



Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção
Curso de Especialização em Construção Civil



Monografia

"CONCRETO COM ARMADURA DE FIBRA DE VIDRO"

Autor: Lucas Carvalho Cateb

Orientador: Prof. Adriano de Paula e Silva

Janeiro/2011

LUCAS CARVALHO CATEB

"CONCRETO COM ARMADURA DE FIBRA DE VIDRO"

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil
da Escola de Engenharia UFMG

Ênfase: Gestão e Tecnologia na Construção Civil

Orientador: Prof. Adriano de Paula e Silva

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

Dedico este trabalho a meus pais e irmãos pelo apoio e carinho que se fizeram fundamentais para sua conclusão.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela família estruturada e atenciosa a que pertenço, aos meus pais por não pouparem esforços em garantir minha formação desde os primeiros anos de minha vida e a meus irmãos que sempre apoiaram minhas idéias com dedicação.

Aos professores que me orientaram nesta jornada de conhecimento e me trouxeram a um novo patamar de sabedoria.

Aos queridos colegas que caminharam ao meu lado nesta empreitada sempre dispostos a garantir nosso sucesso.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 <i>Definição e características das fibras de vidro</i>	14
2.2 <i>Fabricação e utilização</i>	17
2.2.1 <i>Formas de fornecimento</i>	18
2.2.1.1 <i>Roving ou cordoalha</i>	18
2.2.1.2 <i>Fibra picada</i>	19
2.2.1.3 <i>Telas</i>	20
2.2.1.4 <i>Tecidos</i>	21
2.2.1.5 <i>Perfis pultrudados</i>	22
3. PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE VIDRO.....	23
3.1 <i>Tensão de ruptura e módulo de elasticidade</i>	23
3.2 <i>Durabilidade</i>	25
3.3 <i>Aderência</i>	26
3.4 <i>Fissuração</i>	27
3.5 <i>Visão geral das barras de FRP</i>	28
4. CONCLUSÃO.....	29
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fieiras e filamentos de vidro escorrendo por pequenos orifícios. (NEG, 2007).....	18
Figura 2: Roving de fibra tipo AR.....	19
Figura 3: Fibra picada.....	19
Figura 4: Telas de fibra de vidro AR.....	20
Figura 5: Exemplo de construção em GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete).....	21
Figura 6: Tecido de fibra tipo AR.....	21
Figura 7: Esquema de fabricação de perfis pultrudados de fibra de vidro.....	22
Figura 8: Exemplo de perfis pultrudados em fibra de vidro.....	22
Figura 9: Diagrama de tensão e deformação médias por diâmetro (Witt, 2009).....	24
Figura 10: Perfil de ruptura (Witt, 2009).....	25
Figura 11: Teste de arrancamento em barra de FRP (Witt, 2009).....	26
Figura 12: Teste de fissuração (Witt, 2009).....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Tipos de fibra de vidro e suas principais aplicações (Beber, 2003).....	15
Tabela 2:	Propriedades das fibras de vidro tipo E, S e AR. (Beber, 2003).....	15
Tabela 3:	Propriedades das fibras normalmente utilizadas como reforço em concreto (Banthia, 2009).....	16
Tabela 4:	Valores médios de resistência à tração de barras pultrudadas (Witt, 2009) adaptado.....	23
Tabela 5:	Diâmetros, dimensões e pesos típicos (Witt, 2009) adaptado.....	28
Tabela 6:	Tabela comparativa (Witt, 2009) adaptado.....	29

LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIATURAS

A = área de atuação de uma força

d = diâmetro de barra para ensaio

E = módulo de elasticidade

ε = deformação específica

ρ = densidade do material

σ = tensão

DIN = Deutsches Institut für Normung

NBR = Norma Brasileira

PVC = Cloreto de Polivinila

FRP = Fiber reinforced polymers

ASTM = American Society for Testing and Materials

AR = Álcali resistente

GFRC = Glassfiber reinforced concrete

RESUMO

Este trabalho constitui de uma pesquisa bibliográfica com a intensão de esclarecer a viabilidade de se utilizar fibras de vidro na construção civil como material substituto ao aço. Foram pesquisadas diversas fontes nacionais e internacionais para agrupar informações confiáveis e despertar o interesse do leitor para o tema. As fibras de vidro são fornecidas em diversas formas e para a construção civil já existem perfis específicos para a substituição das armaduras metálicas. A utilização destes perfis é, hoje, indicada somente para meios de agressividade severa porém com a difusão de sua aplicação poderemos ter um novo período de desenvolvimentos na engenharia civil baseado em materiais compósitos não metálicos. O fato de excluirmos o aço das construções nos permite explorar um horizonte de vida útil em nossos projetos nunca antes imagináveis. As matrizes cimentícias não sofrem grande degradação ao longo do tempo sendo portanto o aço estrutural o limitador em praticamente todas as construções. Também é da utilização do aço que surgem a maioria das patologias em edificações e eleva seu custo de manutenção. As construções em concreto aparente não poderiam ter uma melhor alternativa do que a utilização de armaduras não metálicas.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado com aço estrutural vem sendo utilizado em construções destinadas às mais diversas finalidades desde 1850 segundo Gonçalves et al. (2005). Hoje temos vasto conhecimento sobre as propriedades destes materiais e seu comportamento ao longo do tempo, especialmente para estruturas expostas a meios fortemente agressivos como regiões litorâneas, áreas industriais, obras hidráulicas e obras de arte rodoviárias temos conhecimento consolidado sobre os grandes custos de manutenção e baixa expectativa de vida útil.

