de **GFRP** quando processados por laminação, são constituídos por camadas (lâminas) de fibras impregnadas com polímeros (matriz) sobrepostas umas às outras, diversamente dos sistemas de produção por pultrusão, enrolamento filamentar ou centrifugação, todos esses automatizados. São fundamentais para a resistência final do elemento de reforço, da peça ou do produto final seis requisitos principais:

■ A orientação segundo o plano de aplicação

Para compreender a atuação dos compósitos em **GFRP** pode ser feita analogia com uma barra de aço que está reforçando uma estrutura de concreto no sentido transversal á biela de compressão de uma viga, por exemplo. Essa barra está atuando por tração, acompanhada de flexão e possivelmente de outros efeitos de segunda ordem.

Quando o concreto atingir seu limite último de tração irá gerar fissuras que serão suportadas pela barra trabalhando, principalmente, sob tração. Contudo, ao se atingir patamares de cisalhamento por compressão do concreto, essa barra também estará sujeita a esforços transversais decorrentes do escorregamento do concreto, gerando o conhecido "efeito de pino de cisalhamento". Através de ensaios nota-se que esse limite está muito próximo da ruptura da barra por cisalhamento e não mais por tração como inicialmente.

Analogamente, as fibras quando orientadas na matriz polimérica são dispostas de forma a cumprir o mesmo papel.

Com a diferença que sua resistência transversal é bem menor que a longitudinal. Sendo assim, ao se dimensionar uma estrutura o projetista deve conhecer os tipos de fibra a melhor orientação a dar para cada uma, tirar proveito da geometria do elemento para redirecionar as tensões a favor da orientação das fibras, sempre buscando orientá-las no sentido mais longitudinal possível. atua em relação ao reforço estrutural.

Após a análise das ações atuantes, se for constatado que os efeitos de segunda ordem naquela região podem ser negligenciados, é possível a utilização de tecidos unidirecionais. Tais tecidos aumentam significativamente a resistência à flexão na

região tracionada, além de aumentar também o teor de fibra de vidro em relação ao peso ou volume total. Dependendo da quantidade de camadas essa configuração pode ser ampliada para as direções: 0° , 90° , $+45^\circ$ e -45° para os tecidos.

Quando se configura um laminado com essa orientação, alternado com as camadas de manta, os modelos matemáticos de cálculo atuais consideram a estrutura como quase-isotrópica devida à orientação das fibras, as quais cobrem os principais ângulos teóricos de aplicação de carregamento ou solicitações na estrutura. A Figura 30 mostra o esquema de sobreposição das camadas de manta e tecido bidirecional, com defasagem de ângulo de 90° entre os tecidos.

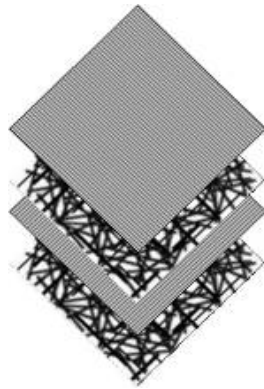


Figura 30 – Esquema de aplicação de múltiplas camadas de fibra de vidro

A Figura 31 apresenta um diagrama sobre o comportamento do módulo de elasticidade e das tensões, como função da orientação (em graus) do laminado e como função do tipo de tecido utilizado como reforço.

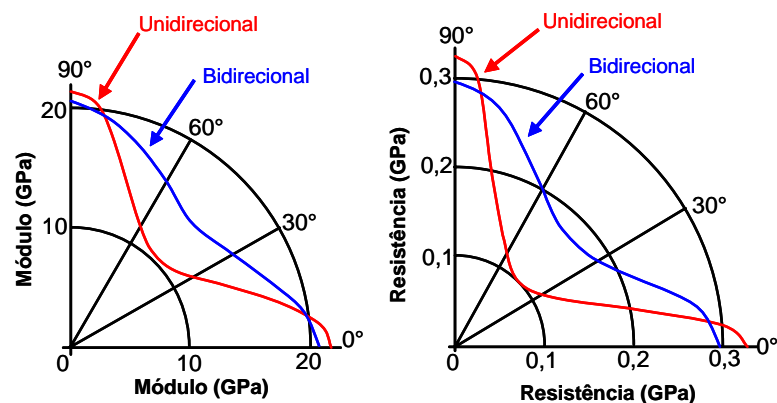


Figura 31 – Módulo e Resistência atingida, segundo o tipo de tecido e ângulo da camada
Adaptado de Piggott (2002)

■ O tipo de fibra utilizado

As fibras podem ser aplicadas como mantas, tecidos bidirecionais, unidirecionais, triaxiais (tecidos tramados em três direções – 0° , $+60^\circ$ e -60°) ou fios picados. A seleção da gramatura das mantas e tecidos é feita mediante a complexidade da região a ser reforçada. Áreas curvas e com entalhes exigem gramaturas menores para permitir a conformação da fibra sobre toda a superfície. Contornos, rebaixos e ressaltos. No caso de fios picados, projetados, a espessura é obtida pela superposição de camadas após a consolidação da camada anterior. Além das fibras de vidro, existem as fibras aramida e de carbono. Dependendo da aplicação e da severidade das ações pode ser mais viável a aplicação dessas fibras.

Atualmente são fabricados tecidos híbridos, os quais aproveitam ao máximo as propriedades mecânicas e físicas das fibras de vidro, aramida e de carbono. No ANEXO I é possível ver exemplos de quase todos os tipos de fibras descritos neste trabalho.

■ O Método de produção do elemento ou do reforço

Nos compósitos de fibras em matriz polimérica existem quatro processos distintos de produção. O primeiro é a laminação, o segundo a pultrusão, o terceiro é o enrolamento filamental e o quarto a centrifugação. Desses processos, a laminação ainda apresenta divisão de procedimentos de execução.

Esses procedimentos dizem respeito às técnicas de produção, que se sub-divide em vários procedimentos produtivos. A laminação manual e por “*spray-up*” se constituem de processos diretos, isto é, eles podem ser utilizados para produzir um elemento estrutural único, uma parte desse elemento ou todo conjunto estrutural num único processo contínuo.

A Tabela 24 apresenta uma comparação entre as propriedades mecânicas típicas para os principais, e mais utilizados, sistemas de laminação em **GFRP**. Nota-se a grande variação da resistência e do módulo. Isso está diretamente relacionado ao percentual de vidro no peso total do laminado.

Cada sistema possui uma maior ou menor folga para ajuste, dentro de seus limites mínimos e máximos. Interfere nessas quantidades o tipo de fibra utilizado, isto é, se é fio contínuo, fio picado, manta ou tecido e os processos de execução, como será visto nos capítulos seguintes.

Tabela 24 – Propriedades mecânicas de laminados em GFRP

Tipo de Reforço	Conteúdo de vidro (%por peso)	Peso específico (g / cm ³)	Resistência à tração (MN / m ²)	Módulo na tração (GN / m ²)
<i>Roving</i> - pultrusão ou enrolamento contínuo	50 – 80	1,6 – 2,0	400 – 1250	20 – 50
Laminação manual Com Manta	25 – 45	1,4 – 1,6	60 – 180	6 – 11
Laminação com pre-preg em molde único	25 – 50	1,4 – 1,6	60 – 200	6 – 12
Laminação manual com tecido	45 – 62	1,5 – 1,8	200 – 350	12 – 24
Laminação a pistola (manta) e tecido (manual)	30 – 55	1,4 – 1,7	90 – 290	9 – 17
Moldagem por SMC	20 - 25	1,75 – 1,95	60 - 100	9 – 13

Fonte: Hollaway (1978)

■ O transpasse entre as lâminas

O transpasse entre as lâminas, ou camadas, serve para criar o monolitismo e para dar continuidade na transferência dos esforços, quando se necessita emendar uma mesma camada (comum na laminação manual e por projeção).

De forma geral, os transpasses mínimos recomendados em ABS (1993) são de 50 mm numa mesma camada, devendo qualquer emenda de camadas subseqüentes estarem defasadas no mínimo de 100 mm entre si, para garantir que as tensões não caminhem pelas junções.

Não se tem notícia desses procedimentos específicos para a construção civil, no que se refere às aplicações mistas, manual e projetada. Isso é fundamental para garantir a unicidade de cada camada quando aplicadas em regiões com dimensões superiores a 1,20 m x 1,20 m.

Essas medidas são referentes à largura máxima dos tecidos e mantas produzidos, sendo necessária uma emenda para recobrir toda área, em um ou em outro sentido.

A Figura 32, em seguida representa, esquematicamente, os transpasses entre 2 camadas de fibras.

Esse detalhamento deve ser feito no projeto da peça ou reforço, para que seja garantida a ancoragem entre cada camada. As camadas, de fios picados, depositadas por projeção não apresentarão esse transpasse, em substituição às mantas. A espessura t equivale à espessura das camadas depositadas medida fora das regiões onde estão os transpasses.

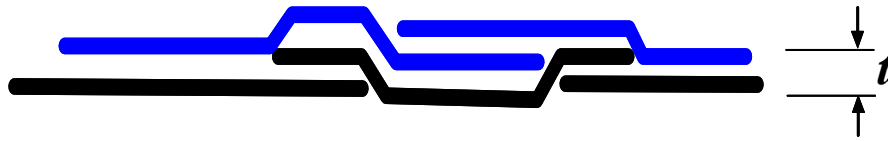


Figura 32 - Diagrama de transpasse entre 2 camadas de fibras com qualquer tipo de fibra, desde que aplicada manualmente ou por projeção

■ Consolidação total da camada, com retirada de bolhas de ar

É o processo que necessita ser realizado para eliminação das bolhas e aderência do laminado na superfície inferior.

As ferramentas para isso são os roletes e os ajudantes de laminação devem imediatamente iniciar a roletagem, logo após a deposição da camada de fibra e a impregnação da resina pelo laminador. Esse procedimento só é eliminado nos processos mecânicos como a pultrusão e os outros que serão vistos adiante.

No processo manual e por projeção, a roletagem é um passo importante e indispensável que requer verificação pelo técnico responsável. Peças com curvas acentuadas, quinas e reentrâncias necessitam maior atenção, pois a maleabilidade de algumas mantas e tecidos não é suficiente para contorná-los, causando o desprendimento prematuro do laminado antes da cura.

A Figura 33 mostra esse processo, onde é possível notar a diferença entre a parte consolidada e a não consolidada de fibra de vidro.

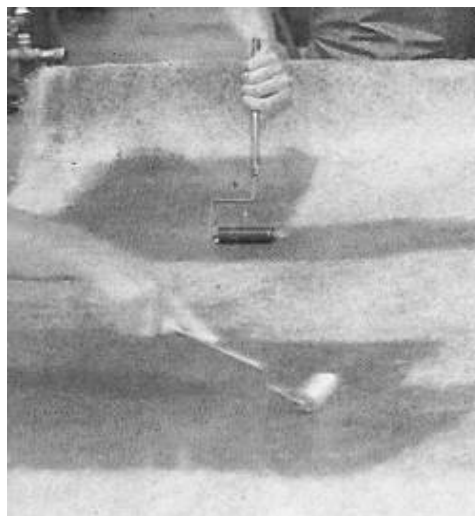


Figura 33 – Processo de Roletagem para consolidar camada de fibra
Fonte: Owens Corning (1996)

■ Método de cura

A forma como o **GFRP** é curado interfere na resistência final do componente ou reforço. Já foi descrito que os processos de cura podem ser a frio ou a quente. Nos processos de cura a frio, os usuais para aplicações diretas de reforços em estruturas, é pouco provável que seja possível realizar pós-cura, com aquecimento da superfície laminada até 60 °C a 80 °C.

Algumas alternativas de baixo custo, que permitem melhorar a cura final do reforço é a utilização de lâmpadas de raio infravermelho sobre a superfície. Com isso, ocorrerá a evaporação do estireno residual não polimerizado durante a exotermia. Em reforços de peças de concreto e alvenaria, deve ser analisada, experimentalmente, a possibilidade de aumentar a exotermia na cura, uma vez que são elementos indeformáveis e o grande volume dos elementos tende a dissipar a energia térmica, causando rápido reequilíbrio entre a temperatura do reforço e do elemento.

2.4.5.2.1 Características Construtivas dos GFRP

Os elementos ou reforços constituídos por **GFRP**, podem ser considerados, geometricamente como lineares ou bi-dimensionais. Esse aspecto é importante conhecer para se tirar proveito dos materiais constituintes no momento de se idealizar um reforço ou criar um elemento estrutural.

No caso de vigas, pilares e perfis, são elementos lineares. Já painéis, pisos e coberturas são bi-dimensionais.

No primeiro caso é mais conveniente dimensionar os elementos valendo-se de materiais lineares, isto é, os “*rovings*”, enquanto no segundo caso é mais prático valar-se de materiais bi-dimensionais, no caso as mantas e os tecidos. Porém, muitas vezes isso não é possível de se realizar.

Esses fatores são importantes, pois no momento do cálculo estrutural será necessário ter-se em mão a seção transversal da peça ou elemento de reforço. Para tanto se torna necessário calcular a área superficial e, posteriormente a seção transversal de um elemento qualquer, conforme descreve Quinn (2002).

Para isso, o projetista deve ter conhecimento da densidade de todos os componentes envolvidos na produção do elemento ou peça.

Essas informações são suficientes para obter-se as seções transversais de elementos ou peças que se pretenda produzir ou laminar. Em geral, tais dados são obtidos junto aos fornecedores dos materiais, não sendo dificuldade consegui-los.

A Tabela 25, a seguir apresenta alguns materiais constituintes e densidades correspondentes.

Tabela 25 – Densidade dos materiais constituintes dos compósitos

DENSIDADE DOS CONSTITUINTES	
MATERIAL	DENSIDADE (g / cm³)
Roving – Tecido - Manta	2,55
Resina poliéster	1,14
Resina Vinil-éster	1,22
Resina epoxi	1,18
Monômero de Estireno	0,91
MEKP (catalisador)	1,10
Acelerador de Cobalto	1,0
Retardantes de fogo	1,7 a 2,8

Fonte: Quinn (2002)

Com esses dados e o tipo de fibra e de resina que irá se trabalhar é possível determinar a área superficial, assim como a seção transversal da peça ou elemento onde será aplicado o material.

Esse processo é similar à granulometria do concreto, que tem por finalidade minimizar os vazios intersticiais, a obtenção das taxas de fibra versus matriz polimérica tem por finalidade obter o máximo desempenho do compósito, através do maior teor de vidro possível para cada sistema produtivo.

Sabe-se, experimentalmente e pela prática, que os sistemas de maior desempenho em relação ao teor de vidro por peso, ou volume, são os sistemas de enrolamento filamentar e pultrusão. Isso se deve ao maior controle que se exerce na quantidade de polímero que envolve as fibras. Ou fator é a tipologia do vidro, isto é, são mechas de vidro contínuas. Isso permite que o polímero deslize e penetre nos interstícios mais facilmente que em geometrias entrelaçadas, por exemplo.

Para se estabelecer esse teor, os projetistas têm várias ferramentas computacionais atualmente de grande eficiência e custos relativamente baixos. Contudo, é possível e relativamente simples dimensionar essa relação de materiais.

2.4.5.2.2 Regra das Misturas

É um dos principais processos para obtenção da relação entre teor de vidro e de polímero de um compósito. A literatura aborda como o mais prático meio para se obter uma aproximação de cálculo e estimativa razoável, até que se escolha o compósito a ser utilizado (QUINN, 2002; PIGGOTT, 2002; LEVY NETO, 2006).

A conversão entre fração de volume e fração de massa dos elementos ou peças em compósitos é feita pelo uso das Equações 1 e 2 abaixo:

$$V_k = \frac{M_k / \rho_k}{M_{a1} / \rho_{a1} + \dots + M_k / \rho_k + \dots + M_n / \rho_n} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$M_k = \frac{\rho_k * V_k}{\rho_1 * V_1 + \dots + \rho_k * V_k + \dots + \rho_n * V_n} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

- ρ_k Densidade do k-ésimo material constituinte que se queira determinar o volume
- V_k Fração de volume do k-ésimo material que se queira determinar
- M_k Fração de massa do k-ésimo material que se queira determinar

Inicialmente, considerando os elementos bi-dimensionais, isto é, de chapas ou placas, a primeira determinação a ser feita é em relação à conversão da densidade do polímero em massas por unidade de área, em razão desses elementos serem produzidos com reforços bi-dimensionais, isto é, mantas, tecidos ou véus de superfície. Para tanto, utiliza-se a Equação 3 a seguir, onde a espessura t_m é a espessura da resina por unidade de área, dada em milímetros, no caso, por metro quadrado.

$$t_m = \frac{\text{massa / unidade de área (kg / m}^2 \text{)}}{\text{densidade (g / cm}^3 \text{)}} \quad \text{Eq (3)}$$

O teor de vidro e polímero pode ser obtido tanto em volume como em peso, dependendo da necessidade. A relação dessa regra é fornecida pela Equação 4.

$$t_k = \frac{w_f}{\delta_f} + \frac{(1 - W_f)}{W_f} * \frac{w_m}{\delta_m} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

t_k	Espessura do laminado em milímetros
w_f	Massa da fibra em kg / m ²
w_m	Massa da matriz polimérica, em kg/m ²
δ_f	Densidade da fibra de vidro, em g/cm ³
δ_m	Densidade da matriz de resina, em g/cm ³
W_f	Fração de massa da fibra, em % em relação ao peso ou volume total

Para se determinar a espessura de uma chapa de 1 m² executada com uma camada de fibra de manta gramatura 450 g / m², impregnada com resina epóxi, segue-se o roteiro abaixo:

a) Determina-se a espessura de resina por unidade de área:

Usando a Eq. 2, tem-se: 1kg de resina por metro quadrado / 1,18 g / cm³ (extraído da Tabela 25 acima) = 0,847 mm;

b) Determina-se a espessura da fibra pelo mesmo método, resultando em: 0,118 mm;

c) Soma-se as duas espessura para obter o total do laminado: **0,965 mm**.

O valor acima pode ser arredondado para 1 mm caso o sistema de aplicação seja manual ou “*spray-up*”. Para sistemas automáticos deve ser mantido o valor, uma vez que existem folgas e ajustes dos equipamentos para controlar com maior precisão as espessuras. Quando o elemento é unidimensional, isto é, prevalece uma das dimensões em relação às outras duas, como perfis, tubos ou barras, esses são, geralmente, produzidos pelos processos de pultrusão, “*filament winding*”, ou centrifugação.

Para se calcular a área superficial para elementos produzidos com reforços lineares, utiliza-se a Equação 5 para determinar a espessura do laminado e a Equação 6, para determinar a massa por unidade de comprimento (TEX).

$$t_m = \frac{\text{massa / unidade de área (kg / m}^2\text{)}}{\text{densidade (g / cm}^3\text{)} * V_f} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$kTEX = \frac{\text{massa (g)}}{\text{unidade de área (m}^2\text{)}} * \text{largura (m)} \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que:

t_m	Espessura do laminado
$kTEX$	1000 TEX = 2,4g / km
V_f	Fração em volume de fibra

O próximo exemplo fornece a quantidade de rolos de *rovings* de 4800 TEX, necessários para se produzir um tanque circular com 1 metro de altura por 1 metro de perímetro, com espessura de parede de 8 mm e uma fração de volume de 70%.

- Calcula-se inicialmente a quantidade de fibra por m², em kg/m². Pela Eq. 5, tem-se:
Massa da fibra = 2,55*0,7*7 = **12,5 kg/m²**
- Utilizando a Eq. 6: kTEX = 12500 (g/m²) * 1 (m) = **12500 kTEX**
- Finalmente, divide-se o total encontrado pelo tipo de *roving*, obtendo-se a quantidade de rolos a consumir: **2604 rolos**.

Ao se dimensionar um elemento a partir da seção transversal, quando o mesmo é produzido a partir de filamentos, torna-se mais conveniente trabalhar com frações de volume, do que com frações de massa dos materiais constituintes do compósito. Para isso, a área da seção transversal de qualquer constituinte é dada pela Equação 7:

$$A_s = \frac{kTEX}{g / cm^3} \quad \text{Eq. (7)}$$

Com A_s sendo a área da seção transversal.

Da mesma forma, para se determinar a quantidade de material a partir da seção transversal de uma peça ou elemento, é mais prático utilizar a base de cálculo apresentada pela Equação 5, anteriormente descrita. Outras inúmeras formas de cálculo estão disponíveis em Hollaway (1978), Piggott (2002) e Quinn (2002), assim como nos guias de recomendações da ACI (1998), FIB (1998) e outros constantes da bibliografia.

2.4.6 RECOMENDAÇÕES AO PROJETAR ESTRUTURAS EM GRC

Para o caso de estruturas de pouca espessura em elementos de **GRC** a principal recomendação de dimensionamento consta do manual da FIB (1998) – “*Design of thin-wallet units*”.

Entre as principais recomendações derivadas de diversos ensaios de caracterização e comportamento de corpos de prova, estão as adições de sílica ativa e pozolanas, aditivos superplastificantes e polímeros hidrossolúveis. Além dos ajustes de granulometria e outros pertinentes à formulação do concreto, já descritas anteriormente.

Para painéis maciços lisos ou tipo “Pi” ou “Duplo T”, se recomenda tomar os valores de resistência característica do material, obtidos nos ensaios, caso o desvio-padrão seja menor ou igual a 5%. Quando esse valor for maior, devem ser tomados os valores de resistência característicos e subtraído o dobro da média dos valores de desvio.

A Tabela 26 apresenta os valores característicos para cálculo de painéis estruturais.

Tabela 26 – Valores característicos de GRC – Desvio de +/- 2,5%

Estados limites	AR – GRC (MPa)	PGRC1 (MPa)	PGRC2 (MPa)
Limite de Prop. (tração)	5	5	5
ELU	5	9	7
ϵ_{II} (tração) ‰	0,2	1,5	0,7
Limite de Prop. (flexão)	10	12	12
Módulo de Ruptura (flexão)	10	20	14
ϵ_{IUb} (flexão) ‰	0,4	2,5	1
E	18000	10000	13000

Compilado de FIB (1998)

Uma importante relação que se deve ter ao dimensionar elementos em **GRC** é a diminuição da ductilidade do material com o passar do tempo. A FIB (1998), em seu apêndice A, apresenta o modelo de ensaio de elementos e corpos de prova para verificação do diagrama de tensão versus deformação para elementos pré-moldados em **GRC**, em função da idade.

Em relação à aplicação, adota-se a Tabela 27 a seguir.

Tabela 27 – Coeficientes em função da utilização dos elementos em GRC

Aplicação	Resistência (St)	Deformação	Durabilidade e deform. Na ruptura (B)	Resistência à poluição (V)	Categoria contra incêndio
Fôrma perdida	3	Req. de norma	2	1 ou 2	1
Elementos de Fachada maciços	2	“	1	1	1
Elementos tipo sanduíche	2	“	1	1	1
Elementos compósitos	2	“	1	1	1
Elementos internos	3	“	2	1	1
Elem. construtivos até 2 m acima do solo	2	“	1	1	0

Fonte: FIB (1998)

As recomendações de cálculo estão baseados no EUROCODE (1990), tendo como requisito, para um determinado estado-limite, que seja satisfeita a relação dada pela Equação 8 e seguintes:

$$S_d < R_d \quad \text{Eq. (8)}$$

$$S_d = \gamma_f \cdot S \leq R_d = \frac{R}{\gamma_m} \quad \text{Eq. (9)}$$

Sendo:

S Valor representativo ou característico de carregamento

γ_f Fator de majoração de carga

S_d Valor das ações de projeto

R Resistência representativa

γ_m Fator de minoração do material

R_d Valore resistente de projeto para o material específico

Devem ser realizadas as verificações para:

- Estado limite último – ELU;

- Estado limite de formação de fissuras (deformação limite).

Diferentemente de outros produtos similares em concreto pré-fabricado, como lajes alveolares, onde para o critério de deformação pode se considerar os coeficientes como iguais a 1, nos elementos de **GRC** devem ser adotados os seguintes valores, conforme os coeficientes da Tabela 27:

Ruptura: $\gamma_f = 1.5$ e $\gamma_m = 1.25$

Estes valores se aplicam para as categorias de resistência abaixo:

- St = 1: para controle estrutural de elementos novos mas, adicionalmente, para comportamentos de ruptura plástica, requerida para idades avançadas. Em **GRC** esse fator não deve ser considerado a menos que seja utilizado reforço em aço adicional;
- St = 2, para elementos novos e após as primeiras idades (28 dias) e elementos em que não seja considerada a ruptura plástica nas idades avançadas;
- St = 3, somente para elementos em processo de cura até completarem 28 dias.

Na deformação por flexão, a deflexão máxima admissível para elementos em **GRC** resultante das combinações desfavoráveis descritas, será no máximo de 1/300 do vão livre da direção considerada.

Em relação à movimentação dos elementos em **GRC** todas as ligações devem ser realizadas de forma a garantir que ações térmicas não sejam transmitidas a esses elementos.

Considerando-se a deformação na ruptura e durabilidade os elementos em **GRC** se subdividem em duas categorias:

- Deformação última: $\gamma_f = 1.3$ e $\gamma_m = 1.4$, aplicável para:

1. B1, com $\gamma_f = 1.3$ e $\gamma_m = 1.4$;

2. B2, com $\gamma_f = 1.3$ e $\gamma_m = 1$

Posteriormente, B1 e B2 podem ser calculados por:

$$\varepsilon \leq \frac{\varepsilon_{mh}}{1.8} \quad \text{Eq. (10)}$$

para a classe B1, e:

$$\varepsilon \leq \frac{\varepsilon_{mh}}{1.3} \quad \text{Eq. (11)}$$

A partir de:

$$\varepsilon_d = \gamma_f \cdot \varepsilon \leq \frac{\varepsilon_{mh}}{\gamma_m} \quad \text{Eq. (12)}$$

Em que:

ε Deformação a ser calculada em função das tensões e das deformações restringidas.

ε_d Valor da deformação máxima de projeto

ε_{mh} Deformação característica do material

ε_{mh} Deve ser deduzida a partir de medições no decorrer da vida útil do material ou ensaios

O diagrama tensão versus deformação apresentado em FIB (1998), mostrado na Figura 34 demonstra a importância das verificações em projeto ao se trabalhar com elementos estruturais com **GRC**, em razão da diminuição da ductilidade com o passar do tempo.

Observa-se o diagrama de Tensão versus Deformação versus Tempo para idades de 28 dias até 1 ano, após 2, 3 e 4 anos, respectivamente.

Os projetistas devem estar atentos para esses detalhes ao trabalhar com novos materiais, cujas propriedades e comportamento são distintos dos materiais convencionais, ou tradicionais, utilizados na construção civil.

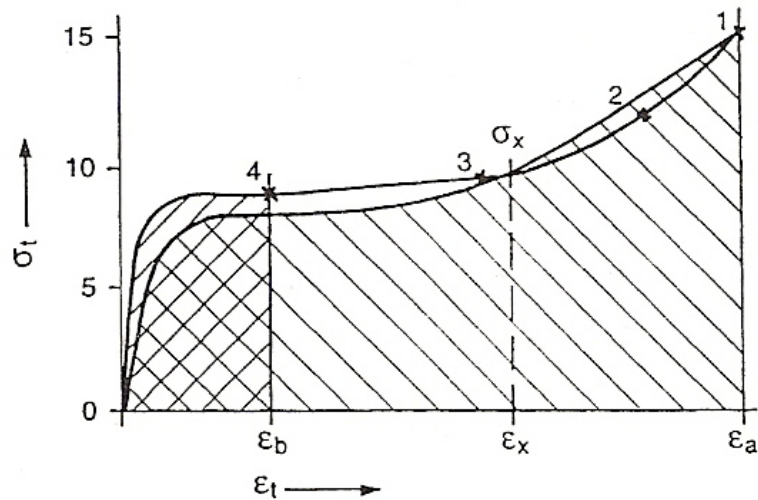


Figura 34 – Diagrama tensão versus deformação. Fonte: FIB (1998)

O módulo de ruptura é definido pela Equação 6, a seguir:

$$\sigma_{MOR} = \frac{P_{RUP}L}{bd^2} \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde:

P_{RUP} É a força máxima atingida em ensaio de flexão pura (ensaio de 4 pontos)

L É o vão livre entre apoios

b Largura da peça ensaiada (na região de ruptura caso seja seção variável)

d Altura da peça na região de ruptura (caso seja seção variável)

A deformação por ruptura é calculada pela média das deformações na face comprimida e da face tracionada, obtidas pela deflexão de ruptura nos ensaios de flexão pura.

Essa forma de cálculo auxilia para a criação de métodos de cálculo para novos materiais, mantendo-se a favor da segurança quando em idades avançadas.

Para a estimativa de projeto visando prever o Módulo E máximo antes da abertura de fissuras, ou seja, onde o elemento se mantenha no regime elástico, ou de proporcionalidade, pela Lei de Hooke, a relação dada pela Equação 14:

$$E = \frac{5P_e L^3}{27Y_e b d^2} \quad \text{Eq. (14)}$$

P_e Ponto em que o diagrama tensão versus deformação deixa de ser proporcional
 Y_e Deflexão medida quando a carga atinge o limite de proporcionalidade do diagrama.

2.4.7 RECOMENDAÇÕES AO PROJETAR ESTRUTURAS EM GFRP

Ao projetar estrutura em **GFRP**, diferentemente do que ocorre com outros projetos onde, a partir das propriedades mecânicas de um determinado material, utilizando-se tais propriedades para o dimensionamento da estrutura sob as diversas condições de uso, o dimensionamento em **GFRP** segue outro percurso. Pelas características dos compósitos (aqui significando especificamente as fibras em matrizes poliméricas), ao se idealizar um produto desse material, está se pensando em desenvolver as próprias características do material, para que o mesmo trabalhe aproveitando a máxima resistência.

Este tópico abordará os principais conceitos de análise de compósitos como elementos construtivos. A análise do comportamento dos laminados se faz importante pela característica peculiar desse material. Baixo módulo, no caso particular das fibras de vidro, baixíssima densidade, elevada resistência.

Existem diversos modelos de cálculo para estruturas que podem ser utilizados para calcular estruturas de **GFRP**.

Conforme apresentado em Tita (1999), devem ser realizados três procedimentos de cálculo. São eles:

Regra das misturas, já descrito, para quantificar o material;

Teoria clássica dos laminados – para analisar a estrutura compósita (**CLT** – *Classical Laminate theory*);

Análise por elementos finitos – aprimoramento da análise anterior.

Atualmente, com os aplicativos de simulação por elementos finitos não lineares, é possível trabalhar com hipóteses muito realistas. Diversos aplicativos já contêm métodos consagrados de análise (TSAI, 1974; TSAI & WU, 1971, 1986; TSAI & HILL, 1968), em que é possível elaborar a simulação das diversas camadas de fibra, indicando os respectivos ângulos e indicando se o laminado é simétrico ou não, em relação à espessura. Contudo, tais aplicativos têm um valor muito elevado e aplicativos de domínio público ainda não são capazes de atingir níveis de sofisticação dos anteriores.

Até a década de 1980 a maior dificuldade estava em encontrar um modelo matemático genérico que pudesse ser adotado para o cálculo das estruturas de **GFRP**, considerando as múltiplas lâminas, ou camadas (*plies or layers*). Posteriormente, com a evolução dos computadores, a preocupação deixou de ser a criação de um único modelo, mas analisar, sob todos os aspectos, o comportamento desses materiais.

Muitas pesquisas vêm sendo conduzidas para aprimorar modelos de cálculo que relacionam o comportamento das fibras, da matriz e do compósito propriamente dito.

Em construção civil, alguns modelos foram utilizados em toda a década de 1980 e início da década de 1990, quando a metodologia dos elementos (e volumes) finitos ganhou impulso, por conta dos microcomputadores.

Como descrito por Tita (1999), o projetista deve seguir certos procedimentos ao dimensionar uma estrutura em **GFRP**. Após os resultados é extremamente aconselhável realizar um ensaio de impacto para analisar o comportamento real da estrutura proposta.

Uma análise preliminar do que deve ser feito e uma estimativa da distribuição das camadas necessárias, bem como a orientação das fibras, em relação ao plano paralelo às lâminas, também é prática recomendada para que se obtenha os resultados esperados de projeto.

Recentemente as pesquisas vêm se direcionando para a análise plástica e viscoplástica de meios contínuos anisotrópicos, reforçados ou não com fibras, por meio de modelagens por elementos finitos e modelagem por elementos de contorno, conforme Vanalli (2004).

