



FACULDADE DE CIÊNCIAS GERENCIAIS DE MANHUAÇU

**O USO DE FIBRAS DE CARBONO COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO**

Ezequiel Batista Domingos

MANHUAÇU / MG

2015



EZEQUIEL BATISTA DOMINGOS

**O USO DE FIBRAS DE CARBONO COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso Superior de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas
Orientador: Márcio José Ottoni

Manhuaçu / MG

2015



FICHA CATALOGRÁFICA

D671u Domingos, Ezequiel Batista.

O uso de fibras de carbono como reforço estrutural em vigas de concreto armado / Ezequiel Batista Domingos. -- Manhuaçu, 2015.
19f.

Monografia (Curso de Engenharia civil) – Orientador: Márcio José ottoni
Centro Superior de Estudos de Manhuaçu - FACIG

1. Fibras de carbono. 2. Reforço estrutural. 3. Vigas de concreto armado.

I. Título.

FACIG

CDD - 624.1834



RESUMO

Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto armado. As estruturas feitas com este material apresentam uma vida útil média de 50 anos. Isso se deve ao fato de que toda obra é confeccionada para sofrer o mínimo de alterações estruturais possíveis. Contudo, o desgaste natural é inevitável e as estruturas acabam sucumbindo aos seus efeitos danosos. A mudança na utilização de uma construção é outro fator que tem causado mudanças nas estruturas. Um dos meios que podem ser usados para compensar essas mudanças é o reforço estrutural. Através dele é possível recuperar a capacidade resistente de uma estrutura sem que haja grandes alterações geométricas. Existem vários métodos de reforço estrutural. Dentre os mais utilizados estão o reforço com perfis metálicos e o reforço pelo aumento da seção transversal. Com os avanços tecnológicos a utilização de fibras de carbono como reforço estrutural tem ganhado espaço no ramo da construção civil. O presente artigo tem como objetivo analisar o comportamento desse tipo de reforço em vigas de concreto armado, de modo que venha a corroborar com o aprimoramento desta técnica.

Palavras-chave: Fibras de carbono. Reforço estrutural. Vigas de concreto armado.



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1. Reforço em estruturas de concreto armado	5
2.1.1. Reforço pelo aumento da seção transversal	5
2.1.2. Reforço com perfis metálicos	6
2.1.3. Reforço com chapa de aço colada	7
2.1.4. Reforço por protensão exterior	7
2.2. Reforço com materiais compósitos	8
2.2.1. Fibras de vidro	9
2.2.2. Fibras aramida	10
2.2.3. Fibras de carbono	11
2.2.4. Compósitos reforçados com fibras de carbono	12
3. METODOLOGIA	14
3.1. Ensaios realizados por Silva (2014)	15
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	16
4.1. Deformações nas armaduras de flexão	16
4.2. Deformações na superfície do concreto	17
4.3. Deformações no reforço	18
4.4. Evolução da abertura das fissuras	18
4.5. Cargas e modos de ruptura das vigas	18
5. CONCLUSÃO	19
6. REFERÊNCIAS	20

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado têm sido amplamente utilizadas na engenharia civil, sendo projetadas para atender a uma vida útil mínima que varia de acordo com a sua finalidade.

A durabilidade é um aspecto que deve ser levado em conta durante a concepção das estruturas, pois as mesmas devem manter suas propriedades físicas e mecânicas durante toda a sua vida útil.

Muitas estruturas têm suas características alteradas devido ao desgaste natural, a falhas durante as fases de concepção e execução do projeto, a alterações na utilização da estrutura e a danos causados por desastres naturais.

O reforço estrutural visa restituir ou aumentar a capacidade resistente sem que haja alterações significativas nas estruturas. Dentre os métodos convencionais destacam-se a colagem de placas de aço e o aumento da seção transversal dos elementos estruturais.

Com os avanços tecnológicos a utilização de fibras de carbono como reforço estrutural tem ganhado espaço no ramo da construção civil.

O presente estudo tem por objetivo analisar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono, de modo que venha a corroborar com o aprimoramento deste método de reforço estrutural.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Reforço em estruturas de concreto armado

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados na construção civil. As estruturas feitas com este material apresentam uma vida útil média de 50 anos. Porém, fatores como o desgaste natural, as falhas cometidas nas fases de concepção e execução dos projetos e as alterações na utilização das estruturas têm reduzido a vida útil das construções. Para compensar esta redução muitas obras são submetidas a um reforço estrutural.