O desenvolvimento deste trabalho se baseia na busca para reunir uma parcela de conhecimento sobre a viabilidade técnica da adoção da fibra de vidro como elemento de reforço à tração em estruturas de concreto armado como alternativa ao uso do concreto armado com aço, uma vez que este último sofre grande degradação à partir da alteração do pH do concreto à medida que ocorre a carbonatação do seu componente principal. O processo de carbonatação do concreto não gera malefícios ao mesmo, podendo até desenvolver ganhos de resistência consideráveis, porém devido à acidificação do meio as armaduras de aço perdem sua capacidade passivadora e assim sua proteção contra o processo de oxidação.

Este trabalho visa explorar as alternativas para utilização da fibra de vidro em substituição ao aço estrutural, largamente utilizado em construções em geral e especialmente em áreas industriais, onde temos maiores concentrações de gás carbônico e chuvas ácidas dois principais agentes deletérios ao concreto armado convencional.

A utilização de fibras sintéticas em matrizes de cimento Portland é amplamente utilizada na recuperação estrutural de elementos de concreto em obras de arte rodoviárias e estruturas industriais, porém a fabricação de elementos estruturais em concreto com armadura em fibra de vidro, fibra de carbono ou aramida ainda não é uma prática comum em nosso país.

As fibras sintéticas podem ser inseridas em matrizes cimentícias na forma de filamentos com distribuição difusa (picados), fios, mantas, telas, tecidos e perfis pultrudados sendo cada forma de utilização responsável por absorver tensões de formas específicas. Outro ponto importante que deve ser considerado é o ataque químico da fibra de vidro convencional (tipo E) pela alta alcalinidade da pasta de cimento Portland, processo conhecido como devitrificação, as fibras de vidro convencionais quando utilizadas sem qualquer proteção, sofrem a degradação de suas propriedades físicas causando uma diminuição em sua capacidade de suportar forças de tração. Este empecilho pode ser contornado com a utilização de fibras de vidro do tipo AR, ou álcali-resistentes, que são formadas a partir da adição de óxido de zircônio durante a fusão do vidro, porém, como as fibras de vidro do tipo AR têm um custo mais elevado que da fibra de vidro convencional diversos pesquisadores desenvolvem maneiras de proteger os filamentos de vidro tipo E da pasta de cimento Portland. Peruzzi (2007) desenvolveu em sua tese um novo tipo de fibra na forma de telas, a partir das fibras de vidro tipo E, usando uma impregnação de PVC como película protetora para barrar o ataque dos álcalis da pasta cimentícia. Anteriormente foi estudado por Peruzzi (2002) a utilização destas fibras, sem a camada impregnante, em um meio menos agressivo ao vidro comum. Matrizes cimentícias de menor alcalinidade e menor ou desprezível formação de hidróxido de cálcio obtidas à partir da utilização de

cimentos aluminosos ou cimento de alto forno (CPIII) com a adição de sílica ativa, cinza volante, metacaulinita ou outro material com propriedades pozolânicas que diminuem ou eliminam a formação de hidróxido de cálcio na reação de hidratação mostraram resultados menos expressivos como solução única, porém, não merecem ser desconsiderados como parte do conjunto de soluções.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para este estudo devemos primeiramente definir a abrangência de um material compósito, visto que, informalmente consideremos compósitos todo material artificialmente produzido, formado por duas ou mais fases, e que apresente propriedades similares às de todos os materiais que o formam. Segundo Schwartz (1984), Mano (1991) e Callister Jr. (1997) os materiais compósitos são definidos em termos macro-estruturais formados por matrizes, partículas, fibras etc. Onde o material compósito é a combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, possuindo uma interface distinta entre si e adquirindo assim propriedades que variam em função das suas quantidades relativas e principalmente da geometria dos componentes dispersos. Pela geometria do componente disperso temos três classificações para os compósitos : particulares (reforçados com partículas), fibrosos (reforçados com fibras) e compósitos estruturais. Pela interpretação de Callister Jr.(1997) partículas são componentes dispersos que apresentam dimensões similares em todas as direções, enquanto as fibras apresentam grande relação entre comprimento e diâmetro.

Na construção civil temos uma formação muito comum de compósito reforçado com partículas, o concreto, formado a partir de partículas (agregados miúdos e

gráudos) e uma matriz (pasta de cimento). Em aplicações estruturais, não necessariamente ligadas a construção civil, temos também em larga escala a utilização de compósitos de polímeros reforçados com fibras (FRP - fiber reinforced polymers) onde sua resistência e rigidez são função do tipo de fibra, da matriz polimérica utilizada e, o mais importante, da interface entre estas duas fases. As aplicações das matrizes poliméricas são praticamente infindáveis visto que temos uma infinidade de polímeros já desenvolvidos e em desenvolvimento. Uma vez que avançamos no entendimento sobre as uniões físicas em escala quântica temos novos tipos de polímeros em desenvolvimento para utilizações cada vez mais específicas. Na área da construção civil também temos uma grande quantidade de matrizes desenvolvidas, porém em menor número e mais profundo conhecimento de suas propriedades. Isto se deve ao alto grau de conservadorismo e grande impacto do custo, pois, geralmente tratamos de grandes volumes de materiais e qualquer desenvolvimento que eleve consideravelmente o custo de uma construção é imediatamente descartado.