Apesar disso, conceitos mais tradicionais, ou conservadores, continuam sendo aplicados nos projetos atualmente.

A despeito da evolução das ferramentas de cálculo de estruturas feitas com material compósito, ou outras que recebam algum tipo de reforço desses materiais, a maior dificuldade está em criar normas de procedimentos padronizadas. De um lado, dificulta o entendimento por parte de engenheiros pouco familiarizados com os compósitos. Por outro lado, torna o uso dessa tecnologia um processo que sofre menor grau de imposições construtivas muito conservadoras.

O fato de haverem diversos guias de linhas gerais mobiliza os profissionais, constantemente, a procurar as mudanças ocorridas nesses.

Trabalhar num projeto e dimensionamento estrutural em compósitos requer maior esforço e tempo, ao mesmo tempo em que permite maior flexibilidade e arrojo, que são

controlados pelos ensaios de caracterização das tipologias nomeadas como candidatas na elaboração do reforço ou estrutura.

Todos os modelos de dimensionamento, sem exceção, exigem que os ensaios básicos de tração e impacto sejam realizados. Os procedimentos para confecção dos corpos de prova e para execução dos ensaios já estão totalmente detalhados, especialmente pela ASTM e pela BSI. Portanto, se não há uma homogeneidade nos procedimentos de execução, há total controle em relação aos requisitos mínimos que o **GFRP**, o **CFRP** ou o **AFRP** devem atender para os diversos setores industriais.

Com o objetivo de mostrar os principais princípios para a caracterização das propriedades dos compósitos, serão apresentando alguns conceitos-chave e modelos de cálculo.

2.4.7.1 Modelos Baseados em Hollaway e Piggott

Os modelos apresentados a seguir são referenciais generalizados para o processo de determinação das ações atuantes em estruturas baseadas em compósitos, independentemente do tipo de fibra utilizado.

Não se trata de uma ferramenta de cálculo e dimensionamento específico para sistemas estruturais e sim, um guia para aqueles que pretendam se aprofundarem no tema. Vários autores e métodos foram colocados com intuito de mostrar a particularidade desse material em relação às ligas metálicas e ao concreto.

Certamente, a Ciência dos Materiais vem trazendo avanços substanciais ao conhecimento de todos os materiais, especialmente dos polímeros e das fibras, em razão da flexibilidade de aplicações possíveis para essa gama de materiais atuando em conjunto.

Alguns conceitos de comportamento e de cálculo são apresentados em Hollaway (1978) e Piggott (2002). Ambos os autores destacam a necessidade de obtenção de dados experimentais, para se comparar com os modelos de cálculo.

Primeiramente, devem se adotar as seguintes premissas:

- As fibras são contínuas e homogeneamente dispersas na matriz;
- As fibras são unidirecionais;
- O comportamento do compósito é ortotrópico homogêneo;
- A adesão entre a interface da matriz e das fibras é perfeita.

Disso, resulta a simetria das propriedades nos três planos, conforme mostrado na Figura 35, caracterizando-se, inicialmente, por quatro constantes elásticas independentes:

E_{11} = módulo de elasticidade longitudinal às fibras;

E_{22} = módulo de elasticidade na direção transversal;

ν_{12} = coeficiente de Poisson (deformação transversal)

G_{12} = módulo cortante longitudinal;

ν_{21} = obtido pela equação:

$$\nu_{21} E_{11} = \nu_{12} E_{22} \quad \text{Eq. (15)}$$

As premissas anteriores continuam válidas para múltiplas camadas, onde deve ser acrescentado o parâmetro referente ao ângulo θ , de disposição de uma camada (lâmina) do tecido unidirecional sobre a anterior.

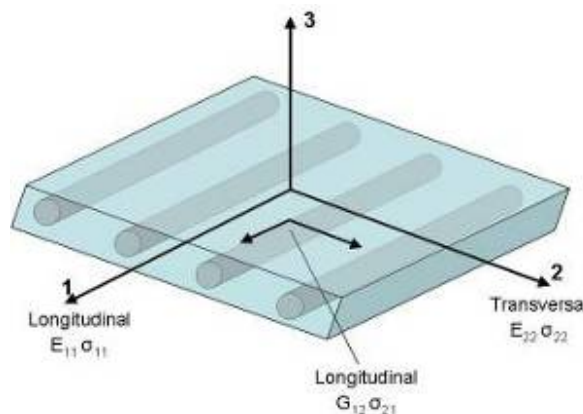


Figura 35 - Diagrama de caracterização do GFRP
Adaptado de HOLLAWAY (1978)

2.4.7.2 Tração Uniaxial Longitudinal

Para estimar as tensões que um compósito está sujeito, não existe um modelo generalizado capaz de cobrir todas as alternativas e variáveis envolvidas. Isto porque, as características mecânicas da matriz mudam de um polímero para outro, assim como as características mecânicas da fibra mudam de uma geometria para outra. Segundo Hollaway (1978) e Piggott (2002), é possível estimar, com certa precisão, através da Equação 16.

$$\sigma_{1u} \cong V_f \sigma_{fu} + V_m \sigma_{mu} \quad \text{Eq. (16)}$$

Em que:

σ_{1u} = Tensão de ruptura total no sentido longitudinal;

V_f = Fração de volume, conforme determinado a seguir;

σ_{fu} = Tensão de ruptura das fibras;

V_m = Fração de volume da matriz = $1 - V_f$;

σ_{mu} = Tensão de ruptura da matriz.

Para que se obtenha alta resistência do compósito, é essencial que o módulo da fibra seja muito maior que o módulo da matriz. Isso se obtém pelo aumento da fração volumétrica entre fibra e matriz. Essa relação pode ser obtida conforme descrito anteriormente (PIGGOTT, 2002).

2.4.7.3 Tração Transversal e Força Cortante

Supondo que as camadas de fibras estejam perfeitamente aderidas à matriz e alinhadas, duas ações podem ocorrer, as quais estarão majoritariamente influenciando a matriz. As Figuras 36 e 37 representam essas ações.

A ação representada pela Figura 36 é a tração transversal às fibras e tende a romper a matriz próxima à interface em uma ou mais camadas em que as fibras estejam dispostas ortogonalmente à força de tração.

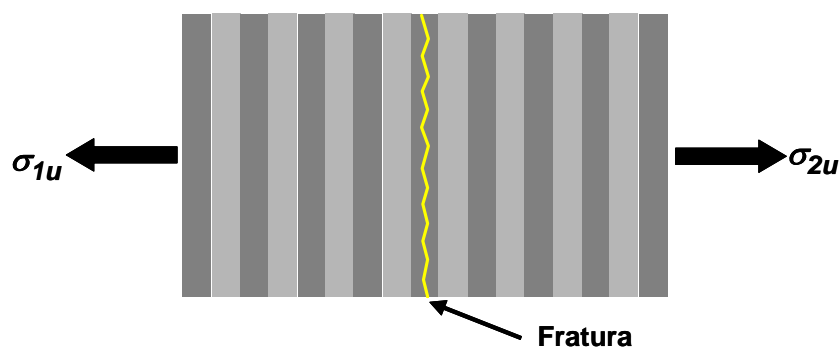


Figura 36- Fratura devido ao arrancamento por tração transversal à camada (Adaptado de PIGGOTT, 2002)

Por outro lado, a Figura 37 representa a tensão de cisalhamento interlaminar devida à tração longitudinal atuando sobre múltiplas lâminas ou camadas.

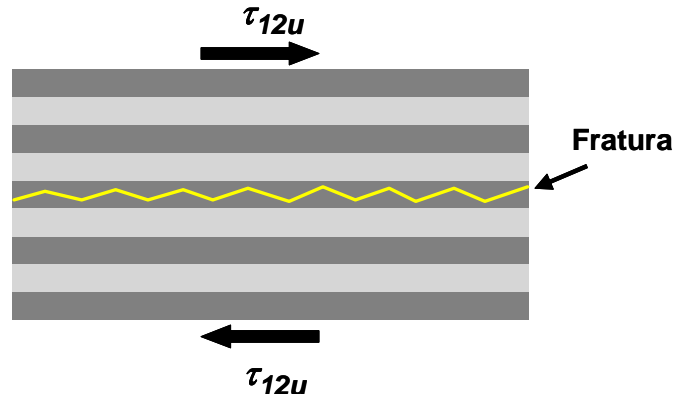


Figura 37- Fratura devido ao cisalhamento interlaminar por tração longitudinal (Adaptado de PIGGOTT (2002))

Isso vale para uma camada ou lâmina ou, para mais de uma lâmina, desde que a orientação das fibras seja paralela. No caso de haver camada intermediária ortogonalmente disposta, com o mesmo tipo de fibra, essas ações invertem suas posições, isto é, passa a existir uma ação de cisalhamento ortogonal à uma ação de tração transversal.

Nos materiais compósitos constituídos de fibras unidirecionais dispostas ortogonalmente, esses efeitos são minimizados, desde que se mantenha a simetria das faces em relação às ações, isto é, pares de camadas simetricamente opostas. Outra preocupação é em relação à adesão na interface entre cada camada.

Essa adesão será maior ou menor como função direta do tipo de fibra da superfície de contato de cada camada. Um exemplo disso é o contato de um tecido tramado de gramatura 600g/m² interfaceando outro tecido do mesmo tipo, porém posicionado ortogonalmente em relação ao primeiro.

Esse fenômeno é muito mais acentuado em fibras do tipo unidirecional, cuja quantidade de fibras num sentido é, aproximadamente, 90 % maior que no outro. Para o caso de tecidos bidirecionais ou tri-axiais a análise se torna mais complexa.

A Figura 38, na seqüência, esquematiza as direções das forças para ilustrar esse fenômeno, de onde deriva a complexidade de predição das linhas de ação dessas forças, para esses materiais, onde:

σ_c = Tensão de tração no compósito;

σ_l = Tensão de tração na lâmina;

τ_{tl} = Tensão de cisalhamento devida à tração nas lâminas.

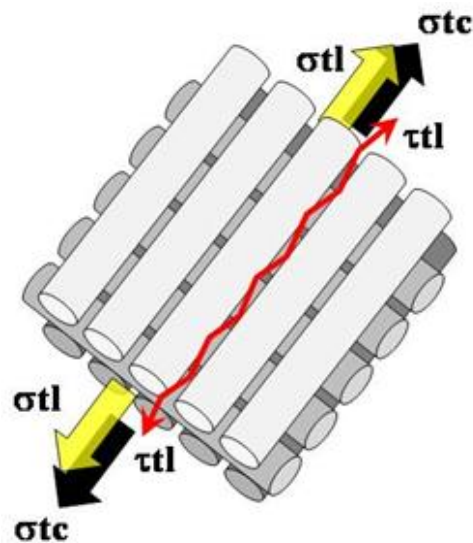


Figura 38 – Alteração da tensão em função do direcionamento de fibras unidirecionais sobrepostas num laminado de 3 camadas

A força cortante pode atuar no plano do laminado ou perpendicular a ele. Dependendo da geometria da peça uma ou outra será a tensão crítica.

Segundo Hollaway (1978), um modelo aproximado para determinar a tensão transversal no laminado é dado por:

$$\sigma_{tr} = \sigma_m \left[1 - \sqrt{\left(\frac{4V_f}{\pi} \right)} + \sigma'_1 \sqrt{\left(\frac{4V_f}{\pi} \right)} \right] \quad \text{Eq. (17)}$$

onde,

σ_{tr} = Tensão transversal às fibras;

σ_m = Tensão última de ruptura da matriz;

σ'_1 = Tensão última de ruptura das fibras.

V_f = Fração de volume de fibra.

Como se pode notar, o equacionamento visto se baseia na Regra das Misturas, ou seja, considera os volumes de fibra e de matriz e soma as tensões de cada parcela, proporcionalmente.

2.4.7.4 Laminados Isotrópicos Homogêneos

Para laminados compostos unicamente por mantas contínuas ou de fios picados, ou ainda por projeção de fibras picadas, é possível considerá-los como tendo uma relação de tensão versus deformação isotrópica homogênea, para um estado plano de tensões. Análogo ao que já foi feito para os compósitos ortotrópicos.

Sendo assim, as relações baseadas na Lei de Hooke, tomam a seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (18)}$$

onde,

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}$$

$$Q_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)} = G$$

Pelo equacionamento acima, implica que somente duas constantes elásticas são necessárias para se caracterizar um material isotrópico sob estado plano de tensões.

2.4.7.5. Laminados Ortotrópicos Homogêneos

A relação para compósitos unidirecionais ou bidirecionais pode ser descrita pelo estado plano de tensões. Para análise macro-mecânica, as interações entre a fibra e a matriz e a sua geometria não são consideradas. Pela Lei de Hooke⁷ as relações podem ser expressas por:

$$\sigma_{11} = Q_{11} \varepsilon_{11} + Q_{12} \varepsilon_{22} \quad \text{Eq. (19)}$$

⁷ Robert Hooke (1635-1703), cientista experimentalista inglês, desenvolveu a teoria da elasticidade linear e o conceito de tensão e deformação.

$$\sigma_{22} = Q_{12} \varepsilon_{11} + Q_{22} \varepsilon_{22} \quad \text{Eq. (20)}$$

$$\sigma_{12} = Q_{66} \varepsilon_{12} \quad \text{Eq. (21)}$$

Representadas na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (22)}$$

Em que Q é a matriz de rigidez com as seguintes componentes:

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Onde, E_{11} , E_{22} , G_{12} e ν_{11} são as constantes elásticas do compósito.

Caso o eixo do laminado não coincida com os eixos principais (1,2) da figura anterior, devem ser aplicadas transformações para os eixos referenciais (x,y), conforme a seguir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (23)}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (24)}$$

A matriz de transformação, T , é definida por:

$$[T] = \begin{pmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{pmatrix} \quad \text{Eq. (25)}$$

em que $m = \cos\theta$ e $n = \sin\theta$

Assim, a relação entre tensão e deformação para uma camada, com referência aos eixos (x,y), é descrita como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}]^* \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{Eq. (26)}$$

Assim a matriz Q-barra, qual descreve o comportamento de um laminado unidirecional ou bidirecional alinhados em (x,y), formando um ângulo θ qualquer, com referência aos eixos principais (1,2).

Da eq. (26), se deduz o módulo de elasticidade em relação aos eixos:

$$\frac{1}{E_{xx}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_{11}} + \frac{\sin^4 \theta}{E_{22}} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad \text{Eq. (27)}$$

De forma similar, é possível obter o coeficiente de Poisson:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_{yy}} = \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\nu_{12}}{E_{11}} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \quad \text{Eq. (28)}$$

Finalmente, o módulo de cisalhamento, é dado por:

$$\frac{1}{G_{xy}} = 4 \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{2\nu_{12}}{G_{12}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{12}} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2 \quad \text{Eq. (29)}$$

O equacionamento visto anteriormente diz respeito aos eixos x e y ou **1** e **2**, considerando-se x e y como eixos quaisquer formando um ângulo θ qualquer com esses eixos.

Para o caso genérico de um laminado com n -lâminas, a equação 26 é modificada de forma a acrescentar o eixo z , o qual se faz integrando a Eq. (26) entre $-z/2$ e $z/2$ onde o somatório, em módulo de z é a espessura total do laminado (JONES (1975) apud LEVY NETO (2006)), dada pela Equação 30:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-1/2}^{1/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz; \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-1/2}^{1/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z^* dz \quad \text{Eq. (30)}$$

A partir da Equação 30, desenvolvendo-se para o caso geral, obtém-se a matriz da Equação 31:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa_0 \end{Bmatrix} \quad \text{Eq. (31)}$$

As matrizes [A], [B], e [D] são, cada uma, 3x3, isto é, simétricas. A matriz [A] é a matriz de rigidez no plano, a matriz [B] a matriz dos acoplamentos entre planos e a matriz [D] a matriz de rigidez à flexão ou torção, conforme o caso.

Conhecendo-se as deformações e flechas no plano médio de uma lâmina, determinadas experimentalmente, podem ser calculadas as resultantes e os momentos através da Equação 31 e da Equação 32:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \\ \kappa_{x0} \\ \kappa_{y0} \\ \kappa_{xy0} \end{Bmatrix} \quad \text{Eq. (32)}$$

Caso se conheça as tensões resultantes e os momentos atuantes é possível encontrar-se as deformações e as deflexões no plano médio, pela inversão da Equação (31). Dessa forma, obtém-se a Equação (33) (id. 2006):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\theta} \\ \kappa_{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} * \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad \text{Eq. (33)}$$

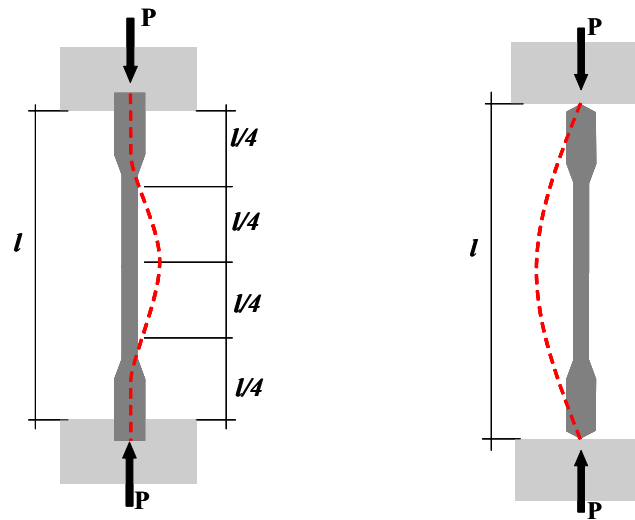
O ANEXO II apresenta esquematicamente o processo geral de cálculo para o caso bi-dimensional e tri-dimensional em compósitos, Carvalho (2007).

2.4.7.6 Compressão em Compósitos

O estudo da compressão em compósitos tem sido considerado como uma análise da fase polimérica, isto é, sob domínio da matriz. Em parte, segundo Piggott (2002), pela dificuldade de se analisar o comportamento das fibras unidirecionais quando submetidas à compressão uniaxial.

O principal problema na compressão de elementos de **GFRP** ocorre em função da flambagem local, devido à esbelteza dos elementos. Outra questão é devida ao método de ensaio, em que o corpo de prova padrão não tem a geometria adequada, uma vez que foi idealizado para ensaios com metais.

Nos ensaios de compressão os corpos de prova têm suas extremidades restringidas de rotação. Essa imposição se deve ao processo de posicionamento e fixação dos corpos de prova nos equipamentos de ensaio. Isso multiplica a tensão em quatro vezes comparando-se com o caso de extremidades rotuladas, conforme esquematizado na Figura 39 “a” e “b”, a seguir.



a- Flambagem com engaste b- Flambagem com rótula

Figura 39 “a” e “b” – Comprimento de flambagem para compósitos
(Adaptado de PIGGOTT, 2002)

O modelo generalizado de cálculo é a equação de Euler⁸, apresentada a seguir:

$$\sigma_b = \left(\pi^2 E / 12 \right) (d / l)^2 \quad \text{Eq. (34)}$$

Contudo, a Eq. (34), só é válida para materiais isotrópicos. Dessa forma, segundo Bogetti et al. (1988, apud PIGGOTT, 2002), é utilizado um fator de correção para o cálculo em materiais compósitos, pela seguinte equação:

$$\sigma_{bcomp} \cong \left(\left(\pi^2 E / 12 \right) (d / l)^2 \right) / \left(1 + (E_x / G_{xz}) (d / l)^2 \right) \quad \text{Eq. (35)}$$

onde:

σ_b = Tensão crítica de flambagem;

σ_{bcomp} = Tensão crítica de flambagem do compósito;

E_x = Módulo de elasticidade do compósito em x (E_{11});


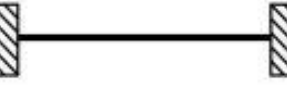



G_{xz} = Módulo de elasticidade transversal em xz (G_{13});

⁸ Leonard Euler (1707 – 1783), matemático (e físico) suíço, desenvolveu o conceito de tensão crítica de flambagem, entre outros trabalhos.

- d = Espessura;
 l = Comprimento;
 b = Largura.

Um modelo alternativo de cálculo para placas prismáticas, sujeitas à compressão axial, é sugerido em Bleich (1952, apud HOLLAWAY, 1978), onde se estabelece o coeficiente de flambagem, β , segundo os critérios da Tabela 28, a seguir.

Tabela 28 – Valores do coeficiente de flambagem segundo o tipo de restrição

Tipo de restrição	Valor de β
	4,00
	6,97
	5,42
	0,425
	1,277

Adaptado de Hollaway (1978)

A equação de Euler toma, assim, a seguinte forma generalizada para placas planas sujeitas à compressão uniforme, elástica ou inelástica:

$$\sigma_{cr} = \beta \left(\frac{\pi^2 E \sqrt{\eta}}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \right) \quad \text{Eq. (36)}$$

Onde:

σ_{cr} = Tensão crítica de flambagem

$\eta = E_t / E$

ν = Coeficiente de Poisson

b = Largura da placa

t = Espessura da placa

E_r = Módulo resultante, que pode ser calculado pela expressão:

$$E_r = 4EE_t / (\sqrt{E} + \sqrt{E_t})^2 \quad \text{Eq. (37)}$$

2.4.7.7 Dimensionamento Proposto em Owens Corning® (1996)

A seguir, é mostrado o procedimento de dimensionamento pelo critério de rigidez, segundo OWENS CORNING® (1996). Ainda que inúmeros avanços tenham ocorrido nos procedimentos de cálculo estrutural, esse método garante obter uma primeira aproximação de valores, quando não se dispuser de modelos mais acurados, como os anteriores, os quais dependem, muitas vezes de ensaios de caracterização do material.

Inicialmente, é necessário calcular a espessura resistente da peça, para então calcular a rigidez necessária ou requerida.

Para placas planas submetidas a carregamentos laterais uniformes, a deflexão máxima e o momento fletor máximo podem ser descritos como:

$$y = K_1 \frac{qa^4}{E't^3} \quad y < 1 \quad \text{Eq. (38)}$$

$$M = K_2 qa^2 \quad \text{Eq. (39)}$$

Onde:

y é a flecha máxima admissível (em cm);

K_1 e K_2 são coeficientes que dependem do tipo de apoio e da geometria da peça, obtidos da Tabela 28;

a a largura da placa ou raio, se circular (em cm);

E' o módulo de elasticidade na flexão;

M o momento fletor máximo (no engaste ou no meio do vão);

t é a espessura do laminado (em cm).

q é a carga lateral uniforme (em Kg/cm²), dada pela expressão:

$$q = 0, I [(\rho_1 H_1) + (\rho_2 H_2) + \dots + (\rho_n H_n)] \quad \text{Eq. (40)}$$

em que:

H é a altura em metros;

ρ_1 a ρ_n as massas específicas dos materiais que estão atuando sobre a barra (em Kg/cm³).

A Equação 40 representa o somatório das massas específicas de cada material agindo sobre a peça. Para o caso de uma viga que suporta as cargas transferidas pela laje e pela alvenaria, basta substituir em H , a altura pela distância da borda ao centro do vão, para lajes e computar como altura (aqui estão sendo consideradas lajes atuando em duas direções). No caso da alvenaria é só acrescentar a altura de piso a teto, conforme se verá no exemplo.

A tensão máxima admissível é dada por:

$$\sigma' = \frac{6M}{t^2 (\gamma)} \quad \text{Eq. (41)}$$

Onde:

σ' é a resistência à flexão (para o caso do modelo acima).

γ é o coeficiente de segurança, dependente do tipo de solicitação, assumido como 2, para carregamentos estáticos de curta duração, 4 para carregamentos estáticos de longa duração e 5 para carregamentos cíclicos (dinâmicos).

Para encontrar a espessura de parede pelo critério de rigidez, isola-se o t da Equação 38, resultando em:

$$t = \left[\frac{K_1 q a^4}{E' y} \right]^{1/3} \quad \text{Eq. (42)}$$

Onde:

y = flecha máxima limitada por requisitos de projeto.

Tabela 29 - Coeficientes dimensionais e de apoio para placas planas carregadas uniformemente

b/a	Engaste		Apoio	
	K ₁	K ₂ *	K ₁	K ₂ **
1,0	0,015	0,0513	0,049	0,0479
1,1	0,018	0,0581	0,058	0,0554
1,2	0,021	0,0639	0,068	0,0627
1,3	0,023	0,0687	0,077	0,0694
1,4	0,025	0,0726	0,085	0,0755
1,5	0,026	0,0757	0,093	0,0812
1,6	0,028	0,078	0,100	0,0862
1,7	0,029	0,0799	0,106	0,0908
1,8	0,029	0,0812	0,112	0,0948
1,9	0,030	0,0822	0,117	0,0985
2,0	0,030	0,0829	0,122	0,1017
∞	0,030	0,0833	0,156	0,1250
* Para momento fletor máximo no engaste				
** Para momento fletor máximo no meio do vão				

Fonte: OWENS CORNING (1996)

Agora, para encontrar a espessura pelo critério de resistência, substitui-se a variável M da Eq. (39) na Eq. (41), isola-se a variável t e efetua-se alguma manipulação algébrica. Dessa manipulação se obtém:

$$t = \left[\frac{(6)(K_2)(q)(a^2)(\gamma)}{\sigma'} \right]^{1/2} \quad \text{Eq. (43)}$$

O cálculo da espessura resistente é necessário para efetuar a comparação com a espessura requerida para a rigidez e poder calcular a dimensão da nervura, como se verá no exemplo numérico adiante. A deflexão máxima deve atender as exigências de utilização do laminado de acordo com as solicitações e o ambiente onde a estrutura se encontra.

Posteriormente, deverão ser executados novos cálculos baseados no tipo de reforço, sistema de laminação ou fabricação da peça, orientação e teor de fibras e outros critérios mais acurados, que satisfaçam as características do **GFRP**.

A característica desse método está na forma simplificada com que o material é tratado. Outro fator é que nesse dimensionamento, inúmeras vezes é necessário estruturar as placas com nervuras, dependendo das dimensões e da espessura de laminado resultante no cálculo. Pois o baixo módulo gera espessuras economicamente inviáveis. Dessa forma, é

prática basear-se em espessuras iniciais da ordem de 3 mm ou 4 mm e criar a rigidez necessária através da geometria da peça (chapas corrugadas) ou enrijecedores que atuam como vigas nas placas. Os tipos mais comuns são as nervuras “meia-cana” e “chapéu”.

Após o cálculo da estrutura pelo critério anterior, determina-se a quantidade de nervuras em função das equações que se seguem:

$$i = \frac{t^3}{12} \quad \text{Eq. (44)}$$

A Figura 40 “a” e “b” mostra um desenho esquemático desses elementos e as Tabelas 30 e 31 apresentam alguns valores usuais das variáveis geométricas das nervuras, correspondentes às geometrias mencionadas.

i = inércia por unidade de comprimento;

t = espessura do laminado determinada pelo critério de resistência acima.

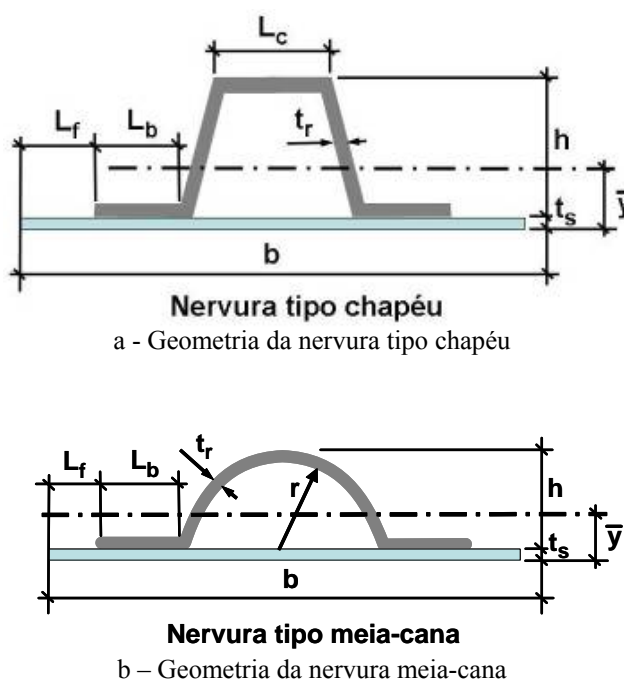


Figura 40 “a” e “b” – Geometria das nervuras enrijecedoras
Fonte: OWENS CORNING (1996)

Tabela 30 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo meia-cana

Nº	b (cm)	t _s (cm)	t _r (cm)	L _b (cm)	h (cm)	ȳ (cm)	I (cm ⁴)
1	22	0,5	0,5	5	6	1,96	138,68
2	22	0,5	0,5	6	5	1,54	87,86
3	26	0,5	0,5	6	7	2,17	216,20
4	26	0,5	0,5	7	6	1,76	146,35
5	28	0,5	0,5	7	7	2,07	221,62
6	28	0,5	0,5	8	6	1,68	149,49
7	30	0,5	0,5	7	8	2,39	318,33
8	30	0,5	0,5	8	7	1,98	226,43
9	30	0,5	0,6	8	7	2,14	265,82
10	30	0,6	0,6	8	7	2,09	279,23

(Adaptado de OWENS CORNING, 1996)

Tabela 31 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo chapéu

Nº	b (cm)	t _s (cm)	t _r (cm)	L _b (cm)	L _c (cm)	h (cm)	ȳ (cm)	I (cm ⁴)
1	10	0,5	0,5	3	3	4	1,34	23,08
2	12	0,5	0,5	5	4	4	1,35	28,20
3	14	0,5	0,5	4,5	5	4	1,40	31,77
4	14	0,5	0,5	5	4	5	1,53	51,57
5	14	0,5	0,5	5	4	5	1,99	77,45
6	14	0,5	0,5	4,5	4	6	1,98	88,33
7	16	0,5	0,5	5	6	5	1,65	63,61
8	16	0,5	0,5	5	6	6	1,97	99,20
9	18	0,5	0,5	6	6	6	1,85	103,01

(Adaptado de OWENS CORNING, 1996)

A partir do resultado acima, deve ser encontrada a inércia da nervura em função do espaçamento entre as mesmas. Esse espaçamento deve ser calculado considerando alguns fatores a seguir:

- Dimensão econômica da nervura;
- Espessura final do laminado considerando a altura da nervura selecionada;
- Evitar obstruções na região onde serão posicionadas as nervuras (divisórias, paredes, encontro com vigas e outros);
- Possibilidade de aproveitamento dos vazios internos para passagem de eletrodutos (neste caso pode ser viável optar por maiores dimensões, mesmo superdimensionando um pouco a nervura).

Com as considerações anteriores em mente, calcula-se a inércia requerida para as nervuras pela seguinte expressão:

$$I = L i \quad \text{Eq. (45)}$$

Onde,

I = Momento de inércia da nervura;

L = Distanciamento entre as nervuras, entre eixos (em cm);

i = resultado da Eq. (45).

Não foi visto em nenhuma aplicação, até a conclusão deste trabalho, de nervuramento inferior em lajes ou vigas. Tal procedimento amplia a capacidade do reforço, através do aproveitamento da geometria. O que se nota, ao contrário, são perfis formados por barras chatas que são colados na face inferior das vigas ou lajes, mesmo em alvenarias, ou fixados com alguns outros sistemas adicionais para garantir a imobilização.

Em outras aplicações de engenharia, especialmente em construção naval, a rigidez é o principal requisito e a rigidez torsional a mais importante, uma vez que se adota 1/1000 de deflexão máxima em certas condições de exigência estrutural.

A solução há muitas décadas, é o nervuramento da estrutura, conferindo a resistência e rigidez requerida e, ao mesmo tempo, conferindo alívio de peso próprio, outro requisito fundamental (em náutica e aeronáutica). Com o resultado obtido na Equação 41 procura-se nas Tabelas 32 ou 33 a inércia mais próxima, ou determina-se previamente uma geometria e selecionar de uma única tabela. O valor superior mais próximo indicará a geometria, os espaçamentos e as dimensões das nervuras.

