

CAIO VINICIUS MINETTO

**A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS EM
REFORÇOS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**

**SÃO CARLOS
2019**

CAIO VINICIUS MINETTO

**A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS EM REFORÇOS DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado ao Curso de Graduação de
Engenharia Civil do Centro Universitário
Central Paulista, como requisito para a
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: M.SC. Sineval Esteves Pereira Jr.

SÃO CARLOS

2019

Aos meus pais, pelo incentivo e força
a Larissa pela compreensão e amor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai por despertar em mim o interesse pela engenharia civil.

A minha esposa por ter a iniciativa de procurar saber da bolsa para eu realizar os estudos.

Ao professor Sineval Esteves Pereira Junior, pelo apoio e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.

Henry Ford

Sumário

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VII
RESUMO.....	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVO.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 INTRODUÇÃO	3
2.2 COMPÓSITOS	4
2.2.1 FIBRAS e MATRIZES	4
2.3 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC)	6
2.4 RUPTURA DO REFORÇO.....	9
2.5 REFORÇO EM PILARES.....	9
2.6 REFORÇO EM VIGAS	10
3. MATERIAIS E MÉTODO.....	12
3.1 CONTEXTO	12
3.2 DIMENSIONAMENTO.....	13
3.2.1 Reforço a Flexão	16
3.2.2 Confinamento do Concreto.....	23
3.2.3 Comportamento em relação ao fogo.	33
3.3 COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO.....	35
4. RESULTADOS.....	37
5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	39
6. REFERÊNCIAS.....	40

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - ABORDAGEM MICROMECAÂNICA E MACRO MECÂNICA.

FIGURA 3.1 - REFORÇO COM VIGAS DE CONCRETO.

FIGURA 3.2 - REFORÇO COM CHAPAS DE AÇO.

FIGURA 3.3 - REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO.

TABELA 2.1 - PROPRIEDADES TÍPICAS DAS RESINAS MAIS USADAS SEGUNDO (TAERWER, 1997).

TABELA 2.2 - PROPRIEDADES TÍPICAS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE FIBRA (MATTHYS, 2000).

TABELA 2.3 - REFORÇO COM COLAGEM DE LAMINADOS, MANTAS E TECIDOS DE FRP AO BETÃO (JUVARDES, 1999).

TABELA 2.4 - DADOS DAS VIGAS (SOUZA, 1998).

RESUMO

A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS EM REFORÇOS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

O reforço em estruturas de concreto é uma prática que sempre se fez necessária, devido a degradação da estrutura com o passar dos anos, erro de projeto, erro de execução, a mudança da utilização da estrutura acrescentando mais cargas do que foi previsto no projeto, etc.

O modo tradicional de reforço seja ele utilizando vigas de aço parafusada ou soldada, ou vigas de concreto, entre outros é eficaz porém exige um alto tempo de execução e muitos recursos.

Este trabalho tem como objetivo demonstrar as vantagens de realizar o reforço utilizando materiais compósitos, com base em amplo estudo bibliográfico, em que, vários trabalhos teóricos e experimentais comprovam a eficiência da utilização de fibras de carbono como reforço estrutural de elementos de concreto armado. Como objetivo específico, pretende-se avaliar o comportamento do compósito em relação a aderência à superfície de concreto, descrito em vários trabalhos e pesquisar as diversas formas de aplicação do material na superfície da estrutura existente. Os resultados demonstraram a eficiência do material como reforço estrutural mas indicou algumas desvantagens como o comportamento associado a baixa ductilidade da composição, propiciando uma ruptura brusca do conjunto estrutural com manta de fibra de carbono.

1. INTRODUÇÃO

O Compósito é a união de materiais com propriedades distintas que somam suas diferentes propriedades físicas e químicas (W.D.CALLISTER, 1985).

Conhecendo os vários tipos de compósitos e também compreendendo a dependência dos seus comportamentos em relação às características, às quantidades relativas, à geometria/distribuição e às propriedades das fases constituintes é possível projetar materiais que possuam combinações de propriedades melhores do que aquelas encontradas em ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos (W.D.CALLISTER, 1985).

Nas construções, os materiais mais utilizados em estruturas de edificações comuns são o concreto armado, aço (estrutura metálica) e Madeira (MELO, P.R, 2013), porém existem materiais compósitos que podem oferecer características tão boas quanto os mesmos e até superiores. Segundo TITA, V.(1999), materiais compósitos vêm sendo usados na aeronáutica, automobilística, marinha entre outros, pela sua alta resistência mecânica. Materiais compósitos, podem oferecer as seguintes vantagens: leveza, oferecendo uma carga reduzida sobre a fundação; resistência à corrosão; elevada resistência à tração; alta rigidez; resistência à fadiga, podendo assim vencer grandes vãos e não é suscetível a influência eletromagnéticas, torna esse material interessante a indústria da construção civil. Como desvantagem, pode-se destacar o custo elevado e a complexidade na fabricação.

Materiais compósitos reforçados são uma opção para os casos em que o uso dos materiais tradicionais, não é adequado, segundo Araújo, C.M. (2002), e podem ser empregados como elemento estrutural, como mostra um trabalho de Tavares, D.H.(2006), onde é utilizada barras de fibra de vidro polimerizadas (GFRP) em vigas armadas ao invés de barras de aço, ou servir de reforço para estruturas que sofrem com o aparecimento de degradação, seja ela prematura ou devido ao tempo de vida útil, a estrutura também pode estar comprometida devido ao aumento de carga em relação às determinações de projeto. Para esses casos existem estudos conforme a revisão de literatura, que mostram o uso de compósitos

poliméricos reforçados com fibra de carbono (PRFC), que podem ser utilizados para encamisar pilares tornando-os mais resistentes. Compósitos reforçados com fibras (FRP) podem reforçar vigas sujeitas a flexão.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o desenvolvimento desses estudos é possível entender que existem materiais com características que podem facilmente contribuir como desenvolvimento e evolução da engenharia civil, que por sua vez necessita de novas tecnologias em sistemas construtivos que visam a sustentabilidade com a racionalização do consumo de materiais.

Materiais compósitos não são os mais usuais hoje para reforços, entre diversos fatores, devido à complexidade em produzir e custo de produção, mas eles podem solucionar vários problemas facilmente, onde os materiais tradicionais em alguns casos somente atendem por um curto período, exigindo assim manutenções periódicas.

A evolução da compreensão do comportamento dos materiais compósitos, por parte dos profissionais da construção civil, propicia uma maior aplicabilidade e aceitação dos métodos e práticas, o que reduziria o custo dos compósitos elevaria a produção dos fabricantes.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo elaborar uma pesquisa bibliográfica sobre aplicação dos materiais compósitos em reforços de estruturas de concreto, avaliar a viabilidade dos métodos de aplicação, métodos de dimensionamento, atendendo à segurança e prescrições normativas internacionais, verificar com base em outros trabalhos, os efeitos da aplicação do material compósito em uma viga como reforço, e descrever as principais vantagens e desvantagens, com base nos resultados de vários trabalhos experimentais, realizados por autores com métodos reconhecidos pela comunidade científica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

As estruturas têm o papel de manter a integridade da construção e um desempenho satisfatório deve ser assegurado para possibilitar a sua utilização durante a vida útil prevista. Muitas vezes podem ser necessárias intervenções durante a utilização das construções, de maneira a recuperar elementos estruturais danificados ou aumentar suas capacidades resistentes. O aumento da capacidade resistente é denominado reforço, que pode ser necessário também no caso de mudança de utilização ou ampliação da obra (R. Carrazedo, p.1, 2002).

As primeiras pesquisas sobre reforço de vigas de concreto armado com adição de chapas metálicas coladas com resina epóxica foram realizadas na década de 60 (THOMAS et al, 1998). Esta técnica, eficiente e de custo relativamente baixo, tem as desvantagens da corrosão do aço, da baixa resistência ao fogo e, em função do peso e tamanhos comerciais das chapas, da necessidade de escoras e dificuldade de manipulação (C.M.Araújo, p.3, 2002).

Nas últimas décadas, tem havido grande mobilização de esforços para a Procura de novos materiais mais duráveis, resistentes e leves para serem utilizados no reforço estrutural (C.M.Araújo, p.3, 2002).

Os materiais compósitos reforçados com fibra surgiram como alternativa para os casos em que emprego dos materiais tradicionais, aço e concreto, não é adequado. Diversas indústrias já utilizavam os materiais compósitos com êxito, e propriedades como elevada resistência à tração, leveza, resistência à corrosão e à fadiga, amortecimento ao choque e isolamento eletromagnético atraíram o interesse da indústria da construção civil (C.M.Araújo, p.3, 2002).

2.2 COMPÓSITOS

Segundo GIBSON (1994) os materiais estruturais podem ser divididos em quatro grandes classes: os metais, os polímeros, as cerâmicas e os compósitos. Os compósitos são materiais formados pela combinação dos anteriores em duas ou mais fases distintas formando um arranjo estrutural macroscópico. Estas fases são a matriz, as fibras e eventualmente o filler (R. Carrazedo, p.5, 2002).