A partir desta análise podemos seguir as linhas de pesquisa que estudam os compósitos elaborados a partir de matrizes cimentícias, comuns à construção civil e de custo aceitável, com a adição de fibras sintéticas que podem substituir inteiramente a parcela de resistência designada ao aço na construção de estruturas de concreto armado convencional. Em contra partida, o nível de conhecimento obtido durante anos de estudos sobre as interações do aço de construção com as diversas matrizes cimentícias disponíveis é de longe superado pelo conhecimento sobre as interações químicas e físicas entre matrizes cimentícias e fibras sintéticas. Desta última nos interessa mais as fibras de vidro por serem as de menor custo de fabricação.

2.1. Definição e características das fibras de vidro

Fibras podem ser definidas como materiais filamentosos com razão entre comprimento e diâmetro de no mínimo 100. Embora não existam restrições quanto ao mínimo diâmetro, o máximo não deve ultrapassar 0,25mm (ASTM, 1996). O processo de constituição das fibras contempla em alinhar suas moléculas e sua alta resistência à tração está ligada a melhor atração intermolecular resultada por este alinhamento (Schwartz, 1984). Dentre as diversas fibras poliméricas, as mais utilizadas comercialmente em aplicações de engenharia são as fibras de vidro (Glass), carbono (Carbon) e aramida (Aromatic Polyamid). Segundo Hollaway (1993) as principais características das fibras utilizadas na fabricação de compósitos são:

- Elevada resistência e módulo de elasticidade;
- Uniformidade no valor de resistência de fibras individuais;
- Estabilidade e manutenção das propriedades durante manuseio;
- Baixa variação de diâmetros entre os filamentos e rugosidade superficial.

Para aplicações na construção civil a fibra de vidro é considerada mais vantajosa sobre as demais por oferecer grande resistência a tração, elevado módulo de elasticidade e baixo custo de produção. Como mencionado inicialmente neste trabalho a utilização de fibras de vidro convencionais do tipo E deve ser precedida pelo encapsulamento de seus filamentos e imersa em uma matriz cimentícia pouco agressiva a sua composição. Porém existem no mercado diversos tipos de fibras de vidro como podemos identificar no quadro 1. As fibras mostradas a seguir podem ser divididas em dois grupos segundo Hollaway & Leeming (1999),

as do tipo E, A, C e E-CR com módulo de elasticidade de 70GPa e resistência a tração de 1.000MPa até 2.000MPa e as fibras do tipo R, S e AR com módulo de elasticidade de 85GPa e resistência a tração de 2.000MPa até 3.000MPa. Porém as fibras dos tipos R e S que são caracterizadas pela sua alta resistência são utilizadas apenas na indústria aeroespacial por seu alto custo de fabricação.

Tabela 1 – Tipos de fibra de vidro e suas principais aplicações (Beber, 2003)

Tipo de fibra	Principal aplicação
E	Aplicações usuais, baixo conteúdo de álcalis (<1%)
A	Elevado conteúdo de álcalis (10-15%)
C	Excelente resistência a corrosão, utilizada para acabamento de superfícies
E-CR	Livre de boro, boa resistência a corrosão por ácidos
R, S	Excelentes propriedades mecânicas, utilizadas para aplicações de alto desempenho
AR	Álcali resistente, empregada em concretos reforçados com fibras

Tabela 2 – Propriedades das fibras de vidro tipo E, S e AR. (Beber, 2003)

Tipo de fibra	Densidade	Resistência à tração	Módulo de Young	Deformação última	Coefficiente de expansão térmica	Coefficiente de Poisson
	kg/m ³	MPa	GPa	%	10 ⁻⁶ /°C	
Vidro-E	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
Vidro-S	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Vidro álcali resistente	2270	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-

Tabela 3 – Propriedades das fibras normalmente utilizadas como reforço em concreto (Banthia, 2009)

Fiber type	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Tensile strain (%) (max-min)	Fiber diameter (μm)	Alkali stability, (relative)
Asbestos	600-3600	69-150	0.3-0.1	0.02-30	excellent
Carbon	590-4800	28-520	2-1	7-18	excellent
Aramid	2700	62-130	4-3	11-12	good
Polypropylene	200-700	0.5-9.8	15-10	10-150	excellent
Polyamide	700-1000	3.9-6.0	15-10	10-50	-
Polyester	800-1300	up to 15	20-8	10-50	-
Rayon	450-1100	up to 11	15-7	10-50	fair
Polyvinyl Alcohol	800-1500	29-40	10-6	14-600	good
Polyacrylonitrile	850-1000	17-18	9	19	good
Polyethylene	400	2-4	400-100	40	excellent
Polyethylene pulp (oriented)	-----	-----	-----	1-20	excellent
High Density Polyethylene	2585	117	2.2	38	excellent
Carbon steel	3000	200	2-1	50-85	excellent
Stainless steel	3000	200	2-1	50-85	excellent
AR- Glass	1700	72	2	12-20	good

Segundo Peruzzi (2007) em setembro de 2007 o custo de 1 metro quadrado de tecido de fibra de vidro do tipo AR tinha o custo médio de US\$3,00 para a fibra do tipo E o custo era de US\$2,00, já para as fibras de carbono e aramida são respectivamente US\$40,00 e US\$22,00. Para o aço CA-50 o custo de 1m² de tela era de US\$1,00 no mesmo período. Porém, devemos levar em consideração que ao utilizarmos as telas, tecidos ou perfis pultrudados de fibra do tipo AR o peso total da estrutura será reduzido, pois, as fibras de vidro têm peso específico de 25,6kN/m³ contra os 78,5kN/m³ do aço. Adicionalmente temos também a eliminação da camada de cobertura das armaduras o que reduziriam todas as seções das estruturas gerando grande economia no volume total de concreto. Para as obras de arte rodoviárias ou estruturas aparentes não é necessário

revestimento, pois a medida em que houver a carbonatação do concreto e diminuição do seu pH as fibras de vidro estariam mais protegidas contra a devitrificação.

