

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Alexandre Führ de Oliveira

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ANCORAGENS DE
POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS EM
ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS À
FLEXÃO**

Avaliador:
Defesa: dia __/__/2014 às _____ horas
Local: UFRGS / Engenharia Nova Osvaldo Aranha, 99, sala 304
Anotações com sugestões para qualificar o trabalho são bem- vindas. O aluno fará as correções e lhe passará a versão final do trabalho, se for de seu interesse.

Porto Alegre

Julho 2018

ALEXANDRE FÜHR DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ANCORAGENS DE
POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS EM
ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS À
FLEXÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão de graduação da
Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil

Orientadora: Angela Gaio Graeff
Coorientadora: Mônica Regina Garcez

Porto Alegre
Julho 2018

ALEXANDRE FÜHR DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ANCORAGENS DE
POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS EM
ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS À
FLEXÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelas Professoras Orientadoras e pela Banca Avaliadora deste trabalho.

Porto Alegre, 19 de julho de 2018

Profa. Angela Gaio Graeff
PhD pela University of Sheffield
Orientadora

Profa. Mônica Regina Garcez
Dra. pela UFRGS
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Vanessa Fátima Pasa Dutra
(UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Profa. Angela Gaio Graeff
(UFRGS)
PhD pela University of Sheffield

Lucas Alexandre Reginato
(UFRGS)
Msc. pela UFRGS

Profa. Mônica Regina Garcez
(UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Aos meus pais e irmãos, com carinho.

AGRADECIMENTOS

O término de mais uma fase acadêmica traz junto a necessidade de olhar para os acontecimentos dos últimos tempos – anos – e ter a satisfação de poder agradecer a tantas pessoas que, de alguma forma, possibilitaram este momento. Afinal, engenharia não se faz sozinho. Com muita alegria, gostaria de agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Agradeço às professoras Angela Graeff e Mônica Garcez, orientadoras, pelo apoio e confiança para a concretização deste trabalho.

Aos técnicos do LEME, Fontes e Edgar, obrigado pela paciência e empenho durante estes meses. Aos bolsistas de iniciação científica João, Heloísa, Ronaldo, Paloma e Victor. À Carolina, pela dedicação ao trabalho. Sem vocês este trabalho não existiria.

A todos os amigos que fiz durante a faculdade, que não foram poucos, agradeço aos momentos de estudo, descontração, vitórias e derrotas. Sempre com espírito colaborativo e apoio mútuo. É incrível o quanto aprendo com todos vocês.

Agradeço também aos meus pais, Azemor e Margarida, que nunca mediram esforços para que esta caminhada tão turbulenta fosse mais prazerosa. Aos meus irmãos, Carlos Eduardo e Rodrigo, cada um com sua especialidade e ambos com imenso interesse em conhecer e entender melhor a engenharia.

Ideias e somente ideias podem iluminar a escuridão

Ludwig von Mises

RESUMO

Este trabalho versa sobre a comparação, quanto às ancoragens, de reforços estruturais com fibra de carbono em elementos de concreto armado submetidos à flexão. A partir da revisão da literatura que aborda o tema, adotaram-se as variáveis geométricas e propôs-se um trabalho considerando duas possibilidades de ancoragem: uma já presente no mercado, e outra inovadora. Primeiramente, as vigas foram concretadas e curadas todas na mesmas condições, evitando, assim, diferenças nos corpos de prova a serem comparados. Em seguida, a superfície das vigas foi preparada para que o reforço de fibra de carbono e as ancoragens do reforço pudessem ser aplicadas de maneira correta. Após a aplicação do reforço e das ancoragens, procedeu-se para o ensaio de flexão em 4 pontos. Constatou-se que as ancoragens utilizadas aumentaram a capacidade de carga das estruturas estudadas, porém não fizeram o reforço chegar ao seu limite, ocorrendo a ruptura na zona de ancoragem antes do colapso por tração na região de maior tensão de tração. Conclui-se que a utilização de ancoragens para o reforço estrutural com fibra de carbono é de essencial necessidade para o uso seguro e econômico desta solução.