Inicialmente utilizados para o reforço de pilares submetidos a ações sísmicas, os polímeros reforçados com fibra de carbono ou “carbon fiber reinforced polymers” (CFRP) já se encontram em aplicações práticas no reforço de lajes, vigas, pilares e paredes, em estruturas como edifícios e pontes. Uma vez garantida a boa qualidade do concreto e a ausência de corrosão nas armaduras, tais reforços possibilitam a limitação das fissuras e redução das flechas, além de aumento da resistência à flexão e ao cisalhamento (C.M.Araújo, p.4, 2002).

Um material multifase exibindo uma combinação de propriedades que o torna superior a cada fase de sua composição pode ser considerado um compósito (CALLISTER, 1985).

2.2.1 FIBRAS e MATRIZES

Em um compósito como a manta de fibra de carbono a fase contínua é conhecida como matriz e uma das suas funções é envolver a fibra proporcionando que os esforços sejam transmitidos a mesma.

Tabela 2.1 - Propriedades típicas das resinas mais usadas segundo Taerwe et al (1997)

Tipo de resina	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Peso específico (kg/m ³)	Retração na cura (%)
Poliéster	35 - 104	2.1 - 3.5	1100 - 1400	5 - 12
Vinil éster	73 - 81	3.0 - 3.5	1100 - 1300	5 - 10
Epóxi	55 - 130	2.8 - 4.1	1200 - 1300	1 - 5

E a fase dispersa é constituída pelas fibras que precisa desempenhar a função de suportar os esforços provenientes da matriz.

Tabela 2.2 - Propriedades típicas dos principais tipos de fibra (MATTHYS, 2000)

Tipo de Fibras		Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Deformação última (%)	Peso específico (kg/m ³)	Diâmetro da fibra (µm)
Carbono (C)	tipo PAN* - com alta resistência (HS)	3500 - 5000	200 - 260	1.2 - 1.8	1700 - 1800	5 - 8
	tipo PAN* - com alto módulo de elasticidade (HM)	2500 - 4000	350 - 700	0.4 - 0.8	1800 - 2000	5 - 8
	tipo Pitch** - com alto módulo de elasticidade (HM)	3000 - 3500	400 - 800	0.4 - 1.5	1900 - 2100	9 - 18
Aramida (A)	com módulo de elasticidade intermediário (IM)	2700 - 4500	60 - 80	4.0 - 4.8	1400 - 1450	12 - 15
	com alto módulo de elasticidade (HM)	2700 - 4500	115 - 130	2.5 - 3.5	1400 - 1450	12 - 15
Vidro (G)	aluminoborosilicato de cálcio (E)	1800 - 2700	70 - 75	3.0 - 4.5	2550 - 2600	5 - 25
	aluminossilicato de magnésio (S)	3400 - 4800	85 - 100	4.5 - 5.5	2550 - 2600	5 - 25

*PAN = fibras obtidas por pirólise e oxidação de fibras sintéticas de Poliacrilonitrila

**Pitch = fibras obtidas pela pirólise do petróleo destilado ou do piche convertido em cristal líquido

(Fonte: MATTHYS, 2000)

Um ponto importante está relacionado à interface fibra-matriz, para garantir que os esforços sejam transmitidos de uma fase para outra, deve-se propiciar uma forte adesão entre a fibra e a matriz. Caso não haja esta forte interação o material ficará sujeito a falhas, tais como delaminações e estará sujeito à propagação de trincas em maiores escalas (SHACKELFORD, 1996).

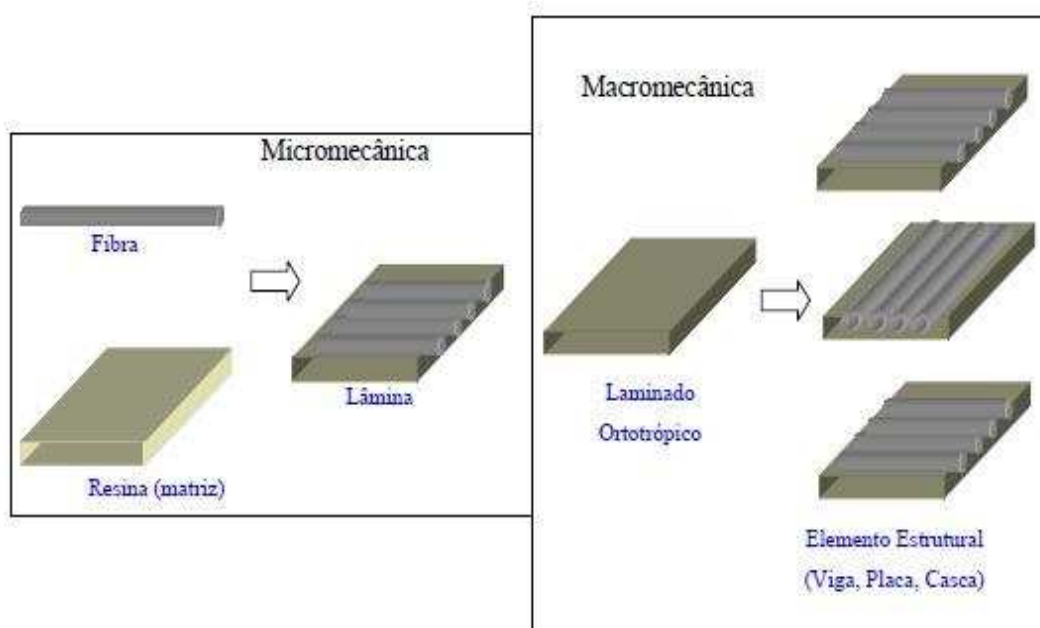


Figura 2.1 - Abordagem micromecânica e macromecânica
VINSON & SIERAKOWSKI (1987)

2.3 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC)

A durabilidade, a leveza e o alto módulo de elasticidade (podendo chegar a 800 GPa) dos PRFC são as características responsáveis pela sua boa aceitação. O custo do compósito, que chega a ser dez vezes maior que o do aço, representa apenas 20% do custo total da obra de reforço e pode ser compensado pela economia gerada na execução mais rápida, fácil e limpa (C.M.Araújo, p.4, 2002).

Os PRFC possuem baixa condutividade térmica transversal (MEIER, 1997) e a sua resistência ao fogo é limitada pela instabilidade da resina exposta a elevadas temperaturas. No entanto, as consequências de danos ao reforço são levadas em consideração pelos coeficientes de segurança, admitindo-se que a estrutura resista às ações permanentes e a uma porcentagem das ações variáveis (C.M.Araújo, p.4, 2002).

O funcionamento apropriado do reforço depende de sua colagem contínua ao substrato. Antes da execução do reforço, o concreto deteriorado deve ser removido e as barras com corrosão devem ser substituídas. Quinas e cantos angulosos na superfície do concreto devem ser arredondados para evitar a delaminação do compósito (C.M.Araújo, p.11, 2002).

As áreas que vão receber o reforço devem ser apicoadas ou lixadas para remover a camada superficial de concreto. Uma vez limpa e seca, a superfície do concreto pode ser melhorada com a aplicação de um primer especificado pelo fabricante. O primer é um produto que penetra no concreto por capilaridade com a função de melhorar a capacidade adesiva da superfície para a recepção da resina de saturação ou do adesivo (C.M.Araújo, p.11, 2002).


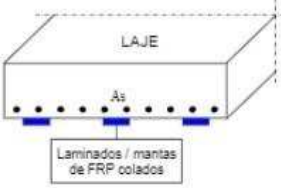
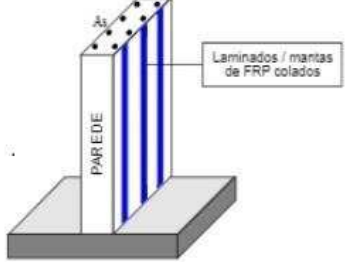
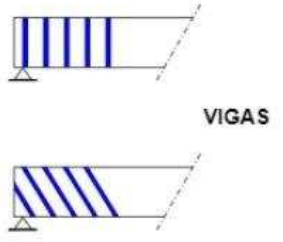
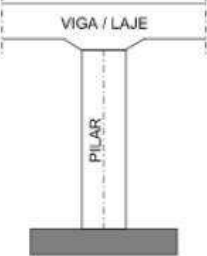


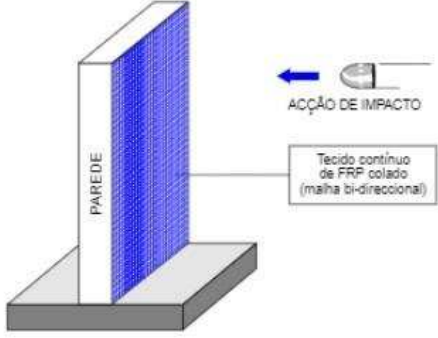
Quando necessário, a superfície deve ser regularizada com a aplicação de “putty”, uma argamassa que deve ser compatível com o primer utilizado.

A colagem do compósito na superfície do concreto difere para cada tipo de PRF. Para a colagem dos PRF curados “in situ” (tecidos e mantas) um adesivo/resina saturante com alta viscosidade é usado tanto para colar quanto para impregnar o compósito. Os reforços que estarão sujeitos à radiação solar ou a ataques químicos devem ter acabamento apropriado (C.M.Araújo, p.11, 2002).