Tabela 32 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo meia-cana

Nº	b (cm)	t _s (cm)	t _r (cm)	L _b (cm)	h (cm)	ȳ (cm)	I (cm ⁴)
1	22	0,5	0,5	5	6	1,96	138,68
2	22	0,5	0,5	6	5	1,54	87,86
3	26	0,5	0,5	6	7	2,17	216,20
4	26	0,5	0,5	7	6	1,76	146,35
5	28	0,5	0,5	7	7	2,07	221,62
6	28	0,5	0,5	8	6	1,68	149,49
7	30	0,5	0,5	7	8	2,39	318,33
8	30	0,5	0,5	8	7	1,98	226,43
9	30	0,5	0,6	8	7	2,14	265,82
10	30	0,6	0,6	8	7	2,09	279,23

(Adaptado de OWENS CORNING, 1996)

Tabela 33 - Valores das variáveis geométricas para nervuras tipo chapéu

Nº	b (cm)	t _s (cm)	t _r (cm)	L _b (cm)	L _c (cm)	h (cm)	ȳ (cm)	I (cm ⁴)
1	10	0,5	0,5	3	3	4	1,34	23,08
2	12	0,5	0,5	5	4	4	1,35	28,20
3	14	0,5	0,5	4,5	5	4	1,40	31,77
4	14	0,5	0,5	5	4	5	1,53	51,57
5	14	0,5	0,5	5	4	5	1,99	77,45
6	14	0,5	0,5	4,5	4	6	1,98	88,33
7	16	0,5	0,5	5	6	5	1,65	63,61
8	16	0,5	0,5	5	6	6	1,97	99,20
9	18	0,5	0,5	6	6	6	1,85	103,01

(Adaptado de OWENS CORNING, 1996)

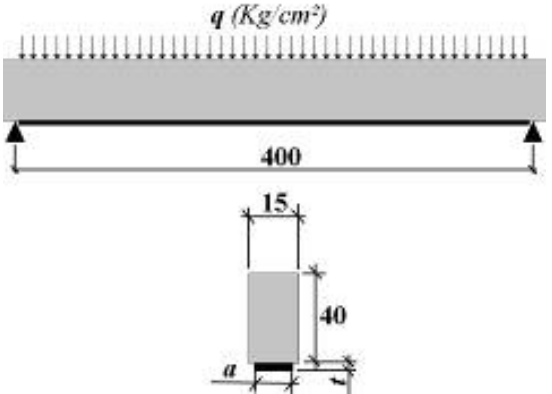
Este cálculo deve ser executado nas duas direções, no caso de placas planas. Dessa forma, as nervuras são montadas em cruz.

Para o caso de reforço inferior de vigas, onde se pode negligenciar os efeitos secundários que atuam no reforço, a nervura pode ser acrescentada à barra de reforço, ou colocada diretamente sob a viga.

Tratando-se de reforço externo, deve ser calculada a inércia relativa ao vão e a deflexão máxima, de maneira similar a perfis metálicos conformados a frio, utilizando o mesmo procedimento de cálculo constante da NBR 14762:2001, lembrando as variações no comprimento de flambagem quando rotulado e engastado.

A seguir é apresentado um exemplo de cálculo pelo critério de dimensionamento que foi descrito neste item.

- Dada a viga do desenho, determinar a espessura da barra de **GFRP** para reforço inferior da viga, sabendo que $\gamma = 4$ e o ensaio do corpo de prova laminado resultou na resistência à flexão, $\sigma' = 1520 \text{ kg/cm}^2$ e o Módulo de flexão, $E' = 94000 \text{ kg/cm}^2$.

Dados	Esquema de posicionamento
Laje = 4,0 m x 3,0 m x 0,1 m $a = 12$ cm (largura barra) $B = 400$ cm (comprimento barra) a/b da barra = $12/400 \Rightarrow K_1$ e $K_2 = \infty$ $P_1 = 0,4 * 2,4 = 0,96$ g/cm ² $P_2 = 0,1 * 0,14 = 0,15$ g/cm ² $P_3 = 3,0 * 2,2 = 6,6$ g/cm ² $q = 0,1 * (0,96 + 0,15 + 6,6) = 0,8$ Kg/cm ² $\gamma = 4$ e $y = 1/500 * a$	 <p>para placas apoiadas: $K_1 = 0,156$ e $K_2 = 0,125$</p>

Tomando as Equações (42) e (43), resolvem-se as espessuras para os critérios de rigidez e resistência, respectivamente:

$$t = \left[\frac{0,156 * 0,8 * 12^4}{94000 * 0,024} \right]^{1/3} = 1,0468 \cong 1,05 \text{ cm} = 10,5 \text{ mm}$$

$$t = \left[\frac{(6)(0,125)(0,8)(12^2)(4)}{1520} \right]^{1/2} \cong 0,4768 \cong 0,48 \text{ cm} = 4,8 \text{ mm}$$

Utilizando a menor espessura, pode ser calculada a nervura de enrijecimento da barra, através da Eq. (44), da seguinte forma:

$$i = \frac{t^3}{12} \Rightarrow i = \frac{4,8^3}{12} = 9,22 \text{ cm}^4$$

Como só existirá uma nervura, considera-se a largura da viga, resultando em:

$$I = 15 * 9,22 = 138,3 \text{ cm}^4, \text{ resultando na nervura 1 da Tabela 22, com } I = 138,68 \text{ cm}^4.$$

Como descrito, esse modelo de cálculo é uma aproximação. Os critérios de falha e fluência não são considerados nesse caso, por exemplo, não sendo um modelo probabilístico.

Uma vez adotado o coeficiente de segurança e adotada a deflexão máxima permitida, calcula-se a estrutura. Outro aspecto que deve ser levado em conta é o fato de ser acrescentada uma nervura com uma determinada espessura. A soma das espessuras multiplicada pelas larguras dará a área total laminada.

Há situações em que a espessura calculada pela rigidez se torna mais econômica se for considerado o tempo de laminação e espessura final dos dois procedimentos.

Deve ser frisado que no exemplo apresentado não foram incluídas considerações sobre as ancoragens transversais do reforço inferior da viga. A ancoragem é um dos principais requisitos para melhorar a aderência e a transmissão dos esforços de cisalhamento entre a interface do reforço e do concreto (BOYD 2000).

Não foram encontradas na literatura, até a conclusão deste trabalho, pesquisas relacionadas, diretamente, ao efeito de escorregamento da interface entre a lâmina de reforço e a ancoragem. A referência mais próxima na literatura (HOLLAWAY e MAYS, 2003; BOYD, 2000) se faz através de recomendações acerca da importância da ancoragem transversal em reforços externos, como forma de aumentar a dissipação da energia de adesão na interface do reforço com o elemento de concreto.

Deve ser reiterado que é imprescindível realizar a retirada de excesso de pasta superficial das faces onde o reforço e a ancoragem serão colocados, para evitar que a fratura ocorra nessa região.

A extensão do elemento, o modo como o carregamento se distribui ao longo do mesmo, a existência, ou não, de protensão e o modo como o elemento está apoiado ou ligado ao outro elemento, contribuem para que os resultados experimentais sejam afetados em relação a casos reais. Conhecendo esse comportamento é possível aumentar o reforço externo nessas regiões.

Os esquemas são resultantes de observações realizadas em experimentos com vigas submetidas à flexão. A Figura 41 “a” e “b” apresenta o esquema de atuação dos esforços entre as ancoragens e o reforço e como se desenvolvem em cada situação.

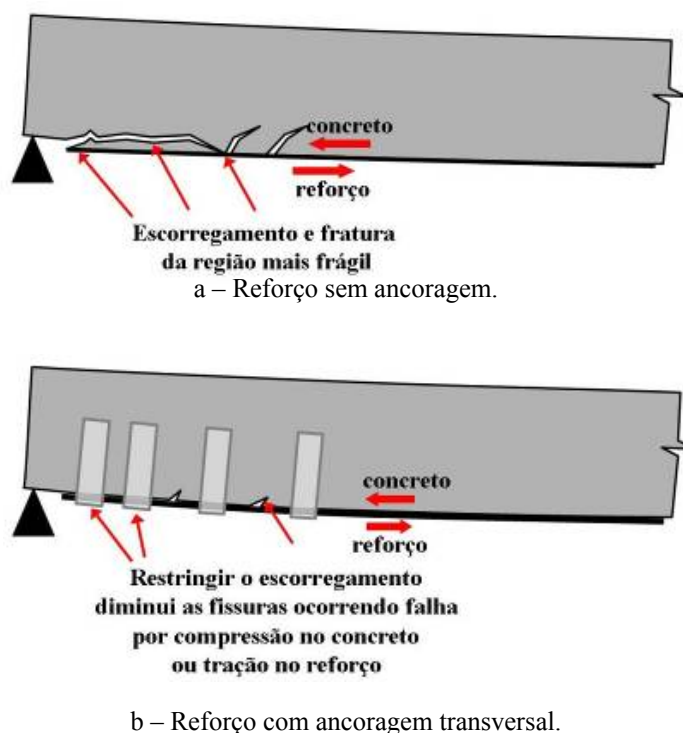


Figura 41 “a” e “b” – Tendência de ruptura com e sem ancoragem transversal.

Deve ser reiterado que esse comportamento merece maior quantidade de pesquisas para se compreender mais profundamente os efeitos secundários das tensões sobre o reforço, a ancoragem, o polímero adesivo e a interface, especialmente os efeitos combinados de cisalhamento e flexão na zona de transição.

Paralelamente a essa pesquisa, vem sendo estudado o reforço de três vigas de concreto já ensaiadas nos domínios 2, 3 e 3-4, por Justo (2006), para testar métodos de ancoragem e tipologia de reforço pré-fabricados em **GFRP**, compostos por perfis pultrudados.

Estão sendo analisados através dos aplicativos ANSYS® e FEMAP®, por Ortenzi (2007), geometrias que tenham comportamento mecânico e de aderência satisfatórios na simulação, para posteriormente serem utilizadas como reforço nas vigas ensaiadas.

Espera-se obter resultados comparados para verificar o comportamento de vigas que atingiram os estágios 3 e 4, e verificar em que grau pode ser considerada essa recuperação, através de perfis pultrudados de **GFRP**, assim como quais os níveis de aderência atingidos na interface do reforço e do elemento estrutural.

A Figura 42, em seguida, mostra o resultado de um dos ensaios realizados por Boyd (2000), em que foi feito o reforço externo com GFRP, sendo uma barra inferior ancorada por fibras projetadas com 3,5 mm de espessura.

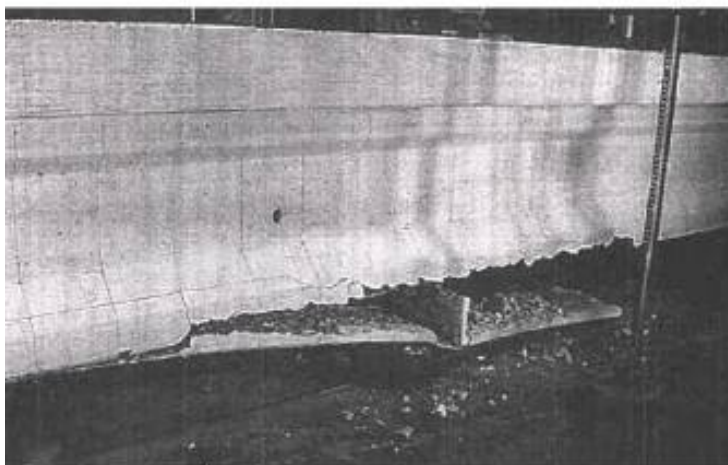


Figura 42 - Ensaio de flexão em viga recuperada com reforço externo em GFRP
Fonte: BOYD (2000)

2.4.7.8 Modelo Desenvolvido pelo NPL - UK (1999)

Esse modelo tem como base vários outros modelos sistematizados para cada análise. Para o critério de tensões limites, o modelo adota o princípio probabilístico já presente nas diversas normas para materiais tradicionais.

Além disso, mostra a importância da idealização da estrutura ou reforço, natureza da estrutura, finalidade, vida útil, máximo desempenho da estrutura, máxima economia, máxima durabilidade e melhor aplicabilidade.

Pelo exposto, trata-se de um modelo de projeto iterativo e estatístico. As variáveis envolvidas e as possíveis soluções se refletem em:

- Liberdade ao projetista para desenvolver o projeto da melhor forma;
- Exigência de profundo conhecimento das alternativas de materiais;
- Exigência de profundo conhecimento dos métodos de aplicação;
- Exigência de bom conhecimento da disponibilidade dos materiais selecionados;
- Criar qualquer elemento estrutural sob medida para cada caso sem que isso se reflita em variação de custos.

Já foi exaustivamente mencionado, neste texto, a necessidade de se conhecer e saber fazer uso das diversas tipologias de mantas e tecidos existentes no mercado.

O modelo de cálculo exemplificado anteriormente não considera esse aspecto de forma direta, uma vez que, feito o ensaio de tração, pode ser obtida a tensão limite do compósito, a deformação e o módulo correspondentes ao tipo de laminado idealizado.

Normalmente, aquele modelo leva a um superdimensionamento excessivo da estrutura.

Quando se trata de um casco de embarcação impactando contra uma onda, fala-se em ações dinâmicas de grandes amplitudes, ciclos variáveis e tensões e acelerações variáveis. Nesse caso, qualquer superdimensionamento pode ser insuficiente. A situação se equivale às situações de sismos para as edificações.

Em relação ao modelo proposto em NPL (2000, 2005), o dimensionamento se faz através da teoria de estados limites, pela seguinte relação:

$$S(x_{Li}\gamma_{FLi})\gamma_{F3} < R(x_{Gi}, x_{Mi} / \gamma_{Mi}) \quad \text{Eq. (46)}$$

e:

$$\gamma_m = \gamma_V \gamma_E \gamma_t \quad \text{Eq. (47)}$$

O conjunto de solicitações S deve ser menor que a capacidade resistente da estrutura R e as variáveis são:

x_{Li} = As variáveis de carregamento (soma das ações);

x_{Mi} = As variáveis dos materiais (fibra e matriz);

x_{Gi} = As variáveis de geometria do elemento;

γ_{FLi} = São os fatores parciais de segurança associados;

γ_{F3} = Somatório dos fatores de segurança parcial de cada eixo principal;

γ_{Mi} = Fator parcial de segurança dos materiais (fibra e matriz);

γ_m = Fator parcial do material, igual à soma dos fatores a seguir;

γ_V = Fator de probabilidade de falha por variabilidade do material;

γ_E = Fator de efeitos higrotérmicos que afetem o material;

γ_t = Fator de probabilidade de falha por fluência e idade do material.

No caso do modelo acima, percebe-se que todo cálculo está baseado em ensaios de caracterização dos materiais constituintes. Sendo assim, o projetista deve realizar

algumas seleções preliminares, de acordo com sua experiência ou, então, valer-se dos modelos de limite de falha por ruptura dos compósitos para criar duas ou três alternativas estruturais e após caracterizá-las, por meio dos ensaios necessários.

2.4.7.9 Modelos de Análise de Falha por Ruptura

Qualquer tipo de **GFRP** é, precisamente falando, anisotrópico. A complexidade de tratamento e de predição desses materiais torna difícil seu dimensionamento preliminar valendo-se de métodos simplificados que não sejam computacionais.

Outra dificuldade ocorre ao tratar o **GFRP** relacionando as ações térmicas e de fluência. Segundo a literatura (MEYERS, 1999; VANALLI, 2004), o comportamento desses materiais é visco-plástico. De fato, quando o polímero utilizado como matriz vai se aproximando da T_g , os compósitos entram numa região de resposta às ações que poderia ser nomeada como “**ZTR**”, ou **Zona de Transição entre Regimes**, pois o material deixa de ter comportamento elasto-plástico e passa a assumir o visco-plástico.

A influência dessa região é dependente do tempo, da temperatura como função do tempo e das propriedades dos materiais e das características de cada material constituinte do compósito. Nota-se aqui a influência exercida pela micromecânica dos materiais na mecânica do compósito, onde se faz necessário a aplicação dos modelos reológicos associados a cada comportamento.

Simplificando a análise para o regime elasto-plástico ou para o visco-plástico, torna-se mais fácil garantir, através das propriedades dos materiais utilizados, que o componente ou elemento estrutural estará atuando no **ELS**, em um ou outro regime, de acordo com os requisitos de projeto.

No caso de elementos estruturais, é fundamental que o material se mantenha no regime elasto-plástico. Para isso, três modelos de falha por ruptura são bastante disseminados:

- TSAI-HILL;
- TSAI-WU.

O modelo Tsai-Hill (1968 apud VANALLI, 2004), ficou conhecido por esse nome por se tratar de uma adaptação feita por TSAI (1968) para placas ortotrópicas no

modelo desenvolvido por HILL (1948), o qual foi uma extensão do modelo isotrópico de von Mises⁹.

A Equação 48 mostra a relação inicialmente proposta por von Mises. Essa equação determina a tensão máxima, através do somatório dos mínimos quadrados dos tensores de tensão nas três direções principais, não obrigatoriamente alinhadas aos eixos. Esse modelo é largamente utilizado para análise de falha por ruptura em materiais com comportamento isotrópico, como ligas metálicas homogêneas, por exemplo.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad \text{Eq. (48)}$$

Onde,

σ_v = Tensão máxima atuante tri-axial;

σ_1 = Tensão máxima em relação a x ;

σ_2 = Tensão máxima em relação a y ;

σ_3 = Tensão máxima em relação a z .

Para o caso de uma análise bidimensional, A Figura 43, em seguida, descreve a comparação entre os estados de Cortante Máxima (proposto por Tresca¹⁰) e o de Energia de Distorção Máxima, difundido por von Mises, para o caso bidimensional. O modelo equivalente para análise de estruturas de concreto é o círculo Mohr-Coulomb.

É perceptível, que o critério de cortante máxima (Tresca) é mais conservador que o critério de falha por tensão axial máxima (von Mises), uma vez que a região prismática é circunscrita à elíptica. Ainda que a teoria de von Mises tenha sido desenvolvida para materiais metálicos, sua adaptação se mostrou aplicável em compósitos de fibra em matrizes poliméricas.

⁹ Richard Edler von Mises (1883 – 1953) – Cientista de origem Austro-Húngara (atual Ucrânia), realizou pesquisas no campo da aerodinâmica, dinâmica dos fluidos, probabilidade, entre outras. Disseminou o critério de análise de tensão máxima de escoamento para materiais isotrópicos dúcteis (origem atribuída a Maxwell em 1865, conhecida também por Maxwell-Huber-Hencky-Mises).

¹⁰ Henri Edouard Tresca, (1814 – 1885) – engenheiro mecânico francês, considerado o pai da teoria da plasticidade. Sua teoria é a principal fonte das demais desenvolvidas.

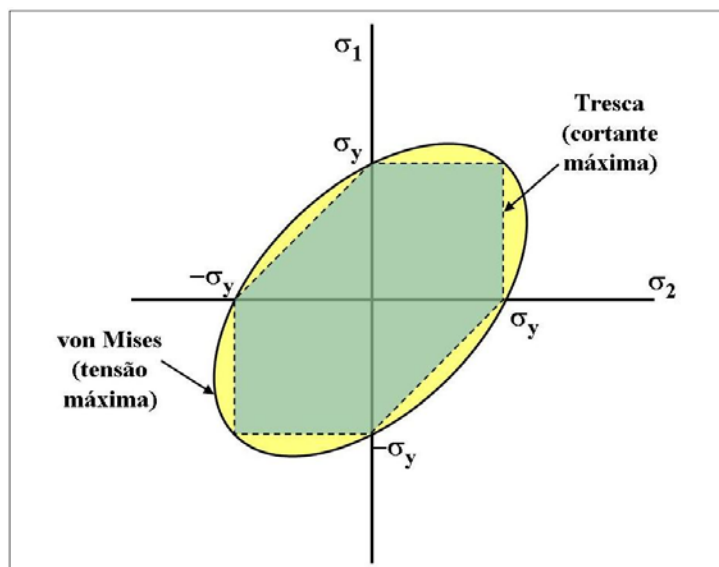


Figura 43 – Região de atuação das tensões máximas e cortantes máximas – caso bidimensional – Fonte (Wikipedia: www.wikibooks.org – acesso 14/01/2007)

A Equação 49 apresenta o modelo TSAI-HILL. Esse critério se baseia na análise de uma lâmina ortotrópica no estado plano de tensão. Portanto: $\sigma_3 = \tau_{31} = \tau_{23} = 0$, em que a direção principal 1 é a direção da fibra de reforço e assumindo também, que as resistências ao escoamento do modelo segundo HILL (1986, apud VANALLI, 2004), sejam substituídos pelas resistências ao escoamento da lâmina, pela seguinte substituição:

$Y_1 = s_L, Y_2 = Y_3 = s_T, Y_{12} = s_{LT}$, chegando a:

$$\frac{\sigma_1^2}{s_L^2} - \frac{\sigma_1 * \sigma_2}{s_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{s_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{s_{LT}^2} = 1 \quad \text{Eq. (49)}$$

Onde,

σ_1, σ_2 = Tensões atuantes nas direções x e y , respectivamente;

τ_{12} = Tensão de cisalhamento referente a xy ;

s_L, s_T, s_{LT} = Resistências características longitudinal, transversal e de cisalhamento do laminado, respectivamente, obtidas nos ensaios.

Finalmente, Equação 50 é o modelo, ou critério, de cálculo para o limite de falha do material compósito, referente a múltiplas lâminas (camadas) e múltiplas direções,

podendo ser generalizado para o caso de uma única lâmina. Esse modelo foi desenvolvido por Tsai & Wu (1971, 1974), como método de previsão e influência das diversas lâminas em relação à linha neutra e o somatório do efeito das ações no conjunto laminado. Esse modelo parte do pressuposto de que o encruamento é isotrópico e a lei de fluxo é não associativa, em regime elasto-plástico.

$$\sigma_x \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_y \left(\frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) + \frac{\sigma_x^2}{(X_t X_c)} + \frac{\sigma_y^2}{(Y_t Y_c)} + \frac{\tau_{xy}^2}{S^2} + F_{xy} \sigma_x \sigma_y = 1 \quad \text{Eq. (50)}$$

Onde,

σ_x = Tensão atuante na direção x ;

σ_y = Tensão atuante na direção y ;

X_t = Tensor de tração em relação a x (operador vetorial)

X_c = Tensor de compressão em relação a x ;

Y_t = Tensor de tração em relação a y ;

Y_c = Tensor de compressão em relação a y ;

τ_{xy}^2 = Tensão de cisalhamento em relação ao plano xy ;

S = Resistência característica ao cisalhamento puro;

F_{xy} = Tensor somatório das resistências características biaxiais em x e y , obtido a partir de ensaios biaxiais de tração em que $\sigma_x = \sigma_y$.

2.5.1.10 Modelos de Dimensionamento e Análise Computacionais

Nos últimos anos, está crescendo o desenvolvimento da análise computacional voltada para aplicações estruturais dos compósitos. Inúmeros métodos numéricos surgiram beneficiados por novas estações de trabalho que operam sistemas operacionais multiplataforma e processamento em 64 bits, que dobra a capacidade e velocidade de cálculo.

Ao se trabalhar com múltiplas *plies* ou camadas o cálculo estrutural dos compósitos se torna muito complexo, pois as matrizes formadas são de terceira dimensão. Apesar disso, os aplicativos de análise matricial podem resolver com extrema rapidez um

sistema dessa natureza. Contudo, é necessário dotar os programas de mecanismos de cálculo iniciais.

A forma usual para utilizar as vantagens da computação é a discretização dos elementos a serem analisados (VANALLI, 2000; TITA, 2002). Essa discretização pode ser realizada pelo AEF/MEF (Análise por Elementos Finitos / Modelagem por Elementos Finitos), pelo AEC/MEC (Análise por Elementos de Contorno / Modelagem por Elementos de Contorno) ou ainda, pelo AVF/MVF (Análise por Volumes Finitos / Modelagem por volumes Finitos).

A análise é a aplicação das condições e ações as quais um determinado elemento existente está sendo submetido e deseja-se obter sua capacidade, através de uma simulação da situação, ou condição real da peça. Por outro lado, a modelagem, se refere à criação de um novo elemento, através de aplicativos específicos para, então, simularem-se as condições ou capacidade máxima resistente desse elemento e a capacidade em situação de serviço, com as variáveis requeridas, como situações de sismos, vibrações e outras dinâmicas ou estáticas.

Cada um dos métodos descritos são modelos de aproximação de cálculo que possuem abordagens diferenciadas para resolver um mesmo problema inicial, isto é, obter, a partir de subdivisões (discretizações) de uma geometria complexa em inúmeras geometrias simples, que estão interligadas por uma continuidade estrutural, chamada de **NÓ**. Essa divisão é denominada de *mesh*, ou malha, na qual os elementos podem ser bidimensionais (MEF; MEC) ou tridimensionais (MVF). Podem ainda ter geometria triangular ou retangular, conforme a geometria e complexidade da estrutura a ser analisada.

Cada face de cada elemento atua como se fosse uma barra e cada vértice, ou **NÓ**, pode ser considerado como um apoio ou engaste. Esses, por sua vez, são responsáveis pela transferência das condições de equilíbrio das ações atuantes no primeiro elemento, para o elemento seguinte e, assim, sucessivamente, até que se cubra toda a malha gerada no elemento estrutural a ser estudado.

A seguir apresenta-se uma lista de alguns dos principais aplicativos de modelagem disponíveis no mercado:

- SIMULIA (ABAQUS) – (www.simulia.com);
- FEMAP – (www.femap.com);
- ALGOR – (www.algor.com);
- ANSYS – (www.ansys.com);
- NASTRAN – (www.nastran.com);

- TQS – (www.tqs.com.br);
- CYPECAD – (www.cype.com).

Em seguida, apresenta-se alguns autores que abordam o estudo da teoria e método de modelagem aqui descrito com maior profundidade, alguns de forma genérica, outros específicos para área de estruturas:

- SAVASSI, Walter (2000);
- ASSAN, Aloísio Ernesto (2003);
- SORIANO, Humberto Lima (2002);
- OCHOA, O. O. & REDDY, J. N. (1992);
- LIU, G. R. & QUEK, S. S. (2003).

2.4.7.11 Outros Modelos de Dimensionamento e Análise

Existem diversos outros modelos de dimensionamento, ou guias de recomendações, elaborados por diversas entidades, em vários países. Alguns deles se referem apenas ao cálculo do **GFRP** (para reforços externos), enquanto outros tratam das estruturas (para reforços internos). Apresenta-se, a seguir, a listagem dos guias ou normas utilizados com maior frequência:

- Design Manual 2001 – ISIS Canada (2001);
- 440R-96: Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures - Reapproved 2002 – ACI (2002);
- 440.4R-04: Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons – ACI (2004);
- 440.3R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures – ACI (2004);
- 440.1R-06: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars – ACI (2006);
- 440.2R-02: Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures – ACI (2002);
- Engineering and Design Guidance– COMPOSITES MATERIALS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES – U.S. Department Of The Arm (1997);
- USDEF – U. S. Department of Defense – PMCM – Polymer Matrix Composites Materials Handbook – V.1 to 5 (2002);

- ISE – Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre Composite Reinforcement – ISE (1999);
- BS EN 14364:2006 (aborda princípios diversos para FRP);
- NPL – National Physics Laboratory – Design Principles and Guideline in GRP – UK (2005);
- Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials – JSCE (1998);
- Guidelines for Retrofit of Concrete Structures – JSCE (1999);
- Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets – JSCE (2000).

3. TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Neste item serão abordadas as diversas técnicas de aplicação dos dois tipos de compósitos vistos no decorrer do texto. Inicialmente serão vistas as técnicas de aplicação ou produção de elementos ou reforços em **GRC** e, posteriormente, serão vistas as técnicas de aplicação e produção de elementos ou reforços em **GFRP**.

Partindo do pressuposto que os materiais já estão caracterizados, as estruturas devidamente calculadas, são necessárias abordar as técnicas de aplicação desses materiais.

3.1 TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DO GRC

O concreto reforçado com fibras pode ser aplicado quase da mesma maneira que o concreto convencional. Algumas diferenças existem em relação ao tempo e velocidade de mistura da pasta, controle do fator água / cimento e controle da dispersão das fibras na matriz.

Caso seja utilizado na produção de componentes pré-fabricados os procedimentos de fábrica são idênticos aos demais realizados com o concreto normal. Algumas recomendações são feitas pela FIB (1998) em relação ao controle de qualidade e retirada de amostras para ensaios. Também são descritos procedimentos de testes de “SLUMP” um pouco diferenciados do teste usual, já consagrado. Outro ensaio feito no local da obra ou em fábrica, é o controle da distribuição e quantidade de fibras dispersas na pastas. Esse ensaio também é descrito pela FIB (1998).

Foi executada uma obra de edificação residencial com 18 pavimentos na Nova Zelândia. Toda vedação foi executada com painéis de **GRC**, em substituição à alvenaria. Os painéis vieram da fábrica com acabamento superficial, primer e primeira demão de tinta. Todos os caixilhos e instalações foram executados pelo fabricante dos painéis de acordo com os projetos. A fixação e transferência das ações de vento e outras foram garantidas através das ligações painéis – lajes – vigas – pilares, por meio de trilhos de fixação metálicos presos à estrutura. A Figura 44, a seguir, mostra parte da edificação.



Figura 44 – Edificação construída na Nova Zelândia em 2003.

Fonte: GRCA (2005)

No caso de **CGFRP** – Concreto projetado reforçado com fibras, o equipamento utilizado é o mesmo para a projeção de concreto com fibras metálicas. A técnica de aplicação também é a mesma, contudo, deve ser observado o tempo de deposição entre camadas e a pressão de aplicação do jato, para não romper as fibras por impacto com a superfície que receberá o tratamento.

A Figura 45, na seqüência, mostra esse tipo de equipamento sendo utilizado para recobrir uma parede de blocos de concreto.



Figura 45 – Aplicação de CGFRP sobre alvenaria.

Fonte: GRCA (2005)

3.2 TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DE GFRP

As técnicas descritas a seguir independem do tipo de fibra que está reforçando determinado polímero. Salvo alguns procedimentos intermediários, seja de preparação de superfícies, seja relacionados ao ferramental ou a forma de aplicação, o que for detalhado neste item vale para quase a totalidade dos polímeros termofixos abordados neste texto.

Os métodos de aplicação, ou técnicas de aplicação serão relacionados seguindo uma ordem dupla de valores.

Primeiramente, pelo custo de aplicação e junto com esse critério o de facilidade e mobilidade de operação. Portanto, cada uma das técnicas subseqüentes pode desde já serem subentendidas como de maior complexidade de execução, maior custo e menor flexibilidade de mobilização que a anterior. Apesar disso, nem sempre a técnica subseqüente representará, obrigatoriamente, **menor custo global**.

Outros fatores, ou aspectos, em relação aos elementos a serem reforçados, ou aos componentes a serem produzidos podem, eventualmente, influenciar na composição final dos custos.

A hierarquia aqui descrita serve apenas como indicativo inicial, ou ponto de partida para o projetista iniciar sua análise, não devendo, contudo, se ater a uma ou outra técnica sem suficiente domínio do conjunto de procedimentos ou processos construtivos que terá que realizar para atingir os resultados esperados.

Ao executar o reforço por cintamento de pilares de um viaduto, não basta conhecer a melhor técnica e o menor custo direto, se os custos de paralisação para executar o reparo, ou o de mobilização de equipamentos teriam custo global superior que outra técnica inicialmente mais cara e menos usual. Cabe aos projetistas estarem atentos a esses requisitos que não fazem parte direta do dimensionamento ou outra fase de projeto.

A tecnologia de aplicação do **GFRP** depende dos fatores a seguir:

- Método de execução de peças estruturais inteiramente em **GFRP**;
- Método de aplicação de reforços externos em **GFRP** sobre outros materiais, como concreto, alvenaria ou madeira;
- Elementos estruturais em concreto reforçado internamente com GFRP;
- Grau de serialização de uma mesma peça ou componente;
- Dificuldades de mobilização de equipamentos;

- Qualificação da mão de obra operacional e de responsáveis pela execução.
- Conhecimento, por parte dos projetistas das qualidades, benefícios e limitações dos materiais;
- Comparação de custos totais, incluindo manutenções posteriores, paralisações e durabilidade no decorrer da vida útil da estrutura.

Quaisquer obras podem ser construídas inteiramente em **GFRP** sem que seja necessário o uso de outros materiais estruturais.

Os projetistas precisam conhecer o comportamento estrutural desse material, saber tirar proveito da geometria dos elementos estruturais e dimensioná-los adequadamente, como qualquer outra estrutura. Devem, além disso, ter o entendimento de qual sistema construtivo é o mais apropriado e que melhor irá cumprir suas funções ao longo do tempo. No caso de obras de infra-estrutura esse pensamento é vital.

O primeiro ponto que se deve conhecer é a relação entre as propriedades mecânicas de um laminado em relação a outros materiais, já descritas anteriormente.