Palavras-chave: Fibra de Carbono. Ancoragens.
Reforço Estrutural.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho.	17
Figura 2 – Diagrama tensão versus deformação dos PRF.	21
Figura 3 – Diferentes aplicações do PRFC como reforço estrutural.	27
Figura 4 – Etapas de aplicação do reforço estrutural.....	28
Figura 5 – Modos de falha de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC.	30
Figura 6 – Solicitações atuantes no PRF colado à viga.	32
Figura 7 – Diagrama de momentos e representação da zona de ancoragem em vigas reforçadas com PRFC.	33
Figura 8 – (a) Exemplo de Ancoragem Tipo I; (b) Exemplo de Ancoragem Tipo II; (c) Exemplo de Ancoragem Tipo III.	34
Figura 9 – Exemplos de sistemas de ancoragem.	37
Figura 10 – Sistema de ancoragem por laços em “U”.	38
Figura 11 – Construção do dispositivo.	41
Figura 12 – Dispositivo colocado no reforço.	41
Figura 13 – Ancoragem com parafusos sobre PRFC.	41
Figura 14 – Detalhamento das armaduras das vigas.....	43
Figura 15 – (a) Agregado miúdo do concreto; (b) Agregado graúdo do concreto.....	45
Figura 16 – Materiais utilizados para o corte da manta de fibra de carbono.....	46
Figura 17 – Forma recebendo aplicação de desmoldante antes da concretagem.....	49
Figura 18 – (a) Vibrador de Imersão; (b) Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	50
Figura 19 - (a) Esmerilhadeira com disco diamantado; (b) Superfície pronta para recebimento do reforço; (c) Aplicação do primer.....	51
Figura 20 – (a) Resena de laminação após mistura manual; (b) Posicionamento da manta de fibra de carbono.....	52
Figura 21 – Detalhe das vigas do Grupo I.....	53
Figura 22 – (a) Placas de laminado posicionadas sobre a viga; (b) Furação da viga para fixação dos parabolts.....	54
Figura 23 – (a) Apoio de primeira ordem; (b) Apoio de segunda ordem.....	55
Figura 24 – Esquema do ensaio.....	56
Figura 25 – Viga posicionada para o ensaio.....	56
Figura 26: Detalhe da ruptura da VT – 2 na região próxima ao apoio.....	58
Figura 27: Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas testemunho	58
Figura 28 – Descolamento do reforço após deformações excessivas na região central do vão.....	60

Figura 29 – Detalhe do rompimento do laço em “U” após o escorregamento (<i>slip off</i>) do reforço.....	60
Figura 30 – Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas do Grupo I....	61
Figura 31 – Detalhe do rompimento da ancoragem da viga do Grupo II.....	62
Figura 32 – Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas do Grupo II	62
Figura 33 – Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas dos três grupos	63
Figura 34 – Diagrama momento fletor x deslocamento para vigas com rupturas frágeis parciais durante o ensaio.....	64
Figura 35 – Momento último das vigas do estudo.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação dos esforços atuantes na interface do concreto com o PRF.....	32
Quadro 2 – Esquema de reforço e ancoragem das vigas.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de redução para PRFC em diferentes condições de exposição	25
Tabela 2 – Características físicas do tecido de fibra de carbono	46
Tabela 3 – Características físicas do Laminado de Fibra de Carbono	47
Tabela 4 – Características dos componentes do primer	47
Tabela 5 – Características dos componentes da resina de laminação	48
Tabela 6 – Resistência à compressão do concreto	55
Tabela 7 – Cargas e modo de ruptura das vigas testemunho	59
Tabela 8 – Cargas e modo de ruptura das vigas do Grupo I	61
Tabela 9 – Cargas e modo de ruptura das vigas do Grupo II	63
Tabela 10 – Comparação entre cargas e modos de ruptura das vigas ensaiadas	66
Tabela 11 – Comparação entre cargas de ruptura teóricas e experimentais	67
Tabela 11 – Comparativo de custo direto da execução das ancoragens dos Grupos I e II	68

LISTA DE SIGLAS

ACI – American Concrete Institution

FD – Fatores de Deformabilidade

FP – Fator de Performance

FR – Fatores de Resistência

FRP – Fibre Reinforced Polymer

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

PAN - Poliacrilonitril

PRF – Polímeros Reforçados com Fibras

PRFC – Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono

PRFV – Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

E_c – módulo de elasticidade do compósito (GPa)

E_f – módulo de elasticidade da fibra (GPa)

E_m – módulo de elasticidade da matriz (GPa)

V_f – fração de volume de fibras

η_0 – fator de eficiência pela contribuição das fibras na direção da solicitação

α_n – proporção total de fibras na direção n

θ – ângulo formado entre as fibras na direção n e a linha de atuação da solicitação (graus)