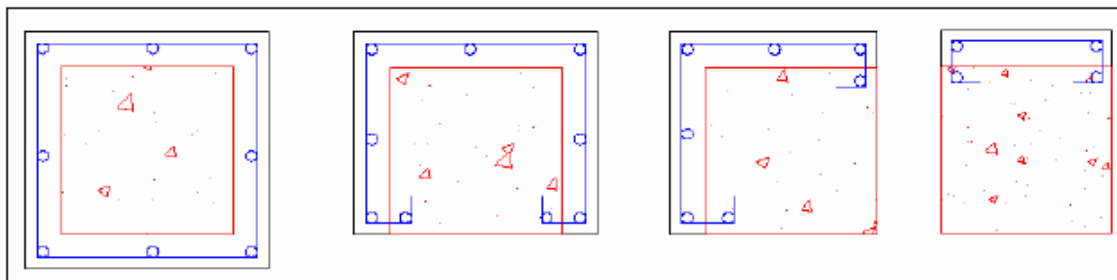
O reforço estrutural consiste em aumentar a capacidade resistente de um elemento sem que haja alterações significativas em suas características geométricas.

Existem vários métodos de reforço estrutural. Os mais utilizados são o reforço pelo aumento da seção transversal, o reforço com perfis metálicos, o reforço com chapas de aço coladas, o reforço com protensão exterior e o reforço com materiais compósitos.

2.1.1. Reforço pelo aumento da seção transversal

Este método consiste no aumento da seção transversal de um elemento estrutural através do acréscimo de armaduras recobertas com concreto (TAKEUTI, 1999).

FIGURA 1 – Reforço com adição de armadura e concreto em pilares de concreto armado



Fonte: Takeuti, 1999.

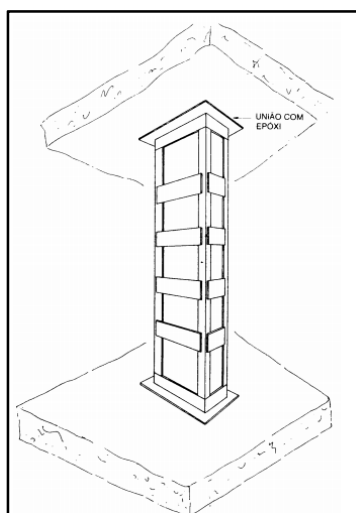
Dentre suas principais vantagens estão o maior conhecimento da técnica e dos materiais empregados em sua execução e o baixo custo com relação aos outros métodos de reforço estrutural (REIS, 1998).

No entanto, o aumento do peso próprio das estruturas, o risco de corrosão das armaduras e a deterioração do concreto do reforço caracterizam-se como as principais desvantagens deste método (EMMONS et al., 1998; PINTO, 2000 *apud* BEBER, 2003).

2.1.2. Reforço com perfis metálicos

O reforço com perfis metálicos consiste em envolver os elementos danificados com uma estrutura formada por perfis soldados entre si.

FIGURA 2 – Reforço com perfis metálicos em pilar de concreto armado



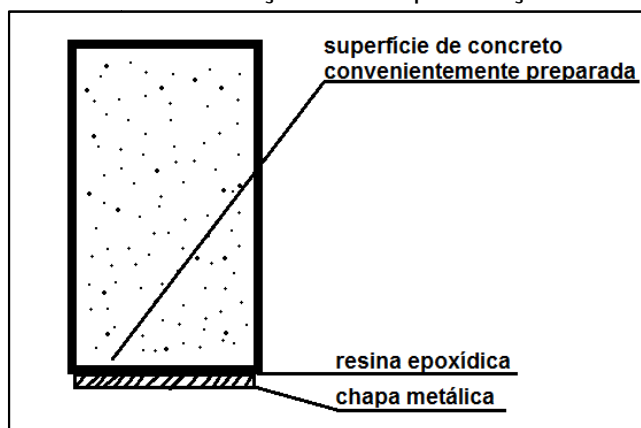
Fonte: Takeuti, 1999.

A principal vantagem apresentada por este tipo de reforço é a rapidez na execução. Contudo, se não houver uma solidariedade entre os perfis metálicos e o concreto, o reforço somente atuará quando a peça estrutural atingir a ruptura (CÁNOVAS, 1988 *apud* TAKEUTI, 1999). Deste modo, recomenda-se que seja executado apenas em situações emergenciais ou em casos onde não há a possibilidade de grandes alterações geométricas (SOUZA e RIPPER, 1998).

2.1.3. Reforço com chapa de aço colada

Esta técnica baseia-se na criação de uma armadura secundária à peça estrutural através da colagem de chapas de aço (REIS, 2001).