2.2. Fabricação e utilização

A produção das fibras de vidro explicada por (Carvalho 1993, p.39):

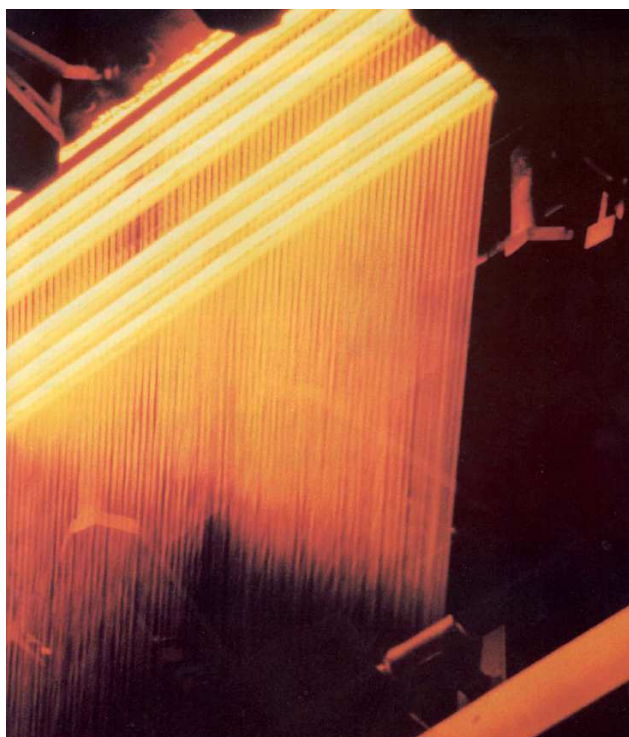
A matéria-prima é composta principalmente pela sílica em forma de areia, o componente básico para qualquer vidro, cerca de 50%. Os outros ingredientes são os boratos e pequenas quantidades de especialidades químicas. Os materiais são misturados numa grande quantidade, a granel (...) A mistura é então levada para o forno de fusão. Dentro do forno a areia e os outros ingredientes se dissolvem formando uma massa fundida em temperaturas que giram em torno de 1.550°C. A temperatura desta massa decresce gradualmente a partir da zona de fusão até os canais que alimentam as feiras, no qual a temperatura alcança 1.250°C. Nesta temperatura, o vidro atinge a viscosidade mais favorável para a formação das fibras, permitindo a conformação das mesmas com baixo índice de quebra.

A massa fundida de vidro flui para bandejas de platina altamente resistentes ao calor, as quais possuem milhares de pequenas aberturas tubulares furadas com precisão, e que são chamadas de feiras. As feiras são placas metálicas retangulares com orifícios através do qual a massa fundida passa, originando os filamentos. Esta corrente fina de vidro fundido é puxada em um diâmetro preciso, e então resfriada por água e ar para garantir o diâmetro e criar um filamento. Logo após a sua formação, os filamentos são coletados e agrupados em mechas e feixes, e depois enrolados em bobinas.

Na manufatura, as fibras recebem, individualmente, um revestimento químico (sizing) que protege e lubrifica cada filamento, aumentando a resistência a abrasão e garantindo a integridade do feixe, visto que, sem este tratamento

superficial, as fibras não serviriam de material de reforço. Uma outra função do tratamento superficial das fibras é torna-las compatíveis com a matriz a ser reforçada. Por último, as bobinas são aquecidas para secar o revestimento químico (sizing).

Figura 1 – Fieiras e filamentos de vidro escorrendo por pequenos orifícios. (NEG, 2007)



Após o resfriamento dos filamentos de vidro e finalização do processo de sizing, as fibras de vidro são unidas em e enroladas. Estes rolos são chamados de rovings, a partir dos rovings podemos fabricar tecidos, telas, fibra picada e perfis pultrudados.

2.2.1. Formas de fornecimento

2.2.1.1. Roving ou cordoalha

Para a formação do roving contínuo são agrupados 150 a 200 filamentos em cordões e de 20 a 50 cordões agrupados em uma cordoalha enrolada em formato cilíndrico. O

roving é a primeira forma comercial das fibras de vidro e podem ser utilizados para a produção de tubos e fibras picadas para mistura úmida no concreto e argamassas.