σ_c – resistência à tração do compósito (MPa)

σ_f – resistência à tração das fibras (MPa)

σ'_m – resistência da matriz no rompimento da fibra (MPa)

$I_{t,max}$ - comprimento efetivo de ancoragem (m)

E_{fd} - módulo de elasticidade de cálculo da fibra (GPa)

t_f - espessura do reforço (m)

f_{ctk} - resistência característica de tração do concreto (MPa)

$T_{k,max}$ - força máxima de ancoragem (N)

k_b - fator de forma

b_f - largura do reforço (m)

b - largura da viga reforçada (m)

T_g – temperatura de transição vítrea (°C)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo Principal	15
2.2.2 Objetivo Secundário	15
2.3 HIPÓTESE	16
2.4 PRESSUPOSTO	16
2.5 DELIMITAÇÕES	16
2.6 LIMITAÇÕES	16
2.7 DELINEAMENTO	17
3 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS	19
3.1 CARACTERÍSTICAS DO PRFC	20
3.1.1 Características físicas e mecânicas do PRFC	21
3.1.1.1 Resistência à tração e rigidez	21
3.1.1.2 Resistência à compressão	23
3.1.1.3 Ductilidade	24
3.1.2 Durabilidade do PRFC	24
3.1.2.1 Umidade	25
3.1.2.2 Resistência a altas temperaturas	26
3.2 APLICAÇÕES DO PRFC COMO REFORÇO ESTRUTURAL	26
3.2.1 Modo de aplicação	27
3.2.2 Modos de ruptura	29
3.2.2.1 Falha por descolamento no final do reforço	29
3.2.3 Interação concreto/adetivo/fibra	31
3.3 ANCORAGENS	33
3.3.1 Tipos de uso	34
3.3.2 Comprimento de ancoragem na flexão	35
3.3.3 Sistemas de ancoragem para reforços à flexão	36
3.3.3.1 Laços em U	37
3.3.3.2 Chapa metálica parafusada	38
3.3.3.3 Camada de manta sobreposta	39

3.3.3.4 Ancoragem por <i>spikes</i>	39
3.3.3.5 Parafusos sobre PRFC	40
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
4.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS	42
4.1.1 Vigas	43
4.2 MATERIAIS	44
4.2.1 Cimento	45
4.2.2 Agregado miúdo	45
4.2.3 Agregado graúdo	45
4.2.4 Água	45
4.2.5 Armaduras	46
4.2.6 Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)	46
4.2.6.1 Tecido de Fibra de Carbono	46
4.2.6.2 Laminado de Fibra de Carbono	47
4.2.6.3 Primer	47
4.2.6.4 Resina Epóxi	47
4.2.7 Parafusos auto fixantes (Parabolt)	48
4.3 PRODUÇÃO DAS VIGAS	48
4.3.1 Montagem das armaduras	48
4.3.2 Concreto	48
4.3.3 Quantidade de material	49
4.3.4 Formas	49
4.3.5 Concretagem	49
4.3.5.1 Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone (<i>slump</i>)	49
4.3.6 Cura	50
4.3.7 Preparação da superfície	50
4.3.8 Aplicação do reforço	51
4.3.9 Aplicação da ancoragem	52
4.3.9.1 Ancoragens do Grupo I	52
4.3.9.2 Ancoragens do Grupo II	53
4.4 ENSAIOS	54
4.4.1 Controle tecnológico do concreto	54
4.4.2 Ensaio de flexão em 4 pontos	55
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
5.1 MODOS DE RUPTURA	57

5.1.1 Vigas Testemunho	57
5.1.2 Vigas do Grupo I	59
5.1.3 Vigas do Grupo II	61
5.2 APRESENTAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS	63
5.3 ANÁLISE DE CUSTO DOS SISTEMAS DE ANCORAGEM	67
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICE A	73

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado estão sujeitas a diversos fatores que desgastam e diminuem a sua vida útil. A exposição a ambientes agressivos, o uso indevido da edificação ou erros de projeto e/ou execução são alguns motivos que levam à necessidade de recuperação ou reforço estrutural. Ainda, a possibilidade de mudança de uso da edificação pode fazer com que seja necessária uma intervenção a fim de garantir a segurança dos usuários.