FIGURA 3 – Reforço com chapa de aço colada



Fonte: Souza e Ripper, 1998.

As principais vantagens apresentadas por esse tipo de intervenção são:

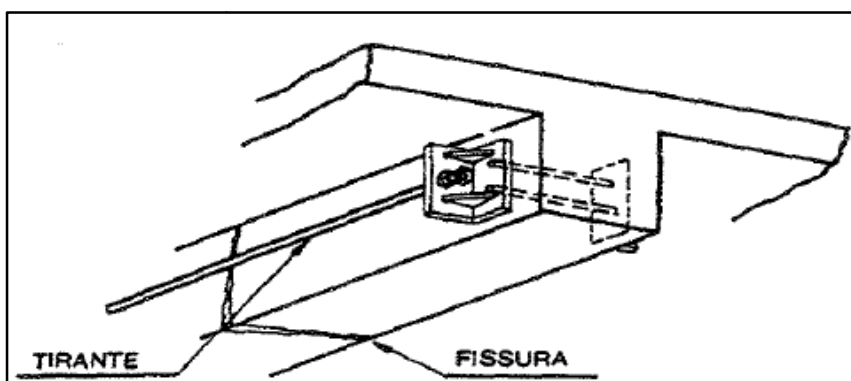
- Rapidez na execução;
- Não utilização de materiais molhados ou úmidos;
- Ausência de vibrações e baixo nível de ruídos [...];
- Pouca interferência no uso da estrutura durante a execução da reabilitação (REIS, 1998, p. 67).

Porém, este método apresenta baixa resistência ao fogo e pouca durabilidade da aderência nas interfaces adesivo-chapa e adesivo-concreto (SHEHATA e TEIXEIRA JÚNIOR, 1997 *apud* REIS, 2001).

2.1.4. Reforço por protensão exterior

O reforço por protensão exterior é realizado através da inserção de cabos protendidos no exterior do elemento estrutural, de modo que sejam geradas tensões capazes de compensar as cargas excedentes (GALLARDO, 2002).

FIGURA 4 – Reforço por protensão exterior em viga de concreto armado



Fonte: Cánovas, 1998 *apud* Gallardo, 2002.

Segundo Viana (2004), este tipo de intervenção apresenta as seguintes vantagens:

- O reforço pode ser executado mesmo que a estrutura esteja carregada;
- O resultado do reforço é obtido logo após o término da protensão dos cabos;
- Após a protensão grande parte das deformações existentes no elemento é eliminada;
- A protensão gera uma redução na deformação das armaduras internas.

No entanto, por estar localizado na parte exterior do elemento estrutural, este método se torna vulnerável à ação do fogo, a corrosão eletroquímica e a atos de vandalismo (BEBER, 2003).

2.2. Reforço com materiais compósitos

Os compósitos são materiais multifásicos que apresentam uma combinação das melhores características das suas fases constituintes (CALLISTER, 2011).

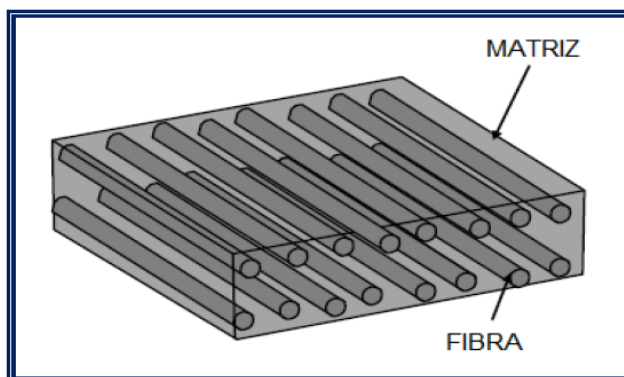
Basicamente existem três grupos principais de compósitos: os compósitos estruturais, os compósitos reforçados com partículas e os compósitos reforçados com fibras (CALLISTER, 2011). Os mais utilizados como reforço estrutural são os compósitos reforçados com fibras.

Este grupo de materiais destaca-se dos demais por apresentar:

- Elevado módulo de elasticidade e alta resistência à tração (no caso do CFRP);
- Imunidade à corrosão, quando em condições normais de exposição;
- Baixo peso específico, sendo de quatro a cinco vezes mais leve que o aço;
- Capacidade de atingir grandes deformações;
- Disponibilidade em diversos tamanhos, geometria e dimensões (OLIVEIRA JUNIOR, 2005, p. 14).

Segundo Callister (2011), esse tipo de compósito é formado por uma fase matriz e uma fase fibra.