A temperatura, a umidade relativa do ar e a umidade da superfície durante a execução do reforço têm grande influência na performance do compósito. Embora altas temperaturas não são indicadas durante a execução do reforço por apressarem a cura da resina, baixas temperaturas e dias chuvosos também prejudicam o serviço, pois tornam a resina muito viscosa e a cura bastante lenta, a temperatura deve estar acima de 5°C de acordo com Thomas e Thomas (1996) e pelo menos 3°C acima do ponto de orvalho (SIKA, 2000) para possibilitar a adesão da resina na superfície do concreto (C.M.Araújo, p.11, 2002).

Ripper e Scherer (1999) recomendam que a umidade do substrato, quando da aplicação do reforço, deve ser inferior a 4% e o controle feito por equipamento adequado. Segundo Matthys (2000), a adesão obtida é insuficiente quando a umidade relativa do ar é maior que 80%(C.M.Araújo, p.12, 2002).

TABELA 2.3-Reforços com colagem de laminados, mantas e tecidos de FRP ao betão (Juvardes, 1999)

Sistema FRP	REFORÇO TIPO Comportamento / Forma / Estrutura		
LAMINADOS / MANTAS (unidirecionais)	FLEXÃO		
			
		FLEXÃO / CORTE	
COMPRESSÃO / DUCTILIDADE			
TECIDOS (bi ou multidirecionais)	PILARES		
			
TECIDOS (bi ou multidirecionais)	SISMO		
			

2.4 RUPTURA DO REFORÇO

É necessário tomar cuidados em relação às irregularidades na superfície do concreto, má concretagem e espalhamento incorreto da resina, pois isso pode ocasionar a ruptura do reforço que segundo Triantafilou (1998) pode ocorrer da seguintes maneiras:

- (a) Escoamento da armadura interna seguido de ruptura do reforço
- (b) Escoamento da armadura interna seguido de esmagamento do concreto
- (c) Esmagamento do concreto
- (d) Destacamento do compósito nas extremidades da zona de ancoragem
- (e) Descolamento do compósito próximo às fissuras inclinadas
- (f) Descolamento do compósito provocado por fissuras de flexão
- (g) Descolamento do compósito provocado por irregularidades na superfície do concreto e falha na concretagem.

A fim de evitar esses problemas a escolha da resina adequada é essencial.

Geralmente o que limita o desempenho da ligação é a superfície do concreto, que pode estar em deterioração, com fissuras deixando a camada mais externa sem condições.

2.5 REFORÇO EM PILARES.

Entre as diversas técnicas de reforço de pilares nota-se algumas vantagens naquelas que mobilizam o efeito de confinamento do concreto. Por meio do confinamento torna-se possível contar com a colaboração do concreto do pilar pré-existente. Possibilitando grandes aumentos da capacidade resistente com pequenos aumento das dimensões dos elementos estruturais R. Carrazedo, p.1, 2002).

O modelo de MANDER et al. (1988) atualmente é um dos modelos de confinamento mais utilizados. Considera a área efetivamente confinada do núcleo, obtida pela eliminação das áreas decorrentes do efeito de arqueamento. O arqueamento ocorre tanto no sentido longitudinal como transversal em pilares de

seção quadrada ou retangular. Em pilares de seção circular, com armadura em espirais ou estribos circulares, o arqueamento ocorre apenas no sentido longitudinal, na região entre barras transversais

2.6 REFORÇO EM VIGAS

Norris et al (1997) realizou o seguinte estudo:

Neste estudo foram ensaiadas 19 vigas de concreto armado com o objetivo de investigar o comportamento de vigas reforçadas com mantas e tecidos de fibra de carbono, de forma e disposição variadas, à flexão ou ao cisalhamento.

O sistema (A) consistia de duas camadas de fibras longitudinais coladas no fundo e laterais da viga. O sistema (B) era formado por duas camadas unidirecionais com orientação paralela (1ª camada) e perpendicular (2ª camada) ao eixo da viga, coladas no fundo e laterais da viga. O sistema (C) era constituído por duas camadas de fibras orientadas em ângulos de $\pm 45^\circ$. O sistema (D) era idêntico ao sistema (C) exceto pela porção central da viga que não recebeu reforço nas laterais. O sistema (E) era formado por fibras coladas perpendicularmente ao eixo da viga. O sistema (F) era idêntico ao sistema (C) sendo que o reforço cobria toda a altura da lateral da viga. Todos os sistemas de reforço possuíam a mesma quantidade de fibra de carbono por área.

Não houve grande diferença de comportamento entre o tecido e a manta de CFRP utilizados. As diferenças mais significativas ocorreram em função da orientação das fibras e disposição do reforço utilizadas. Foram observados aumentos de resistência e rigidez de todas as vigas reforçadas, sendo a magnitude do ganho de resistência inversamente proporcional à ductilidade na ruptura.

As vigas que tiveram as fibras do reforço direcionadas perpendicularmente às fissuras, tanto de flexão quando de cisalhamento, tiveram grande acréscimo de rigidez e capacidade de carga, mas a ruptura foi brusca e ocorreu pelo destacamento do concreto nas extremidades do reforço. Quando as fibras do PRFC foram dispostas obliquamente em relação às fissuras o modo de ruptura foi mais

dúctil, embora o aumento na rigidez e capacidade de carga tenha sido menor que o das vigas mencionadas anteriormente.

Souza et al (1998) realizou os seguintes estudos:

A análise do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com tecidos de fibra de carbono, com diversos tipos de carregamento e sistemas de reforço, o estudo foi constituído por sete vigas de concreto armado com seção transversal retangular de 120 mm x 200 mm e vão de 2100 mm.

E obteve os resultados conforme tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Dados das Vigas de Souza et al (1998)

Viga	Reforço	Carregamento	f_{cm} (MPa)	f_y (MPa)	Compósito		M_u (kN.m)	Modo de ruptura*
					E_r (GPa)	f_t (MPa)		
FRD	-	2 cargas concentradas nos terços dos vãos	33	486	138	1425	8,8	
FRR	-						-	13,7
F1	1 camada de reforço na face inferior	simulação de carga distribuída					14,7	descolamento do reforço de flexão e esmagamento do concreto
F2							15,4	descolamento e ruptura do reforço de flexão
F3	1 camada de reforço na face inferior + 5 bandas transversais de amarração	2 cargas concentradas nos terços dos vãos					17,5	descolamento e ruptura do reforço de flexão e esmagamento do concreto
F4	1 camada de reforço na face inferior e outra nas laterais						33,8	ruptura do reforço na face lateral e esmagamento do concreto
F5	2 camadas de reforço na face inferior						24,2	descolamento do reforço de flexão e esmagamento do concreto

M_u = momento último e f_t = tensão de escoamento do aço

3.MATERIAIS E MÉTODO

3.1 CONTEXTO

Reforço de estruturas sempre foi executado devido aumento da carga com novos carregamentos não previstos, erro de projeto ou de execução, esses reforços podem ser feitos colocando novas vigas ou pilares de concreto armado, revestindo uma viga ou pilar já existente com armadura nova e outra camada de concreto conforme P.M.S.Aranha (1994).



Figura 3.1 - Reforço com vigas de Concreto.

Fonte::<https://br.pinterest.com/pin/411375747208748100/>

Pode usar vigas e colunas novas de aço soldadas ou parafusadas, sendo uma estrutura totalmente nova ou interligada com a estrutura existente conforme

L.E.T.Campos (2006). Ou até mesmo chapa de aço colada.

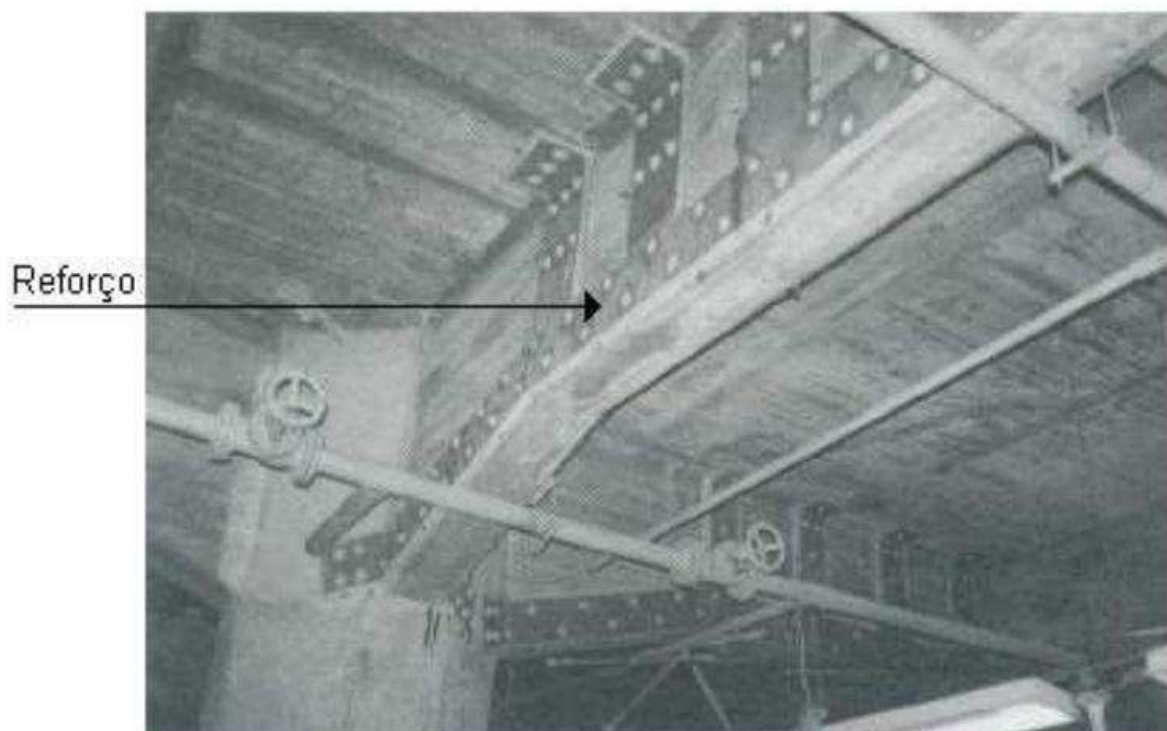


Figura 3.2 – Reforço com chapas de aço
Fonte: Ripper e Souza (1998, p. 151)

Os métodos mais comuns que não envolvem o uso de compósitos são muito eficazes, porém esses materiais podem sofrer degradação de acordo com ambiente, além disso o tempo é elevado e envolve mobilização de muitos recursos para realizar o processo. Além desses os trabalhos realizados mostram que materiais compósitos podem oferecer uma maior resistência com durabilidade prolongada, com um tempo e mobilização de recursos mínimos.