Diversas soluções já foram propostas para reforçar elementos estruturais com o intuito de aumentar a sua capacidade de carga. Jones *et al.* (1988) estudaram o uso de placas metálicas para reforço de vigas submetidas à flexão. Júlio *et al.* (2003), por exemplo, estudaram o método de reforço estrutural por encamisamento (*jacketing*), no qual aumenta-se a seção transversal do elemento, adicionando-se novas armaduras e concreto. Outros autores, por sua vez, propuseram estudos utilizando compósitos de polímeros reforçados com fibras (PRF) para o mesmo fim. Este material, embora desenvolvido há várias décadas, teve sua aplicação na construção iniciada a partir da década de 1970 (IBELL; DARBY, 2014).

PRF, ou FRP (*Fibre Reinforced Polymers*), são materiais que consistem de fibras, normalmente dispostas em uma ou mais direções conhecidas, cobertas por uma matriz de resina. Os dois materiais trabalham em conjunto, dado que a fibra confere a resistência mecânica do compósito quanto aos esforços normais, enquanto a matriz une e transfere os esforços às fibras, além de protegê-las.

Dessa forma, uma das maneiras de reforçar uma estrutura de concreto armado com PRF é colando-se externamente uma ou mais camadas do compósito, de maneira que passe a absorver os esforços solicitantes, aumentando a capacidade da estrutura. A posição na qual estes reforços são colados, bem como a orientação das fibras, varia em função do tipo de solicitação para o qual o reforço foi projetado, podendo ser de flexão ou cisalhamento, para elementos do tipo viga.

Estes compósitos vêm demonstrando diversas vantagens em relação às tradicionais placas de aço, que são pesadas e geram altos custos para instalação. Os polímeros reforçados com fibras têm grandes vantagens, como a excelente relação peso/resistência, alta durabilidade, facilidade de instalação e resistência à corrosão. Estes fatores fazem com que cada vez mais PRF seja escolhido como material para reforços estruturais (KALFAT; AL-MAHAIDI, 2016).

Por outro lado, a falta de normatização e experiência do mercado para com esse tipo de material são algumas das desvantagens observadas. Ademais, os compósitos em questão têm como característica a ruptura frágil, o que faz com que a sua capacidade máxima de suporte de cálculo seja diminuída consideravelmente (IBELL; DARBY, 2014).

Podem ocorrer sete tipos principais de falha em vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRF: (1) esmagamento do concreto à compressão (PHAM, 2004); (2) ruptura do PRF (ARAM, 2008); (3) ruptura por cisalhamento (CHEN, 2003); (4) separação da camada de cobertura do concreto (YAO, 2007); (5) descolamento da placa do PRF na interface com o concreto (LEUNG, 2006); (6) descolamento da placa devido à fissuras na zona de flexão (OMBRES, 2010) e; (7) descolamento da placa devido à fissuras na zona de cisalhamento (YE, 2005).

Dentre as possibilidades de ruína, a ruptura do PRF por esgotamento de sua capacidade resistente é a que representa a utilização mais eficiente do reforço. Entretanto, se torna bastante difícil obter essa condição devido ao descolamento do PRF, que pode indicar falha na ancoragem (GRELL; SNEED, 2013). Esta seção do reforço é o objeto de estudo deste trabalho e merece especial atenção porque muitas vezes é a limitante de projeto para o uso das fibras (CERONI, *et al.*, 2008). A utilização de diferentes tipos de ancoragem foi tema de diversos estudos, como Skuturna e Valivonis (2016), Kalfat e Al-Mahaidi (2016), Ferrari *et al.* (2007) e outros, mas ainda se percebe uma carência de estudos nessa área.

Com base nas situações descritas acima, o trabalho buscou propor e testar métodos de ancoragem do PRF em vigas de concreto armado reforçadas submetidas à flexão, com o intuito de melhorar o desempenho do uso dos reforços estruturais com fibras.

2 DIRETRIZES

As diretrizes do desenvolvimento da pesquisa são descritas a seguir.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a influência de duas distintas soluções de ancoragem na capacidade última de suporte de vigas de concreto armado reforçadas com fibra de carbono submetidas à flexão?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa se dividem em principal e secundários, e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é verificar experimentalmente a influência de dois diferentes tipos de ancoragem em vigas de concreto armado reforçadas estruturalmente com fibra de carbono, em comparação com vigas reforçadas estruturalmente com fibra de carbono e sem a utilização de ancoragens.