FIGURA 5 – Fases de um compósito fibroso



Fonte: Obaidat, 2007 *apud* Perelles 2013.

A fase matriz tem a função de:

- Unir as fibras e proteger suas superfícies durante o manuseio, fabricação e ao longo de toda sua vida útil;
- Dispersar e separar, ordenadamente, as fibras com o objetivo de evitar a propagação de fissuras e consequente ruptura do compósito;
- Transferir integralmente as tensões para as fibras por atrito ou adesão;
- Ser química e termicamente compatível com a fibra (HOLLAWAY, 1993 *apud* BEBER, 2003, p. 22).

Nos compósitos fibrosos a matriz pode ser constituída por resinas epóxi ou por resinas de poliéster. A Tabela 1 mostra algumas das propriedades apresentadas por estes dois tipos de resina.

TABELA 1 - Propriedades das resinas dos tipos poliéster e epóxi

Resina	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Densidade (Kg/m ³)
Poliéster	2,1 - 4,1	20 - 100	1,0 - 6,5	1000 – 1450
Epóxi	2,5 - 4,1	55 – 130	1,5 - 9,0	1100 – 1300

Fonte: Carolin, 2003 *apud* Fonseca, 2007.

A fase fibra é composta por materiais filamentosos, cujo diâmetro é menor ou igual a 0,25 mm (JONES, 1975; ASTM, 1996 *apud* BEBER, 2003).

Os materiais filamentosos mais utilizados na confecção de compósitos são: as fibras de vidro, as fibras aramida e as fibras de carbono.

2.2.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro consistem em aglomerados de pequenos filamentos de vidro, cujos diâmetros variam entre 3 e 20 μm (CALLISTER, 2011).

FIGURA 6 – Fibras de vidro



Fonte: Okoder.com.

De acordo com Hollaway e Leeming (1999 *apud* BEBER, 2003), esse material pode ser dividido em dois grupos:

- O primeiro grupo, formado pelas fibras do tipo E, A, C e E-CR, apresenta um módulo de elasticidade de 70 GPa e uma resistência à tração que varia de 1000 a 2000 MPa;
- O segundo grupo, formado pelas fibras do tipo R, S e AR, apresenta um módulo de elasticidade de 85 GPa e uma resistência à tração que varia de 2000 a 3000 MPa.

O Quadro 1 apresenta os tipos de fibras de vidro e suas principais aplicações.

QUADRO 1 - Tipos de fibras de vidro e suas principais aplicações

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

Fonte: Beber, 2003.

2.2.2. Fibras aramida

As fibras aramida são fibras sintéticas formadas a partir da extrusão do nylon. Geralmente são encontradas na forma de estopas, fios lisos e tecidos.

FIGURA 7 – Fibras aramida



Fonte: Sentryair.com.

Segundo Bernardi (2003), as propriedades mecânicas apresentadas por esse tipo de fibra variam de acordo com a classe do material.

A Tabela 2 mostra as propriedades mecânicas de algumas classes de aramida da marca Kevlar.

TABELA 2 - Propriedades mecânicas dos produtos de aramida Kevlar

Denominação	Denier / filamentos	Diâmetro filamento (μm)	Seção transversal	Densidade (g/cm^3)	Tenacidade (GPa)	Alongamento (%)	Módulo (GPa)
Kevlar	1,5 - 2,25	12 - 15	Circular	1,44	2,9	3,6	70
Kevlar 29	1,5 - 2,25	12 - 15	Circular	1,44	2,9	3,6	70
Kevlar 49	1,5	12	Circular	1,45	2,9	2,8	135
Kevlar 68	2,25	15	Circular	1,44	3,1	3,3	99
Kevlar 119	1,5 - 2,25	12 - 15	Circular	1,44	3,1	4,4	55
Kevlar 129	1,5	12	Circular	1,45	3,4	3,3	99
Kevlar 149	1,5	12	Circular	1,47	2,3	1,5	143

Fonte: Yang, 1993 *apud* Bernardi, 2003.

2.2.3. Fibras de carbono

As fibras de carbono são filamentos sintéticos formados a partir da carbonização de materiais orgânicos como o rayon, a poliacrilonitrila e o alcatrão (MACHADO, 2010).

FIGURA 8 - Fibras de carbono



Fonte: Imagefreehd.com.

Através do controle da temperatura durante o processo de carbonização é possível obter uma grande variedade de fibras de carbono com diferentes propriedades mecânicas. A Tabela 3 mostra os quatro tipos principais de fibras de carbono.