O segundo ponto se refere às técnicas de fabricação ou aplicação seja de elementos executados em **GRC**, seja de elementos fabricados em **GFRP**, ou ainda, reforços em **GFRP** aplicados em elementos estruturais preexistentes.

Cada tipologia requer procedimentos de execução diversos, dos quais a maioria será detalhada a seguir.

3.2.1 LAMINAÇÃO MANUAL

Este processo é o mais difundido e mais utilizado em todo mundo na execução de peças e partes que não exijam grande volume de produção.

Na laminação manual são utilizados instrumentos simples como: rolos de pintura, pincéis e roletes. Esses últimos são ferramentas utilizadas para extrair as bolhas de ar que ficam presas entre a resina e as fibras e que devido à viscosidade não são eliminadas a não ser por compactação ou pressão.

Não se verificou aplicações em construção civil, pela laminação totalmente manual, no que se refere à deposição da fibra sobre a superfície do elemento estrutural a ser reforçado. A menos que o trabalho ocorra em locais de difícil acesso para o equipamento de projeção.

Estruturas de madeira de coberturas, vigas e pilares em pontes, reforços em alvenarias danificadas e outros casos especiais. Além de reforços em estruturas danificadas, obras parcial ou totalmente construídas com uso de **GFRP** podem ser vistas na literatura (ACI, 1996, 2002; HOLLAWAY, 1978).

As vantagens desse processo são:

- Baixo custo de mão de obra;
- Baixo investimento em moldes ou fôrmas;
- Baixo investimento em ferramental;
- Controle preciso do posicionamento e direcionamento das fibras;
- Permite ter maior controle de espessura da fibra que a laminação a pistola (projeção), quando se utilizam mantas;
- Não há limitação de extensão ou área a ser laminada, desde que se promova a laminação por faixas, obedecendo aos transpasses das fibras;
- Aceita geometrias de graus de complexidade relativamente difíceis;
- Espessuras mínimas de 0,5 mm +/-0,2 mm e máximas, teoricamente, ilimitadas;
- Uso de ferramentas manuais permite execução em locais sem energia elétrica;
- Menor dispersão de monômero no ambiente, comparado ao sistema “*spray up*”.

Em contrapartida, as desvantagens desse método são:

- Maior tempo gasto para preparar o material (medir, cortar, e aplicar);
- Maior número de pessoas para realizar a compactação das camadas aplicadas;
- Maior tempo gasto entre cada camada aplicada, uma vez que as mantas vêm em rolos e devem ser cortadas e aplicadas, ao contrário dos fios projetados;
- Maior percentual de perda de material, por haver sempre alguma rebarba nas bordas (não é o caso para a construção civil);
- Menor uniformidade na distribuição da resina sobre a fibra de vidro, pois a impregnação é feita com rolos de pintura.

As Figuras 46 e 47 mostram esquematicamente esses locais. Posteriormente, no item sobre aplicações será visto um exemplo de reforço de estruturas de madeira.

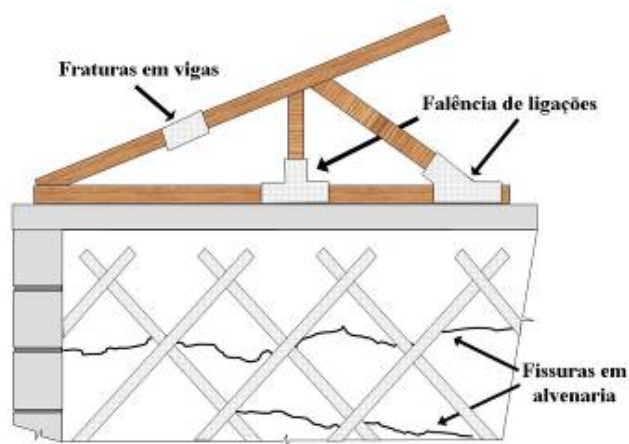


Figura 46 - Reforços de recuperação estrutural em construções antigas ou danificadas por sismos.



Figura 47 - Reforços em pilares, vigas e tabuleiros de pontes e viadutos.

Ao curar, o laminado se torna um material translúcido, com a coloração do polímero que serviu de matriz. Caso seja requerido, é possível adicionar pigmentos para tornar a superfície opaca, adicionar aditivos anti-chamas e contra incidência de raios ultravioletas, conforme o tipo de aplicação, ou executar pintura superficial após a cura total da peça.

A Figura 48 mostra um detalhe do processo de impregnação e moldagem manual, sobre uma fôrma aberta, de uma Manta 450 g/m² de fibras descontínuas. A parte mais escura (circundada em vermelho) à esquerda é a camada inferior já consolidada através da roletagem, enquanto a parte mais clara próxima ao pincel é a fibra ainda não impregnada.



Figura 48 – Execução manual do laminado de GFRP
Fonte: Owens Corning (1992)

A Figura 49, na seqüência, mostra um, entre vários, modelo de rolete utilizado para consolidar a fibra e retirar as bolhas de ar que ficam presas sob o laminado. É possível observar o formato tipo “dente de serra” dos fios, para facilitar o processo.



Figura 49– Roletes utilizados para extração de bolhas dos laminados

Os passos descritos a seguir servem para o sistema de laminação manual e laminação por projeção, ou “*spray up*”, para sistemas de cura a frio, isto é, à temperatura ambiente. O operador do equipamento, ou o laminador, deve estar apto a seguir esses procedimentos, além de interferir e orientar os ajudantes no processo de retirada das bolhas e compactação do laminado:

- Verificar a umidade relativa que não deve ser superior a 65 %, caso o procedimento seja executado em local desprovido de controle de temperatura e umidade;

- Verificar a temperatura e o período do dia previsto (manhã ou tarde) para iniciar o trabalho, uma vez que até às 13 horas, a tendência da temperatura no Brasil é aumentar e, após esse horário, diminuir;
- O responsável pela obra deve prover e exigir o uso dos Equipamentos de Proteção Individual – **EPI**, especialmente óculos, luvas de borracha nitrílica e máscaras para vapores e poeiras tóxicas descartáveis ou permanentes;
- Preparar a superfície que receberá a matriz, limpando totalmente poeiras, partículas soltas ou mal aderidas e graxas, utilizando escova de aço e a solução adequada para o substrato (ácido fraco, acetona, outro solvente) e, se necessário, cloro para retirar fungos e mofo, lavando com água corrente em seguida;
- No caso de necessidade de lavar a superfície, é necessário aguardar a secagem completa e verificar a umidade superficial, que não deve ser maior que 2% para resinas poliéster ou 4% para epóxi;
- Medir e separar a quantidade necessária de **manta** e **tecido** (definidos no início do texto) que serão utilizados, de acordo com as dimensões da área a ser reforçada ou da peça a ser executada;
- Para cada 100 m² de área equivalente¹¹ é necessária uma equipe de 3 pessoas, sendo um laminador e dois ajudantes;
- O tempo de gelatinização (início da cura) e da cura é função de várias variáveis como temperatura, umidade, espessura da camada laminada, teor de catalisador e teor de acelerador presentes na resina. Dessa forma, o projetista ou o responsável pela obra devem prover todos os dados necessários no momento da operação;
- A velocidade e experiência da equipe irão determinar a quantidade máxima de laminação para cada etapa;
- Os limites mínimos e máximos para cada tipo de catalisador e cada tipo de resina são fornecidos pelo fabricante de resina ao vender o produto, mas, em geral, para catalisadores **MEKP**, os mais utilizados em resinas poliéster, varia entre 0,5% e 1,5% em relação ao peso de resina;
- **Nunca misturar catalisadores diretamente a aceleradores**, pois a reação é altamente exotérmica, causando ferimentos graves, até morte, caso atinja algum dos compartimentos de resina ou catalisador;

¹¹ Área equivalente se refere a área total laminada, multiplicada pelo número de camadas de fibra aplicada. Ex.: uma área de 20 m² recebe 4 camadas de fibra. Isso totaliza 80 m² de área equivalente, pois o trabalho executado se repetiu quatro vezes.

- Sempre preparar a quantidade de resina para cumprir etapas parciais e não para a área total a ser laminada, para não haver perda de material. No caso de laminação a pistola não há esse inconveniente, uma vez que resina e catalisador estão em compartimentos separados;
- Ao final de cada etapa **SEMPRE** executar a remoção dos restos de resina impregnados nas ferramentas, pois as mesmas se inutilizam após poucos minutos da cura, sem possibilidade de reaproveitamento;
- Preferir iniciar o trabalho de forma que seja possível recobrir toda a área num único dia;
- Serviços em locais abertos, como vigas e pilares de pontes e estruturas ao ar livre devem ser recobertos com película de polietileno para evitar acúmulo de poeira ou água, logo após a gelatinização da resina.
- No caso de equipamento de projeção, o mesmo deve ficar protegido com alguma cobertura provisória para proteger os materiais e, especialmente, o rolo de *roving*;
- Devem ser evitadas sobras de resina catalisada em compartimentos destinados à aplicação, assim, procurar despejar as sobras antes de catalisar, sobre um filme plástico ou caixa com serragem.

3.2.2 LAMINAÇÃO POR PROJEÇÃO (OU SPRAY UP)

O sistema de laminação por projeção é uma otimização do sistema manual, que permite maior rendimento na aplicação das camadas aleatórias, substituindo as mantas. Nesse sistema são utilizados os *rovings*, que são aplicados por um equipamento à base de ar comprimido. O equipamento consiste em uma plataforma sobre rodízios onde ficam os reservatórios de resina e de catalisador, o suporte para o rolo de *roving* e um braço articulado com alças por onde o fio é conduzido até o picotador rotativo.

O próprio equipamento também suporta as mangueiras de ar e transporte de resina e catalisador. Os fios são impulsionados sobre o jato de resina e ao caírem já são impregnados com a mesma. Nesse processo a experiência do laminador é fundamental para a homogeneidade das camadas e regularidade de espessura de cada camada.

A cada processo deve ser feita a regulagem do fluxo de fibra e de resina, no interior de um saco plástico para que sejam pesadas.

Esse procedimento deve ser feito pela projeção da fibra dentro do saco plástico por 20 segundos, posteriormente, a projeção da resina, por 15 segundos e, finalmente,

a projeção do catalisador, também por 15 segundos. Pesam-se os conteúdos de cada material e calculam-se as proporções.

Estando dentro dos limites mínimo e máximo recomendados, inicia-se o processo de laminação, sem necessidade de nova aferição, até que se troque o tipo de resina ou o equipamento seja removido para limpeza.

Outro cuidado a ser tomado é em relação ao comprimento das fibras, que deve estar entre 45 mm e 55 mm, para que sejam conduzidas adequadamente pela pistola.

Fios mais curtos tendem a se dispersar com o jato de ar e fios mais longos tendem a cair mais rapidamente, antes de atingir o molde ou peça a ser reforçada, ou não são suficientemente impregnados com o jato de resina que está sendo pulverizado sobre as fibras.

Atualmente, os novos equipamentos não imprimem o ar junto com a resina, mas exercem pressão no interior do reservatório e a resina é lançada sob pressão.

Esses sistemas têm como grande vantagem evitar que o monômero de estireno contido no polímero seja disperso na atmosfera antes de cumprir seu objetivo que é o de reconstruir as cadeias químicas.

Os sistema “*airless*” também diminui a emissão de monômetro no ambiente, o qual é um produto altamente prejudicial quando aspirado por longos períodos. Assim, esses sistemas diminuem consideravelmente sua emissão no local de trabalho, causando menor índice de intoxicação e de poluição.

A Figura 50, a seguir, mostra o detalhe do aplicador desse equipamento.

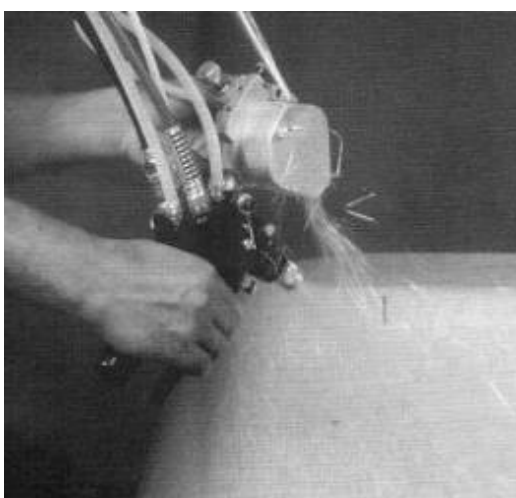


Figura 50 – Detalhe da pistola de laminação por projeção (*spray-up*)
Fonte: Owens Corning (2002)

Como descrito, essa técnica de aplicação elimina a deposição das mantas, contudo, caso seja necessária a aplicação de reforço de tecidos unidirecionais ou bidirecionais esses devem ser aplicados manualmente. Da mesma forma, a consolidação com roletes deve ser feita como no método manual, sendo que a impregnação pode ser feita com o mesmo equipamento de projeção, sem utilizar o gatilho que aciona o tracionador e picotador de fibras.

A maior vantagem desse sistema é a aplicação sucessiva de camadas em áreas de quaisquer dimensões, desde que seja possível compactar a fibra depositada. Também é vantajoso em relação à molhabilidade das fibras que ocorre de forma mais homogênea que na laminação manual.

Pode se considerar o método de aplicação a pistola como uma racionalização da aplicação manual. Nele, a perda de material não utilizado não ocorre, uma vez que a resina só é misturada ao catalisador no momento da projeção sobre a fibra e esta última recobre estritamente a região que se deseja reforçar ou recobrir.

Algumas exigências em relação à saúde humana e poluição devem ser atendidas ao se operar esse sistema de laminação. Os vapores tóxicos do monômero contido nas resinas devem ser evitados e para tanto o uso de Equipamentos de Proteção Individual – **EPI** – é obrigatório. Além disso, o ambiente deve ser perfeitamente isolado do exterior, possuir sistema de exaustão e filtragem dos vapores e partículas de vidro que ficam em dispersão no ambiente de aplicação.

3.2.3 PULTRUSÃO

Pultrusão é um sistema similar à fabricação de perfis metálicos por extrusão. O nome é outro anglicismo que deriva do verbo “*to pull*” – puxar. Isto porque o material não é empurrado para a ferramenta de perfilação, mas, ao contrário, os perfis são puxados, através de tratores que controlam também parte da continuidade do processo de fabricação dos elementos.

Na pultrusão, as fibras utilizadas são os *rovings* diretos, isto é, não são torcidos. Os rolos são acomodados em prateleiras e seu número varia de acordo com a geometria do perfil, espessura e dimensões. Em geral são utilizados de 9 a 25 rolos simultaneamente.

A Figura 51, adiante, mostra o esquema de produção de perfis pultrudados. Pela Figura pode ser visto o trajeto dos fios, os quais são reunidos dentro do tracionador

inicial e passam por uma bandeja contendo o polímero já catalisado. Após a passagem pela bandeja de impregnação os fios são reunidos conforme a ferramenta de conformação existente na câmara de cura. A ferramenta é substituída de acordo com os perfis que se deseja produzir. Posteriormente, após a saída da câmara de cura os perfis são cortados em dimensões padronizadas ou especiais conforme solicitação do cliente.

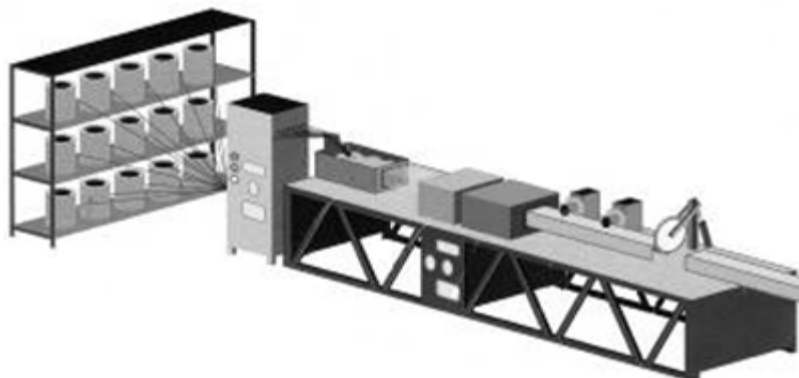


Figura 51 - Modelo esquemático de uma linha de produção de pultrusão
Fonte: ENEMAC (2006)

A Figura 52 mostra uma variedade de perfis com as mais diversas geometrias produzidos em todo o mundo. Esse sistema de fabricação possibilita obter os melhores teores de fibra em relação ao peso total, podendo atingir até 80 % em peso. Para isso, a qualidade do polímero é de extrema importância, bem como as ferramentas de modelagem e de tracionamento das peças, as quais devem ser projetadas para não causar microfissuras no perfil, logo após a saída do sistema de cura. Através do extrator.



Figura 52 - Perfis produzidos pelo processo de pultrusão
Fonte: Saint-Gobain – VETROTEX (2003)

Já foi visto que na pultrusão os fios são tracionados e passam por um banho de resina já catalisada sendo levados ao conformador. Nesse ponto os perfis adquirem a geometria da ferramenta e são conduzidos à câmara de cura que é um sistema de aquecimento homogêneo com controle de temperatura de acordo com a catalisação.

O tempo de transição dentro do sistema é controlado pela velocidade do equipamento, que é ajustada de acordo com a necessidade e em função do volume da peça que está sendo produzida.

Pela cura à quente, a polimerização é completa não necessitando realizar pós-cura. Porém, apresenta um maior custo com energia.

Outros elementos e peças não estruturais como esquadrias de janelas podem ser fabricados com perfis pultrudados.

Já existem no Brasil empresas que fabricam diversos tipos de perfis pultrudados com finalidade estrutural, para uso em construção civil. Esse tipo de perfil é dimensionado pelo mesmo critério de dimensionamento de perfis metálicos. Os fabricantes possuem as propriedades características dos perfis e podem ainda fornecer perfis especiais com geometrias complexas, de acordo com a necessidade e especificação de projeto.

3.2.4 OUTRAS TÉCNICAS DE APLICAÇÃO

As demais técnicas de fabricação ou produção de compósitos de polímeros reforçados com fibras são as seguintes:

- **Enrolamento Filamentar (Filament Winding)** – Não é adequado para ser utilizado como método de reforço em elementos estruturais prontos, mas somente para fabricação de peças ou componentes novos, como postes, tubulação de dimensões médias que exijam alta pressão ou estacas circulares, por exemplo. Seu maior campo de aplicação na construção civil ocorre na fabricação de tubulações para finalidades diversas.

Assim como no sistema de pultrusão é utilizado o *roving* direto que é tracionado por um sistema que se movimenta paralelamente ao molde, enquanto esse vai girando fixado a um eixo rotativo de velocidade de rotação coordenada com a velocidade de translação do cabeçote que fornece a fibra.

Essas velocidades determinam a conformação do enrolamento da fibra sobre o molde. Após o término, o molde é retirado do eixo e desmontado internamente, sendo que em alguns casos, os moldes funcionam como fôrmas perdidas, isto é, se tornam parte do elemento final. A Figura 53 apresenta o processo de produção de vasos de pressão

(cilindros de extintores). Notar a coloração amarela que demonstra a aplicação de fibra aramida e não da fibra de vidro (ou carbono). Uma das aplicações recentes desse sistema, no Brasil, é a fabricação de tanques de GNV (Gás Nacional Veicular), para equipar táxis, devido à resistência e baixo peso. Outro aspecto é que são equipamentos que operam por **CAD/CAM** (Computer Aided Design; Computer Aided Manufacturing), via **CNC** (Controlador Numérico Computadorizado);

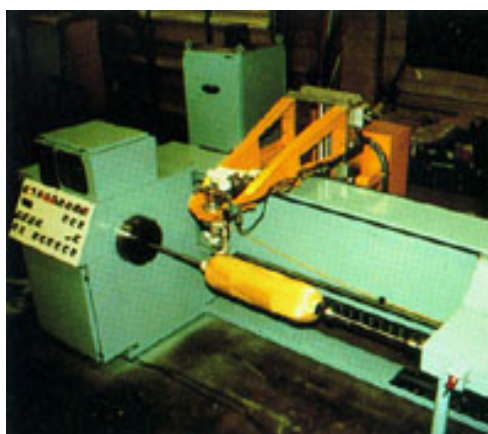


Figura 53 - Equipamento de Enrolamento filamental – *Filament Winding*
Fonte: Advanced Composites (2006)

O processo de enrolamento filamental garante teores de vidro de até 80 % em relação ao peso total do laminado, garantindo elevada resistência, da mesma forma como o sistema de pultrusão. A geometria tubular é outro fator que aumenta substancialmente a rigidez do elemento. Pilares e estacas são os elementos estruturais que melhor se adaptariam a esse sistema, fora os demais já citados. O investimento inicial em equipamentos similares para grandes extensões é muito alto, por essa razão no Brasil a construção civil ainda não utiliza produtos derivados desse processo. Contudo, pesquisas para produzir um equipamento de enrolamento filamental estão em andamento no Brasil;

- **Centrifugação (Centrifugal Engine)** – processo em que as fibras e a matriz são lançadas no interior da estrutura tubular e a rotação causa a consolidação entre fibra e matriz. É utilizado para fabricação de componentes circulares de grandes diâmetros, como tubulações de esgoto, tanques estacionários ou silos de armazenagem. A desvantagem desse sistema é o alto investimento em equipamentos, em geral de grandes dimensões. No Brasil ainda são fabricados tanques estacionários pelo processo manual ou a pistola. Outra possibilidade de aplicação desse sistema é na construção de passagens para pedestres sob rodovias e sistemas de canalização de córregos.

- **BMC – *Bulk Molding Compound*** – sistema que utiliza moldes metálicos e cura a quente, por prensagem, utilizado para fabricar peças de grande volume de serialização, como partes de veículos, por exemplo. Na construção civil esse sistema se aplica para fabricação de partes e produtos não estruturais, de alto volume de produção;
- **RTM – *Resin Transfer Molding*** – sistema similar ao utilizado nas máquinas injetoras, também utilizado para partes e componentes de grande volume de serialização e peças não estruturais.

Dos outros métodos vistos, para a aplicação ou fabricação de elementos compósitos, o enrolamento filamentar é o que poderia ser utilizado para fabricar reforços externos de pilares circulares de concreto, fôrmas permanentes circulares e perfis para estruturas tridimensionais, ou treliças espaciais. A diferença entre uma e outra forma de aplicação será a espessura final do elemento e sua complexidade. Ressalta-se que deve ser avaliado cada caso de aplicação das técnicas descritas acima para se obter a melhor relação de custo versus benefício em termos globais.

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

Este capítulo apresenta as aplicações correntes e as pesquisas já realizadas visando ampliar a introdução das fibras de vidro, seja em matrizes cimentícias, seja em matrizes poliméricas, na construção civil, bem como diagnosticar os principais problemas e obter soluções que permitam utilizar esses materiais.

4.1 APLICAÇÕES EM GRC

Inúmeras indústrias no mundo vêm pesquisando soluções em compósitos voltadas para a construção civil. Paralelamente, diversas pesquisas têm sido conduzidas para compreender melhor o comportamento desses materiais sob diversos enfoques.

Triantafilou (1998) demonstrou as potencialidades e benefícios do uso de **GFRP** e **CFRP**, como reforço estrutural em vigas de concreto e madeira, em pilares de concreto e em alvenaria para suportar os esforços de cisalhamento. Os modelos de cálculo utilizados para o esforço cortante junto aos apoios das vigas de concreto e junto às bases dos pilares são análogos aos das treliças clássicas, já utilizadas para o concreto armado.

Nos Estados Unidos, o U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY (1997; 2002) possui seu próprio guia de recomendações para aplicação de **GFRP** em construção civil, como reforço estrutural ou elementos construtivos estruturais. O mesmo ocorre com outros órgãos ou entidades normalizadoras em diversos países, como já descrito.

Estruturalmente, os painéis auto-portantes pré-moldados de fachada são os elementos mais executados com esse material. Outra aplicação bastante comum é através de projeção de concreto em paredes de túneis degradadas que necessitem reforço estrutural.

Hoje a Europa e os Estados Unidos vêm substituindo o uso das fibras de aço pelas fibras de vidro e poliméricas, na recuperação de túneis, visando melhorar o comportamento em situação de incêndio

A Figura 54 apresenta um exemplo dessa aplicação.



Figura 54 – Túnel construído com GRC projetado sobre concreto armado com GFRP
Fonte: HUGHES BROTHERS, Inc. (2005)

No Brasil foram construídos painéis estruturais pré-moldados em concreto com fibras para a construção do Metrô de São Paulo. Contudo, são experiências de aplicação raras e isoladas no país, em relação ao **GRC**.

A Figura 55, a seguir, exemplifica a flexibilidade de utilização do **GRC** na construção civil. Pelo exemplo, nota-se a versatilidade de geometria dos painéis pré-fabricados em **GRC**, bem como a complexidade da fôrma utilizada.

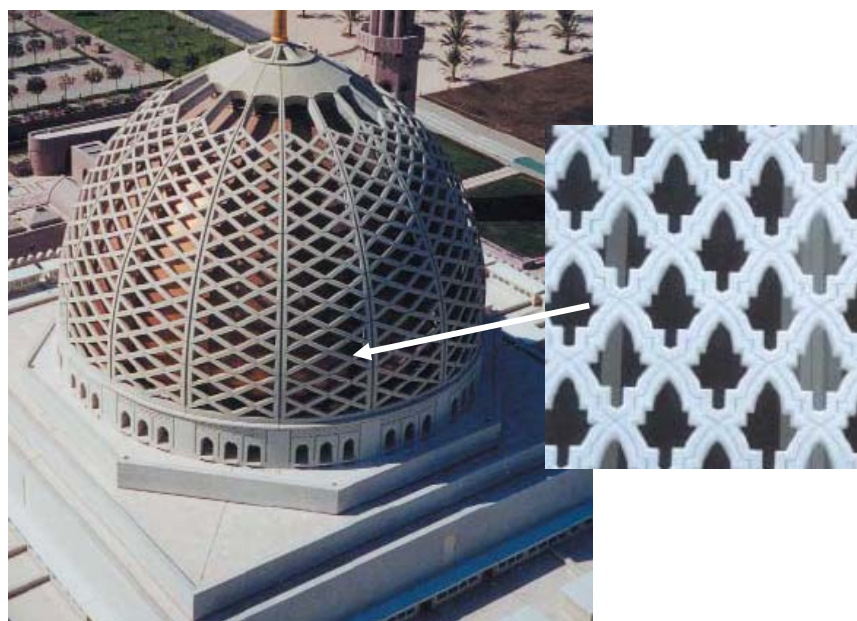


Figura 55 – Mesquita em Omã – Construída com painéis em GRC
Fonte: Saint-Gobain – VETROTEX (2006)

O principal problema a ser contornado em relação a esse material é a utilização de fibras de vidro tipo **AR** (álcali resistente), para evitar ataques químicos de álcalis pelos sais presentes na reação de cura do concreto, como os diversos sulfatos.

As fibras vendidas hoje são importadas e seu custo final não se deve somente aos impostos incidentes mas, igualmente, ao seu preço, uma vez que é monopólio internacional.

Alternativas para minimizar esse efeito já foi descrita em parte, anteriormente. Foi utilizada como adição às fibras de vidro tipo **E**, o recobrimento com látex-estireno-butadieno, conforme analisado por Peruzzi (2002), criando uma película de revestimento que protege a interface entre fibra e pasta cimentícia.

Esse processo evita a degradação das fibras nas primeiras idades quando o teor de água ainda é elevado e continua reagindo com grande intensidade e gerando os compostos alcalinos nocivos ao vidro.

Na Europa, Japão, Austrália e Estados Unidos o uso do **GRC** é freqüente e está presente em diversos tipos de obras. É muito utilizado como painéis de fachada, substituindo com vantagens a alvenaria convencional, uma vez que podem ser executados centenas de metros quadrados de vedação por dia.

No Brasil a maior dificuldade está justamente em adquirir as fibras de vidro em base de zircônia, que são mais resistentes aos álcalis. Em contrapartida, as pesquisas quase na obtiveram sucesso em relação à disseminação de informação técnica para que fosse possível absorver essa tecnologia pelo mercado.

A Figura 56 “a” e “b”, mostra a execução de laje de piso de alta resistência em um estacionamento e em um piso de indústria na Inglaterra.



“a” – Contra-piso externo em garagem

“b” – Contra-piso externo em indústria

Figura 56 “a” e “b” – Execução de laje e piso com **GRC**

Fonte: GRCA (2004)

O mercado nacional está produzindo banheiros modulados em **GRC**. Segundo o fabricante a tecnologia é de origem italiana e já montou mais de 9 mil unidades desse produto para edificações residenciais, hotéis e escolas.

A Figura 57 “a”, “b” e “c”, a seguir, mostra a forma como é montado o banheiro na obra, detalhe de um banheiro social e detalhe de um banheiro de escola, todos produzidos e instalados em obras no Brasil.



“a” – área interna de banheiro pronto

“b” - banheiro sendo posicionado na obra



“c” – Detalhe de um banheiro escolar

Figura 57 “a”, “b” e “c” – Banheiros prontos pré-fabricados em GRC. Fonte PAVI do Brasil (2006)

Nesse tipo de equipamento só é necessário realizar as conexões externas de água e esgoto nas esperas já montadas com a unidade. É possível fabricar a mesma unidade destinada à cozinhas ou áreas de serviço para edificações residenciais.

A Figura 58 apresenta outro exemplo de aplicação muito difundida na Europa. São painéis destinados a servir de fôrma perdida em estruturas de concreto moldadas no local. Do mesmo modo, também são executadas obras com painéis incorporados às lajes para servir de fôrma e acabamento da face inferior, contribuindo ainda na consolidação dos elementos de laje alveolar.

Nota-se o posicionamento dos painéis, os quais servem de fôrma perdida para a base do tabuleiro de uma ponte na Inglaterra.



Figura 58 – Painéis **GRC** usados como fôrma perdida em pontes
Fonte: GRCA (2005)

O uso do **GRC** tem se desenvolvido em dois subsistemas específicos nos últimos anos, sendo eles:

- Painéis estruturais de fechamento vertical interno ou externo;
- Painéis arquitetônicos, estruturais ou não, de fachadas.

Em relação ao primeiro subsistema, a principal finalidade das fibras é contribuir para a distribuição das tensões atuantes sobre os painéis em virtude das ações térmicas.

Os elementos constituídos por painéis pré-moldados são, via de regra, mais esbeltos que outros elementos de concreto convencional. Dessa forma, os recobrimentos das armaduras se encontram no limite mínimo de norma. Em países de clima tropical, como o

Brasil, o efeito da radiação solar chega a atingir temperaturas superiores a 50° C na superfície do elemento. Quando ocorrem inversões térmicas, as chuvas impactam os painéis com temperaturas inferiores a 15 ° C. essa amplitude térmica de 30 °C causam retração instantânea do material constituinte do painel, isto é, o concreto e o aço. Esse processo, ao longo do tempo causa fissura superficial que podem atingir a armadura e comprometer o elemento.

A aplicação das fibras de vidro, nesses casos, contribui para dissipar a energia desenvolvida pela retração, causando uma redistribuição não linear.

Sabe-se que o encaminhamento provável das fissuras, no concreto, ocorrem na zona denominada **intersticial**, ou **zona de transição** entre a pasta cimentícia e os agregados (METHA & MONEIRO, 1994), considerada a região de menor resistência mecânica, como já descrito anteriormente.

Com as fibras essa região torna-se menos frágil e aumenta seu engrenamento micromecânico, através do efeito de pino, também já comentado. Dessa forma, amplia a resistência e tenacidade do concreto quando submetido a variações bruscas de temperatura, decorrentes de ações climáticas.

O efeito de engrenamento não é obtido somente com as fibras de vidro, contudo, o uso das fibras metálicas não impede a corrosão e o avanço da fissuração caso iniciada, ao contrário das fibras de vidro.

As fibras aramida, por outro lado, são inapropriadas para uso “in natura” sem revestimento de polímeros, uma vez que são mais susceptíveis à absorção de água.

As fibras de carbono possuem propriedade de condutividade elétrica e, assim, podem formar pilhas eletrolíticas similares às fibras metálicas. Ainda que não sofram corrosão, transferem a variação potencial para as barras de aço no interior dos elementos.

As aplicações do **GRC** estrutural ou arquitetônico não se limitam aos painéis lisos. Podem receber aplicações de acabamento posteriores, como aplicações de ladrilhos, plaquetas cerâmicas ou efeitos de textura.