3.2 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento foi baseado em alguns estudos e orientações de MACHADO, A.P (2002):

Conforme a norma ACI 440.2R-02 os reforços com fibras de carbono devem ser projetados de acordo com as recomendações de utilização e resistência da

norma ACI 318, utilizando-se os fatores de majoração e minoração dos carregamentos e das ações.

Devem ser adicionados fatores de redução aplicados à contribuição do reforço com fibras de carbono conforme a norma ACI 440.2R-02, para compensar a falta de conhecimento sobre a atuação desses reforços em relação ao conhecimento tecnológico do concreto armado e concreto protendido.

Os sistemas compostos com fibras de carbono, particularmente quando forem utilizados para o reforço de colunas, devem ser dimensionados para promover a resistência às ações sísmicas via dissipação da energia e capacidade de deformação, com base nos níveis de resistência ao corte definidos pelas normas sísmicas.

A menos que objetivos adicionais de desempenho sejam determinados pelos proprietários das obras, o principal desempenho da estrutura deve visar à segurança das vidas dos seus usuários, com o estabelecimento de um determinado nível de danos estruturais para permitir a dissipação da energia sísmica. Dessa forma, elementos reforçados para esse tipo de manifestação, podem necessitar de certo nível de recuperação estrutural ou mesmo da sua substituição após a manifestação do evento sísmico. Cuidados especiais adicionais devem ser tomados se a estrutura sofre também, antes ou subseqüentemente ao sismo, ações devidas ao fogo (incêndio).

Considerações cuidadosas devem ser tomadas para o estabelecimento de limites razoáveis de resistência estrutural das peças reforçadas com sistemas compostos. Esses limites são impostos para garantir que não ocorra o colapso da estrutura reforçada devido a ocorrências tais como descolamento do sistema composto, fogo e incêndios, vandalismo ou outras causas.

Os fabricantes de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono e projetistas estruturais recomendam que o elemento estrutural a partir do instante em que não pode contar com a atuação do reforço com sistema deve ter uma capacidade resistente residual capaz de resistir a um determinado nível mínimo de carregamento. Segundo essa filosofia, no caso em que o sistema de reforço com fibras de carbono for danificado, a estrutura deve ser ainda capaz de resistir a um

nível de carregamento razoável sem que entre em colapso. Segundo a recomendações da norma ACI 440.2R-024 a estrutura deve ter suficiente resistência para o seguinte nível de carregamento:

$$(\phi R_n)_{existente} \geq (1,2xS_{DL} + 0,85xS_{LL})_{novo} \quad \text{onde,}$$

ϕ - fator de redução da resistência.

R_N - resistência nominal do elemento (membro).

S_{DL} - ações da carga permanente e de longa duração.

S_{LL} - ações da carga acidental ou de curta duração.

Norma ACI 440.2R-02 – item 8.2.

Para o caso de estruturas que necessitam possuir resistência ao fogo as avaliações necessárias estão indicadas no item 8.2.1 do ACI 440.2R-02.

De modo geral, o nível de reforço que pode ser alcançado através da utilização de sistemas compostos aderidos externamente é muitas vezes limitado pelas recomendações normativas relativas à resistência ao fogo das estruturas.

As resinas poliméricas usadas tanto nos sistemas compostos aderidos via seca ou pré-impregnados e os adesivos poliméricos utilizados nos sistemas compostos pré-curados perdem sua integridade estrutural a temperaturas que excedem a temperatura de transição vítrea do polímero (T_g). Enquanto a temperatura de transição vítrea pode variar dependendo do processo químico do polímero a faixa de variação das resinas e dos adesivos aplicados “in-loco” é da ordem de 60oC a 82oC.

Decorrente da alta temperatura associada com o fogo e da baixa resistência à temperatura dos sistemas compostos estes podem não serem capazes de resistir à ação do fogo por um período de tempo apreciável.

Apesar de que o sistema composto por si mesmo tenha uma baixa resistência ao fogo a combinação do sistema composto com uma estrutura de concreto pré-existente pode ainda assim possuir uma resistência adequada ao fogo.

Essa resistência é atribuída à resistência inerente do concreto existente ao fogo sozinha.

Para investigar a resistência ao fogo de uma estrutura de concreto reforçada com sistema composto é importante reconhecer que a resistência de uma estrutura tradicional de concreto armado sofre uma diminuição durante sua exposição às altas temperaturas associadas à atuação do fogo. A resistência de escoamento do aço é reduzida, assim como também a resistência à compressão do concreto. Como resultado final, a resistência em geral da estrutura de concreto armado para os carregamentos fica reduzida.

Por extensão, os conceitos estabelecidos para as estruturas de concreto armado podem ser aplicados às estruturas reforçadas com compostos de fibras de carbono, limites ao reforço podem ser estabelecidos para garantir que a estrutura reforçada não entre em colapso sob a ação do fogo.

Existem diversos códigos e normas estruturais que especificam os requisitos que devem ser verificados para que se tenha segurança relativamente à resistência da estrutura reforçada ao fogo.

Para que uma estrutura reforçada com sistema composto sob a ação de altas temperaturas possa ser viabilizada deve ser satisfeita a seguinte equação:

$$(R_{n\phi})_{existente} \geq S_{DL} + S_{LL}$$

Os efeitos dos carregamentos (S_{DL}) e (S_{LL}) devem ser determinados com a utilização das recomendações correntes das normas estruturais. Esta resistência deve ser computada pelo período de tempo especificado pela categoria do fogo considerado e deve desconsiderar a atuação do sistema composto aplicado.

3.2.1 Reforço a Flexão

Quando se utiliza para o reforço de estruturas de concreto armado à flexão um sistema composto estruturado com fibras de carbono, ele é aderido nas faces superior ou inferior das peças. Ou seja, o sistema composto é um sistema de reforço externo.

Para o cálculo da resistência à flexão de uma estrutura de concreto armado reforçado com fibras de carbono algumas considerações e conceitos básicos devem ser estabelecidos, tais como:

Os estudos e cálculos deverão ser efetuados com base nas dimensões existentes das seções e da quantidade e da distribuição das armaduras de aço da mesma, assim como das propriedades e características mecânicas dos materiais constituintes do elemento de concreto a ser reforçado.

Prevalecem os critérios de Bernoulli, ou seja, as seções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e as deformações são linearmente proporcionais à sua distância à linha neutra.

Despreza-se a resistência à tração do concreto.

A deformação do concreto não pode ultrapassar 3,5‰ quando dimensionado segundo os critérios da ABNT e 3,0‰ segundo as recomendações da ACI.

A aderência entre o sistema composto CFC e o substrato de concreto deve ser perfeita.

A deformação será considerada linear até a ruptura no sistema composto CFC.

Quando da sua aplicação o sistema composto não está submetido a qualquer nível inicial de tensões. Entretanto, o substrato ao qual ele será aderido já está submetido a tensões decorrentes da atuação de seu peso próprio, forças de protensão e/ou outros eventuais tipos de solicitação existentes por ocasião da instalação do reforço.

Dessa forma, o nível de tensões atuantes na fibra de carbono será diferente daquele que ocorre na fibra extrema do substrato sobre o qual o reforço é colado.

Para se conhecer o nível de tensão ao qual o reforço será submetido é necessário que se conheça previamente o nível de tensão existente na superfície do substrato na hora de sua aplicação. Conhecido esse nível de tensão conhece-se o nível de deformação existente na fibra extrema do concreto à qual será aderido o reforço.

Essa deformação pré-existente deverá ser subtraída da deformação final encontrada para a fibra de carbono para que se possa estabelecer o nível de tensão com o qual a fibra de carbono efetivamente trabalhará.

A deformação máxima permissível na fibra de carbono será fornecida pela seguinte equação:

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad \text{sendo:}$$

ε_b – deformação na fibra considerada no reforço para o carregamento máximo.

ε_{bi} – deformação pré-existente quando da instalação do reforço de fibra de carbono.

Assim a deformação (ε_{bi}) deve ser considerada como deformação inicial e, portanto, ser excluída da deformação final do sistema composto.

O ACI Commite 440 recomenda que o reforço á flexão através de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono seja feito no estado limite último. Os critérios de dimensionamento à flexão no estado limite último estabelecem que a capacidade resistente à flexão de um elemento deve exceder a demanda estrutural.