TABELA 3 - Principais tipos de fibras de carbono

Tipo de Fibra	Carbono (%)	Temperatura (°C)	Módulo de Elasticidade (GPa)
High strength - HS	92 – 96	1200 - 1400	228 – 241
Intermediate Modulus - IM	92 - 96	~1400	290 - 310
High Modulus - HM	99	1800 - 2500	276 - 380
Ultrahigh Modulus - UM	99	2800 – 3000	483 – 690

Fonte: Lee, 1990 *apud* Silvestre Filho, 2001.

A fibra de carbono é o material mais adequado para a fabricação de compósitos com matriz polimérica, pois apresenta:

- Excepcional resistência a todos os tipos de ataques químicos, não sendo afetadas pela corrosão, pois o carbono é inerte [...];
- Ótimo comportamento quanto à fadiga e face à atuação de cargas cíclicas;
- Muita leveza [...];
- Extraordinária rigidez;
- Estabilidade térmica [...] e reológica (GALLARDO, 2002, p. 25).

Contudo, o seu uso é limitado devido ao elevado custo de produção. Dentre os três tipos de fibras abordados nesta pesquisa as fibras de carbono têm o maior custo unitário (Tabela 4). Fiorelli (2002), afirma que este é o principal motivo da maioria dos reforços estruturais não serem feitos com esse tipo de material.

TABELA 4 - Competitividade econômica das fibras de carbono, aramida e vidro

ALTERNATIVA	Custos (US\$/m ²)	Atratividade econômica (1/US\$)	Competitividade econômica
Fibra de carbono	50,00	0,02	20,00
Fibra de aramida	24,00	0,04	41,67
Fibra de vidro	10,00	0,10	100,00

Fonte: Perelles, Medeiros e Garcez, 2013.

2.2.4. Compósitos reforçados com fibras de carbono

Os compósitos reforçados com fibras de carbono são encontrados em diversas formas, entretanto apenas algumas são utilizadas como reforço estrutural. As mais usuais são:

- Chapas ou lâminas pultrudadas: Chapas de CFRP de alta resistência, impregnadas com resina epóxi ou poliéster, que resultam em perfis contínuos dos mais diversos e complexos formatos que poderão ser colados em superfícies do concreto;
- Fios de fibras de carbono: Fibras enroladas sob tensão que poderão ser coladas em superfícies do concreto;

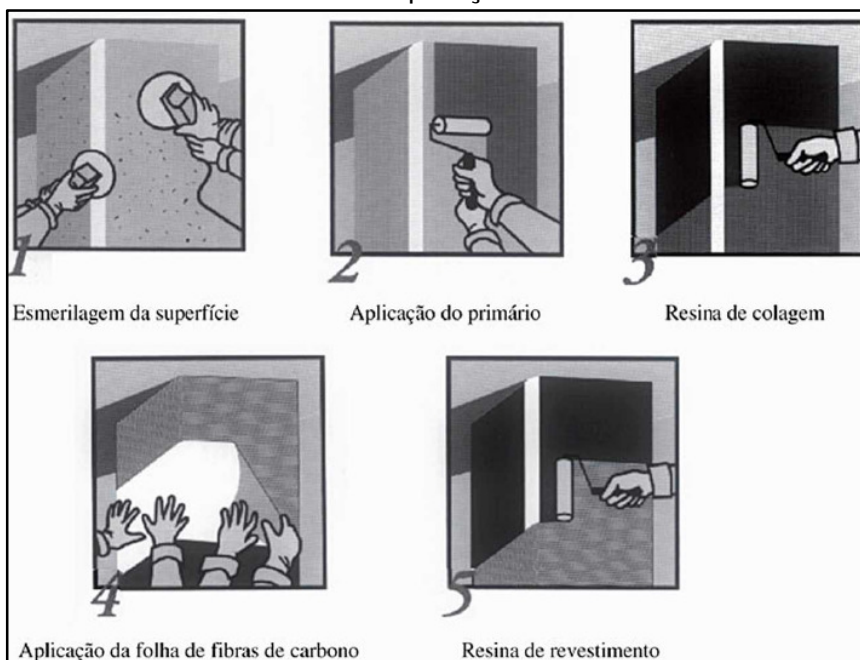
- Tecidos de fibras de carbono: Tecidos pré-impregnados ("prepreg"), com espessura similar a do papel de parede, que poderão ser colados em superfícies de concreto com resina epóxi, seguindo exatamente a curvatura do elemento e permitindo a aplicação em "cantos vivos" (BEBER, 2000 *apud* ESCOBAR, 2003, p. 22).