O refino e detalhamento é função do nível de valor agregado que a edificação terá, isto é, qual o usuário final e qual a finalidade de uso da mesma.

A Figura 59 mostra uma edificação onde os painéis são estruturais e contribuem com o restante da estrutura para a estabilidade da edificação.

A Figura 60 apresenta painéis curvos com aberturas de janelas incorporadas e textura colorida.



Figura 59 – GRC associado à armadura estrutural em painéis estruturais
Fonte: (FERREIRA, 2007)



Figura 60 - Painéis curvos com aplicação de textura colorida.
Fonte: (FERREIRA, 2007)

A Figura 61 “a” e “b” mostra um edifício onde toda fachada é constituída de painéis arquitetônicos pré-moldados, compondo o átrio, janelas e platibandas da edificação, com o detalhe de uma das peças aplicadas na fachada. Nota-se a possibilidade de inserção de diversos tipos de relevos nas fôrmas, criando efeitos decorativos diversos.



“a” - Aplicação em fachada arquitetônica



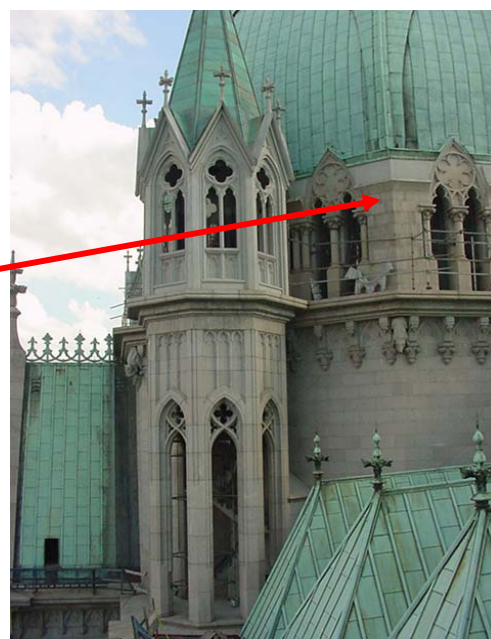
“b” - detalhe de um dos elementos

Figura 61 “a” e “b” - Painéis de fachada arquitetônicos
Fonte (FERREIRA, 2007)

A Figura 62 “a” e “b”, em seguida mostra como elementos de restauração arquitetônica na Catedral da Sé, São Paulo, onde foram aplicados elementos de restauro em diversas partes daquele edifício histórico, em substituição à argamassa e estuque deteriorados.



“b” - detalhe do painel de fachada aplicado



“a” - Elementos de restauração em edifícios históricos

Figura 62 - Restauração estrutural e da fachada - Catedral da Sé – SP
Fonte (FERREIRA, 2007)

4.2 APLICAÇÕES EM GFRP

As aplicações dos **GFRP** na construção civil são, atualmente, muito diversificadas, não se restringindo às aplicações estruturais. Os principais usos do **GFRP** se dão de três formas diversas:

- Como elemento estrutural autônomo, como perfil “H”, “T”, tubular, retangular ou circular, componentes de um sistema estrutural totalmente constituído em **GFRP**;
- Como reforço externo, sob a forma de laminados, para a recuperação estrutural de estruturas degradadas ou abaladas por impacto, agressões de agentes bacteriológicos ou químicos e abalos sísmicos.
- Como reforço interno, sob a forma de armadura estrutural, para estruturas de concreto que exigem certos requisitos de resistência, eficiência e durabilidade e, ao mesmo tempo, elevado isolamento eletro-magnético
- Na fabricação de inúmeros componentes não estruturais utilizados na construção civil, como piscinas, caixas d’água, cubas de pias, tanques, *shafts*, banheiras e tubulações para diversos fins – este item não é abordado neste trabalho.

4.2.1 APLICAÇÕES COMO ELEMENTOS ESTRUTURAIS AUTÔNOMOS

Existem diversas aplicações em que elementos estruturais totalmente fabricados em **GFRP** possuem maior vocação que o concreto ou o aço. Regiões costeiras, indústrias químicas, de processamento de sal e obras de infra-estrutura de saneamento são alguns exemplos.

Laboratórios para pesquisas avançadas com semi-condutores têm sido construídos dessa forma. Uma das obras mais representativas é a casa transparente, cuja estrutura foi totalmente construída a partir de perfis pultrudados em **GFRP** e a vedação de toda construção foi com painéis de policarbonato.

Essa construção foi realizada pela empresa americana de computadores – APPLE, com a finalidade de estudar os efeitos das emissões de ondas eletromagnéticas.

A Figura 63 mostra parte da edificação ainda em construção.



Figura 63 - Estrutura de GFRP recoberta com policarbonato
Fonte: Saint-Gobain – VETROTEX (2003)

Outra obra significativa, pelo vão acima de 150 metros, é uma passarela para pedestres construída na Irlanda em 1999.

A Figura 64 mostra parte da passarela. Toda estrutura é constituída de **GFRP**, exceção dos blocos sobre as estacas de fundação.



Figura 64 - Passarela para pedestres construída na Irlanda em 1999
Fonte: AMOCO - British Petroleum (1999)

O exemplo a seguir é outra passarela de pedestres construída no Reino Unido, finalizada em 2003, com vão de 78 metros, totalmente executada em perfis pultrudados e laminados de **GFRP**. A Figura 65 mostra a passarela já terminada.



Figura 65 – Passarela para pedestres construída no Reino Unido em 2005
Fonte COBRAE (2004)

O terceiro exemplo de construção de obras de infra-estrutura é a ponte denominada “West Mill”, também no Reino Unido, para transito de veículos. A Figura 66 “a” e “b”, apresenta a ponte logo após a inauguração e três anos após sua construção. As vigas tem a geometria de caixão e estão apoiadas nas extremidades das fundações. O Tabuleiro é revestido com uma capa asfáltica para prover a proteção contra o desgaste por atrito e aumentar a aderência dos pneus dos veículos.

“a” – 2003



“b” - 2005

Figura 66 “a” e “b” – Ponte “West Mill” Construída no Reino Unido
Fonte: ASSET (2006)

O quarto exemplo é a ponte “Tsukuyda” construída no Japão em 1999, com vão aproximado de 83 metros. A estrutura e o tabuleiro foram executados com compósitos de **GFRP**, com parte tendo sido utilizados compósitos híbridos de vidro e carbono. Segundo a JSCE – “*Japan Society of Civil Engineers*”.

A Figura 67 mostra a respectiva ponte.



Figura 67 – Ponte “*Tsukuyda*”
Fonte JSCE (2006)

Atualmente vem crescendo o volume de aplicação de **GFRP** na indústria sucro-alcooleira. Isso se deve a alguns fatores principais a saber:

- a) Maior resistência à corrosão, por parte da tubulação e estruturas de sustentação, construídas em **GFRP** quando comparadas com outros materiais usuais;
- b) Tempo de execução e de retomada das atividades por parte das indústrias;
- c) Flexibilidade de recuperação, recortes e emendas de tubulação.

Os perfis pultrudados sem dúvida estão entre os elementos pré-fabricados, os que permitem maior rapidez de montagem, refletindo no menor tempo de paralisação por parte de um setor ou da indústria como um todo.

A Figura 68, a seguir, mostra um exemplo de uma obra numa indústria desse porte executada no Brasil.

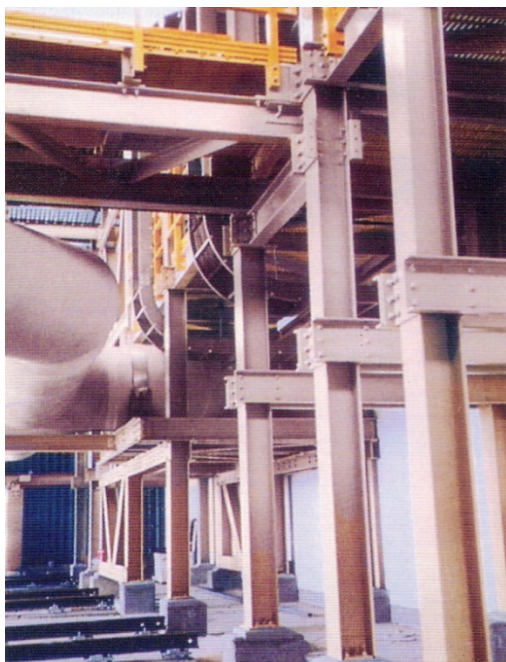


Figura 68 – Detalhe de estrutura totalmente executada com perfis pultrudados em **GFRP**
Fonte: ENMAC (2005)

4.2.2 APLICAÇÕES DE GFRP COMO REFORÇO EXTERNO

As aplicações de reforço de **GFRP** em vigas, pilares e lajes, podem ser divididas em duas formas distintas, a saber:

- Reforço externo pela aplicação de perfis pultrudados por adesão e laminação;
- Reforço interno, através de barras, em substituição ao aço.

Os reforços externos pela aplicação de **GFRP** por adesão de perfis ou tiras pré-impregnadas é prática corrente para a recuperação de pilares, alvenarias, vigas e lajes. Especialmente nos países onde há ocorrência de sismos, essa técnica vem sendo empregada como forma eficaz para recuperar rapidamente a estrutura sem que seja necessário proceder com a demolição, em muitos casos.

De acordo com Duthinih (1998), diversos procedimentos são recomendados para recuperação de vigas, pilares, lajes e alvenarias que sofreram impacto por abalos ou outros fenômenos. No caso dos pilares, são recomendadas três práticas descritas abaixo:

- Recobrimento com tecidos de **GFRP** aplicados no contorno;
- Recobrimento com tiras de tecidos ou “*rovings*” enrolados de forma helicoidal em torno do pilar;
- Aplicação pelo sistema “*spray-up*” diretamente no pilar.

A Figura 69 mostra a recuperação de um pilar de um viaduto no Estados Unidos, realizado em 2005.



Figura 69 – Pilar de ponte reforçado por GFRP por laminação manual helicoidal
Fonte: DENTON (2005)

Cada um dos métodos deve ser utilizado considerando-se a acessibilidade e a disponibilidade de energia local. Na Figura anterior, nota-se que o processo é manual, não necessitando de energia para execução. Por outro lado, é um processo em que devem ser utilizados maiores coeficientes de majoração devido à imperfeições de execução.

Em outro exemplo, a Figura 70 apresenta uma comparação entre um reforço com perfil pultrudado do tipo barra chata aderido inferiormente a uma viga.

O esquema mostra, no lado esquerdo da figura a pior forma de ancoragem, enquanto ao lado direito a melhor técnica. Nota-se que ao lado direito a ancoragem é feita por compressão do perfil através de parafusos.

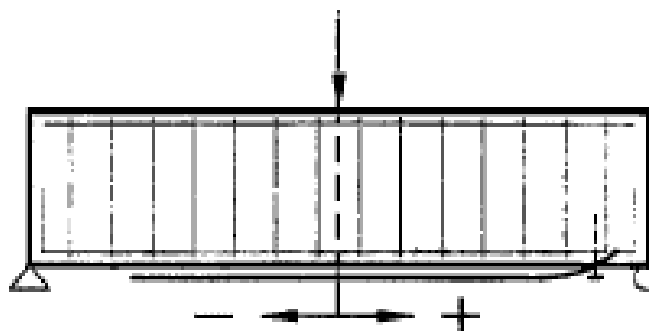


Figura 70 – Detalhe reforço externo com perfil GFRP para recuperar viga de ponte dos E.U.A
Fonte: NIST (1998)

A Figura 71 apresenta uma operação de reforço inferior de uma ponte nos Estados Unidos, realizada em 1999, para impedir continuidade de fissuras decorrentes de

impacto de cargas ou carrocerias de caminhões. Nota-se a seqüência de barras chatas dispostas paralelamente na parte inferior da laje. A aderência é realizada por 2 camadas, sendo uma entre a barra e o concreto e outra sobre a barra.



Figura 71 – Reforço executado com barras chatas híbridas de GFRP e CFRP em ponte nos EUA
Fonte: HUGHES BROTHERS Inc. (2006)

O exemplo a seguir demonstra a aplicação de reforço em alvenaria. Para isso, várias tipologias de reforço são possíveis. Desde a laminação de tecidos ou mantas manualmente, projeção de fibras picadas (“*spray-up*”), adesão de barras chatas, conforme o exemplo anterior e embutimento de barras circulares, similares às barras de aço estrutural.

Da mesma forma que a figura anterior, é aplicado o adesivo epóxi no sulco feito para abrigar os reforços. Posteriormente, o reforço é prensado contra o adesivo e o restante do sulco é recoberto com outra camada de adesivo para completar o processo.

Devem ser tomadas as precauções para que os rasgos sejam feitos da forma menos invasiva possível, uma vez que esses poderiam atuar como indutores de pontos de fratura no elemento.

No caso da Figura 72, a seguir, foi utilizado o último sistema descrito, o qual consiste em realizar um rasgo para impregnação com a resina epóxi.

Após esse procedimento deve ser realizada a limpeza e impregnação com o adesivo através de pistola ou espátulas.

Finalmente, é posicionada a barra e pressionada contra o adesivo manualmente ou por meio de um rolete de borracha rígida.



Figura 72 – Aplicação de barras circulares de GFRP como reforço estrutural em alvenaria. Fonte: HUGHES BROTHER, Inc. (2006)

Os reforços externos, pela facilidade de aplicação e rapidez de utilização da estrutura ou edificação, são muito utilizados nos outros países. No Brasil, alguns trabalhos têm sido realizados em viadutos de São Paulo, contudo, utilizando barras chatas de **CFRP**.

Esse tipo de reforço não fez parte das pesquisas realizadas para este trabalho, contudo, para maiores informações conta a bibliografia recomendada ao final do texto, onde é possível encontrar referências sobre esse assunto.

4.2.3 APLICAÇÕES DE GFRP COMO REFORÇO INTERNO

O segundo tipo de aplicação, isto é, de barras estruturais em substituição ao aço estrutural dentro do concreto, tem crescido muito nos últimos anos, especialmente em obras de infra-estrutura dos países mais desenvolvidos.

Uma das principais razões é o gasto com manutenção e recuperação estrutural de pontes e viadutos, assim como subsolos de edificações dos países de clima temperado.

Todos os anos, no inverno, é utilizado cloreto de sódio nas vias públicas para diminuir o efeito de derrapagem quando o gelo derrete. Esse sal penetra nas fissuras pré-existentes da estrutura e corrói o aço.

A solução mais eficaz e de menor custo encontrada foi substituir as armaduras de aço por armaduras em compósitos de **GFRP** ou outros híbridos.

A Figura 73 mostra algumas dessas barras. Os diâmetros típicos se assemelham aos diâmetros das barras de aço. Algumas delas são produzidas em fibra de carbono.

Numa indústria de microprocessadores nos Estados Unidos, as barras de **GFRP** substituíram as de aço, onde haveria influência de transferência de corrente elétrica pela estrutura, afetando a fabricação dos componentes eletrônicos, pelas descargas eletromagnéticas.

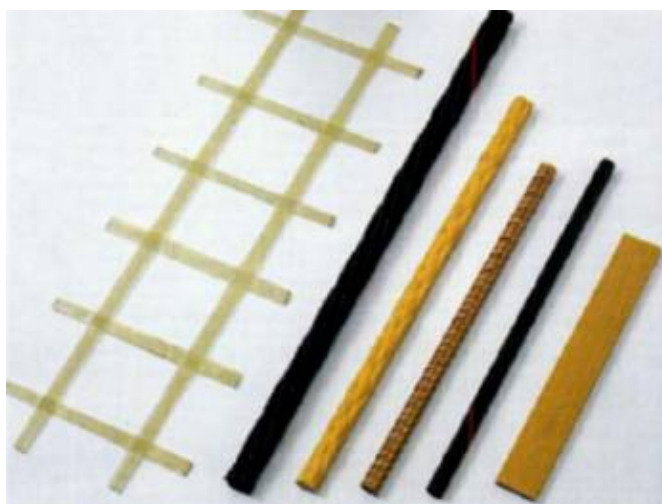


Figura 73 - Exemplo de barras estruturais e telas em GFRP e PRFC
Fonte: HUGHES & BROTHERS (2005)

Outras aplicações de armaduras constituídas de **GFRP** são para substituição do aço em estruturas de áreas de equipamentos de tomografia e outros similares em hospitais, onde foi constatado que a influência da energia eletromagnética em equipamentos dessa natureza afeta os resultados dos exames.

Muitos hospitais mais antigos dos Estados Unidos estão realizando reformas para retirada de fundações com armaduras de aço, por terem sofrido interferências eletromagnéticas em aparelhos de diagnóstico nuclear, extremamente sensíveis.

A Figura 74 apresenta o detalhe da execução de uma sapata de fundação de uma área de laboratórios de um hospital. É possível notar o transpasse entre a armadura vertical e a curvatura para a amarração posterior da laje de piso.



Figura 74 - Estrutura de fundação para laboratório de hospital com armadura de barras de GFRP – USA Fonte: HUGHES BROTHERS INC. (2001)

Não se tem notícia da aplicação comercial de armaduras de **GFRP** no Brasil, até 2007, apesar de existirem alguns fabricantes de elementos estruturais pultrudados desenvolvendo barras para reforços internos e pesquisas referentes a esse tema. Apesar disso, não foi possível encontrar, até o final da pesquisa, algum fornecedor que contasse com catálogos comerciais disponíveis para venda ou mesmo, os padrões de barras disponibilizados para clientes interessados, como é usual nos Estados Unidos e Canadá, por exemplo.

A seguir são apresentados alguns exemplos de aplicação de barras de **GFRP**, utilizadas em escala comercial no Japão, Europa, Estados Unidos e Canadá.

Pela pesquisa se constatou a existência de quatro grandes empresas que produzem barras para reforço estrutural em **GFRP**. A produção é similar às armaduras prontas de aço comercializadas no Brasil. Existem os modelos padronizados, mas são fabricadas de acordo com o projeto apresentado pelo cliente. Além disso, notou-se que as partes de curvatura complexa possuem duas tipologias de solução:

- As barras retas são amarradas aos trechos com as curvaturas por transpasses, sendo as partes fabricadas separadamente e de acordo com o detalhamento de projeto;
- As barras são confeccionadas em peças únicas e pré-formadas posteriormente numa segunda etapa do processo.

Em relação aos estribos, também notou-se duas soluções:

- Os estribos são fornecidos separadamente, como armadura pré-conformada de aço;
- Quando a geometria é mais simples, como pilares, os estribos são incorporados à armadura longitudinal, de forma monolítica.

A Figura 75 “a”, “b”, “c” e “d” apresenta diversos exemplos de estruturas ou armaduras fabricadas em **GFRP**, destinadas a usos diversos. Nota-se no detalhe da Figura 75 “b”, as barras devidamente dobradas. Essas dobras são realizadas em fábrica através do aquecimento e moldagem. O mesmo ocorre com estribos que não sejam incorporados por laminação nas barras longitudinais, mas amarrados com arame ou outro material como abraçadeiras de nylon de alta densidade.



a – Aplicação de barras de GFRP em cortina de concreto – Porto Rico



b – Detalhe de amarração de armadura de sapata



c – Detalhe de armadura em GFRP pré-fabricada – USA



d – Vista armadura de laje de ponte em **GFRP** com estribos consolidados à armadura principal.

Figura 75 “a”, “b”, “c” e “d” – Exemplos de aplicação de barras pultrudadas em GFRP
Fontes: Creative Composites Pultrusion (2004) e HUGHES BROTHERS INC. (2001)

Nos últimos anos é crescente o número de obras de infra-estrutura e de edificações que vêm fazendo uso dos perfis em **GFRP** e **CFRC**, notadamente nos Estados Unidos e Canadá.

A Figura 76 mostra toda armadura fabricada com barras e estribos em **GFRP**, formando uma única peça. Esse processo evita a mobilização dos estribos ao longo das barras longitudinais, evitando concentração de tensões por imperfeições de execução.



Figura 76 – Ponte construída em Michigan – EUA.
Fonte: HUGHES BROTHERS INC. (2001)

Outra aplicação que vem sendo experimentada, nos Estados Unidos, é a execução tabuleiros de pontes com diversos arranjos e sistemas construtivos mistos ou

híbridos. Pontes cujas vigas são em perfis pultrudados tipo “I”, enquanto a laje é executada com elementos de lajes alveolares de concreto protendido. Talvez essa tendência seja a mais razoável nos dias atuais.

Um aspecto importante a considerar, ao se trabalhar com sistemas estruturais híbridos e, especialmente, no caso do concreto e da fibra de vidro, é que o comportamento frágil do **GFRP**, no ELU, faz com que sejam dimensionados para atuarem do estágio 1 equivalente do concreto. No caso de obras de infra-estrutura, como pontes, os carregamentos serão dinâmicos e, dessa forma, o dimensionamento se faz através da deflexão máxima admissível utilizada em compósitos, geralmente limitada a 1/1000 do vão.

Sistemas híbridos, compatibilizando cada material onde eles terão seu melhor desempenho. A Figura 77 mostra um exemplo desse tipo de obra. Os avanços na tecnologia do concreto possibilitam que os elementos de laje durem mais. Outra característica importante, é que sendo pré-fabricados e simplesmente apoiados, a recuperação e substituição desses elementos é muito mais prática do que obras de concreto moldado no local.



Figura 77 – Ponte em sistema construtivo híbrido – GFRP e laje alveolar de concreto protendido
Fonte: CREATIVE PULTRUSIONS, Inc. (2005)

5. PESQUISAS RECENTES

Neste capítulo foram descritas as pesquisas mais atuais sobre o tema. Foram agrupadas com o mesmo critério dos itens anteriores. Inicialmente serão mostradas as pesquisas relacionadas ao **GRC** e na seqüência as pesquisas desenvolvidas com o **GFRP**. Também foram incluídas algumas pesquisas que relacionam ou comparam o desempenho entre alguns tipos usuais de fibras além das fibras de vidro.

Atualmente existem três grandes áreas de conhecimento para as quais as pesquisas têm se dirigido, não só relacionadas à construção civil, mas em outros setores produtivos, como indústria naval e aeronáutica.

A primeira área diz respeito ao aprofundamento da caracterização e comportamento dos compósitos, especialmente em aplicações críticas. Aqui se incluem o desenvolvimento de métodos numéricos e modelagem por elementos finitos.

A segunda área se refere aos estudos de durabilidade e qualidade dos produtos resultantes, enquanto a terceira área está focada nas alternativas que visem os processos menos invasivos ao ambiente, e soluções que sejam auto-sustentáveis.

Em relação aos avanços tecnológicos, pode ser afirmado que os modelos computacionais, cada vez mais sofisticados, garantiram, no decorrer da última década, um salto de qualidade e precisão dos cálculos. Projeto e manufatura por computador complementam o conjunto de processos que permite maior exatidão dimensional, menor número de falhas construtivas e melhor aproveitamento de material.

Na construção civil, à exceção da indústria de pré-moldados, esses avanços não foram alcançados, exceção feita às aplicações não estruturais de alguns segmentos específicos como hotelaria, onde são montados sistemas pré-montados de banheiros e paredes de gesso acartonado.

Ainda que pese o fato das práticas construtivas serem de baixa qualidade e produtividade, as pesquisas realizadas no Brasil também contribuem para que se possa conhecer melhor a interação entre as estruturas de concreto e os reforços em **GFRP**.

5.1 PESQUISAS REALIZADAS COM GRC

A utilização de fibras picadas, especialmente em pisos industriais, já é prática disseminada como solução para aumentar a durabilidade e resistência às vibrações e agentes agressivos. Contudo, no Brasil, ainda prevalece o uso de fibras metálicas. Isso pode

ser devido à falta de divulgação do produto no país, ao preço (por se tratar de produto importado) e à incerteza, por parte das construtoras, em reconhecer as situações em que o produto melhor se enquadraria. Outra hipótese igualmente válida é o desconhecimento do material, por parte dos projetistas, não indicando esse tipo de adição.

Em relação aos efeitos da adição de fibras no concreto, deve ser ressaltada a questão da trabalhabilidade, que deve ser controlada pelo uso de aditivos plastificantes, evitando o aumento do fator água/cimento na mistura, com conseqüentes perdas de outras propriedades, como diminuição da resistência e aumento da permeabilidade, por exemplo.

- Pesquisa apresentada por Denton (2005) demonstra o espalhamento das microfissuras no lugar de grandes fissuras localizadas, em modelos de vigas e painéis em concreto armado reforçadas com fibras de vidro picadas, as quais foram ensaiadas até o ELU.

O comportamento normalmente esperado para elementos confeccionados em **GRC** é o do espalhamento das fissuras, ocorrendo ainda multiplicação de pequenas fissuras descontínuas e com menores aberturas.

Dessa forma, maior número de fissuras em menor profundidade é altamente aconselhável, para evitar ataques externos às armaduras. As interrupções dos percursos das fissuras indicam que houve algum fator restritivo para a propagação da trinca.

Provavelmente as fibras tenham absorvida parte da energia e redirecionado as tensões naquelas regiões. Em geral, são elementos mais esbeltos com menor espessura de recobrimento.

Esses fatores devem ser considerados no momento de dimensionar esses elementos. Ensaio envolvendo fluência e ações climáticas são importantes para monitorar o comportamento ao longo do tempo, especialmente em idades mais avançadas.

A Figura 78, a seguir, apresenta um dos resultados desses ensaios.

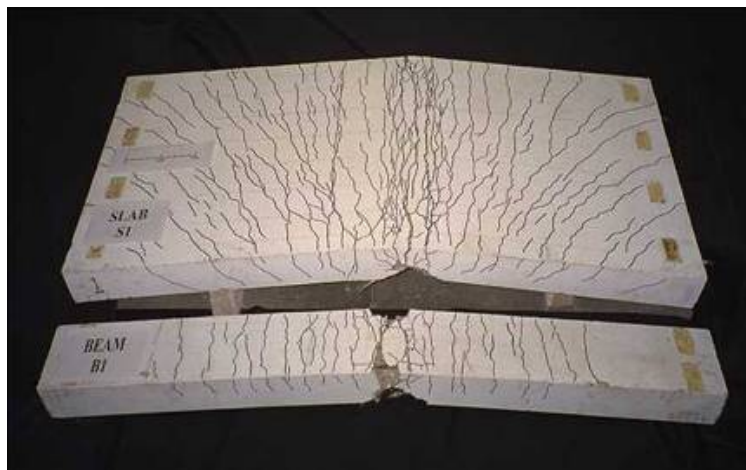


Figura 78 - Resultados de ensaios com painéis e vigas de **GRC**
 Fonte: DENTON (2005)

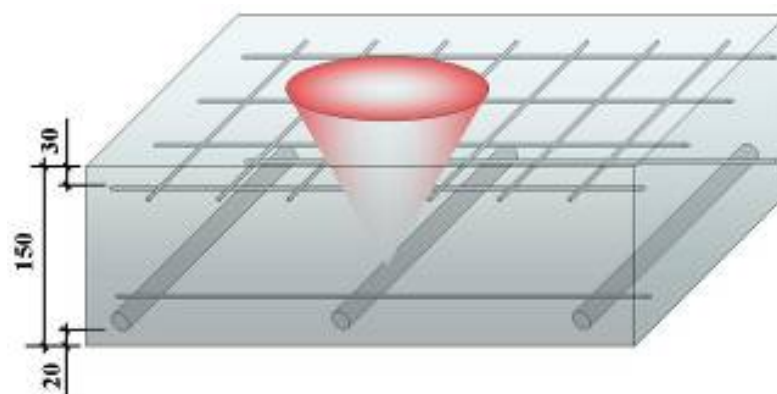
- Outra pesquisa envolvendo ensaios de flexão em duas direções em corpos de prova de painéis e ensaios de cisalhamento por punção, em lajes reforçadas com **GRC** ou com telas de **GFRP**, foi realizada por Mu & Meyer (2002), com análises comparadas de várias tipologias e três tipos de fibras.

No caso deste trabalho foram verificados os comportamentos das tipologias executadas com reforços de fibras picadas e telas de **GFRP** usadas em substituição das telas de aço. A característica inovadora dessa pesquisa está na utilização de fibras de vidro que são resíduos de outras indústrias e foram reaproveitadas sob a forma de fibras picadas.

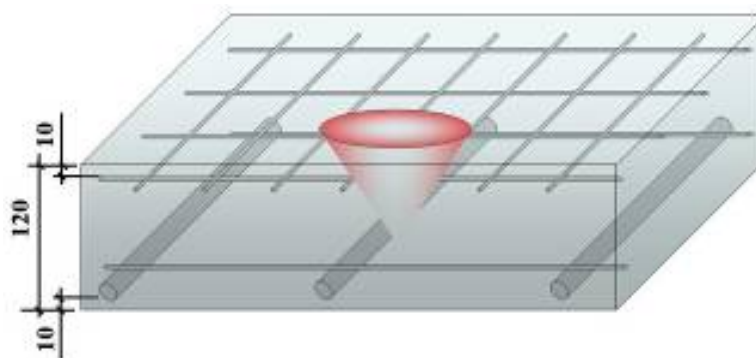
Foi ressaltada a importância que o efeito de punção passa a ter em chapas finas, uma vez que a possibilidade de diminuição dos recobrimentos da armadura reduz a espessura útil das peças (id. 2002).

Paralelamente, diminui a capacidade de absorção de energia gerada pelas tensões transversais, uma vez que em espessuras maiores, o cone virtual de distribuição das tensões transversais, ao atingir a armadura de pele já adquiriu uma área de distribuição maior do que seria para menores espessuras.

A Figura 79 “a” e “b” representa esquematicamente esse efeito para placas com espessuras de 200 mm e 140 mm, respectivamente.



a – Laje com recobrimento e capa convencionais mínimos



b – Laje com espessura e recobrimento reduzidos pelo uso de armadura não metálica

Figura 79 “a” e “b” - Cone de espalhamento da tensão de puncionamento de pilares em lajes.

Nota-se que a área de espalhamento das tensões para o caso de lajes delgadas é inferior à área de lajes convencionais.

Foram estudadas as variações no teor de fibras misturadas ao concreto, assim como a inserção de telas fabricadas em **GFRP**, em substituição às telas de aço. Nesse caso também foram ensaiadas algumas tipologias.

O fator água / cimento utilizado em todos os ensaios foi 0,35. A relação cimento agregado foi de 1:2. Foi substituído 15% do cimento equivalente ao CP III, por metacaulim para minimizar os efeitos da reação alcalina nas fibras de vidro.

Foi utilizado aditivo para melhorar a trabalhabilidade, em razão do reduzido fator água / cimento. Os autores relatam ainda, que corpos de prova prismáticos foram ensaiados à compressão aos 28 dias e apresentaram resistência média de 97,7 MPa.

Os corpos de prova para os ensaios de flexão foram elaborados em chapas quadradas com 154,00 mm de lado e 19,0 mm de espessura.

Para o caso das fibras picadas, essas foram dispersas na pasta na metade inferior das chapas na zona tracionada. Já para o reforço com telas, foram colocadas uma ou duas telas na face tracionada com recobrimento de 2,0 mm de concreto.

No ensaio de puncionamento foram utilizadas placas circulares de 127 mm de diâmetro com 19 mm de espessura. Os materiais se mantiveram inalterados.

Os autores afirmam que os resultados mostraram que as telas apresentam ganho superior de resistência em relação às fibras picadas em razão do alinhamento contínuo das fibras, da homogeneidade da distribuição e do aumento de aderência entre matriz e concreto.

A Figura 80 resume o comportamento de uma série de ensaios de flexão com as diversas tipologias.

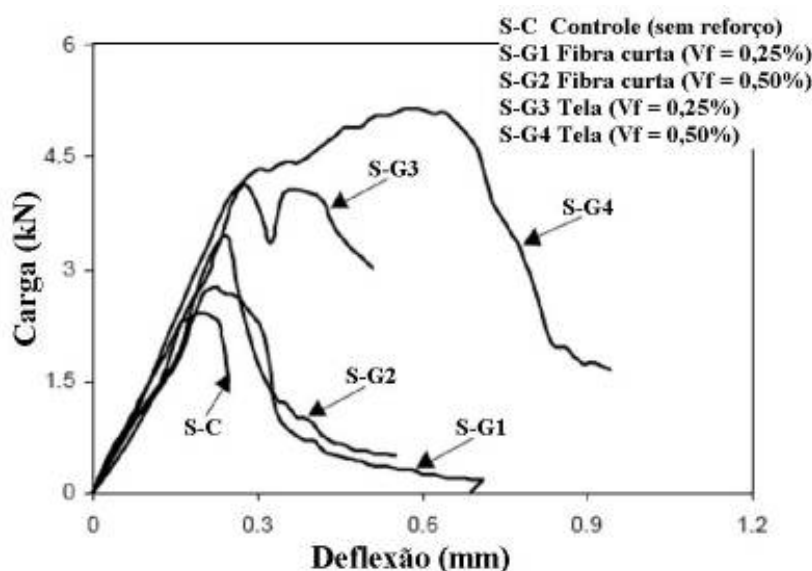


Figura 80 - Comportamento dos corpos de prova reforçados com fibra de vidro
Compilado de MU & MEYER (2002)

A Figura 81 retrata os efeitos nos corpos de prova para as tipologias ensaiadas e mostradas na Figura 80. É possível observar o maior espalhamento das fissuras no corpo de prova S-G 4, o qual suportou o maior carregamento entre as cinco amostras.