A análise para o estado limite último calcula a capacidade resistente da seção pela combinação das condições de equilíbrio das deformações, compatibilidade das tensões e o comportamento reológico do concreto e dos demais materiais constituintes na ruptura.

Quando a ruptura for controlada pelo esmagamento do concreto o bloco de tensões proposto por Whitney pode ser utilizado sem modificações com profundidade $0,85c$ para concretos com resistência até 27,5 MPa (4.000 psi).

Acima desse valor o valor de (β_1) deve ser diminuído de uma taxa constante de 0,05 para cada 6,9Mpa (1000 psi) de acréscimo de resistência mas nunca tomado com valor inferior a 0,65.

Se o controle da ruptura for determinado pela ruptura do sistema composto ou pela delaminação do cobrimento do concreto o bloco de tensões de compressão determinado por Whitney fornece resultados mais acurados se utilizarmos o valor de (α_1) fornecido pelas equações abaixo:

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3(\varepsilon_c')^2 \cdot \gamma_1}$$

$$\varepsilon_c' = 1,71 \frac{f_c'}{E_c}$$

$$\gamma_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c}$$

Outros tipos de ruína podem acontecer em acréscimo aos listados, tal como uma falha prematura localizada na interface do concreto do substrato com o sistema composto. Esse tipo de falha, contudo, pode ser evitada através de um detalhamento apropriado do sistema composto utilizado.

Para o cálculo do reforço de uma viga de concreto armado com a utilização de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono devem ser efetuadas as seguintes verificações:

Determinação do momento fletor majorado (do reforço) máximo que atuará na viga, $M_{maj.,max}$.

Determinar o momento resistente à flexão da viga existente a partir das características geométricas da seção e das características mecânicas dos materiais constituintes da mesma, $M_{resist.}$.

Comparar $M_{maj.,max}$ com $M_{resist.}$. Se $M_{resist.} > M_{maj.,max}$ a viga não necessitará de reforço à flexão. Se, entretanto, $M_{resist.} < M_{maj.,max}$ a viga necessitará de reforço.

No caso da viga necessitar de reforço, determinar o modo de ruptura para o reforço. Se $(c/d < 0,26)$ o reforço será calculado para a condição de viga sub-armada. Se $(c/d > 0,26)$ o reforço será calculado como para uma peça super-armada.

Conhecido o regime no qual será dimensionado o reforço com fibras de carbono o procedimento é o seguinte:

1- arbitra-se a profundidade da linha neutra (c) em conformidade com o modo de ruptura.

2- calculam-se as deformações dos diversos materiais admitindo-se a linearidade da variação das mesmas.

3- conhecidas as deformações calculam-se as tensões atuantes nos diversos materiais.

4- a partir do conhecimento das forças se faz as verificações do equilíbrio das mesmas. Se o momento resistente encontrado no sistema reforçado for maior que o momento solicitante máximo $M_{maj. max}$ o processo está completo.

O procedimento descrito é iterativo, uma vez que a etapa 1, que determina o resultado final, é arbitrada, podendo ou não atender simultaneamente às condições de resistência necessária e economia, devendo ser repetida tantas vezes quanto necessário para a colimação desses objetivos.

Uma vez concluído o processo iterativo faz-se a verificação da ductilidade do sistema composto estruturado com fibras de carbono.

O momento resistente de uma viga de concreto armado reforçada com sistemas compostos de fibra de carbono é constituído dos seguintes esforços componentes:

F_c - resultante da seção comprimida do concreto.

F'_s - força resultante da seção comprimida da armadura.

F_s - força resultante da seção tracionada da armadura.

F_f - força resultante da seção tracionada de fibra de carbono.

A capacidade resistente ao momento fletor de um elemento reforçado com CFC pode ser expressa da seguinte maneira:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d' \right)$$

sendo,

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s < f_y$$

$$f_s' = E_s \cdot \varepsilon_s' < f_y$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{c,f} \leq E_f \cdot \varepsilon_{fe}$$

ψ - coeficiente adicional de redução com valor 0,85.

$$F_s = A_s \cdot f_s$$

$$F_s' = A_s' \cdot f_s'$$

$$F_f = A_f \cdot f_{fe}$$

$$F_c = \alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot c$$

A expressão anterior pode ser assim reescrita:

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + F_s' \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d' \right)$$

Admitindo-se que não exista armadura de aço para compressão a expressão do momento resistente pode ser simplificada para:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad \text{ou ainda,}$$

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

Considerando que,

$$F_f = A_f \cdot f_{fe}$$

$$f_{fe} = \varepsilon_f \cdot E_f = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) E_f$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right)$$

$$f_{fe} = \left[\varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] E_f$$

$$F_f = A_f \cdot E_f \left[\varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] \quad (4a)$$

O equilíbrio das forças é calculado através da determinação do nível de tensões dos materiais constituintes. Assim, o equilíbrio interno das forças é satisfeito se, e somente se, for obedecida a seguinte expressão:

$$c = \frac{F_s + F_f}{F_c + F_s'} \quad (4b) \quad \text{ou seja,}$$

A profundidade da linha neutra é encontrada ao se satisfazer simultaneamente a equação (4a) através da equação (4b), estabelecendo-se assim o equilíbrio interno das forças e a compatibilidade das deformações.

Deformação máxima que pode ser admitida em um reforço à flexão com Fibras de Carbono em função do número de camadas para prevenir a delaminação do revestimento ou descolamento do sistema composto.

A delaminação do revestimento ou o descolamento do sistema CFC pode ocorrer se os esforços que estiverem ocorrendo nas fibras não puderem ser absorvidos pelo substrato do concreto.

Com o objetivo de nos prevenirmos o descolamento das lâminas de fibras de carbono uma limitação deve ser introduzida ao nível de deformação desenvolvida no sistema.

As equações (4c) e (4d) fornecem as expressões que determinam o coeficiente (k_m), estabelecido em função da cola:

$$k_m = \frac{1}{60\xi_{fcu}} \left(1 - \frac{n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}}{360.000} \right) \leq 0,90 \quad \text{para,} \quad n E_{fc} t_{fc} \leq 180.000 \quad (4c)$$

$$k_m = \frac{1}{60\xi_{fcu}} \left(\frac{90.000}{n E_{fc} t_{fc}} \right) \leq 0,90 \quad \text{para,} \quad n E_{fc} t_{fc} > 180.000 \quad (4d)$$

Onde:

n número de camadas do reforço com CFC.

E_{fc} módulo de elasticidade do CFC (MPa).

t_{fc} espessura de uma camada do sistema CFC (mm).

ξ_{fcu} deformação de ruptura do reforço com CFC (mm/mm).

O coeficiente (k_m) definido acima tem um valor inferior a (0,90) e deve multiplicar pela deformação de ruptura do sistema composto para se definir uma limitação de deformação que previna o descolamento.

O número (n) utilizado nas expressões (4c) e (4d) é o número de camadas do reforço com lâminas de fibras de carbono à flexão na posição, ao longo do desenvolvimento longitudinal do sistema, onde a resistência ao momento fletor esteja sendo considerado. A expressão reconhece que laminados com maiores espessuras são mais predispostos à delaminação.

Dessa forma, à medida que a espessura do laminado cresce as limitações de deformação máxima admissível vão se tornando mais rigorosas. Para laminados com espessura unitária ($n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}$) maior do que 180.000 N/mm o coeficiente (k_m) limita a força a ser desenvolvida no laminado em oposição ao nível de deformação.

Esse coeficiente efetivamente estabelece um limite superior para a força total que pode ser desenvolvida em um laminado de fibras de carbono, levando em consideração o número de camadas utilizadas.

O coeficiente (k_m) é baseado exclusivamente numa tendência observada da experiência que elaboram projetos com sistemas compósitos aderidos externamente. Com o desenvolvimento de maiores pesquisas voltadas para a colagem à flexão dos sistemas compostos poderão ser determinados métodos mais acurados para a avaliação do valor de delaminação.

Enquanto isso não ocorre, a ACI recomenda que sejam utilizadas as expressões (4c) e (4d).

3.2.2 Confinamento do Concreto

A carga de compressão admissível em uma coluna reforçada com jaqueta de CFC deve ser calculada através das seguintes expressões, derivadas da ACI - 318, que

variam de acordo com o tipo de estribo com que foi armada a coluna.

$$\phi P_n = 0,85\phi [0,85\psi f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (7a) \Rightarrow \text{para elementos \u00e3o protendidos com estribos em forma de espira.}$$

$$\phi P_n = 0,80\phi [0,85\psi f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (7b) \Rightarrow \text{para elementos \u00e3o protendidos com estribos de a\u00e7o convencionais.}$$

Sendo,

A_g - \u00e1rea da se\u00e7\u00e3o transversal da coluna.

A_{st} - \u00e1rea da se\u00e7\u00e3o transversal da armadura longitudinal da coluna.

ϕ - coeficiente de redu\u00e7\u00e3o recomendado pelo ACI 318.

O coeficiente (0,85) vem embutido nas suas express\u00f5es (7a) e (7b) onde a resist\u00eancia \u00e0 compress\u00e3o varia em fun\u00e7\u00e3o da exist\u00eancia de estribos em espira ou comum.

A norma ACI 318 recomenda:

$\phi = 0,90$, nos casos de flex\u00e3o sem carregamento axial.