Destes três tipos o mais utilizado como reforço em estruturas de concreto são os tecidos. Conforme Souza e Ripper (1998), o sistema de aplicação desse tipo de compósito como reforço estrutural pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Preparação da superfície receptora: Nessa etapa ocorre a regularização da superfície do elemento estrutural. As sujeiras e a fina camada de nata de cimento que reveste a peça são removidas através do esmerilhamento da superfície de concreto. Os defeitos geométricos ou de execução são corrigidos pela aplicação de argamassas epoxídicas. As arestas vivas são arredondadas com um raio mínimo de curvatura de 30 mm;
- Aplicação do compósito: Após o reparo da superfície é aplicado um *primer* na área a ser reforçada com o objetivo de garantir a plena adesão do compósito ao elemento estrutural. Posteriormente, são colocados, sequencialmente, a resina de colagem, o tecido de fibras de carbono e a camada final de resina de recobrimento das fibras. Durante a execução dessa etapa todo o excesso de resina deverá ser removido.

A Figura 9 mostra este sistema de aplicação de forma esquemática.

FIGURA 9 - Sistema de aplicação dos tecidos de PRFC



Fonte: Souza e Ripper, 1998.

Antes de se aplicar um reforço com tecidos de PRFC em uma estrutura devem ser feitas as seguintes considerações:

- Os compósitos reforçados com fibras de carbono são anisotrópicos, com o eixo longitudinal sendo o eixo resistente. As propriedades dos compósitos deverão ser sempre obtidas com relação a este eixo;
- Transversalmente a resistência é muito pequena, de tal forma que os compósitos podem ser cortados perpendicularmente ao seu eixo longitudinal com serras comuns;
- Diferentemente do aço, existe uma variação significativa entre um produto fornecido por um fabricante e por outro. Fatores como o tipo de fibra, o volume de resina, orientação das fibras e controle de qualidade durante a fabricação produzem uma grande variedade nas características dos produtos;
- As propriedades mecânicas dos compósitos, assim como de todos os materiais estruturais, são afetadas pelo histórico dos carregamentos, sua duração e variação de temperatura;
- Os compósitos reforçados com fibras de carbono alcançam a sua resistência última sem apresentar qualquer escoamento (ESCOBAR, 2003, p. 27).

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi a revisão sistemática da literatura, que, segundo Gil (2002), consiste em uma pesquisa de caráter exploratório elaborada a partir de material já publicado.

Para a confecção desta pesquisa foram utilizados artigos, dissertações, livros e teses referentes à temática, publicados entre os anos de 1998 e 2014.

Estes materiais foram obtidos através de buscas realizadas no acervo da biblioteca Dr. Jorge Hannas e nas bases de dados SciELO, Periódicos CAPES e Google Acadêmico.

As buscas aconteceram entre os meses de setembro e outubro de 2015, sendo norteadas pelo uso dos seguintes descritores:

- fibras de carbono,
- PRF (polímeros reforçados com fibras),
- PRFC (polímeros reforçados com fibras de carbono),
- vigas de concreto armado,
- reforço estrutural.

Ao final das buscas foi feita uma leitura criteriosa do conteúdo dos materiais coletados, visando a separação dos dados relevantes à pesquisa.

Para complementar a pesquisa foram analisados os resultados obtidos nos ensaios de duas vigas, uma de concreto convencional e outra reforçada à flexão com duas camadas de PRFC, extraídas de um estudo publicado por Silva (2014).

Esta análise conferiu ao presente estudo um caráter quantitativo, visto que uma pesquisa quantitativa "considera o que pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las" (KAUARK; MANHÃES e MEDEIROS, 2010, p. 26).

3.1. Ensaios realizados por Silva (2014)

O estudo realizado por Silva (2014) teve como principal objetivo a análise do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com materiais híbridos.

Em sua pesquisa foram ensaiadas 14 vigas "T" divididas em três grupos (A, B e C) que diferiam entre si pela quantidade de camadas utilizadas no reforço e pela utilização de um pré-carregamento durante a execução do mesmo.