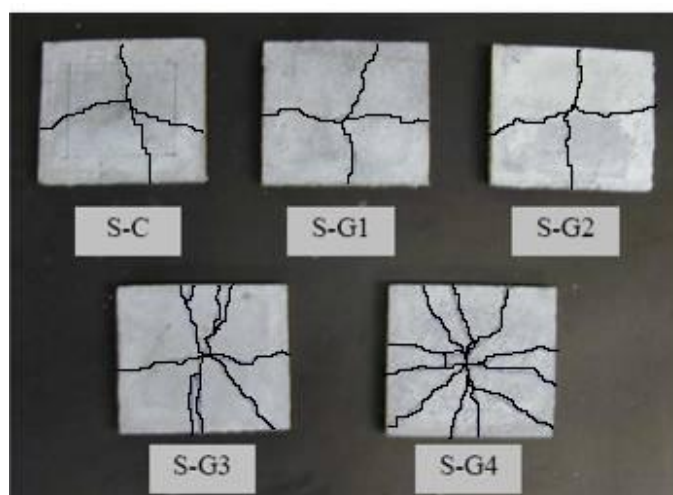


Figura 81 - Resultado dos ensaios de flexão biaxial para placas reforçadas com as tipologias descritas na Figura 72. Fonte: MU & MEYER (2002)

5.2 PESQUISAS REALIZADAS COM GFRP

As pesquisas mais recentes vêm sendo realizadas com **CFRC** – polímeros reforçados com fibra de carbono. Contudo, ainda existem muitas pesquisas sendo realizadas com **GFRP** e muitas outras a se realizar, especialmente no campo da mecânica da fratura, associada a elementos de reforço para a construção civil, pesquisas relacionadas à fluência e à ação de agentes poluentes ambientais. Especialmente no Brasil, pela característica de seu clima tropical estudos relativos aos efeitos térmicos em painéis estruturais pré-fabricados, como painéis “Pi” ou duplo “T” e telhas auto-portantes tipo “W”, são temas que merecem atenção.

- Foi verificada, por Saadatmanesh (1997), em ensaios conduzidos em vigas, pilares e paredes, a capacidade de utilização de chapas de GFRP coladas com resinas epóxi, como reforço estrutural de elementos degradados.

Foram ensaiadas vigas com 4,9 m X 0,455 m X 0,205 m, (idem), com vão livre de 4,57 m, para verificar o comportamento das diversas tipologias de fixação dos reforços.

A Figura 82, a seguir, apresenta tais tipologias. As formas principais de aplicação foram as seguintes:

- a) Laminação em “U” com tecido unidirecional;
- b) Mesmo tipo, com tecido bidirecional;
- c) Mesmo tipo, com tecido tri-axial;

- d) Reforço inferior com barra chata colada e ancorada nas extremidades com tecido unidirecional;
- e) Mesmo tipo, com ancoragem de tecido bidirecional;
- f) Reforço lateral com tecido unidirecional;
- g) Mesmo tipo, com tecido bidirecional.

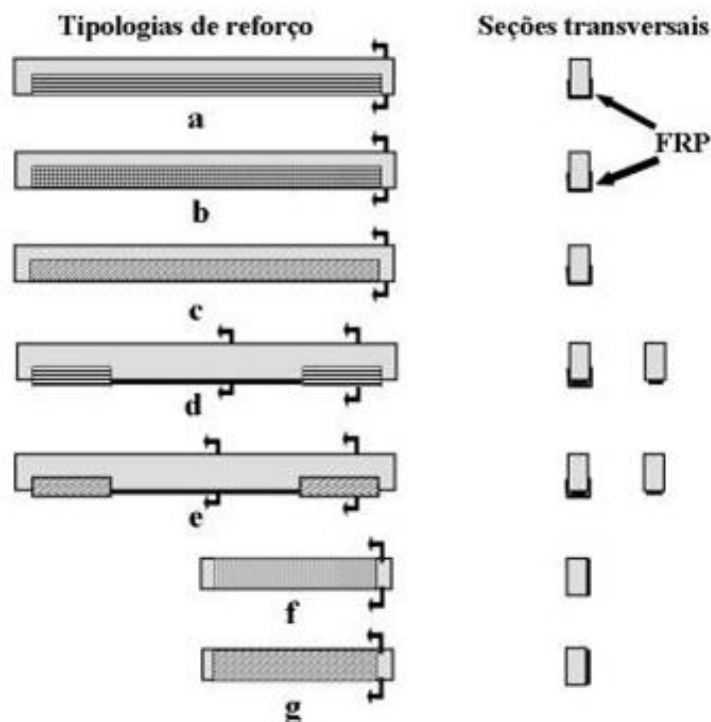


Figura 82 - Tipologias de aplicação de reforço externo em GFRP
Adaptado de Saadatmanesh (1998)

No ensaio descrito aqui, a viga foi subarmada para simular a perda de massa da armadura, devido à corrosão. Foram utilizadas 4 barras de aço $\phi 12$ mm, de 414 MPa na face tracionada e 350 MPa na comprimida. O concreto utilizado foi de 35 MPa.

Para garantir que os reforços atuassem já no início do carregamento, a viga foi submetida a uma contra-flecha por macacos hidráulicos, sendo aplicado 36 kN.

O teste consistiu em aplicar um carregamento de 107 kN, numa seqüência de dois carregamentos e dois descarregamentos consecutivos. Pode ser notada pela Figura 83, a estrita curva de histerese, onde se nota também, que a falha é muito mais frágil, apesar de resistir mais. A ruptura ocorreu, (id. 1997), entre o reforço e a armadura tracionada

ao final da placa de reforço. Nesse ensaio foi utilizada a tipologia da letra “e” da Figura 85 anterior. As características da barra eram:

- a) Largura: 152 mm;
- b) Espessura: 6 mm;
- c) Comprimento: 4,25 m;
- d) Material **GFRP** pultrudado (não há referência ao teor de fibra);
- e) Adesivo epóxi de resistência entre 14 MPa e 15 MPa e alongamento até ruptura: 40%.

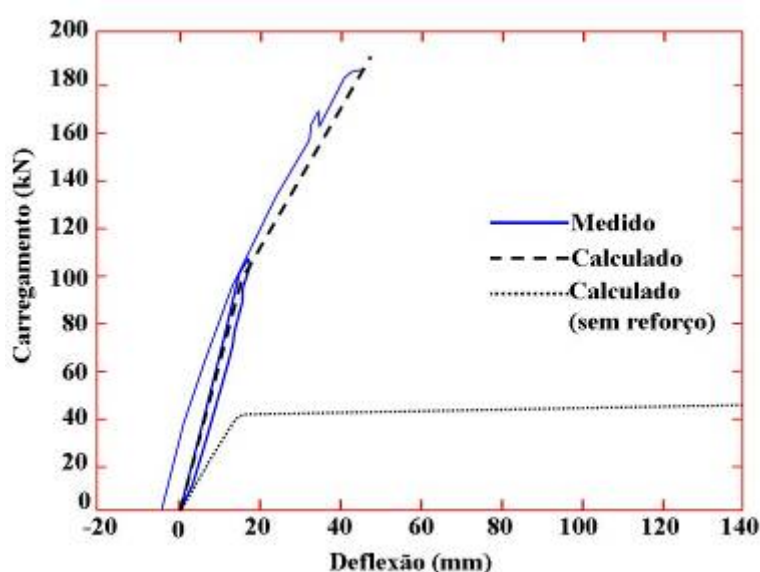


Figura 83 - Ensaio de carregamento cíclico à flexão pura
(Compilado de Saadatmanesh (1997))

Foi constatada pelo autor, a necessidade de verificar a situação real das armaduras em cada caso, para verificar, em condições de serviço, se não há possibilidade de atingir a ruptura, uma vez que essa ocorre de forma frágil.

- Em outra pesquisa, Mottram (2002) iniciou diversos ensaios realizados em ligações de perfis pultrudados de **GFRP**, no Reino Unido, em cooperação entre duas universidades. Estudou peças de ligação, parafusadas e laminadas, para perfis executados pelos seguintes processos de produção:
 - a) Laminação manual;
 - b) Enrolamento filamentar;
 - c) RTM (moldagem por transferência de resina);

d) Pultrusão.

A Figura 84 “a”, “b”, “c” e “d”, em seguida, mostra algumas tipologias de ligações analisadas pelo autor, entre as quais só na foi observada ligações pilar-pilar.



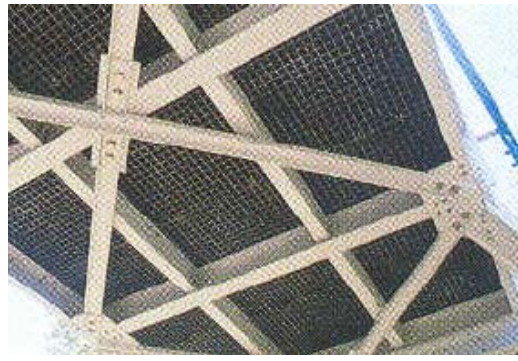
a – Ligação viga – viga



b – ligação viga - pilar



c – ligação pilar – painel



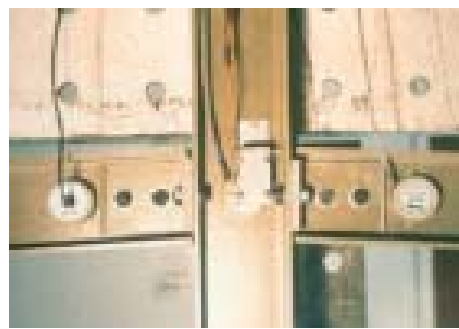
d – ligação de contraventamento

Figura 84 “a”, “b”, “c” e “d” – análises de ligações realizadas por Mottram (2002)

A Figura 85 “a”, “b”, “c” e “d”, a seguir, mostra os ensaios realizados com algumas das ligações descritas pela Figura 87.



a – Ensaio de ligação de 4 vigas



b – Ensaio de ligação painel -viga – pilar



d – Ensaio de ligação viga-pilar



d – Ensaio de ligação pilar- fundação

Figura 85 “a”, “b”, “c” e “d” – Ensaio executados com diversas ligações em **GFRP**

Fonte: Mottram (2006)

Os resultados finais do grupo de trabalho não foram publicados até o momento, mas foram já estabelecidos alguns parâmetros mínimos em relação ao diâmetro de furos, espessura mínima de parede recomendada e outros, que estão mostrados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados de valores recomendados pelos ensaios até 2007

Espessura mínima da chapa t (mm)	Relação diâm. Parafuso/ espessura chapa D/t	Relação distância do canto ou dobra e diâm. do parafuso C/D	Relação distância da borda e diâm. do parafuso B/D	Relação larg./ diâm. parafuso W/D
6,35	1,6	3	1 diâmetro	4

Fonte: Mottram (2007)

A fase atual da pesquisa está realizando comparações entre as simulações realizadas com o ABAQUS ® e o ANSYS ®, para verificar os pontos convergentes e os pontos divergentes entre os dois softwares.

- Correia et al. (2005) conduziram ensaios de flexão em vigas mistas, bi-apoiadas, compostas por perfil tipo “I” pultrudado de **GFRP**, com capa de concreto. A Figura 86, a seguir, mostra um dos modelos ensaiados durante a pesquisa.



Figura 86 – Viga mista, **GFRP** – concreto sendo ensaiada
Fonte – Correia et al. (2005)

A viga da Figura 86 foi submetida a duas séries de carregamento. O primeiro, monotônico, foi até 178,4 kN, onde surgiram as fissuras por compressão da capa de concreto.

O segundo ciclo, também monotônico, atingiu 182,7 kN, quando as fissuras da zona comprimida se conduziram abaixo da LN, causando o colapso da estrutura, que ocorreu pela fratura da alma de **GFRP**.

Esse efeito é visto na Figura 87 “a” e “b”. A parte “a” mostra a ruptura longitudinal do perfil “I” compósito, enquanto a parte “b” mostra o momento da flambagem local da alma no início da ruptura.



“a”

“b”

Figura 87 “a” e “b” – Detalhes da ruptura da viga.

Fonte: CORREIA et al. (2005)

- Rehm (2005) realizou ensaios de flexão em vigas tipo “I”, utilizadas na maioria das pontes rodoviárias norte-americanas. Para simular de forma mais realística o comportamento da viga como se estivesse comprometida, executou os modelos em escala real, subarmados. Posteriormente, retirou partes dos cantos no centro do vão até atingir parte da armadura de protensão, promovendo a ruptura de uma cordoalha, como ocorre eventualmente quando uma carroceria de caminhão se choca contra essas vigas e, finalmente fez o reforço externo em **GFRP**. Para reforçar a estrutura foi aplicada, inicialmente, uma camada de resina aderente, tipo epóxi, posteriormente foi aplicado o reforço, através da superposição de várias camadas de fibra picada, por projeção. A figura 88 mostra o exemplo de um viaduto sobre uma rodovia norte-americana cuja viga está danificada por impactos subseqüentes de carrocerias.



Figura 88 – Viga de viaduto danificada por impacto de carrocerias ou cargas - EUA

Fonte: REHM (2005)

Foram ensaiadas 6 pontes sendo uma não danificada e outra danificada sem reforço como parâmetros de controle.

As demais foram reforçadas com várias tipologias de fibras, sendo que para o interesse deste trabalho a comparação foi feita entre a viga recuperada com **GFRP** em matriz de resina éster vinílica e a viga parâmetro de controle, não danificada.

A Figura 89, a seguir, mostra um dos modelos artificialmente danificados antes de efetuar o reforço.



Figura 89 - Detalhe da viga danificada para simular o dano real
Fonte: Rehm (2005)

Após os ensaios constatou-se a importância da ancoragem transversal para conter a delaminação da interface.

A Figura 90 mostra o detalhe da viga 5 sendo reforçada, pela técnica de *spray-up*.



Figura 90 – Aplicação de fibra por projeção (*spray-up*)
Fonte: Rehm (2005)

Nesse processo foi executado o revestimento nas faces verticais e na face inferior da viga. Ressalta-se que, devido à verticalidade das laterais, a aplicação deve ser feita com resinas de baixa tixotropia para evitar escorrimento da resina e desigualdade na espessura da matriz (id. 2005). Portanto, a aplicação deve ser acompanhada pelo responsável, valendo-se de especímetros para garantir uniformidade na aplicação e qualidade do reforço.

A Figura 91 apresenta a viga não danificada, de controle, submetida ao ensaio.



Figura 91 - Viga não danificada, de controle, sendo ensaiada
Fonte: Rehm (2005)

Terminada a aplicação do reforço e sua cura, os modelos foram ensaiados à flexão pura. Dos modelos ensaiados o que apresentou melhor desempenho comparado com o modelo de controle, foi a peça 5, que foi reforçada com **GFRP** projetado. Essa suportou 95% do carregamento total do modelo de controle não danificado.

A Figura 92 mostra o gráfico de Momento versus deflexão, normalizado, isto é, descontando-se a acomodação do equipamento e ajustes iniciais dos instrumentos de medição. Apesar de constar no gráfico, a peça 6 foi executada com fibra aramida. Por esse motivo não foi considerada, ainda que tenha superado a viga de controle.

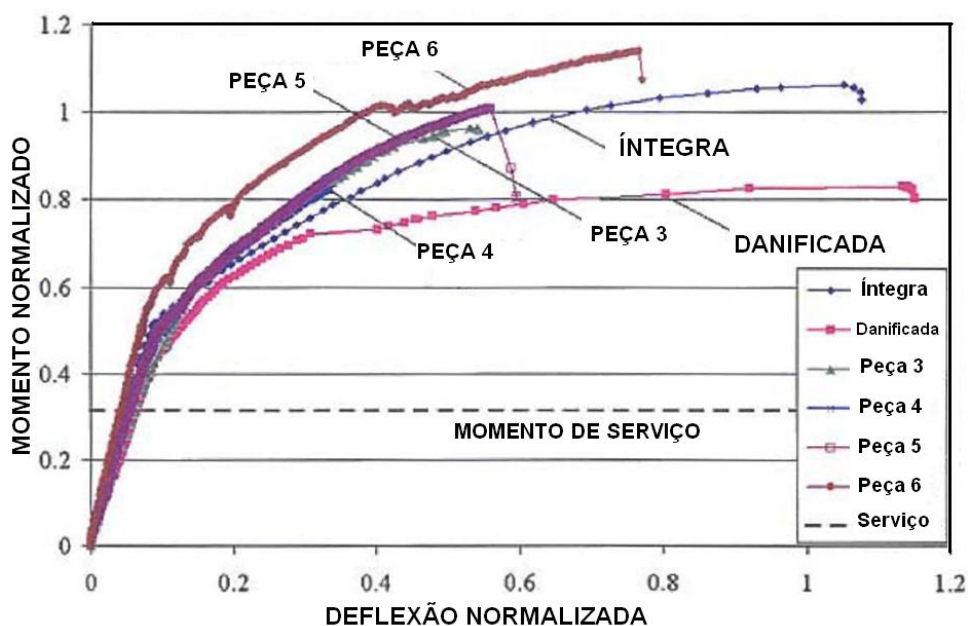


Figura 92 – Diagrama de Momento versus deflexão normalizados
Fonte: Rehm (2005)

- Ensaios vêm sendo conduzidos por Teixeira et al. (2006) com perfis pultrudados, visando obter ligações que satisfaçam requisitos de resistência necessários para construção de ponte treliçada desmontável.

A maior dificuldade está nas ligações, uma vez que ligações parafusadas simples não suportaram o carregamento necessário (id. 2006).

Pelas conclusões parciais, verifica-se que é possível melhorar as propriedades mecânicas, através do estudo da geometria mais adequada.

Comparando-se os resultados deste ensaio com os obtidos no ensaio das amostras de tiras, foi verificado que o E_{fl} foi 19% maior e o desvio padrão foi 90% menor. Segundo os autores, o ensaio do tubo é mais representativo, pois considera toda a seção transversal do perfil e é menos sensível a imperfeições de fabricação. Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma ASTM D 3039/ D 3039M – 95, segundo relatado por Teixeira et al. (2005).

Foram ensaiadas 18 amostras. Os diversos resultados obtidos estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Resultados obtidos com ensaios de perfis pultrudados para construção de pontes treliçadas.

N°	Dimensões do CP (mm)		Dimensões do reforço (mm)			σ_{rup} (MPa)	E (GPa)	τ_{12}	Ruptura inicial
	L x w	$t_{méd}$	Tr	material	Obs.				
						425,2	-	-	cp (adjacente reforço)
1	250 x 15	5,90	60	compósito	reforço de espessura constante	400,1	-	-	cp (adjacente reforço)
2		7,10	60	compósito					
3		7,32	60	compósito					
5		6,75	60	alumínio	reforço com mísula	395,6	-	-	idem 1
6		6,95	65	alumínio					
9	300 x 10	6,78	65	alumínio	reforço de espessura constante	443,2	-	-	região central
10		6,98	65	alumínio					
11		5,73	65	alumínio					
12		6,08	65	alumínio					
13		6,55	65	alumínio	Reforço com mísula	411,1	26,36	-	região central
14		6,58	65	alumínio					
15		6,48	65	alumínio					
16		6,38	65	alumínio					
18	260 x 10	5,90	65	alumínio	-	31,49	-	-	-
19		6,38	65	alumínio					
20	400 x 10	4,98	65	alumínio	reforço c/ mísula e cp sem o véu externo	474,6	-	0,337	região central
21		4,20	65	alumínio					
22		2,85	65	alumínio					
Média						422,8	27,42	0,340	
Desvio padrão						24,64	1,90	-	

Fonte: TEIXEIRA et al. (2005)

A Figura 93 “a”, “b” e “c” mostra os tipos de ruptura ocorridos no compósito, de acordo com o indicado na Tabela 35.

As fissuras iniciaram na zona central e se propagaram das fibras externas para as fibras internas do material.

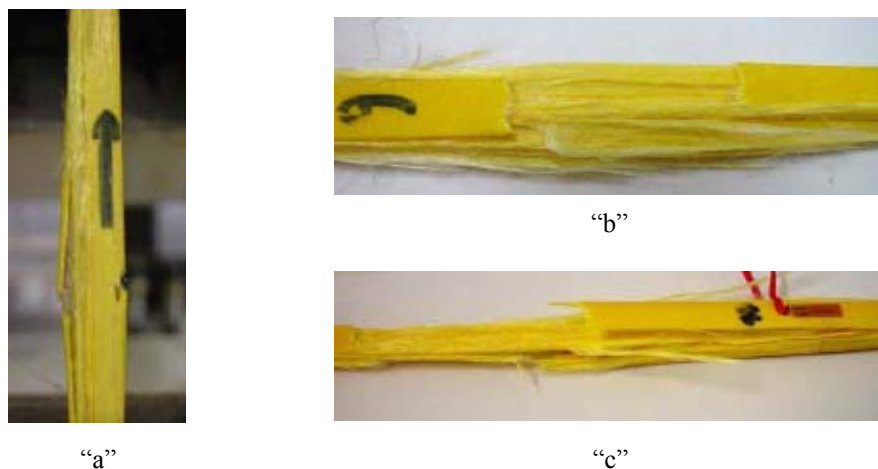


Figura 93 “a”, “b” e “c” – modos de ruptura dos corpos de prova ensaiados
Fonte: TEIXEIRA et al. (2005)

Na continuidade do mesmo trabalho, os autores executaram importante ensaio de fluência acelerado na tração para o material em análise. É importante ressaltar que esses ensaios normalmente não são conduzidos e pesquisas sobre efeitos da fluência ainda são pouco conhecidos para muitos materiais, sobretudo para materiais mais avançados, como os compósitos. O ensaio foi conduzido durante 5 horas, com temperatura de 24 °C. Os corpos de prova foram submetidos a carregamento por gravidade, através de pesos fixados numa das extremidades com cabos. Finalmente, foram conduzidos os ensaios com as ligações parafusadas. A Figura 94 mostra quatro modos de ruptura das ligações.

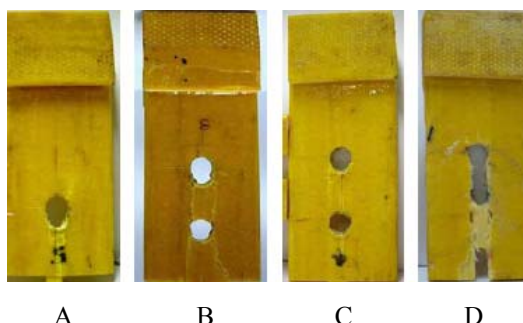


Figura 94 – Modos de ruptura de perfis parafusados
Fonte: TEIXEIRA ET al. (2005)

Os resultados obtidos nos ensaios com as ligações parafusadas, mostradas na Figura 88 estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de tração em ligações parafusadas.

Chapa	Amostra	Fx (kN)	σ_N (MPa)	$\sigma_{méd}$ (MPa)	Desvio padrão	Tipo de ruptura
1 parafuso	1	13,1	41,9	33,7	7,2	rasgamento
	2	8,8	30,8			rasgamento
	5	9,0	28,4			por apoio
2 parafusos	3	19,8	65,0	59,0	6,6	rasgamento
	4	15,8	52,0			por apoio
	6	18,7	60,0			rasgamento

Fonte: TEIXEIRA et al. (2005)

- A reciclagem auto-sustentabilidade são temas pouco considerados quando se estuda os materiais na construção civil. Uma das pesquisas mais recentes em termos de reciclagem de compósitos, vem sendo desenvolvida por Yoshida (2006) e envolve a reciclagem através de hidrólise por meio de água subcrítica, conforme descreve o autor. Esse processo é o primeiro a produzir resultados tecnicamente satisfatórios, ao permitir a completa separação e total reaproveitamento dos componentes da matriz do compósito.

O processo consiste em aumentar a pressão e temperatura da água até atingir o ponto pouco abaixo do ponto crítico, 374 °C, a uma pressão acima da pressão de vapor saturado, 22,1 MPa. Nesse ponto a ionização da água é mil vezes maior que na temperatura ambiente. Dessa forma, ela passa a atuar como um solvente orgânico, uma vez que sua constante dielétrica diminui ao nível desses.

Como resultado, a resina é dissolvida e totalmente separada das fibras e essas últimas são recuperadas totalmente e sem perda da resistência, seja por ações mecânicas, químicas ou pirólise¹², Yoshida (2006). Não foi possível obter dados dos resultados já obtidos.

- Corradi et al. (2002), promoveram ensaios e aplicações de compósitos de **GFRP** e **CFRP** em edificações atingidas pelos terremotos de 1997 e 1998 na região da Umbria e Marche, na Itália, utilizando tiras de laminados na vertical e horizontal. Foram reforçadas alvenarias de tijolos e de pedras calcárias. A pesquisa foi desenvolvida para

¹² Pirólise: processo de reciclagem de lixo ou outros materiais para produzir novos materiais. Consiste no aquecimento a elevadas temperaturas para separar materiais com diferentes temperaturas de fusão. Em geral, um dos materiais é utilizado como próprio agente combustível.

encontrar uma alternativa satisfatória em substituição à injeção de graute em alvenarias danificadas, prática comum atualmente, como forma de recuperação estrutural para restaurar a continuidade da estrutura degradada. A escolha desse tipo de reforço foi em razão do baixo peso, alta resistência, ser um método não invasivo de recuperação estrutural de edifícios históricos, além de reversível e de rápida reocupação das edificações.

A característica do reforço testado foi o uso de laminados híbridos de fibra de vidro e fibra de carbono. A Tabela 37 apresenta algumas propriedades físicas dos materiais utilizados.

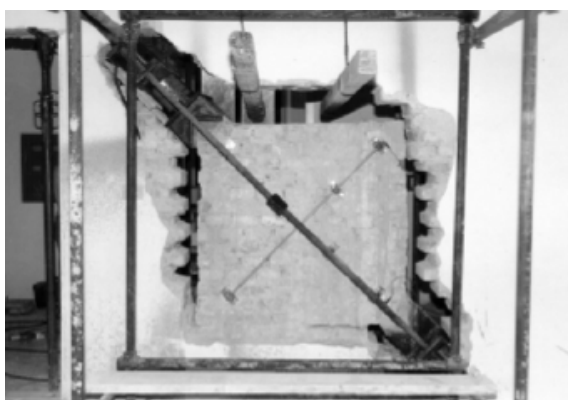
Tabela 37 – Características do material empregado na pesquisa.

Propriedade	Fibra de carbono	Fibra de vidro
Densidade superficial (kg/m^2)	0,300	0,300
Espessura equivalente (mm)	0,165	0,118
Resistência à tração (MPa)	3430	1515
Módulo elasticidade à tração (MPa)	230000	75000
Alongamento na ruptura, ϵ (%)	1,5	2,1

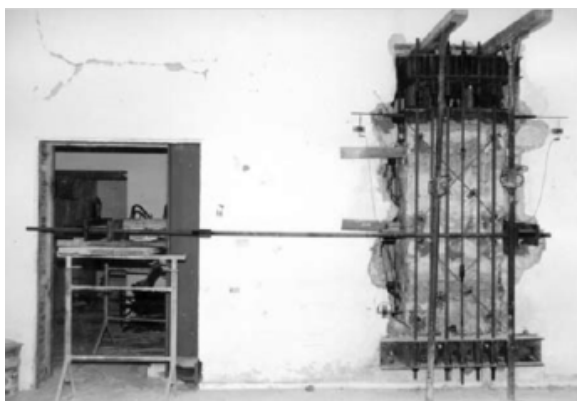
Fonte: Corradi et al. (2002)

Foram, inicialmente, conduzidos ensaios de compressão, cisalhamento e compressão diagonal em corpos de prova com duas geometrias, executados no local da obra (Ponte Postegiano – Itália).

Pode ser visto os corpos de prova para os ensaios de carregamento da Figura 95 “a”, em que foi realizado o ensaio de compressão diagonal e “b”, onde se ensaiou a compressão longitudinal.



a - Ensaio de compressão diagonal.



b – Ensaio de compressão

Figura 95 “a” e “b” – Ensaios de compressão e compressão diagonal

Fonte: Corradi et al.(2005)

Para a execução dos reforços, após as análises optou-se por fixação de barras chatas de **GFRP** e **PRFC**, posicionadas conforme mostrado na Figura 96, onde primeiramente foram fixadas as barras de **GFRP** (tiras cinzas) e sobre essas as barras de **PRFC** (tiras pretas).

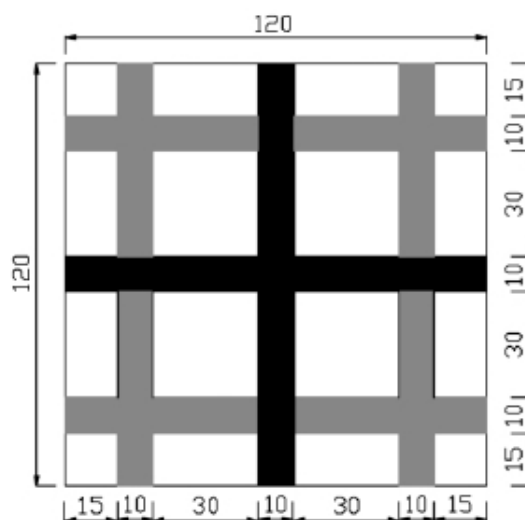


Figura 96 – Disposição das barras de reforço na alvenaria da “Ponte Postegiano”

Fonte: Corradi et al. (2005).

Primeiramente, as imperfeições foram niveladas com argamassa com resistência de 8 MPa, aos 28 dias, em espessuras que variaram entre 4 mm e 8 mm. Após a cura da argamassa, foram coladas as tiras de **GFRP**, com resina epóxi, distantes 0,8 m entre eixo. Em seguida foram fixadas as tiras de **PRFC**, da mesma maneira que as anteriores com defasagem de 0,40m, como se pode notar na Figura 96.

Foram ensaiadas quatro amostras, sendo uma delas sem qualquer tipo de reforço, utilizada como parâmetro de controle. Os ensaios indicaram que os reforços com Fibra

de vidro e fibra de carbono suportaram o carregamento até a ruína da alvenaria por compressão. A Figura 97 apresenta os resultados dos ensaios de compressão diagonal, conduzidos para verificação dos reforços do edifício da Ponte Postegiano, na Itália. A Figura 98 mostra a o ensaio de cisalhamento a que foram submetidas.

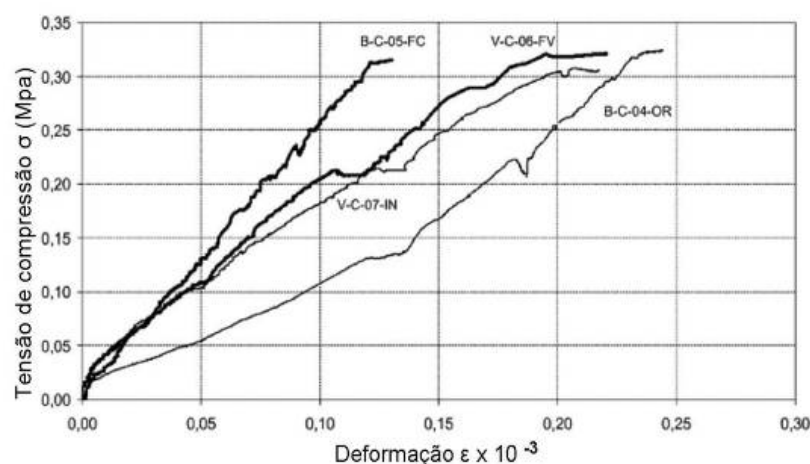


Figura 97 - Diagrama Tensão compressiva diagonal versus deformação em alvenaria. Fonte: Corradi et al. (2002)

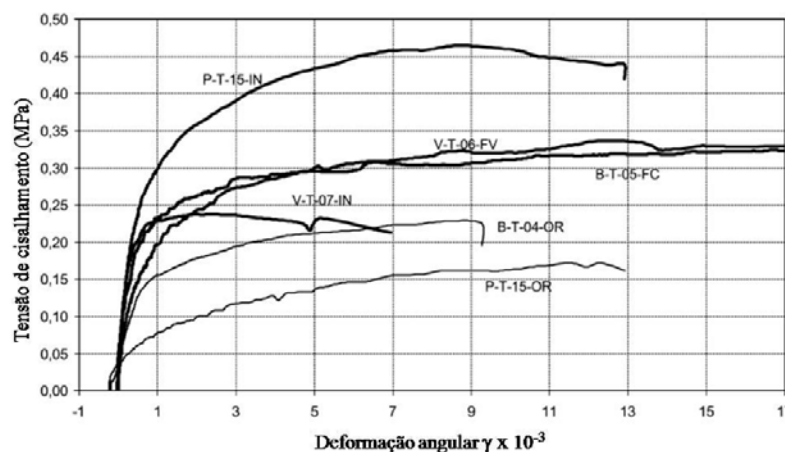


Figura 98 – Diagrama cisalhamento diagonal x deformação angular
Fonte: Corradi et al. (2005).