Figura 2 – Roving de fibra tipo AR



2.2.1.2. Fibra picada

Figura 3 – Fibra picada

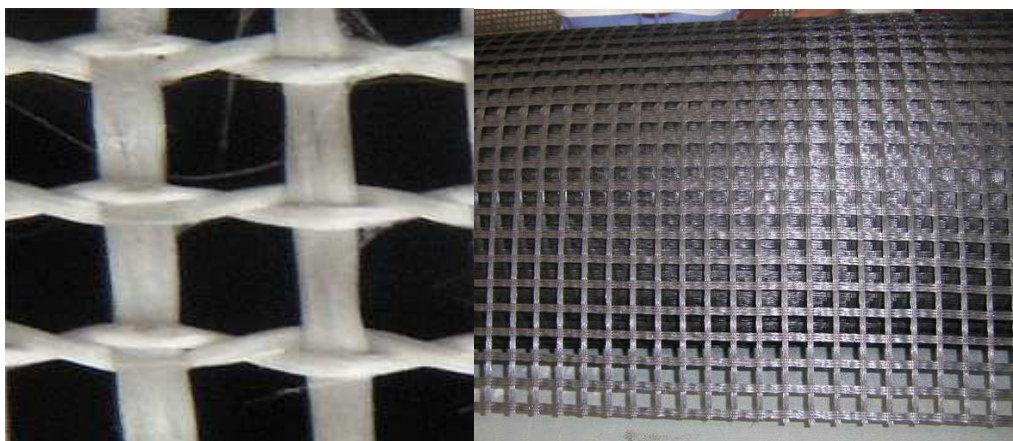


Obtida à partir do roving é muito utilizado na fabricação de painéis de fachada e peças pré-fabricadas de concreto, podem ser misturadas em via úmida para melhor dispersão em concretos ou argamassas e garantem boa resistência à microfissuração gerando ganhos de durabilidade. A fabricação de peças estruturais em concreto com fibras

picadas da uma nova dimensão a utilização dos concretos armados com fibra de vidro, mecanismos de grande porte anteriormente fabricados em aço agora podem ser fabricados em GFRC garantindo grande durabilidade e baixa manutenção.

2.2.1.3. Telas

Figura 4 – Telas de fibra de vidro AR



As telas de fibra tipo AR podem ser utilizadas em lajes como estruturas sandwich uma camada inferior lançada diretamente sobre a fôrma sem necessidade de cobrimento e uma camada superior aplicada após a concretagem. Existem telas de diversas tramas e malhas com diferentes especificações de teores de fibra por metro quadrado. Este material permite a fabricação de peças estruturais de geometria complexa onde não seria possível a utilização de armadura em aço. A fabricação de peças em concreto tipo sandwich é interessante para a o aumento da mecanização nas construções, perfis e peças estruturais podem ser fabricados em escala industrial e montados como estruturas pré-fabricadas porém com maior expectativa de vida útil e menores custos de manutenção.

Figura 5 – Exemplo de construção em GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete)



2.2.1.4. Tecidos

Figura 6 – Tecido de fibra tipo AR



São formados a partir do roving em equipamentos de tecelagem, a aplicação de tecidos é mais indicada para fins de reforço estrutura, pois, como sua malha é muito fechada este deve ser utilizado em combinação à resinas poliméricas. A pasta de cimento teria grande dificuldade de impregnação reduzindo sua aplicação na construção civil.

2.2.1.5. Perfis pultrudados

Os perfis pultrudados não precisam necessariamente utilizar as fibras de vidro tipo AR, pois em seu processo de fabricação são impregnados com resinas de cura térmica que protege os filamentos da fibra tipo E. As armações em perfis pultrudados substituem as armações metálicas convencionais em aplicações que exijam grande resistência a ação de elementos químicos deletérios ao aço estrutural. Livre de corrosão, interferências eletromagnéticas e baixo peso específico as fibras de vidro tipo AR permitem a execução de obras em áreas industriais, costeiras, barragens, comportas e instalações de geração de energia sem a necessidade de manutenção constante e com alta expectativa de vida útil. Basicamente toda estrutura aparente de concreto e exposta às intempéries pode ter sua armadura executada com perfis pultrudados para maior durabilidade.

Figura 7 – Esquema de fabricação de perfis pultrudados de fibra de vidro

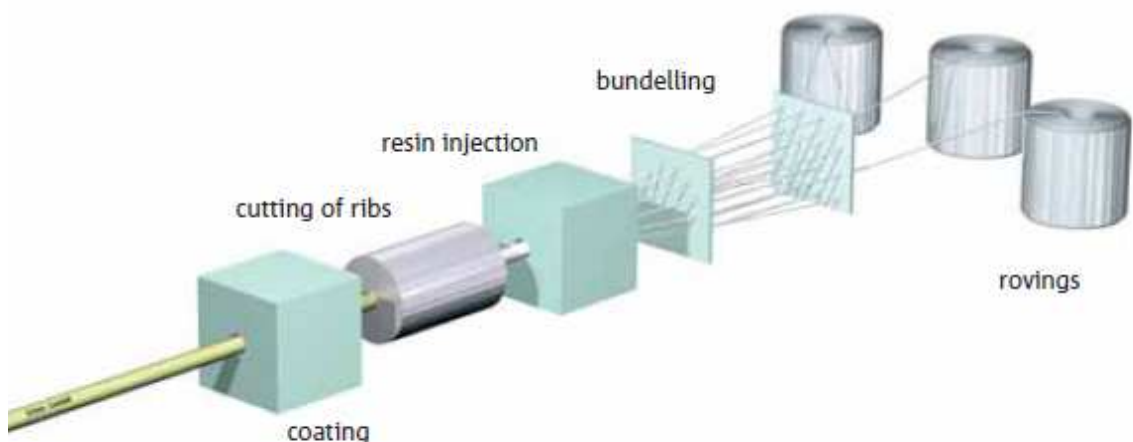


Figura 8 – Exemplo de perfis pultrudados em fibra de vidro



3. PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE VIDRO

Para esta parcela do trabalho serão consideradas informações relativas às barras pultrudadas de fibra de vidro por serem as de geometria e utilização mais próximas ao aço estrutural e assim permitirem maior clareza no confronto de suas propriedades.