TABELA 5 - Configuração dos grupos de vigas ensaiadas por Silva (2014)

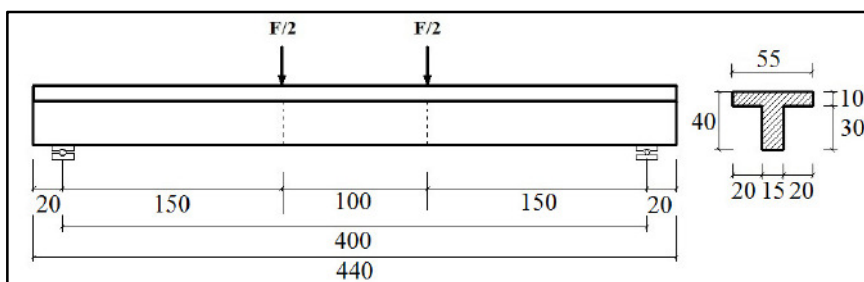
GRUPO	Quantidade de camadas*	Pré-carregamento
A	Duas	Não
B	Três	Não
C	Duas	Sim

* As camadas são alternadas entre PRFC e PRFV

Fonte: Silva, 2014.

As vigas foram confeccionadas com uma altura de 40 cm, vão livre entre os apoios, de 4 m e com um f_{ck} de 40 MPa. A Figura 10 mostra as características geométricas das vigas ensaiadas por Silva (2014).

FIGURA 10 - Características geométricas das vigas ensaiadas por Silva (2014)



Fonte: Silva, 2014.

A taxa de armadura utilizada na confecção das vigas foi de 0,63%, o correspondente a duas barras de 20 mm de diâmetro. Segundo Silva (2014), as vigas foram dimensionadas para romperem à flexão.

- EF1 e EF4 nas extremidades;
- EF2 sob o ponto de carga sul da viga;
- EF3 no meio do vão.

Na Tabela 7 são apresentados os valores registrados pelos quatro extensômetros.

TABELA 7 - Deformações das armaduras de flexão

Viga	Máxima deformação do aço (%)				Carga de escoamento (KN)*
	EF1	EF2	EF3	EF4	
VR1 RF	1,2	3,9	9,2	1,0	147,3
VA1 CC	1,0	7,7	3,54*	0,9	125,0

* Extensômetro parou de funcionar antes do final do ensaio

Fonte: Silva, 2014.

Ao analisar os resultados nota-se que as deformações em ambas as vigas foram menores nos apoios e maiores à medida que se aproximavam do meio do vão. As deformações nos apoios da viga VA1 CC foram aproximadamente 14% menores que as da viga de referência.

No extensômetro EF2 a viga reforçada apresentou uma deformação 97% maior que a viga VR1 RF.

A leitura da deformação no meio do vão da viga VA1 CC foi prejudicada devido ao defeito ocorrido no extensômetro EF3 durante a execução do ensaio. Consequentemente a leitura da carga de escoamento do aço também foi afetada. Contudo, com base nos dados coletados pelo extensômetro EF2 pode-se supor que tanto a deformação quanto a carga de escoamento teriam alcançado valores mais altos que os da viga de referência.

4.2. Deformações na superfície do concreto

As deformações sofridas pela superfície de concreto das vigas foram registradas por dois extensômetros (EC1 e EC2) localizados no meio do vão na parte superior das vigas. A Tabela 8 contém os valores registrados pelos extensômetros.

TABELA 8 - Deformação máxima do concreto

Viga	Deformação máxima do concreto (%)	
	EC1	EC2
VR1 RF	1,7	1,1
VA1 CC	2,0	1,5

Fonte: Silva, 2014.

Conforme os dados registrados pelos extensômetros a viga VA1 CC apresentou uma deformação média 27% maior com relação a viga de referência. Contudo, ambas as vigas tiveram deformações inferiores a 3,5‰ como estipula a ABNT NBR 6118 (2014). Segundo Silva (2014), isto se deve ao fato das vigas serem subarmadas.

4.3. Deformações no reforço

As deformações do reforço da viga VA1 CC foram obtidas a partir de três extensômetros (ER1, ER2 e ER3) posicionados da seguinte forma:

- ER1 sob o ponto de carga sul da viga;
- ER2 sob o ponto de carga norte da viga;
- ER3 no meio do vão.

A seguir é mostrado um resumo dos valores registrados pelos três aparelhos.

TABELA 9 - Deformações máximas do reforço

Viga	Deformação máxima do reforço (‰)		
	ER1	ER2	ER3
VA1 CC	8,5	9,0	11,1

Fonte: Silva, 2014.

Com base nos dados computados pelos três aparelhos o reforço teve uma deformação média de 9,5‰. Ao comparar os valores das deformações do aço com as deformações do reforço no ponto de carga sul da viga, constatou-se que o reforço sofreu uma deformação aproximadamente 10% maior que o aço.

4.4. Evolução da abertura das fissuras

As fissuras apresentadas pelas vigas foram registradas em intervalos de carga de 20 kN, sendo medidas na lateral da alma próximo aos apoios e no meio do vão. A Tabela 10 contém os valores da abertura das fissuras para uma carga de 140 kN e o valor das cargas de abertura da primeira fissura experimental e teórica.