Concluiu-se que esse sistema de reforço, como forma de minimizar os riscos decorrentes de abalos sísmicos, representa um grande avanço. Algumas das razões se devem à rapidez com que podem ser executados e pela forma pouco invasiva com que são executados, isto é, não necessitam perfurações ou aberturas de rasgos para embutimento do material de reforço (id. 2005).

Foi constatado que seu efeito, comparado com o sistema de injeção de graute, é melhor quando a alvenaria é nova, como forma de prevenção, uma vez que o graute penetra nas fissuras promovendo a continuidade interna na alvenaria, enquanto os reforços externos não possuem essa capacidade.

Não foi mencionada a possibilidade de uso de concreto polimérico como coadjuvante para preencher as fissuras. Seria uma alternativa ainda menos invasiva por trabalhar com granulometria muito menor que graute ou micro concreto.

- Tavares (2006) realizou inúmeros ensaios com vigas armadas com barras de **GFRP**, produzidas pelo sistema de pultrusão, substituindo totalmente as armaduras de aço. Apesar das barras utilizadas terem sido importadas, no Brasil já existe tecnologia e equipamentos para sua produção. Porém, é pouco provável que essa tecnologia seja difundida no mercado da construção civil, mesmo em obras que deveriam utilizar esses materiais, como centros cirúrgicos e centros de tomografia, em hospitais. Em parte pelo elevado valor agregado, em parte pelo desinteresse por parte das construtoras, em geral, em adotar novas tecnologias.

Os modelos ensaiados se constituíram de vigas com as dimensões principais mostradas na Tabela 38.

Tabela 38 – Dimensão dos modelos de vigas ensaiados

Vão (cm)	Altura (cm)	Largura (cm)	Recobrimento (cm)
305	30	15	2,5

Fonte: TAVARES (2006)

Em relação à pesquisa em questão, pode ser notado que não houve qualquer preocupação com a dosagem do concreto no que diz respeito, especificamente às recomendações da FIB (1998) e da ACI (1996). Não foi relatado a aplicação de superplastificantes, adições de microssílica ou cinzas volantes para permitir maior interação entre os álcalis e as adições, bem como para reduzir o fator água / cimento utilizado.

Pelo indicado na preparação do concreto só ficou claro que o fator água / cimento foi bastante elevado (0,58) para um concreto com resistência de 40 MPa aos 14 dias. As

recomendações são de fator água / cimento da ordem de 0,40. Isso representaria em torno de 40 % acima do fator recomendado.

Algumas conclusões que valem para novas pesquisas é o fato das barras de **GFRP** por serem muito mais leves possuem a tendência de se movimentar e elevarem-se quando o concreto é aplicado na fôrma. Em outros países esse efeito é eliminado pela ancoragem passante externa de pinos de polipropileno que calçam as barras em pontos determinados.

Outra dificuldade enfrentada pela autora foi o fato de não terem sido adquiridas as barras através de projeto enviado ao fornecedor. Desse modo, as curvaturas e estribos foram adaptados no decorrer da pesquisa.

A principal conclusão dos ensaios com os cinco modelos foi que o baixo módulo e a forma de ruptura são os principais problemas a serem resolvidos para permitir a aplicação desse tipo de material em construção civil. Contudo, o Ministério dos Transportes norte-americano tem substituído a armadura convencional de suas pontes por armaduras de **GFRP** ou híbridas. Portanto, devem ser considerados esses efeitos no cálculo.

O uso desse material é favorecido no hemisfério norte pela possibilidade de utilização de concretos avançados em relação ao que se faz usualmente no Brasil, isto é, acima de 50 MPa.

- Numa das poucas pesquisas relacionadas ao reforço de estruturas de madeira, Cruz (1999) desenvolveu estudos para aplicação de reforço estrutural em estruturas de madeira de edificações tombadas pelo IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. A situação do madeiramento estrutural está em condições precárias e sua substituição implicaria em descaracterização e risco de desabamento em virtude da antigüidade da edificação.

A pesquisa teve como objetivo diagnosticar tipologias de reforço estrutural que após os reparos permanecesse total ou quase totalmente invisível para o observador. Dessa forma selecionou um perfil pré-determinado para embutir nos corpos de prova de madeira, os quais tinham um rebaixo para encaixar e colar o reforço.

A autora selecionou a madeira maçaranduba (*manilkara hulberis*) para realizar os ensaios, uma vez que é uma das madeiras constituintes da flora regional e muito utilizada como elemento estrutural.

A Figura 99, a seguir ilustra metade do modelo com o perfil já embutido no mesmo.

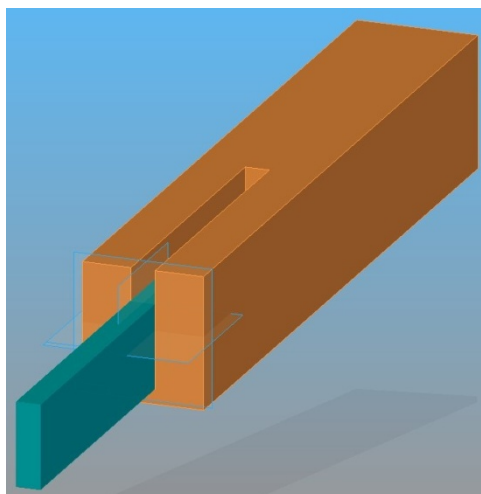


Figura 99 – Esquema de posicionamento do reforço em metade do Corpo de prova.
Adaptado de Cruz, (1999)

Foram realizados 15 ensaios, sendo os primeiros 5 com corpos de prova inteiros de madeira, os 5 seguintes com corpos de prova divididos ao meio e reforçados com uma barra maciça de **GFRP** com 250 mm x 70 mm x 20 mm, colados com resina poliéster e, finalmente 5 ensaios com as mesmas características do anterior, porém colados com resina epóxi. A Figura 100 mostra o corpo de prova e o reforço ao lado.

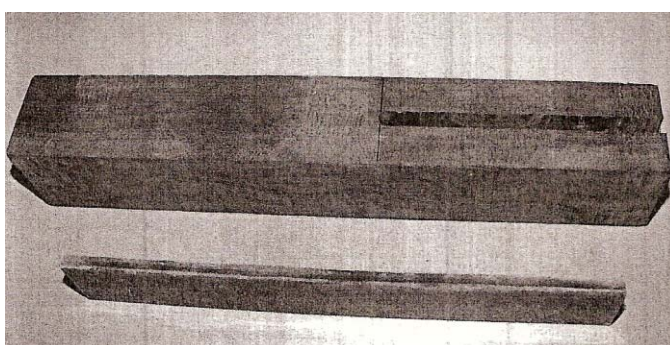


Figura 100 – Meio corpo de prova, com ranhura pra inserção do reforço em GFRP que se encontra ao lado. Fonte: CRUZ (1999)

A Figura 101, a seguir, apresenta os modelos com os corpos de prova embutidos, prontos para serem ensaiados. A Figura 102, na seqüência, apresenta um corpo de prova sendo submetido ao ensaio de flexão de 4 pontos.

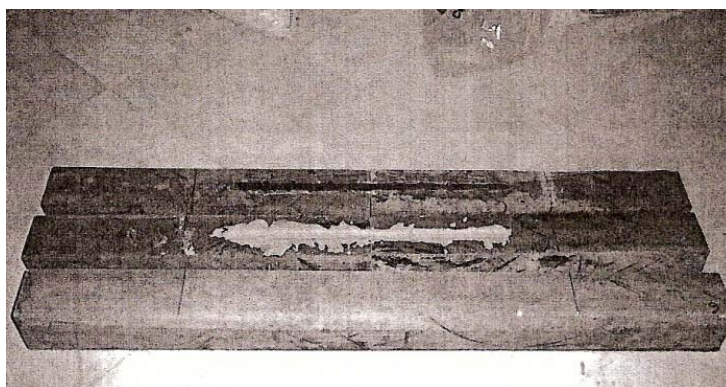


Figura 101 – Corpos de prova já unidos através do reforço de **GFRP**
Fonte: Cruz (1999)

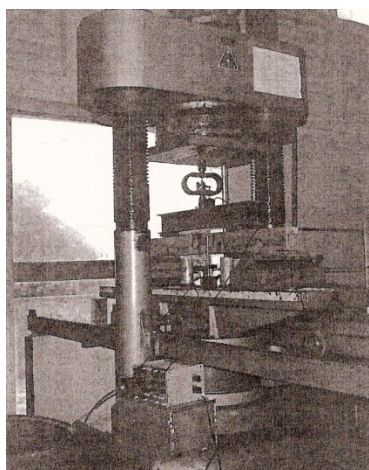


Figura 102 – Corpo de prova sendo ensaiado
Fonte: Cruz (1999)

Os resultados dos ensaios para duas tipologias de adesivos e o corpo de prova de controle são mostrados na Tabela 39.

Tabela 39 – Resultados médios obtidos nos ensaios com os CPs.

Tipo de CP	P (kN)	δ (cm)	σ_{Max}	E (GPa)
Reforço em Epóxi	28,86	0,87	14,41	9,35
Reforço com Poliéster	28,40	1,9	14,21	4,13
Viga íntegra	174,15	1,77	87,12	27,22

Fonte: CRUZ (1999)

Como se nota, pelos resultados, a autora concluiu que a tipologia adotada não contribuiu para evitar o cisalhamento por escorregamento da interface entre adesivo e os corpos de prova. Além disso, o baixo módulo do reforço em relação à madeira íntegra também deveria ser melhorado. Em pesquisas de outros segmentos, nota-se que a alteração na geometria dos compósitos contribui substancialmente para o aumento da rigidez do elemento. No caso acima a reforço era maciço. Talvez com perfil pultrudado retangular se atingisse melhores resultados.

- Em outra pesquisa, de continuidade à anterior, Cruz (2004) alterou o sistema de ancoragem, que deixou de ser por aderência simples e passou a ser por inserção de pinos no sentido transversal ao deslocamento. Os pinos foram confeccionados do mesmo material do reforço, em **GFRP**. Os corpos de prova utilizados se mantiveram com a mesma geometria daqueles da pesquisa anterior, porém receberam furação para fixação dos pinos. A Figura 103 mostra o posicionamento da furação nos modelos.

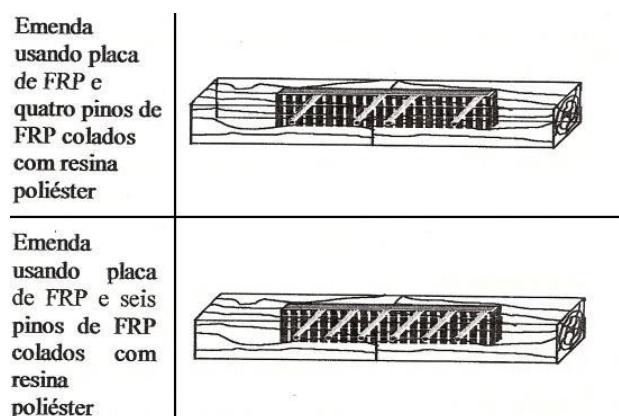
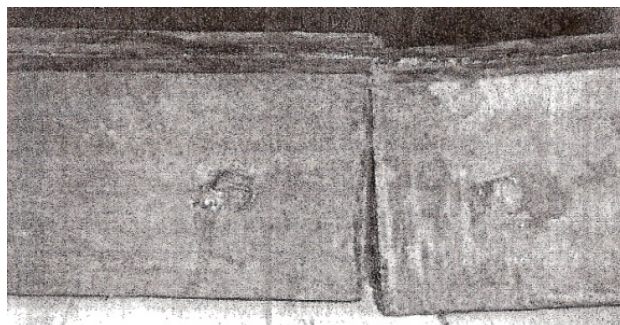


Figura 103 – Corpos de prova com 4 furos e 6 furos
Fonte: CRUZ (2004)

Os pinos transpassaram toda a largura do corpo de prova. O diâmetro dos pinos foi de 10 mm. Entre as tipologias ensaiadas com reforço em **GFRP**, as tipologias com 4 e 6 pinos apresentaram melhores resultados.

A ruptura ocorreu no material de reforço como se vê na Figura 104 “a” e “b”, a seguir.



a - Ruptura por fratura do compósito

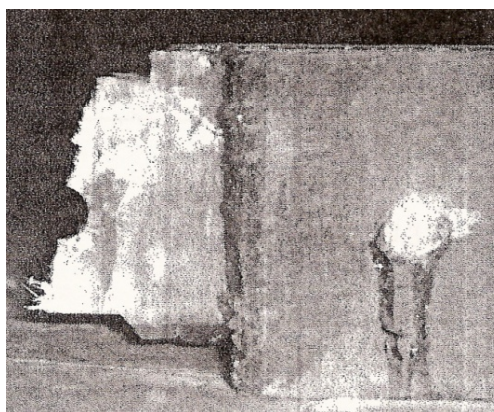
b – Vista do rasgamento do **GFRP**

Figura 104 “a” e “b” – Ruptura dos corpos de prova com 2, 4 e 6 furos
 Fonte: CRUZ (2004)

Nessa segunda pesquisa a falha ocorreu com o elemento de reforço. Disso foi concluído (CRUZ, 2004), que o dimensionamento do reforço deveria ser modificado para suportar maior carregamento. Pela análise comparativa, se pôde observar que se os pinos tivessem sido fixados alternadamente em planos ortogonais talvez o efeito de pino resultasse melhor. A Tabela 40 apresenta esses resultados.

Tabela 40 – Resultados médios obtidos nos ensaios com os CPs.

Tipo de CP	P (kN)	δ (cm)	σ_{Max}	E (GPa)
Viga íntegra	174,15	1,77	87,12	27,22
Poliéster com 4 pinos	29,6	1,91	14,81	4,25
Poliéster com 6 pinos	28,56	2,06	14,28	3,82

Fonte: Cruz (2004)

- Bathias (2006) realizou ensaios sobre a evolução da fadiga em compósitos, observando o comportamento em fadiga de baixo e de alto ciclo. A Figura 105 apresenta o comportamento e evolução das trincas para um corpo de prova de **GFRP**, quase-isotrópico, vale dizer, com camadas multidirecionais e simétricas. A principal diferença da evolução das trincas nos compósitos, em relação aos metais, é o direcionamento (id. 2006). Enquanto nos metais a evolução ocorre perpendicularmente à ação da tensão atuante, nos compósitos a evolução é multidirecional e atinge uma área bem maior que a zona plástica. Disso advém a dificuldade para se elaborar modelos que possam prever esse comportamento.

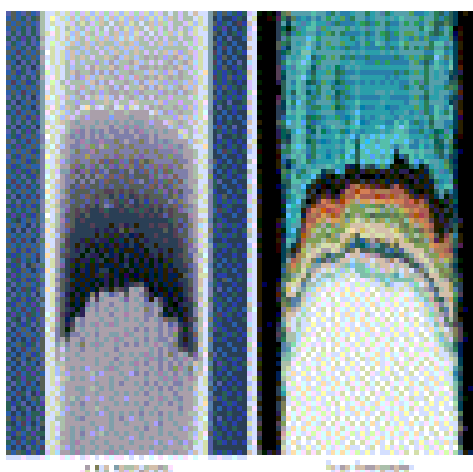


Figura 105 - Microfotografia de evolução de trincas em compósito
Fonte: Bathias (2006)

- Park et al. (2004), desenvolveram um modelo de algoritmo para simular o desenvolvimento do material e a análise estrutural de elementos de laje em **GFRP** para pontes. O algoritmo está baseado na implementação de algoritmos genéticos – **GA**. A estrutura é composta por um sistema de colméia exclusivamente desenhado conforme as análises e simulações. Para desenvolver a simulação do algoritmo foi utilizado o aplicativo ABAQUS®. Posteriormente, foram realizados os ensaios de flexão pura com dois modelos, diferenciando apenas o tipo de polímero utilizado e a direção do carregamento em relação à orientação das fibras. As principais características geométricas dos modelos estão resumidas na Tabela 41, a seguir.

Tabela 41 – Dimensão dos modelos de vigas ensaiados.

Vão (cm)	Altura (cm)	Largura (cm)	Espessura flanges (cm)	Espessura alma (cm)
250	20	35	1,5	1,1

Adaptado de Park et al. (2004)

O modelo foi posicionado conforme mostra a Figura 106. Uma barra transversal foi colocada no ponto de carregamento para garantir a distribuição transversal em toda largura do elemento.

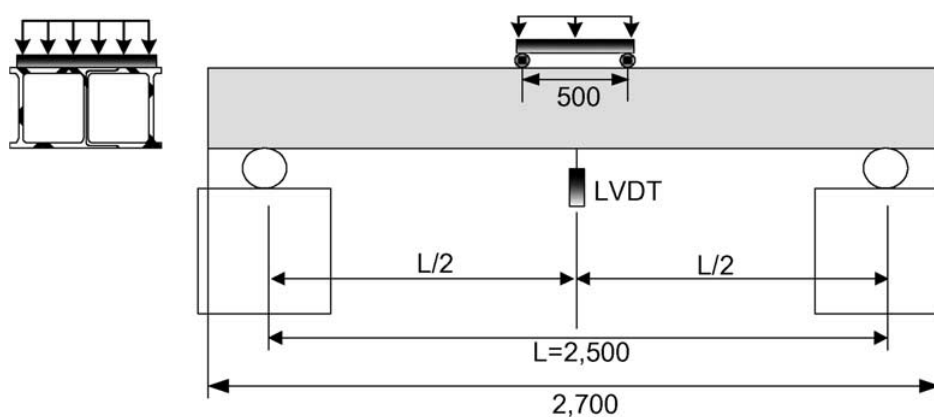


Figura 106 – Posicionamento dos elementos de laje para ensaios de flexão pura
Fonte: Park et al. (2004)

A Figura 107 apresenta um dos modelos pronto para iniciar o ensaio de flexão no sentido longitudinal às fibras.



Figura 107 – Elemento de laje colméia para ensaios de flexão pura
Fonte: Park et al. (2004).

A Figura 108, a seguir, mostra um dos modelos ensaiados até a ruína. É possível verificar o esmagamento da face superior da colméia.



Figura 108 – Elemento após a ruína da mesa da laje no ensaio de flexão pura. Fonte: Park et al. (2004)

Os resultados dos ensaios para as duas tipologias de elementos estão resumidos pela Tabela 42. Nota-se que o compósito elaborado com o adesivo epóxi tipo “S”, apresentou maior resistência até a ruptura que o outro elemento com epóxi tipo “M”. Isso ocorreu porque as resinas eram de fornecedores diferentes. Dos resultados se nota a importância maior que se deve dar à seleção adequada dos materiais, ao se trabalhar com compósitos.

Tabela 42 – Resultados dos ensaios para os elementos com epóxi – S e epóxi – M

Elemento	Deflexão máxima (mm)	Carga máxima (kN)
Valor teórico	18,68	229,1
Epóxi - S	30,84	373,1
Epóxi – M	28,75	356,3

Fonte: Park et al. (2004)

Também é possível comparar com os valores de cálculo da simulação, que se mostrou bastante conservadora. Ainda que para o mesmo polímero de fabricantes diferentes tenha havido uma pequena variação de aproximadamente 9,5% na resistência última, ambos superaram o modelo de cálculo, no mínimo em 64%. Já no ensaio de flexão transversal às fibras, o modelo de cálculo ficou superestimado em relação aos resultados obtidos, como pode ser notado pelos dados constantes na Tabela 43, a seguir (id. 2004).

Tabela 43 – Ensaio transversais para os elementos construídos com epóxi – S e epóxi – M

Elemento	Deflexão máxima (mm)	Carga máxima (kN)
Valor teórico	37,37	17,1
Epóxi - S	55,60	8,5
Epóxi – M	53,81	7,6

Fonte: Park et al. (2004)

A Figura 109 mostra o elemento após o ensaio de flexão transversal às fibras, até sua ruptura.



Figura 109 – Elemento após a ruína total, na flexão transversal pura

Fonte: Park et al. (2004)

Pelos resultados obtidos a proposta da pesquisa foi atendida, na medida em que o modelo de simulação e dimensionamento pode ser validado pelos ensaios, não só dos elementos como do conjunto de uma laje. Segundo Park et al. (2004), todos os ensaios realizados apresentaram rendimento mínimo superior a 30 % em relação ao modelo matemático. Isso possibilita afirmar, que é seguro desenvolver elementos compósitos baseados na simulação, assim como basear-se nos valores de cálculo para executar a fabricação dos elementos, com boa margem de segurança.

- Em outra pesquisa, envolvendo reforços externos com **GFRP** aplicado por projeção em pilares de alvenaria, Shaheen & Shrive (2005) conduziram ensaios em 24 modelos de pilares confeccionados com tijolos cerâmicos maciços, cujas características geométricas principais são apresentadas pela Tabela 44 adiante.

Tabela 44 – Dimensões dos modelos de pilares de alvenaria ensaiados.

Tipo	Seção transversal (mm)	Argamassa	Altura (mm)	Armadura
I	290 x 290	S	1000	-
II	390 x 390	S	1000	4 x 10 mm

Adaptado de Shaheen & Shrive (2005)

Os pilares foram recobertos com camadas de 2 mm e de 4 mm de espessura de **GFRP**. Conforme relatado pelos autores, uma das principais dificuldades é manter a homogeneidade de espessura quando se trabalha com **GFRP** projetado. Para efeito de comparação três pilares de cada tipologia foram ensaiados para verificar o comportamento da ruptura e comparar posteriormente com os modelos reforçados. A Figura 110 mostra a aplicação do **GFRP** sobre a superfície de um pilar.



Figura 110 – Aplicação do **GFRP** sobre o pilar de alvenaria
Fonte: Shaheen & Shrive (2005)

Após a aplicação e cura do material de reforço foram realizados os ensaios. Para os elementos sem reforço foi notado que a ruptura iniciou no núcleo grauteado do pilar, propagando-se para as faces, de cerâmica.

No caso dos pilares reforçados, apesar do comportamento inicial ser o mesmo, a propagação final teve pequena variação em função do confinamento dos tijolos pelo encapsulamento da camada de laminado. Em parte, esse fato contribuiu para um ganho de resistência na ruptura, em relação aos elementos sem reforço.

As Figuras 111 e 112 mostram os tipos de rupturas ocorridas nos ensaios. O mesmo desempenho foi verificado para as duas tipologias de pilares ensaiadas.

A Figura 111 mostra o elemento com seção transversal medindo 290 x 290 mm e a Figura 112 apresenta o elemento com seção transversal de 390 x 390 mm.



Figura 111 – Pilar reforçado com GFRP – Modo de ruptura I e II
Fonte: SHAHEEN & SHRIVE, (2005).



Figura 112 – Pilar reforçado com GFRP – Modo de ruptura I e II
Fonte: SHAHEEN & SHRIVE, (2005)

A Tabela 46 mostra resumidamente os resultados de seis ensaios, como exemplo. Três ensaios foram realizados com tijolos de seção transversal de 290 mm e três com tijolos de 390 mm de seção transversal.

Tabela 45 – Resultados dos ensaios para os elementos de pilar construídos em alvenaria e reforçados com GFRP projetado.

Elemento	Espessura de reforço	Deformação máxima (mm)	Carga máxima (kN)
Pilar simples	--	3,7	1193,4
Pilar 290 mm	2 mm	3,6	1419,5
Pilar 290 mm	4 mm	3,8	1490,3
Pilar 390 mm	--	10,2	1887,8
Pilar 390 mm	2 mm	26,8	2149,4
Pilar 390 mm	4 mm	25,7	2187,5

Fonte: SHAHEEN & SHRIVE, (2005)

Como conclusão, nota-se que há um aumento de resistência, porém esse aumento só passa a ser significativo nos pilares de 390 mm de seção transversal, com 4 mm de espessura de reforço. Segundo os autores, as variações ocorridas no processo de laminação, também podem ter contribuído para alguma divergência nos resultados.

Nota-se que há uma perda considerável na aderência do reforço em relação à superfície dos tijolos. Outra conclusão é que sendo uma técnica relativamente fácil de reforço, é válida para reforçar elementos com carregamentos axiais. No caso de carregamentos excêntricos novos ensaios devem ser realizados para avaliar o comportamento correspondente.

- A pesquisa a seguir está sendo conduzida em duas etapas. A primeira é a aplicação de uma simulação, para verificar o comportamento de 3 vigas pré-moldadas de concreto ensaiadas para atingir o estágio 2, o estágio 3 e o estágio 3-4, respectivamente, e o comportamento das mesmas vigas após serem reforçadas com perfis pultrudados em **GFRP**. A Tabela 46 apresenta as configurações das vigas ensaiadas e o reforço existente em cada uma delas (JUSTO, 2006).

Tabela 46 – determinação das vigas do projeto segundo os domínios de deformação

VIGAS	CARACTERÍSTICA	DOMÍNIO DE DEFORMAÇÃO
1	Pouco armada	Domínio 2
2	Medianamente armada	Domínio 3
3	Muito armada	Limite entre os domínios 3 e 4

Fonte: Justo (2006).

A Figura 113 mostra o resultado da viga fissurada nos domínios 3-4.

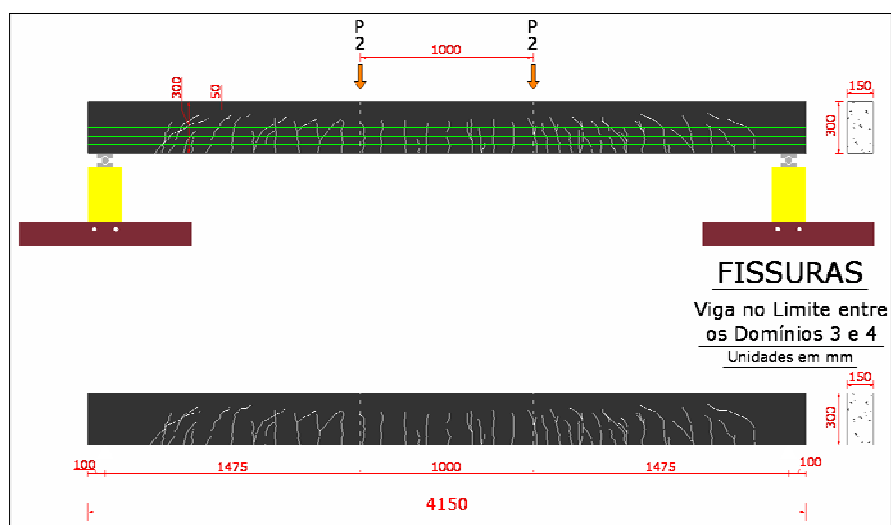


Figura 113 - Cópia das fissuras ocorridas na viga ensaiada para o domínio 3-4.
Fonte (JUSTO, 2006)

A Figura 114 mostra a simulação realizada com os valores obtidos pelo ensaio com a viga da Figura 113, com as deformações ocorridas, onde se nota a malha triangular com a viga sendo discretizada em elementos finitos triangulares.

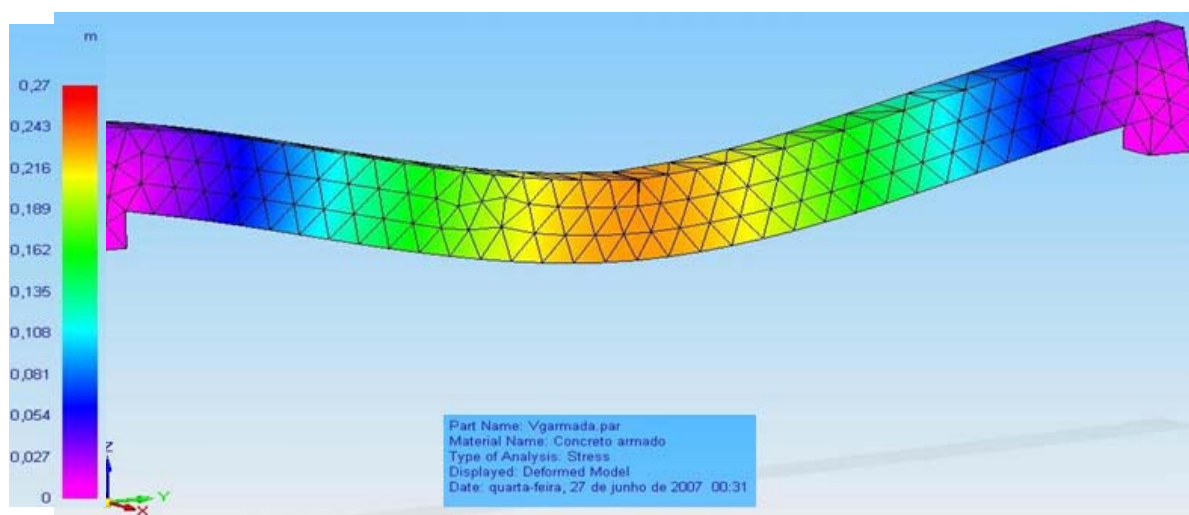


Figura 114 - Elemento estrutural submetido à simulação.
Fonte (ORTENZI, 2007)

Como se verifica pela Figura 114, a deformação atingiu 24,3 cm na ruptura, valor esse muito próximo ao obtido no ensaio real, que foi de 24,8 cm. Isso representou uma defasagem de 2,05 % em relação à situação real.

A Figura 115 apresenta um esquema do posicionamento do reforço a ser ensaiado nas mesmas vigas para verificar o comportamento de reforços estruturais externos em vigas colapsadas (ORTENZI, 2007).

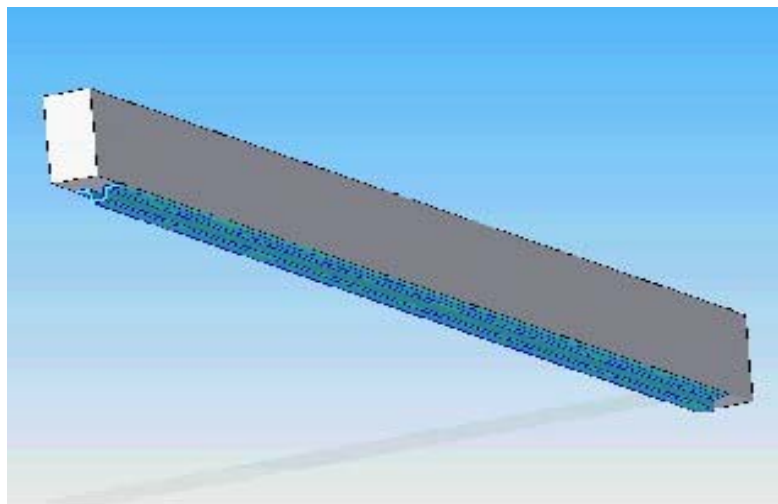


Figura 115 -Esquema de simulação por MEF e comparação com situação real de ensaio
Fonte (ORTENZI, 2007)

5.3 PESQUISAS NECESSÁRIAS

Podem ser mencionadas como principais segmentos a serem desbravados com novas pesquisas, que serão colocadas na seqüência deste trabalho.

Um segmento que requer maior aprofundamento através das pesquisas é o segmento da reciclagem desses materiais para reutilização ou reconversão. Outro segmento é o desenvolvimento de polímeros derivados de recursos renováveis.