3.1. Tensão de ruptura e módulo de elasticidade

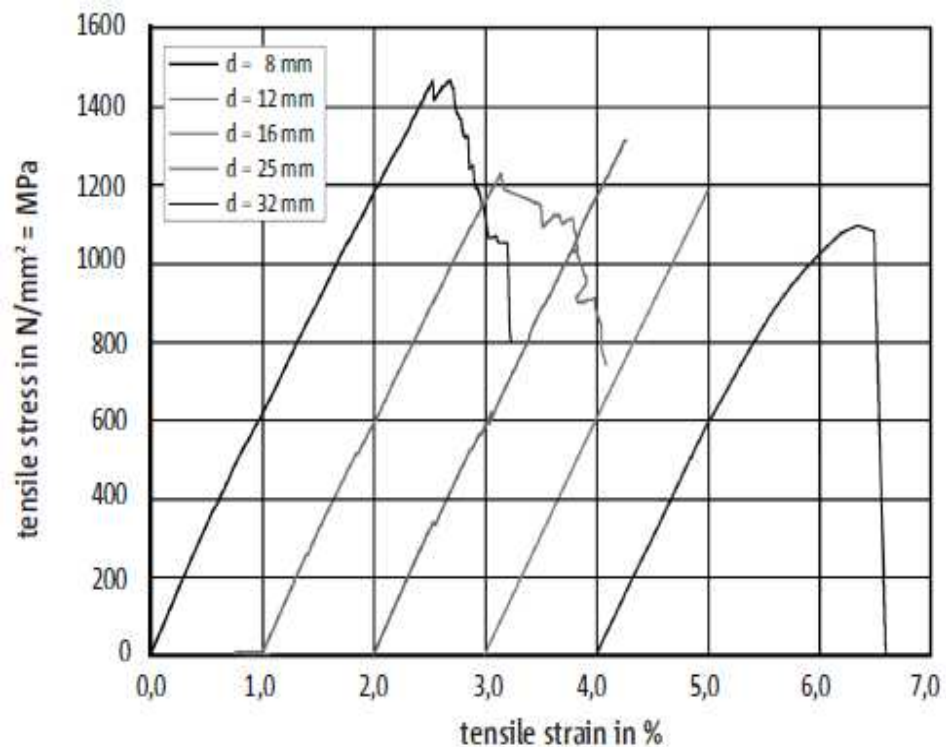
Diferenciadamente ao aço estrutural, as fibras de vidro tem comportamento elástico linear até sua ruptura. Em ensaios de tração não são observados patamares de escoamento. Seu módulo de elasticidade é maior que 60GPa (64GPa para barras pultrudadas de 16mm de diâmetro). Segundo ensaios realizados na Universidade de Toronto (2009), as tensões de tração são maiores que 1.000MPa para todos os diâmetros de barras.

Tabela 4 – Valores médios de resistência à tração de barras pultrudadas (Witt, 2009) adaptado.

Diâmetro da barra (mm)	Resistência média à tração (N/mm²)
8	1500
12	1350
16	>1.200
25	>1.100
32	>1.000

Para a determinação da relação entre tensão e deformação as pontas das barras foram coladas aos pratos da prensa e a carga foi aplicada a uma taxa de 1kN/s em uma prensa hidráulica. O módulo de elasticidade foi medido com a utilização de extensômetros de alta sensibilidade. O quadro 4 nos mostra os valores médios obtidos nos diâmetros testados.

Figura 9 – Diagrama de tensão e deformação médias por diâmetro (Witt, 2009)



Como demonstrado neste diagrama a ruptura ocorre de forma abrupta e em todos os testes foi localizada na porção livre dos corpos de prova onde foi excedida a resistência a tração do material. Os filamentos se espalham pela zona de ruptura em forma de um pincel, evidenciando a formação unidirecional do processo de pultrusão. Nas extremidades das barras, nas regiões próximas aos engastes, não são notados sinais de ruptura. Em contraste à ruptura abrupta apresentada nos testes, as barras apresentam comportamento dúctil com alto módulo de elasticidade e tensão de ruptura. Para as barras de 8mm, 12mm e 32mm de diâmetro são notadas zonas de instabilidade com cargas próximas as tensões de ruptura.

Figura 10 – Perfil de ruptura (Witt, 2009)



3.2. Durabilidade

Normas internacionais exigem estudos de durabilidade baseados em forças residuais. As barras de fibra de vidro pultrudadas são submetidas a testes de envelhecimento acelerado sob tensão submersas em uma substância alcalina para simular o seu comportamento ao longo do tempo na condição de trabalho. Após o período de envelhecimento as barras são descarregadas e sua capacidade residual de carregamento é testada. Estas normas foram desenvolvidas devido ao aumento da responsabilidade das barras de fibra de vidro, que, em outros tempos era unicamente utilizada como reforço estrutural e portanto responsável por absorver carregamentos secundários. As novas gerações de fibras de vidro voltadas para o uso estrutural na construção civil estão aptas a resistirem grandes esforços e se destinam a substituir as armaduras metálicas. Com isso se faz necessário a aplicação de ensaios de longo prazo para determinação de suas propriedades durante o envelhecimento. A resistência da

fibra de vidro com o passar dos anos é reduzida e esta redução varia em função das variações de temperatura e umidade. A expectativa de durabilidade de projetos com armaduras de fibra de vidro é estimada em 100 anos (Witt, 2009) a partir de critérios de dimensionamento que considerem a influência do tempo sobre sua capacidade de carga. Para realização de ensaios, as barras pultrudadas são envelopadas em um molde de concreto de alta alcalinidade ($\text{pH} > 13,7$) e são submetidas a condição de saturação e temperatura elevada durante 1.000h. Após os períodos de envelhecimento são realizados testes de arrancamento e ruptura por tração. Após os testes de durabilidade realizados em intervalos de 1.000h os resultados são apresentados em escala logarítmica.