$\phi = 0,90$, nos casos de tra\u00e7\u00e3o axial.

$\phi = 0,90$, nos casos de tra\u00e7\u00e3o axial com flex\u00e3o. Nesse caso tanto a carga axial como o momento resistente nominal devem ser multiplicados pelo valor apropriado de ϕ tomado isoladamente para cada caso.

$\phi = 0,75$, nos casos de compress\u00e3o axial e compress\u00e3o axial com flex\u00e3o com estribos em espiral conforme 10.9.3.

$\phi = 0,70$, nos casos de compress\u00e3o axial e compress\u00e3o axial com flex\u00e3o com estribos normais.

As se\u00e7\u00f5es circulares s\u00e3o as mais eficientemente refor\u00e7adas com a utiliza\u00e7\u00e3o de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono.

Alinhado transversalmente ao eixo longitudinal das pe\u00e7as o sistema composto estabelece uma press\u00e3o uniformemente distribu\u00edda ao longo da circunfer\u00eancia da pe\u00e7a confinando a expans\u00e3o transversal do elemento de concreto.

Para o caso de seções confinadas não circulares os testes realizados demonstram que ocorre uma diminuição da eficiência dos sistemas CFC comparativamente às seções circulares. O ACI Committee 440 recomenda:

Testes tem confirmado que o confinamento de seções quadradas com a utilização de jaquetas de fibra de carbono é cerca de 50% menos eficiente do que o de elementos circulares. O atual fator de eficiência deve ser determinado para elementos não circulares baseado na geometria, na proporcionalidade entre os lados e na configuração da armadura de aço. O fator de eficiência deverá ser confirmado através de testes. Seções retangulares com relação entre os lados (B/H) excedendo 1,50 ou dimensões dos lados, B ou H, excedendo 900mm não devem ser confinadas através de jaquetas de fibra de carbono até que testes demonstrem sua efetividade.

Para quantificar o comportamento do concreto enclausurado por uma jaqueta de CFC é necessário que seja determinado o total de pressão de confinamento fornecida pela fibra de carbono. A pressão de confinamento é função da espessura da jaqueta e da expansão transversal do concreto.

Através da compatibilidade das deformações entre os dois elementos resistentes existentes a deformação na jaqueta de CFC tem que ser igual à deformação transversal do concreto. A pressão de confinamento pode ser determinada da análise de estabilidade de um tubo cilíndrico de paredes finas.

Recomendada pelo ACI para elementos não protendidos e com estribos de aço circulares, tem-se:

$$\phi P_n = 0,85\phi [0,85\psi f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] , \text{ onde,}$$

ϕ - coeficiente de redução recomendado pelo ACI 318, normalmente considerado com valor (0,70).

ψ_f - coeficiente adicional de redução da resistência que leva em consideração a forma da coluna, normalmente considerado nos reforços com sistemas CFC com valor (0,95).

O valor de (f'_{cc}), resistência à compressão majorada pelo confinamento do concreto é fornecido pela seguinte expressão:

$$f'_{cc} = f'_c \left[2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 \cdot f'_l}{f'_c} - 1,25 \right] \quad (7c)$$

Comparando os termos com os adotados pela NBR-6118 tem-se:

$f'_{cc} \Rightarrow f'_{ck}$ - aumento da resistência à compressão do concreto decorrente do confinamento.

$f'_c \Rightarrow f_{ck}$ - resistência característica à compressão do concreto.

A parcela correspondente à resistência por compressão no concreto, segundo o ACI, pode ser assim escrita:

$$0,85 \phi \cdot 0,85 \psi f \cdot f'_{cc} = 0,85 \cdot 0,70 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \cdot f'_{cc} = 0,480 \cdot f'_{cc}$$

Segundo os critérios da NBR-6118 essa contribuição seria dada por:

$$\frac{0,85 \cdot f'_{ck}}{1,4} = 0,607 \cdot f'_{ck}$$

Já para o aço o ACI considera:

$$0,80 \cdot 0,70 \cdot f_y = 0,560 \cdot f_y$$

Segundo a NBR-6118 deve ser utilizada para o aço a tensão correspondente à deformação de (0,002), o que no aço CA-50 representaria:

$$f'_y = 0,002 \cdot 21000 = 42 \text{ kN/cm}^2, \text{ ou seja,}$$

$$f'_y = 0,84 \cdot f_{yk}$$

Existem duas contribuições distintas para o estabelecimento da pressão de confinamento quando do reforço com a utilização de sistemas CFC:

- 1- Componente da pressão de confinamento devido ao sistema CFC utilizado.
- 2- Componente da pressão de confinamento devido aos estribos existentes na seção.

A pressão lateral de confinamento pode ser expressa da seguinte maneira:

$$f_l \cdot h \cdot (1 \text{ cm}) = 2 \cdot F = 2 \cdot f_{fe} \cdot n \cdot t_r \cdot k_a, \text{ onde,}$$

f_{fe} - tensão de tração na fibra de carbono.

n - número de camadas de fibras de carbono.

t_r - espessura de uma camada de fibra de carbono.

k_a - coeficiente de redução da eficiência da fibra de carbono.

$$f_l = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot f_{fe} \cdot k_a}{h}$$

Nas seções circulares ($k_a = 1$), o que resulta:

$$f_l = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot f_{fe}}{h}, \text{ sendo,}$$

$$f_{fe} = \xi_{fe} \cdot E_f$$

Segundo o ACI, a tensão (ξ_{fe}) seria limitada por:

$$\xi_{fe} = 0,004 < 0,75 \cdot \xi_{fu}$$

Se considerarmos um círculo com ($\phi = h$), com deformação transversal (ξ_t), teremos como comprimento da circunferência após a deformação final do concreto:

$$l_{\text{final}} = \pi \cdot h \cdot (1 + \xi_t)$$

$$\Delta l = \pi \cdot h \cdot \xi_t$$

A deformação longitudinal da fibra de carbono colocada em volta da coluna será:

$$\xi_{fc} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\pi \cdot h \cdot \xi_t}{\pi \cdot h} = \xi_t, \text{ ou seja,}$$

$$\xi_{fc} = \xi_t = \nu \cdot \xi_l, \text{ onde,}$$

ν - coeficiente de Poisson, normalmente considerado igual a (0,20) para o concreto.

O ACI recomenda a seguinte expressão para o cálculo da pressão lateral de confinamento devida ao sistema CFC:

$$f_l = \frac{k_a \cdot \rho_f \cdot f_{fe}}{2} \text{ onde,}$$

$k_a = 1$ para as seções circulares.

$$\rho_f = \frac{4 \cdot n \cdot t_f}{h}$$

$$f_{fe} = \xi_{fe} \cdot E_f, \text{ assim,}$$

$$f_l = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot f_{fe}}{h}$$

Para a determinação do valor de (ffe) deve ser levada em consideração a deformação ($\xi_{fe} = 0,004$).

Para um tecido de fibra de carbono com $E_{fe} = 23.500 \text{ MPa}$, por exemplo, a tensão máxima que pode ser absorvida pela fibra de carbono será:

$$f_{fe} = 0,004 \cdot 23500 = 94,00 \text{ kN/cm}^2$$

Analisando uma coluna circular confinada segundo os critérios da NBR-6118 para compressão centrada vem:

$$N_d = \gamma_f \cdot \gamma_p \cdot N, \text{ onde,}$$

$$\gamma_f = 1,40$$

$$\gamma_p = 1 + \frac{6}{h} \quad \text{para } (\lambda \leq 40) \text{ e}$$

$$\gamma_p = 1 + \frac{k_e}{h} \quad \text{para } (40 < \lambda \leq 80)$$

$$N_d = A_c \cdot f_c + A_s \cdot f'_{yd}, \text{ sendo}$$

$$f'_c = 0,85 \cdot f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,40}$$

$$f'_{yd} = 0,002 \cdot E_s, \text{ o que no aço CA-50 corresponde a } 42 \text{ kN/cm}^2$$

Contribuição do estribo no confinamento da seção circular:

A norma brasileira NBR 6118 apresenta as seguintes recomendações relativamente às colunas cintadas (confinadas por estribos):

Em 4.1.1.4 fica estabelecido que:

Somente serão calculadas como cintadas as peças que obedecerem ao disposto no item 6.4.1, tiverem ($\lambda \leq 40$) referido ao núcleo, e excentricidade, já incluída a acidental, inferior a ($d_i / 8$). O cálculo será feito de acordo com o item 4.1.1.3, aumentando-se (f_{ck}) de:

$$\Delta f_{ck} = 2 \cdot \frac{A_t}{A_{ci}} \cdot f_{yk} \left(1 - 8 \frac{e}{d_i} \right) \geq 0 \text{ onde,}$$

A_t - área da seção fictícia da armadura de cintamento (volume da armadura de cintamento por unidade de comprimento da peça).

A_{ci} - área da seção transversal do núcleo de uma peça cintada encerrado pela superfície que contém o eixo do cintamento.

e - excentricidade da força normal.

d_i - diâmetro do núcleo de uma peça cintada, medido no eixo da barra de cintamento.

$$A_t = \frac{\pi \cdot A_{es} \cdot d_i}{s} \quad e,$$

$$A_{ci} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad , \text{ onde } (d_i = h - 2c - \phi_{est}.)$$

Não se considerará o concreto exterior ao núcleo. A resistência total de cálculo da peça cintada não deverá, porém, ultrapassar (1,7) vezes a calculada como se não houvesse cintamento.