Podem ser mencionadas como principais segmentos a serem desbravados com novas pesquisas, os seguintes:

- Pesquisas técnico-econômicas comparativas de custo entre os processos de recuperação estrutural utilizando-se **GFRP**, **CFRP** e materiais convencionais, atentando para comparação de todos os custos, incluindo manutenções futuras;
- Pesquisas envolvendo pultrusão de barras estruturais em **GFRP** como reforço de estruturas de concreto, com análises de desempenho mecânico e desenvolvimento de processos de laminação adequados;
- Pesquisas com protensão por meio de barras de **GFRP** para lajes, vigas e outros elementos;
- Ligações de elementos pré-moldados com **GFRP**;

- Pesquisas sobre comportamento de pilares e ações de puncionamento em lajes armadas com barras de **GFRP**;
- Avaliação e simulação de comportamento de estruturas ou reforços submetidos à ação do fogo e desenvolvimento de compósitos que atendam os requisitos de segurança ou que se mostrem eficientes;
- Novas pesquisas que desenvolvam matrizes cimentícias e poliméricas para utilização com fibra de vidro tipo E, para utilização em concreto pré-moldado e **GRC**;
- Reforço estrutural em paredes e muros de arrimo;
- Análise de fluência em reforços estruturais de **GFRP** em estruturas de concreto.

6. CONCLUSÕES

Foi estudada aqui a aplicação da fibra de vidro em matrizes poliméricas e cimentícias no campo da construção civil. O estado-da-arte, em qualquer pesquisa, se faz através do acompanhamento de aplicações que surgem a cada dia, de pesquisas realizadas ou em desenvolvimento cujos resultados parciais são divulgados, bem como se verificando as tendências mundiais de aplicação de determinada tecnologia.

6.1 SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os meios científicos para a caracterização dos materiais compósitos de fibra de vidro em matrizes poliméricas, isto é, o conjunto de recursos humanos, equipamentos e núcleos de pesquisa, estão mais avançados em comparação com os mesmos meios relacionados ao uso da fibra de vidro em matrizes cimentícias. Provavelmente, essa menor velocidade de desenvolvimento pode ser atribuída aos seguintes fatores:

- a) Necessidade de aprofundar o conhecimento para fazer interagir as fibras sem que as mesmas sofram agressão química pela alcalinidade presente no concreto;
- b) As fibras se constituem apenas em uma das adições possíveis dentre várias opções disponíveis aos concretos;
- c) A necessidade de construções de baixo custo, sobretudo em países em desenvolvimento, eventualmente, inibem desenvolvimento de inovações tecnológicas;
- d) Algumas empresas tenham desenvolvido pesquisas proprietárias, como ocorre no seguimento dos fármacos, resultando em pequeno número de indústrias que fabricam produtos em **GRC** no mundo;
- e) A origem do capital destinado às pesquisas com materiais compósitos provém de um setor produtivo primário extremamente rico, a extração de petróleo;
- f) Indústrias de grande porte, como setor automobilístico, aeroespacial, armamentos e eletro-eletrônicos têm enorme interesse no desenvolvimento desses materiais.

Em relação à análise estrutural, a indústria aeroespacial desempenhou importante papel nas pesquisas. Os modelos de análise estrutural desse segmento tecnológico envolvem outros critérios não usuais na análise estrutural em construção civil, como tolerância a falhas, análise de propagação de fissuras (trincas), entre outros critérios.

Outra constatação foi a unicidade entre os métodos de ensaios de caracterização dos materiais compósitos. As diversas entidades normalizadoras internacionais (ASTM, BSI, JIS, DIN, CEN) mantêm um padrão muito próximo entre suas recomendações. Infelizmente, no Brasil, a ABNT, possui muito pouco material destinado a caracterização desses materiais. Isso dificulta o acesso às propriedades características por parte dos projetistas, contribuindo para dificultar a ampliação do conhecimento de técnicas e processos de utilização de compósitos pela construção civil.

Outro aspecto observado é que quase a totalidade das pesquisas acenam para a necessidade de novas pesquisas envolvendo o comportamento da fibra de vidro ao longo do tempo, fluência, quando estão associadas ao concreto, seja como adição direta, de fios picados, seja como armaduras de reforço em substituição às armaduras de aço. Esse é, portanto, um importante tópico a ser desenvolvido em pesquisas futuras.

6.2 SOBRE AS PESQUISAS RECENTES

Em relação às pesquisas mais recentes, é possível notar que o uso de fibras em matrizes poliméricas vem recebendo maior atenção dos pesquisadores. Foram estudados perfis pultrudados para montagem de obras de infra-estrutura, perfis pultrudados para substituir o aço como reforço em elementos de concreto armado e sistemas de reforço externo de diversos elementos estruturais, como pilares, vigas e alvenaria.

Pesquisas relacionadas a reforços externos e mistos associando concreto pré-fabricado, **GRC**, perfis pultrudados para uso em armaduras e perfis pultrudados para armaduras associados ao concreto reforçado com fibras projetado também têm sido conduzidas, bem como aplicações nesse campo.

Outra linha de pesquisa associada à anterior é a modelagem numérica para possibilitar maior compreensão do comportamento dessas estruturas sob ações diversas.

No caso de elementos em **GRC**, pesquisas envolvendo questões como melhoria da interação fibras versus matriz e a utilização de fibras híbridas também se denotam como novas alternativas. Não foi encontrado material suficiente para se estudar em relação às barras protendidas.

Ainda em relação a elementos estruturais, não foi encontrado nenhuma pesquisa comparativa para analisar os efeitos de fissuração em painéis de laje, telhas tipo “W” e outros elementos auto-portantes em concreto pré-fabricado para estudar se existiriam benefícios em adicionar fibras de vidro nesses elementos estruturais.

De outra parte, capas de lajes alveolares produzidas na Europa já utilizam fibras de vidro adicionadas ao concreto, para melhorar o comportamento na retração por secagem ou variações térmicas. No Brasil ainda estão sendo conduzidas pesquisas para melhorar a qualidade do concreto utilizado na fabricação desses elementos estruturais. No caso específico de elementos de laje alveolar seria uma alternativa viável a utilização de fibras de vidro, uma vez que o concreto tem baixíssimo fator água / cimento, minimizando o efeito da reação álcali versus sílica.

6.3 SOBRE APLICAÇÕES RECENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em relação às aplicações mais recentes, nota-se que a maioria está focada para o uso do GRC na Europa, e também para construção de pontes em GFRP ou híbridas, tanto na América do Norte, como Europa e Japão. Alguns países das ilhas do Caribe, com influência da cultura americana também têm feito uso dos perfis pultrudados como armadura para substituir o aço nas estruturas de concreto.

No Brasil, as aplicações mais recentes não utilizam a fibra de vidro, mas a fibra de carbono, dessa forma pouco se comentou neste trabalho. Contudo, é uma aplicação com estrita ligação ao tema desenvolvido aqui e merece citação. Tais aplicações estão sendo realizadas em recuperação das ligações de apoios em viadutos na cidade de São Paulo.

No Canadá e Estados Unidos, já há alguns anos, por recomendação dos respectivos órgãos responsáveis pelas rodovias, as recuperações de pontes tiveram o aço substituído por armadura de reforço em **GFRP** ou híbridas com **CFRC**.

Outro segmento que vem utilizando, inicialmente como forma de recuperação, mas atualmente como método de reforço preventivo, são os sistemas de reforço de alvenaria externos, em zonas sujeitas a sismos. Isso ocorre nos Estados Unidos, na costa oeste, na Itália e no Japão.

No Brasil, na Bahia, técnicos do IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, já iniciaram há alguns anos a recuperação das estruturas de cobertura de edificações históricas de Salvador, utilizando GFRP como reforço externo para minimizar os riscos de ruína daquelas estruturas.

6.4 COMENTÁRIO FINAL

Percebe-se que pesquisas envolvendo o estado-da-arte de qualquer ciência, tornam-se inexauríveis.

A mobilidade mundial atual, a rapidez dos meios de comunicação diversificados e a quantidade de informações que surgem a cada momento tornam praticamente impossível considerar, no sentido estrito do termo, que se tenha atingido o objetivo de diagnosticar o estado-da-arte sobre qualquer tema.

Para possibilitar acompanhamento que se poderia considerar como sendo quase em tempo real, as tarefas deveriam ser executadas através de grupos interdisciplinares e extra-nacionais, ou seja, que se formem grupos de pesquisa em tempo real para analisar tópicos específicos para um curto período de tempo. Dessa forma, talvez se atinja o objetivo de diagnosticar o que existe de mais atual em nível de pesquisa e aplicação em uma determinada área do conhecimento humano.

De toda maneira, a amplitude do tema abordado permitiu aprofundar o conhecimento sobre as possibilidades de utilização, dificuldades de aplicação imediata de algumas técnicas e as possibilidades e oportunidades para pesquisar detalhes não vistos em algumas pesquisas ou, ainda, complementar algumas pesquisas estudadas sob outros enfoques.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, Antônio. **Cura e Pós-cura de Resinas Poliéster e Vinil Éster**. Passos: REICCHOLD, 2002.
- CARVALHO, Jonas de. **SEM 5836 – Projeto e Fabricação de Componentes em Material Polimérico compósito** – notas de aula. São Carlos: USP, 2007.
- CORRADI, M. et al. **Strengthening Techniques Tested on Masonry Structures Struck by the Umbria – Marche Earthquake of 1997 – 1998**. Construction and Building Materials Journal n. 16, pp. 229 – 239. Perugia: ELSEVIER, 2002.
- CORREIA, João R.; BRANCO, Fernando A.; FERREIRA, João G. **Flexural behavior of GFRP–concrete hybrid beams with interconnection slip**. COMPOSITE STRUCTURES – 2005. Artigo disponível online em: www.elsevier.com/locate/compstruct. Acessado em 18/08/2006.
- CRAY VALLEY – **Apostila Curso de Gel Coat, 31p**. ATOFINA S/A. Taboão da Serra: Cray Valley, 2000.
- DENTON, Steve. **Breaking Down Barriers to the Use of Composites in Construction – Technical Presentation**. Garston: PARSONS BRINCKERHOFF, 2005. Disponível em: <http://www.ngcc.org.uk>. Acesso em 19 de setembro de 2006.
- ESTEVES, Fernanda. **Evolução dos Materiais Poliméricos ao Longo do Tempo**. Dissertação de Mestrado. Porto: UNIVERSIDADE DO PORTO, 2004.
- FARRAR, David. **Healing the Rift** – Materials World V. 14, Nº 8, p.18-21. London: IOM3, 2006.
- FERRARIS, Chiara F. **Alkali-Silica Reaction on High Performance Concrete**. NISTIR – 5742. Gaithersburg: NIST, 1995.
- FERREIRA, Marcelo de Araújo. **Treinamento de Professores para Curso de Estruturas Pré-moldadas de Concreto**. E-book em mídia eletrônica. São Carlos: EDUFSCAR, 2007.
- FERREIRA, Marcelo de Araújo. **Workshop International: Design & Construction of Precast Concrete Structures - UFSCar**. São Carlos: NETPRE, 2007.
- FIORELLI, Juliano; DIAS, Antonio Alves. **Fiberglass reinforced gleam beams: mechanical properties and theoretical model**. Mat. Res. São Carlos, v. 9, n. 3, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392006000300004&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 02 Fev 2007. doi: 10.1590/S1516-14392006000300004.

FIB - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Design of Thin-walled Units – Recommendations**. London: FIB, 1998.

FREIRE JR., Raimundo Carlos Silvério; AQUINO, Eve Maria Freire de. **Fatigue damage mechanism and failure prevention in fiberglass reinforced plastic**. Mat. Res., São Carlos, v. 8, n. 1, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392005000100009&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 02 Fev 2007. doi: 10.1590/S1516-1439200500010 0009.

HOECHST. **Manual Técnico de Aplicação de Resinas ALPOLIT – 16p**. São Paulo: HOECHST, 1996.

HOLLAWAY, Leonard C. **Glass Reinforced Plastic in Construction – Engineering Aspects**. Surrey: Surrey University Press, 1978.

HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of reinforced Concrete Structures**. Cambridge: WOODHEAD, 3rd Reprinted, 2003.

ISE – INSTITUTE OF STRUCTURAL ENGINEERS – **Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre Composite Reinforcement**. London: SETO, 1999.

ISO – International Standard Organization. ISO 91.20.04 – **Glass Fibre Reinforced Pipes – Design Procedures**. Genève: 2005.

_____. ISO 91.20.05 – **Glass Fibre Reinforced Pipes - Testing**. Genève: 2005.

JSCE – JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials**. Tokyo: JSCE, 1998. Obtido via internet. <http://www.jsce-int.org/>. Acessado em 18/11/2006.

_____. **Guidelines for Retrofit of Concrete Structures**. Tokyo: JSCE, 1999. Obtido via internet. <http://www.jsce-int.org/>. Acessado em 18/11/2006.

_____. **Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets**. Tokyo: JSCE, 2000. Obtido via internet. <http://www.jsce-int.org/>. Acessado em 18/11/2006.

JUSTO, Carlos Alberto Tobal. **Metodologia para Medição da Rotação e Curvatura na Zona de Distúrbio na Extremidade de Vigas Pré-moldadas de Concreto**. Iniciação Científica. São Carlos: UFSCar, 2006.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites Manufacturing Materials, product and process engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

McMURRY, John. Organic Chemistry, 5th Edition. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2000.

- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO – Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora PINI, 1994.
- MILTON, G. W. **The theory of Composites - Monographs on applied and Computational Mathematics**. London: CAMBRIDGE, 2003.
- MU, Bin; MEYER, Christian. Bending and Punching Shear Resistance of Fiber -Reinforced Glass Concrete Slabs. ACI Journal, 22p. Detroit: ACI, 2002.
- NPL – National Physics Laboratory – **Design recommendations for FRP Structures**. London: NPL, 1999.
- LEVY NETO, Flávio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais - ciência e Tecnologia**. São Paulo: EDGARD BLÜCHER, 2006.
- ORTENZI, Altibano. **Manual de Procedimentos para Laminação Manual e a Pistola – Procedimentos Internos 02/90 - 54 p**. Porto Alegre: MADRUGA – Construções Náuticas Ltda., 1990.
- ORTENZI, Altibano. **Perfis Pultrudados Como Reforço de Vigas de Concreto Armado Rompidas - Análise e simulação utilizando aplicativos CAM/FEA – Pesquisa em andamento**. São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP, 2007.
- PACCOLA, Rodrigo Ribeiro. **Análise não linear física de placas e cascas anisotrópicas laminadas acopladas ou não com meio contínuo tridimensional viscoelástico através da combinação entre o MEC e o MEF**. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2004.
- PERUZZI, Antônio de Paulo. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa – Dissertação de Mestrado – Departamento de Estruturas**. São Carlos: EESC – USP, 2002.
- PIGGOTT, Michael. **Load Bearing Fibre Composites**. 2nd Edition. Toronto: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.
- QUINN, J. A. **Composites Design Manual**. Liverpool: James Quinn Associates Publisher, 3rd. edition, 2002.
- RAM, Arie. **Fundamentals of Polymer Engineering**. Haifa, Israel: PLENUM PRESS, 1997.
- REHM, Kelley. **Full Scale Testing of FRP Repaired Prestressed Beams**. AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington: AASHTO, 2002.
- SAADATMANESH, Hamid. **Extending Service Life of Concrete and Masonry Structures with Fiber Composites**. *Construction and Building Materials*. Vol. 1 i, N° 5-6. pp. 327-335. Tucson: Elsevier Science Ltd, 1997.

- SAINT-GOBAIN – VETROTEX. **Vetrotex Glass Fibre**. Chambéry: VETROTEX, 2000.
- SAVASSI, Walter. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos: Em análise linear de estruturas**. São Carlos: EESC, 1996.
- SAVASTANO JR., Holmer. **Zona de Transição Entre Fibras e a Pasta de Cimento Portland: Caracterização e Interrelação com as Propriedades Mecânicas do Concreto**. Tese de Doutorado. São Paulo: USP, 1992.
- SHAHEEN, E; SHRIVE, N. G. **Strengthening of Masonry Columns with Sprayed Glass Fibre Reinforced Polymer (SGFRP)**. 10th C. M. S.. Alberta: CMS, 2005.
- SINGH, Interdeep; NAYAK, Debasys; BHATNAGAR, Naresh. **Secondary Processing of Polymers Matrix Composites**. Bromsgrove: Composites Processing, 2004.
- SOLOMONS, T. W. Graham. **Fundamentals of Organic Chemistry, 5th Edition**. New York: WILEY & Sons, 1996.
- SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo; EDUSP, 2003.
- TANN, D. B. **Behaviour of FRP Strengthened Concrete Elements in Fire** - University of Glamorgan. Bromdgrove: CPA Annual Conference, 2004.
- TAVARES, Danusa Haick. **Análise Teórica e Esxprimental em Vigas de Concreto Armadas com Barras Não Metálicas de GFRP**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Estruturas. São Carlos: EESC – USP, 2006.
- TOLEDO, Raquel de; ABREU, Aline F. de; JUNGLES, Antonio E. – **A Difusão de Inovações Tecnológicas na Indústria da Construção Civil** – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 1999.
- TSAI, Stephen W. **Composites Design**. Dayton: UNITED STATES AIR FORCE MATERIALS LABORATORY, 1986.
- TSAI, Stephen W. **Theory Composites Design**. Stanford: University of California at Stanford, 2003.
- VANALLI, Leandro. **O MEC e o MEF Aplicados à Análise de Problemas visco-plásticos em Meios Anisotrópicos e Compostos** - Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2004.
- YOSHIDA, Hiroyuki. **First FRP Recycling Technology Using Sub-critical Water Hydrolysis Succeeds in Forming New Functional Polymer (Styrene-fumarate Copolymer)**. OSAKA: MATSUSHITA ELECTRIC WORKS, LTD., 2006. Artigo disponível em: <http://www.mew.jp>. Data de acesso: 18/01/2007.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732 – **Cimento Portland Comum – Especificação, 5p.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- _____. NBR 5733 – **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – Especificação, 5p.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- _____. NBR 5735 – **Cimento Portland Alto Forno – Especificação, 5p.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- _____. NBR 5736 – **Cimento Portland Pozolânico – Especificação, 5p.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- _____. NBR 11172 – **Aglomerantes de Origem Mineral – Terminologia, 5p.** Rio de Janeiro: ABNT, 1989.
- _____. NBR 11578 – **Cimento Portland Composto – Especificação, 5p.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- _____. NBR 6023 - **Referências Bibliográficas, 19p.** São Paulo: ABNT, 2000.
- BRE Digest 442. **Architectural Use of Polymer Composites**, London: CRC, 1999.
- BRE IP 7/99. **Advanced Polymer Composites in Construction**. London: CRC, 1999.
- CHB - Canadian Highway Bridge. **Design Code, "Section 16: Fibre Reinforced Structures", Final Draft**. Montreal, 1996.
- CLARKE, J. L.; O'REGAN, D. P.; THIRUGNANENEDRAN, C. **"EUROCRETE Project, Modification of Design Rules to Incorporate Non-Ferrous Reinforcement"**. London: Sir William Halcrow & Partners, 1996.
- CONCRETE SOCIETY. **Technical report 55. Design Guidance for Strengthening Concrete Structures using Fibre Composite materials**. Concrete Society, 2000, ISBN 0 946691 84 3.
- CBDG. **Technical Guide 3. The use of Fibre Composites in Concrete Bridges**. Concrete Society, 2000.
- FERRARI, Vladimir José. **Reforço de Vigas de Concreto Armado com Manta de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) Aderido a Substrato de Transição Constituído por Compósito Cimentício de Alto Desempenho**. Tese de doutorado. São Carlos: EESC, 2007.

FIB – Federation Internationale du Béton. **Bulletin 10 "Bond of Reinforcement in Concrete"**. Prepared by Task Group Bond Models, chapter 7 on FRP, August 2000 pp315-394. Brussels: FIB, 2000.

Highways Agency. **Advice Note BA 30/94, Strengthening of Concrete Bridges using externally bonded plates**. London, Dept of Transport, 1994.

ISE - Institution of Structural Engineers. **A guide to the Structural Use of Adhesives**. London, ISE, 1999.

_____. **"Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre Composite Reinforcement"**. Published by SETO Ltd, 116 p. London, SETO, 1999.

JSCE – Japan Society of Civil Engineers. **"Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials"**. Tokio, Concrete Engineering Series 23, 1997.

LAY, David C. **Álgebra Linear e suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1999.

GLOSSÁRIO

Acelerador: Agente químico que promove a aceleração da polimerização, ou cura, do plástico insaturado, ao ser misturado com o catalisador.

Airless: Equipamento para projeção da fibra de vidro que projeta a resina por pressão, sem ar, sendo esse utilizado somente para lançar os fios picados, resultando em menor evaporação do estireno.

Aleatório: Forma de dispersão dos fios picados que são depositados para formar as mantas de fios picados, *ou chopped strand mat*.

Anisotrópico: Em relação aos compósitos, se refere à orientação das fibras em relação ao plano dos laminados, ou camadas, de forma multidirecional apresentando propriedades mecânicas diferentes em cada direção.

Aramida: Fibra sintética desenvolvida nos laboratórios da Du Pont ® - na década de 1960, a partir da poliamida, de alto módulo e resistência.

Bidirecional: Tecidos tramados (*woven rovings*) na sua fabricação, onde o urdume e a trama possuem mesma quantidade de fios e mesma gramatura - Ver: Unidirecional.

Catalisador: Agente químico que promove a polimerização, ou cura, dos plásticos termofixos insaturados.

Chopped Strand Mat: Manta fabricada a partir do *roving* picado, com 40 mm a 50 mm de comprimento, depositado aleatoriamente sobre uma esteira, com aplicação de estireno para manter a coesão das fibras.

Compósitos: A matriz composta por fibra de vidro e plásticos termofixos diversos. Quando se tratar de outra matriz será especificado no texto entre parênteses.

Estireno: Derivado aromático do petróleo que promove a solubilidade da resina antes de ser resfriada, após sua produção, quebrando a cadeia molecular e tornando-a líquida.

Feixe: Multifilamentos de fios de vidro que variam entre 5 e 25 µm.

Fibra de Carbono: Fibra desenvolvida em 1963, a partir de fibras de Poliacrilonitrilo que passam por processo de tensionamento, oxidação, carbonização e grafitinização – Ver PAN e PITCH.

Gramatura: Peso por metro quadrado (densidade/área) da fibra já beneficiada sob a forma de tecido ou manta.

Gel coat: Preparado à base de algum tipo de resina, aditivado de outros compostos como parafina e pigmentos que serve para dar o acabamento superficial das peças fabricadas em GFRP.

Gel coat primer: Similar ao *gel coat*, é fabricado com resinas de maior resistência para dar o acabamento superficial de moldes e fôrmas para fabricação de peças em GFRP.

Hand lay-up: Técnica de aplicação da fibra e do plástico manualmente sobre um molde ou superfície, segundo determinadas técnicas.

Isoftálica: Denominação de certo tipo de resina poliéster utilizada em compósitos, em razão do ácido componente.

Isômeros: Compostos de mesma cadeia molecular, porém diferentes em sua distribuição geométrica ou espacial dos átomos, tratados na estereoquímica.

Isotrópico: Em relação aos compósitos, se refere à orientação das fibras em relação ao plano dos laminados, ou camadas, de forma multidirecional apresentando propriedades mecânicas similares em todas as direções (ver detalhes do termo em ORTOTRÓPICO).

Laminação: Processo pelo qual se faz o depósito das camadas de fibra de vidro impregnadas pela resina devidamente catalisada sobre seu local definitivo de aplicação ou fora dele.

Laminadora: Equipamento composto pelos recipientes de resina e catalisador e do mecanismo de condução e corte do *roving* para laminação pelo sistema *spray up*.

Lay-up: Deposição de camadas; laminação.

Low-profile: Baixa contração; referindo-se aos compósitos presentes neste trabalho.

Mechas: Ver “Feixe”.

Multidirecional: Certo tipo de tecido produzido em múltiplas camadas, com as quatro orientações principais: 0° , 90° , $+45^\circ$ e -45° em relação à longitudinal do tecido.

Ortoftálica: Denominação de certo tipo de resina poliéster utilizada em compósitos, em razão do ácido componente.

Ortotrópico: Em relação à matemática e física, se refere à distribuição das fibras que criam os planos (trópicos) dos laminados, ou camadas, de forma bidirecional ortogonal, apresentando propriedades mecânicas em duas direções ortogonais paralelas às fibras (três no caso do concreto). Essa característica ocorre nos tecidos bidirecionais (alguns autores escrevem “ortótropo”, contudo essa definição já é clara nos dicionários da língua portuguesa e trata-se de uma definição biológica e não do sentido de equilíbrio ortogonal – nos 3 eixos

cartesianos principais de inércia, apesar do radical ORTO estar presente). O mesmo ocorre com os termos ISOTRÓPICO e ANISOTRÓPICO.

PAN: Poliacrílonitrilo – material precursor das fibras de carbono – VER – PITCH e FIBRA DE CARBONO.

PITCH: Piche utilizado em conjunto com fibras rayon como materiais precursores na fabricação de fibras de carbono utilizando o mesmo processo do PAN e FIBRA DE CARBONO.

Pistola de laminação: Ou simplesmente pistola, é o equipamento que lembra o revólver de pintura, porém possui dois orifícios de passagem de material e um picotador por onde é picado e lançado o *roving*, um componente *da spray-up machine*.

Picotador: Mecanismo que possui dois cilindros onde um deles contém lâminas e o outro é de borracha, usados para tracionar o *roving*, cortar e lançá-lo através de aspersão de ar comprimido.

Polímero: Refere-se à cadeia molecular onde existem muitas repetições da unidade química de que é formado um determinado composto químico.

Pultrusão: Método de fabricação de perfis similar à extrusão de metais e plásticos termo moldáveis, através de um sistema de moldagem.

Quase-Isotrópico: Trata-se da denominação, por alguns pesquisadores, da tendência de alguns laminados se comportarem como isotrópicos, em razão da distribuição das camadas em quase todas as direções de atuação dos esforços.

Randômico: Estrangeirismo adaptado para o português técnico. Ver Aleatório.

Resina: Nome comum dado aos plásticos chamados termofixos, insaturados, isto é, que necessitam de reagentes para que ocorra a polimerização ou arranjo da cadeia molecular.

Rolete: Ferramenta manual de alumínio ou polímero termoplástico com ranhuras helicoidais, utilizado para compactar as camadas de fibra e extrair as bolhas de ar eventualmente retidas durante o processo de laminação manual – *hand lay-up*, ou por projeção – *spray-up*.

Roving: Fios formados por feixes multifilamentares de vidro, não torcidos, unidos por silano, enrolados em bobinas. Variam conforme a quantidade de filamentos por feixe, de 4 a 4000 TEX.

Silano: Composto que recobre os filamentos de vidro tornando-os compatíveis com os polímeros.

Spray-up: Método de aplicação da fibra e do polímero simultaneamente por meio de uma máquina de projeção por meio de ar comprimido.

Spray-up machine: Equipamento de laminação por projeção.

Tecido: Nome genérico aplicado no Brasil tanto para os *woven rovings* como para os *woven cloths*, sempre se fazendo referência à gramatura dos mesmos. Ex.: tecido 600, que significa pesar 600 g / m².

Tereftálica: Certo tipo de resina baseada no ácido tereftálico ou polietileno tereftalato - PET.

Termofixo: Um tipo de polímero insaturado – será explicado no texto.

Termomoldável: Um tipo de polímero saturado – será explicado no texto.

Termoplástico: Ver termomoldável.

Tixotropia: Capacidade de um líquido manter-se aderido a uma superfície pelo atrito de contato e pela sua viscosidade dinâmica μ .

Trama: Fios que entrelaçam as fibras, no sentido transversal dos tecidos, limitando sua largura.

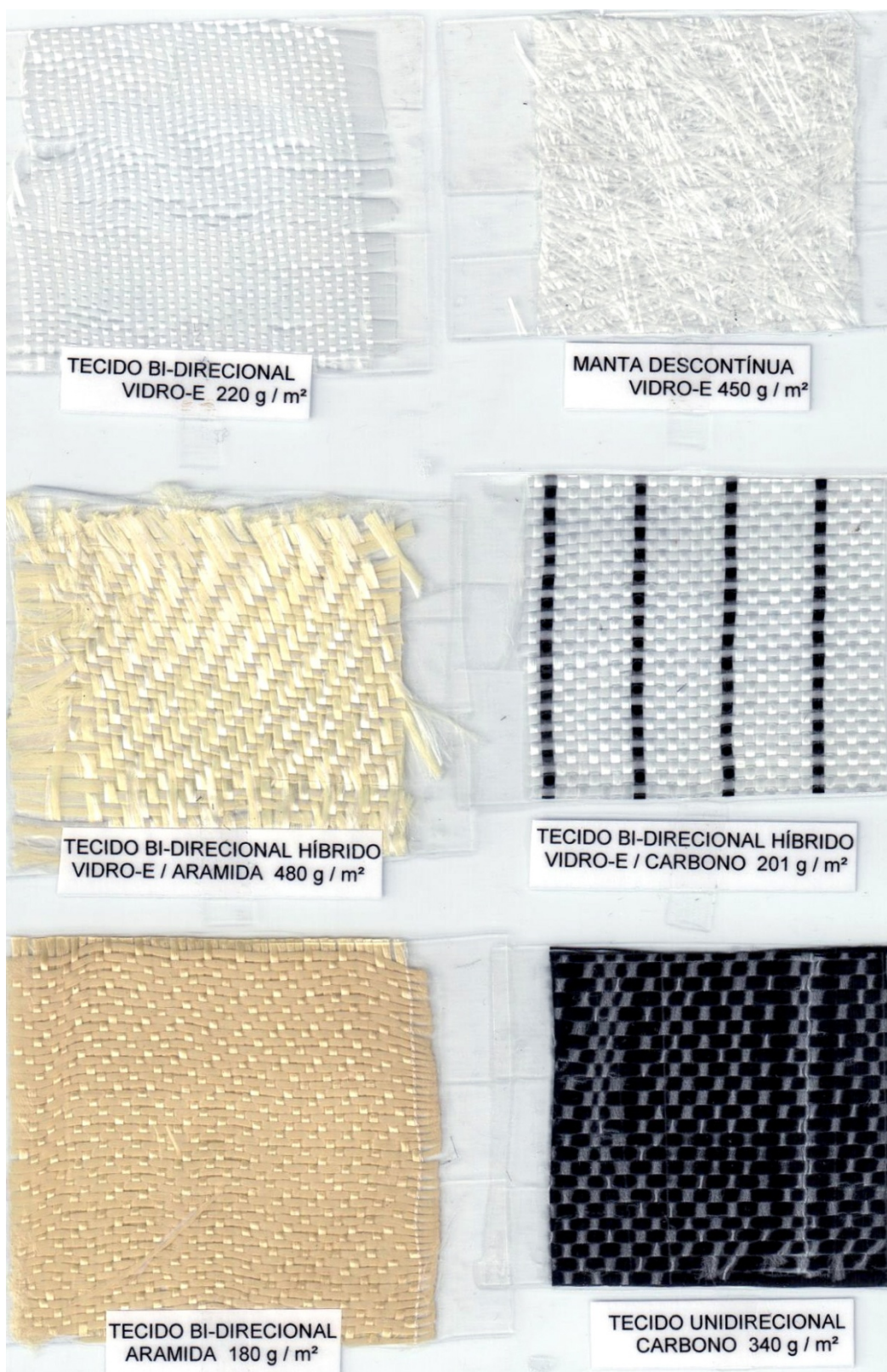
Unidirecional: Forma de tramar os tecidos em que o urdume possui maior quantidade (e maior gramatura) de fios que a trama, deixando o tecido reforçado numa única direção. Ver: Bidirecional.

Urdume: Fios que se prolongam por todo tecido, no sentido longitudinal e são mantidos coesos e retilíneos pela trama.

Woven Fabrics / Woven Cloths: Tecidos elaborados com *rovings* compostos por fios entrelaçados de forma bidirecional ou unidirecional, com gramatura não superior a 400 g / m².

Woven Roving: *Rovings* Tecidos elaborados a partir de *rovings* com fios entrelaçados formando uma trama grossa de maior gramatura, normalmente bidirecionais – acima de 400 g/m².

ANEXO I

EXEMPLOS DE ALGUMAS FIBRAS UTILIZADAS
PARA PRODUIR MATERIAIS COMPÓSITOS

ANEXO II

Fluxograma do processo de cálculo em compósitos laminados. Caso geral referentes aos eixos x, y e x, y, z .