3.3. Aderência

Testes de arrancamento foram realizados por Witt (2009) em corpos de prova de concreto de 150mm de aresta e o deslocamento na ponta descarregada da barra foi plotada em função da carga aplicada. A resistência do concreto utilizado nos testes foi de 40N/mm^2 . Os resultados mostram que o arrancamento, assim como nas barras de aço, ocorre com a extração da barra de FRP do bloco de concreto sem danificar suas costelas de ancoragem. Também foram observados maiores valores para a força de arrancamento conforme o aumento da resistência do concreto utilizado. Não foram observadas grandes diferenças entre o deslize da ponta não carregada da barra de FRP e da barra de aço, ambos entre 0,4mm e 0,6mm.

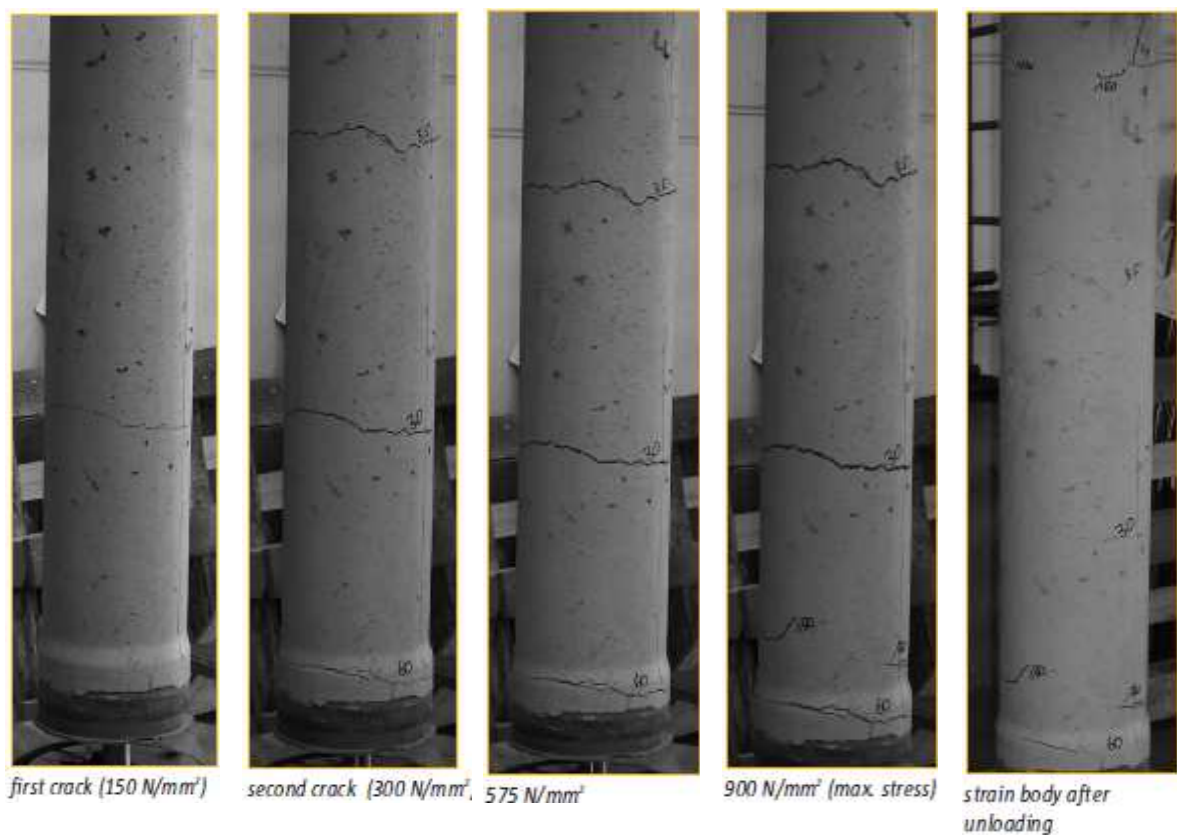
Figura 11 – Teste de arrancamento em barra de FRP (Witt, 2009)



3.4. Fissuração

Para a determinação da fissuração de estruturas armadas com perfis pultrudados de fibra de vidro, foram feitos ensaios por Witt (2009) em elementos cilíndricos de concreto com resistência de 30N/mm^2 e cobertura de 65mm em uma barra de FRP de 16mm de diâmetro. Os corpos de prova foram tensionados até uma carga de 900MPa e observou-se que o espaçamento entre as fissuras era de aproximadamente 300mm . A medida em que a carga foi aumentada a abertura das fissuras também aumentava e quando foi feito o descarregamento as fissuras se fecharam quase completamente. Após a abertura dos corpos de prova as barras foram inspecionadas se mostrando intactas bem como as porções de concreto na região entre as trincas.