TABELA 10 - Maior abertura das fissuras

Viga	F 1ª fissura (kN) (Experimental)	F 1ª fissura (kN) (Teórico)	Lado SUL (mm)	CENTRO (mm)	Lado NORTE (mm)
VR1 RF	32,0	31,3	0,20	0,40	0,20
VA1 CC	28,0	31,3	0,10	0,20	0,10

Fonte: Silva, 2014.

Ao analisar os valores registrados nota-se que em ambas as vigas a abertura das fissuras foi maior no centro e menor nos apoios, sendo que os valores registrados na viga VA1 CC foram 50% menores que os da viga de referência.

Contudo, o processo de fissuração ocorreu de forma prematura na viga reforçada, visto que teoricamente as fissuras deveriam ter surgido a uma carga de 31,3 kN.

4.5. Cargas e modos de ruptura das vigas

A carga considerada por Silva (2014) como sendo de ruptura foi a máxima leitura realizada no momento da ruptura das vigas. A Tabela 11 traz os valores das cargas de ruptura, o incremento de carga da viga VA1 CC com relação a viga de referência e o modo de ruptura das vigas.

TABELA 11 - Cargas e modos de ruptura

VIGA	RESULTADOS EXPERIMENTAIS			RESULTADOS ABNT NBR 6118 (2014)	
	Fu, exp (KN)	Incremento de carga (%)	Modo de Ruptura	Fu, teo (KN)	Modo de Ruptura
VR1 RF	159,6	-	A	158,4	E
VA1 CC	188,2	17,9	B	189,3	DL
A - Deformação excessiva da armadura de flexão; B - Deslocamento do reforço; DL - Deformação limite no reforço; E - Esmagamento do concreto.					

Fonte: Silva, 2014.

Ao analisar os dados coletados por Silva (2014) tem-se as seguintes considerações:

- Em ambas as vigas o valor das cargas de ruptura experimentais apresentaram uma variação inferior a 1% com relação às cargas de ruptura teóricas;
- A viga VA1 CC apresentou um incremento de carga de 17,9%;
- Ambas as vigas apresentaram modos de ruptura experimentais diferentes dos teóricos;
- A ruptura da viga de referência se deu pela deformação excessiva da armadura de flexão, que, segundo Silva (2014), se deve ao fato da viga ter sido subarmada;
- A ruptura da viga VA1 CC ocorreu antes do reforço alcançar sua deformação limite, o que se deve ao fato do reforço ter perdido a aderência com o concreto.

5. CONCLUSÃO

O reforço de vigas de concreto armado com polímeros reforçados com fibras de carbono se mostra muito eficiente do ponto de vista estrutural, pois, ele confere às vigas um incremento nas cargas de ruptura, retardando o escoamento do aço e reduzindo a abertura das fissuras que surgem nas vigas reforçadas.

Contudo, existem dois aspectos que necessitam ser melhorados: o controle da aderência entre o reforço e o elemento estrutural e o custo de produção elevado, sendo este último a principal limitação no uso desse tipo de intervenção.

6. REFERÊNCIAS

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CALLISTER, Jr., W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

ESCOBAR, C. J. **Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de cfrp tensionadas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Setor de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FONSECA, T. C. C. S. **Reforço e incremento da rigidez à flexão de ligações vigapilar de estruturas de concreto pré-moldado com polímero reforçado com fibra de carbono (prfc)**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GALLARDO, S. M. A. G. **Reforço à flexão em vigas de concreto utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

KAUARK, F. S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: um guia prático**. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2015.

OLIVEIRA JUNIOR, F. S. **Reforço à flexão de vigas "t" de concreto armado com colagem externa e inserção de compósitos com fibra de carbono e barras de aço no concreto de cobertura**. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

PERELLES, D. H.; MEDEIROS, M. F.; GARCEZ, M. R. Aplicação de ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de reforço do tipo prf. **Revista ALCONPAT**, v.3, n.3, p. 165 - 180, 2013. Disponível em:

<http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista/documentos/RA,V3N3,Sep-Dic_2013/2_RA_65_2013.pdf>. Acesso em: 01 out. 2015.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SILVA, J. R. **Reforço híbrido à flexão de vigas "t" de concreto armado com compósitos de fibras de carbono e fibras de vidro**. 2014. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

SILVESTER FILHO, G. D. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por fibra de carbono**: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TAKEUTI, A. R. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

VIANA, R. D. A. **Programa para dimensionamento de reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.