Já no item 6.4.1 dispõe a NBR 6118 o seguinte:

A armadura de cintamento será constituída por barras em hélice ou estribos, de projeção circular sobre a seção transversal da peça, obedecendo às seguintes condições:

a) a relação entre o comprimento da peça e o diâmetro do núcleo será:
(l/d_i) \leq 10.

b) as extremidades das barras ou dos estribos serão bem ancoradas no núcleo do concreto;

c) as barras helicoidais ou estribos não serão de bitola inferior a 5 mm;

d) o espaçamento entre 2 espiras ou 2 estribos será:

$$\phi_{\tau} + 3\text{cm} \leq s \leq (d_i/5) \text{ ou } 8 \text{ cm} \quad \text{onde:}$$

(ϕ_{τ}) é o diâmetro da espiral ou dos estribos.

e) a seção fictícia A_t do cintamento será:

$$0,005 \cdot A_{ci} \leq A_t \leq 3 \cdot A's$$

f) a armadura longitudinal deverá constar de no mínimo 6 barras dispostas uniformemente no contorno do núcleo e a área da sua seção transversal não

deverá ultrapassar ($0,008.A_{ci}$), inclusive no trecho de emenda por traspasse; a bitola barras longitudinais não será inferior a 10 mm.

Para os estribos a norma ACI 318 recomenda:

7.10.4.2 – para construções moldadas “in-situ” o diâmetro da barra da espiral não pode ser inferior a 3/8” (10 mm.).

7.10.4.3 – o espaço livre entre as espirais não pode ser superior a 3” (7,50cm.) e nem inferior a 1” (2,54 cm.).

Como se observa, as recomendações, tanto da norma brasileira NBR 6118 como da norma ACI 318 relativamente ao confinamento de colunas são bastante restritivas, dificultando muito a possível utilização das armaduras de estribos usualmente adotadas em nosso meio.

Tanto as normas brasileiras como as normas americanas não fazem referência, para efeito de dimensionamento, do confinamento de seções retangulares ou quadradas. Entretanto, em se tratando de reforço estrutural, pode ser que ocorra a conveniência ou a necessidade de se lançar mão desse recurso adicional para aumentar a resistência à compressão do elemento.

Admitindo-se que as recomendações normativas estejam sendo atendidas, a participação dos estribos na composição da pressão de confinamento pode ser assim avaliada. Para as seções transversais circulares temos:

$$f_{l,estr.} = \frac{k_a \cdot \rho_{estr.} \cdot f_{s,estr.}}{2}$$

$$f_l \cdot (1cm) d_i = 2F = 2 \cdot f_{s,estr.} \cdot \frac{A_{estr.}}{s} \cdot k_a \quad \text{sendo,}$$

$$k_a = 1$$

d_i - diâmetro correspondente ao baricentro do estribo.

s - espaçamento dos estribos.

$$f_l = \frac{2 \cdot A_{estr.} \cdot f_{s,estr.}}{s \cdot d_i} \quad \text{sendo,}$$

$$f_{s,estr.} = 0,002 \cdot E_s, \text{ ou seja, para o aço CA-50 temos : } f_{s,estr.} = 42 \text{ kN/cm}^2.$$

$$d_i = h - 2 \cdot d' = h - 2 \cdot c - \phi_{estr.}$$

Cálculo da Pressão de Confinamento Nas Seções Retangulares

A expressão geral continua sendo:

$$f_l = \frac{k_a \cdot \rho_f \cdot f_{fe}}{2}$$

Considerando a contribuição do sistema composto com fibras de carbono:

Segundo a ACI temos:

$$f_l = \frac{k_a \cdot \rho_f \cdot f_{fe}}{2}$$

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot (b + h)}{b \cdot h}$$

$$k_a = 1 - \frac{(b - 2 \cdot r)^2 + (h - 2 \cdot r)^2}{3 \cdot b \cdot h (1 - \rho_g)} \quad \text{sendo,}$$

r – raio de curvatura entre os lados adjacentes (b) e (h); normalmente ($r \cong 1,5 \text{ cm}$)

$$\rho_g = \frac{A_{st}}{A_g}$$

A equação de (ρ_f) pode também ser escrita da seguinte maneira:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot (b + h)}{b \cdot h} = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b)}{b} + \frac{2 \cdot t_f \cdot (h)}{h}, \text{ demonstrando que a}$$

expressão significa

$$\rho_g = n \cdot t_f \cdot \left(\frac{\text{perímetro}}{\text{área}} \right)$$

Considerando a contribuição dos estribos existentes:

Para a seção retangular, desde que atendidas às recomendações da NBR 6118 expostas atrás, temos:

$$\rho_{estr.} = \frac{A_{estr.}}{s} \cdot \frac{\text{perímetro}}{\text{área}} \quad \text{ou seja,}$$

$$\rho_{estr.} = \frac{\frac{2 \cdot A_{estr.} \cdot (b)}{s}}{b} + \frac{\frac{2 \cdot A_{estr.} \cdot (h)}{s}}{h}$$

Como geralmente ($A_{estr.}(b) = A_{estr.}(h) = A_{estr.}$) vem:

$$\rho_{estr.} = \frac{2 \cdot A_{estr.} \cdot (h + b)}{s \cdot b \cdot h}, \text{ sendo,}$$

$$f_l = \frac{k_a \cdot \rho_{estr.} \cdot f_{s,estr.}}{2}$$

$$f_l = \frac{2 \cdot k_a \cdot A_{estr.} \cdot (h + b) \cdot f_{s,estr.}}{2 \cdot s \cdot b \cdot h}$$

$$f_l = \frac{k_a \cdot A_{estr.} \cdot (h + b) \cdot f_{s,estr.}}{s \cdot b \cdot h}$$

Resumindo, a contribuição da fibra de carbono e dos estribos existentes na seção da coluna pode ser assim avaliada:

$$f_l = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot f_{fe}}{h} \Rightarrow \text{devido à fibra de carbono nas seções circulares.}$$

$$f_l = \frac{k_a \cdot \rho_f \cdot f_{fe}}{2} \Rightarrow \text{devido à fibra de carbono nas seções retangulares.}$$

$$f_l = \frac{2 \cdot A_{estr.} \cdot f_{s,estr.}}{s \cdot d_i} \Rightarrow \text{devido aos estribos nas seções circulares.}$$

$$f_l = \frac{k_a \cdot A_{estr.} \cdot f_{s,estr.} \cdot (h + b)}{s \cdot b \cdot h} \Rightarrow \text{devido aos estribos nas seções retangulares.}$$

Em função dos valores de (f_l) calcula-se o aumento da resistência de compressão da coluna decorrente do confinamento através da expressão (7d)

$$f'_{cc} = f'_c \left[2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 \cdot f'_l}{f'_c} - 1,25 \right] \quad (7d)$$

A deformação correspondente à tensão máxima de compressão é fornecida pela equação (7e):

$$\xi'_{cc} = \xi'_c \left(6 \cdot \frac{f'_{cc}}{f_{ck}} - 5 \right) \quad (7e)$$

Nas equações acima as expressões (f_c) e (ξ'_c) são propriedades do concreto não confinado. O termo (ξ'_c) é a deformação correspondente ao valor da tensão máxima admissível de compressão que pode ser obtida da equação (7f).

$$\xi'_c = \frac{1,71 \cdot f_{ck}}{E_c} \quad (7f)$$

Se o elemento está submetido a esforços de compressão e cisalhamento a deformação efetiva na jaqueta de CFC deve ser limitada com base na seguinte expressão:

$$\xi_{fe} = 0,004 \square 0,75 \xi_{fu} \quad (7g)$$

3.2.3 Comportamento em relação ao fogo.

Contudo, o comportamento ao fogo dos materiais que constituem o sistema composto ainda escapa ao alcance desses códigos e normas em função do relativamente pouco tempo de aplicação dos mesmos na indústria da construção civil. A análise do comportamento ao fogo dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono deve levar em consideração dois fatores relevantes:

- 1- As resinas de epoxícas utilizadas nos materiais dos sistemas compósito

de fibra de carbono (CFC) aderidos externamente ao concreto são combustíveis, sendo assim fundamental avaliar o seu potencial de geração de fumaça e propagação da chama.

2- Como se utiliza os sistemas compostos como elementos estruturais, deverá ser avaliada a resistência ao fogo da estrutura de concreto reforçada com o mesmo.

Propagação da chama e geração de fumaça, costuma-se adotar para essas verificações as recomendações da norma ASTM E84 –“Características de Combustão de Superfície dos Materiais de Construção”. Os ensaios preconizados por essa norma são utilizados para:

1- determinar a rapidez da propagação da chama em uma área determinada;

2 - densidade da fumaça gerada quando uma superfície é exposta a uma fonte térmica controlada à temperatura de combustão,

Os acabamentos de superfície, segundo as recomendações dessa norma devem apresentar:

Classe I Índice de propagação de chama < 25

Classe II Índice de propagação de chama < 75

Classe III Índice de propagação de chama < 200

Já o índice de propagação de fumaça deve ser inferior a 450 para poder classificar o acabamento superficial.