Figura 12 – Teste de fissuração (Witt, 2009)



3.5. Visão geral das barras de FRP

As barras de FRP foram desenvolvidas para utilização como armadura em estruturas de concreto e por isso apresentam propriedades mecânicas um tanto semelhantes das apresentadas pelo aço estrutural. As estruturas projetadas com armaduras em FRP são certificadas para uma vida útil de projeto em torno de 100 anos. As barras de FRP apresentam uma deformação elástica linear até sua carga de ruptura, o que ocorre com tensões acima de 1.000MPa em todos os diâmetros. Seu módulo de elasticidade é relativamente baixo proporcionando grandes deformações antes da ruptura. Quando as cargas atuantes cessam sua deflexão retorna a quase zero. As características mais importantes deste material são:

- Alta resistência a corrosão;
- Alta resistência a ataques químicos;
- Não magnetizável;
- Não condutor elétrico;
- Facilidade de manuseio e baixo peso;
- Baixa condutibilidade térmica.

Tabela 5 – Diâmetros, dimensões e pesos típicos (Witt, 2009) adaptado.

Diam. Nom.	Diam. Liq. (mm)	Diam. Tot. (mm)	Seção transv. (mm²)	Peso Específico (kg/m)
8	8,00	9,00	0,00	0,13
12	12,00	13,50	113,00	0,30
16	16,00	18,00	201,00	0,53
25	25,00	27,00	491,00	1,22
32	32,00	34,00	804,00	1,93

Tabela 6 – Tabela comparativa (Witt, 2009) adaptado.

Propriedade	Aço CA-60	Aço Inox	FRP
Tensão de ruptura (MPa)	630	655	1180
Alongamento total (‰)	30	50	26,1
Módulo de elasticidade E (GPa)	200	190	64
Aderência (MPa)	13,7	13,7	12,2
Cobrimento de concreto (mm)	30 a 60	<30	10
Densidade (g/cm ³)	7,85	7,92	2,2
Condutividade térmica (W/mK)	60	16	<0,5
Coef. de expansão térmica (1/K)	0,8 a 1,2x10 ⁻⁵	1,73x10 ⁻⁵	Axial 0,6x10 ⁻⁵ Radial 2,2x10 ⁻⁵
Susceptibilidade ao magnetismo	sim	ligeiramente	não
Condutor eletro-magnético	sim	sim	não

4. CONCLUSÃO

A introdução de um novo material na construção civil é lenta e exige grande esforço em pesquisas antes de se difundir sua aplicação. As barras de FRP desenvolvidas especialmente para a construção civil têm propriedades que geram grandes benefícios do ponto de vista da durabilidade e em situações especiais de meios fortemente agressivo são sem dúvida a opção mais indicada desde que se tenha o conhecimento adequado no seu dimensionamento. Durante a preparação deste trabalho ficou claro que as pesquisas em âmbito nacional estão muito defasadas em relação à utilização de armaduras não metálicas de FRP em peças de concreto. Em países com Canadá, Alemanha e Japão pesquisas que elucidam a interação das fibras com o concreto e as propriedades dos materiais compósitos formados são desenvolvidas a mais de duas décadas.

Outro ponto que ficou claro durante o desenvolvimento deste estudo é que as argamassas com reforços de fibras podem ser amplamente utilizadas em nossas construções e aparentemente geram grandes melhorias nas propriedades destes materiais. Certo de que estudos mais aprofundados estão em desenvolvimento no Brasil, ainda é pequena nossa contribuição para o cenário mundial sobre o tema. Uma das

utilizações mais fantásticas do concreto armado com fibras de vidro que pude observar foi na confecção de grandes peças móveis em eclusas e barragens que substituem as fabricadas em aço. Esta idéia fica clara ao observarmos a figura 5 deste trabalho onde podemos ver uma estação móvel de aquecimento de água feita totalmente em concreto. Este tipo de construção visa a alta durabilidade propiciada pela resistência às intempéries do casamento entre fibras de vidro e concreto. O fato de podermos construir equipamentos e edifícios sem a utilização do aço é deveras tentador pelo simples fato de não necessitarmos enfrentar a luta constante contra sua oxidação. Outro fator que deve ser levantado em relação às fibras de vidro é o seu custo relativamente baixo, a energia para obtenção da fibra de vidro é menor que a utilizada na fabricação do aço e por isso existe a tendência de seu custo de obtenção ser menor.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANTHIA N. **Fiber reinforced concrete** Vancouver: University of British Columbia, 2009
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Porto Alegre: CPGEC / UFRGS, 2003. Tese de doutorado.
- CALLISTER JR, W. D. **Materials Science and Engineering: an introduction**. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- GONÇALVES, R. M. Et al. **Segurança nas estruturas: teoria e exemplos**. São Carlos: SET/EESC/USP, 2005.
- HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering**. 1ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999.
- MANO, E. B. **Polímeros como materiais na engenharia**. São Paulo: Edgar Blüchler, 1991.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.**

2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1994.

PERUZZI, A. P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa.** São Carlos:

EESC-USP, 2002. Dissertação de mestrado.

PERUZZI, A. P. **Estudo das alternativas de uso da fibra de vidro sem características álcali resistente em elementos construtivos de cimento Portland.** São Carlos:

EESC-USP, 2007. Tese de doutorado.

SCHWARTZ, M. M. **Composite materials handbook.** New York: McGraw-Hill, 1984.

WITT C. **Fiber reinforced composite** Toronto: University of Toronto, 2009