3.3 COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO.

O compósito de fibra de carbono é manta de fibra de carbono com matriz epóxica, resiste a tensões de tração de até 4000 Mpa (aproximadamente $10x + q$ o aço), e possui alto módulo de elasticidade (podendo chegar a 800 GPa) conforme Tabela 2.2, e não é afetado pela corrosão pelo contrário, resiste a efeitos corrosivos de ácidos, alcalls, sais... Sendo um sistema leve, não carrega a superfície, grande flexibilidade de aplicação, se molda as mais diversas formas, facilidade de manuseio, transporte e aplicação, mão de obra qualificada, em pilares aumenta resistência por confinamento (arredondar cantos), em vigas aumenta a resistência à flexão, aumento das dimensões dos elementos estruturais praticamente zero. A resina epóxica é responsável pela união das fibras que compõem o compósito atuando como meio pelo qual as solicitações externas sejam transmitidas e distribuídas para as fibras, ela irá fazer a aderência com o concreto e incorporar a fibra para que a mesma absorva os esforços, para isso ela precisa ter forte adesão às fibras, alta resistência a tração, boa aderência ao concreto e baixa retração durante a cura.

Na aplicação precisa preparar a superfície para receber a resina, de forma que aumente a rugosidade da superfície possibilitando um bom intertravamento entre a manta e a estrutura, para iniciar a aplicação da manta de fibra de carbono no caso de vigas e laje é necessário elevar a estrutura provocando uma contra flecha, dessa maneira quando é retirado os dispositivos elevatórios, a fibra já entra ativa resistindo às cargas, então é aplicado um primer na estrutura e na manta, então é colocada a manta e passa um rolo para retirar as bolhas. Após a aplicação realiza testes de sonoridade e teste de arrancamento mecânico.

A manta de fibra de carbono simplifica a recuperação estrutural, rapidez na execução mínimo de mão de obra, ausência se inconvenientes e obtenção de altas resistências no período de 4 a 5 horas.

Uma desvantagem desse sistema é a ruptura busca do conjunto estrutura de concreto com a manta de fibra de carbono.



Figura 3.3 - Reforço com fibra de carbono.

Fonte: http://www.igtech.com.br/fibra_carbono.php

4.RESULTADOS

Os resultados dos estudos realizados com materiais compósitos de fibra de carbono revisados confirmam sua eficiência, quanto a aplicação em reparos e reforços de estruturas de concreto armado.

Sabendo necessidade de reforços em estruturas em todo o mundo, os compósitos representam um aperfeiçoamento na engenharia admirável devido às suas propriedades e características.

Em vários trabalhos na literatura observou se um valor limite para a deformação do compósito e também para a tensão cisalhante limite a ser suportada pelo concreto da superfície a receber o reforço, entende-se por esse motivo a necessidade do dimensionamento a limitação da deformação do compósito, nos resultados dos ensaios desses trabalhos a deformação do compósito era sempre inferior ao valor da deformação de ruptura, então podemos afirmar que o modo de ruptura está diretamente ligado ao detalhamento e dimensionamento do reforço bem como a aplicação do mesmo e as condições da superfície aplicada, pois os aumentos de rigidez e resistência da viga dependem disso.

Observou -se que o descolamento da manta tem relação com locais de abertura de fissuras, todos os experimentos dos trabalhos analisados mostraram a capacidade do aumento de carga, mas os que resistiram ao descolamento foram os que tiveram reforço de cisalhamento cobrindo todas a superfície.

Um trabalho que se aproximou muito de uma situação real foi o C.M.Araújo, (2002), pois antes de aplicar a manta ela submeteu a vigas a um esforço para fissurar as vigas então aplicou a manta e após 7dias ela submeteu a viga a novos ensaios. A partir das análises feitas por ela pode-se propor os modelos de dimensionamento ao cortante e à flexão mostrados a seguir, baseados no modelo de treliça e na teoria da flexão simples.

O roteiro para dimensionamento para reforço ao cortante com estribos de tecido de fibra de carbono consiste em:

Avaliar a resistência do projeto original.

Definir o espaçamento dos estribos externos, com sistema de ancoragem nas extremidades. O CEB-FIP(2001) estabelece que o valor máximo do espaçamento deverá ser o menor dentre os seguintes valores: um quinto do vão, metade da altura da seção ou 0,4 do vão do balanço (se houver).

Determinar a tensão cisalhante limite que o concreto resiste sem destacar.

Calcular a tensão cisalhante atuante no reforço (estribo), que é a menor dentre os valores.

Calcular a contribuição do reforço pelo modelo de treliça.

Calcular a resistência ao cortante da viga reforçada.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Através dos estudos em trabalhos já realizados do emprego de materiais compósitos em reforços, é possível comprovar a eficiência e viabilidade desses materiais. A execução foi se basear em experimentos que foram realizados por mestrandos e analisar seus resultados. Foi constatado nos experimentos:

Respeitar os tempos de colagem e a preparação da superfície evita o descolamento das camadas do reforço. Porém no caso de encamisamento de pilares segundo R. Carrazedo, (2002) o lixamento da superfície não demonstrou grande influência nos resultados.

Observou-se um aumento de rigidez das vigas reforçadas à flexão. E também grandes ganhos de resistência e ductilidade em pilares de seção transversal circular e quadrada.

No caso de pilares circulares submetidos a esforços de compressão axial centrada, existem modelos teóricos que possibilitam prever os ganhos de resistência e ductilidade, entretanto com uma variedade de previsões devido diferentes materiais utilizados nos modelos e diferentes valores de ruptura da camisa.

Quanto maior o número de camadas maior a capacidade de resistência, no trabalho de C.M.Araújo,(2002) foram utilizadas cinco camadas do tecido e a recomendação do fabricante indica um número máximo de três camadas, mas o ela alegou que isso não prejudicou o comportamento do reforço.

Os esforços se limitaram ao momento em que o reforço começou a descolar, antes disso houve uma redução da deformação da armadura.

Os materiais compósitos reforçados com fibras, atendem os requisitos para realizar reparos em estruturas com grande potencial no mercado de trabalho. Porém ainda existe a necessidade de estudos que possibilitem entender a influência de diferentes colas com a superfície do concreto, uma forma mais adequada de ancoragem. Com isso as vantagens desses materiais serão mais evidentes e cada dia mais utilizado, acarretando na redução do custo

6.REFERÊNCIAS

ARANHA, P.M.S.; **Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica**. 1994. 168p.(UFRGS, M.Sc., Engenharia Civil, 1994) Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

ARAUJO, C.M.; **Reforço à Flexão e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto com Tecidos de fibra de Carbono**. 2002. 140p.(COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2002) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE Rio de Janeiro, 2002.

CALLISTER jr., W.D. **Materials Science and Engineering**. 1985. Jonh Wiley & Sons New York, 1985.

CAMPOS L.E.T.; **Técnicas de Recuperação e Reforço Estrutural com Estruturas de Aço**. 2006. 104p.Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CARRAZEDO, R.; **Mecanismo de Confinamento e Suas Implicações no Reforço de Pilares de Concreto por Encamisamento Com Compósito de Fibras de Carbono**. 2002. 208p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

JUVANDES, L., 1999, **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”**. Tese de D.Sc., Universidade do Porto, Porto, Portugal.

MACHADO, A.P.; **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono** - Editora PINI (2002).

MANDER. J.B.; **Theoretical Stress Strain Model for Confined Concrete**. 1988. p.1804-1827. Journal of Structural Engineering, v114. 1988.

MATTHYS, S., 2000, **Structural Behavior and Design of Concrete Members Strengthened with externally bonded FRP Reinforcement**. D.Sc. Thesis, Ghent University, Belgium.

MEIER, U., **Post Strengthening by Continuous Fiber Laminates in Europe**. In: Proceedings of the Third International Symposium of Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, v. 1, pp. 41-56, Japan, october, 1997.

MELO, P.R.: **Pré-dimensionamento de Estruturas de Madeira, de Aço e de Concreto Para Auxílio à Concepção de Projetos Arquitetônicos**. 2013. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

NORRIS T., SAADATMANESH H., EHSANI M., 1997, **Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets**, Journal of Structural Engineering, v.123, n. 7 (Jul.), pp. 903-911.

SHACKELFORD, J.F.; **Introduction to Materials for Engineers**. 1996. New York, John Wiley & Sons, 1996.

SOUZA, R. et al, 1998, **Avaliação do Desempenho de Compósitos Armados com Tecido de Fibras de Carbono como Elemento de Reforço de Vigas de Betão Armado**. In: Simpósio sobre Manutenção e Recuperação de Obras de Arte, 1998

especiais, Lisboa, Portugal.

TAERWE, L. et al, **Behavior of RC Beams Strengthened in Shear by External CFRP Sheets**. In: Proceedings of the Third International Symposium of Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, v. 2, pp. 559-566, Japan, October, 1997.

TAVARES, D.H.; **Análise Teórica e Experimental de Vigas de Concreto Armadas Com Barras Não Metálicas de GFRP**. 2006. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TITA, V.; **Análise Dinâmica Teórica e Experimental de Vigas Fabricadas a Partir de Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados**. 1999. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TRIANAFILLOU, T., 1998, **Strengthening of Structures with Advanced FRPs**, In: Progress in Structural Engineering and Materials, v.1, pp.126-134.

VINSON, J.R; SIERAKOWSKI, R.L. (1986). **Behavior of Structures Composed of Composite Materials**. Dordrecht, Martinus Nijhoff.