2.2.2 Objetivo Secundário

O objetivo secundário do trabalho é:

- a) proposição de um método alternativo de ancoragem com utilização de parabolte e placa laminada em comparação aos métodos tradicionais;

2.3 HIPÓTESE

A hipótese da pesquisa é de que a utilização de ancoragem no reforço estrutural com fibra de carbono otimize o uso do reforço, de maneira que a capacidade portante da viga reforçada com sistema de ancoragem seja superior à capacidade última da viga reforçada sem sistema de ancoragem, o que indica o retardo da falha na ancoragem. Ainda, espera-se que o sistema de ancoragem utilizando placa laminada fixada com parabolt (descrito abaixo) seja 100% eficiente, de maneira que toda a capacidade do compósito seja atingida, refletindo-se em ruptura fora da zona de ancoragem.

2.4 PRESSUPOSTO

O pressuposto do trabalho é de que a ancoragem é fator limitante do projeto de reforços estruturais com PRF, sendo necessários estudos para melhorar o sistema de ancoragem utilizado.

2.5 DELIMITAÇÕES

O estudo delimita-se à avaliação de dois diferentes tipos de ancoragem para reforço estrutural com fibra de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão, em comparação com vigas sem ancoragem. Os tipos de ancoragem utilizados são:

- a) dispositivo de ancoragem com manta flexível de fibra de carbono em “U” em viga com cantos arredondados e;
- b) placa laminada de fibra de carbono fixada com parabolt.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) com relação à fibra:
 - utilização de apenas um tipo de compósito de fibra de carbono.
- b) com relação às vigas de concreto armado:
 - utilização de vigas com dimensões 10x20x150 cm;
 - uma classe de resistência do concreto;
 - aplicação do reforço sem carga previamente aplicada nas vigas;

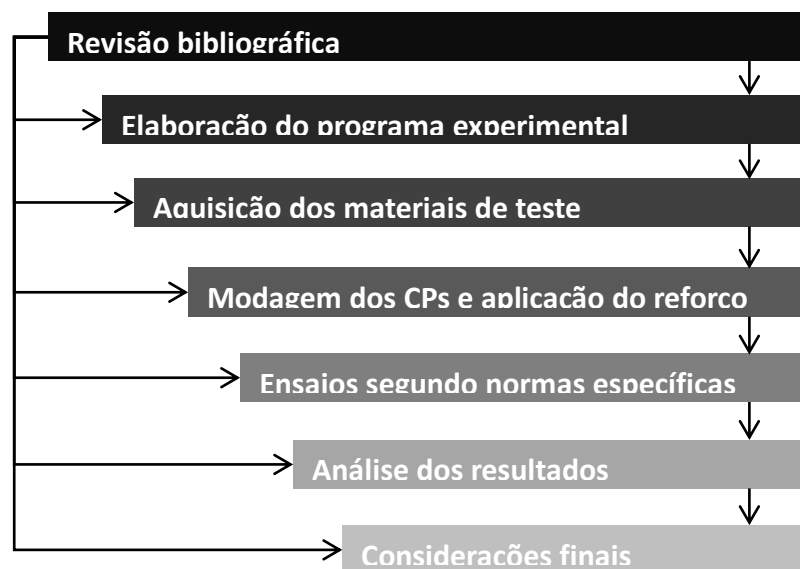
- moldagem de duas vigas para cada tipo de ancoragem.

2.7 DELINEAMENTO

A pesquisa será realizada através das etapas abaixo citadas, representadas na figura 1 e descritas nos parágrafos que seguem:

- a) Revisão bibliográfica;
- b) Elaboração do programa experimental;
- c) Aquisição dos materiais para ensaio;
- d) Moldagem dos corpos de prova e aplicação do reforço e ancoragem;
- e) Ensaios segundo normas específicas;
- f) Avaliação dos resultados;
- g) Considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

O trabalho iniciou com a **revisão bibliográfica**, através da busca em literatura técnica em artigos e livros, nacionais e internacionais relacionados ao tema de reforço estrutural com compósitos e, principalmente, às aplicações das ancoragens desse tipo de reforço nas estruturas

de concreto armado. Este conteúdo compõe o embasamento teórico para toda a pesquisa que segue, desde a etapa do planejamento do programa experimental até as considerações finais.

A partir da revisão bibliográfica, supracitada, foi possível elaborar um **programa experimental** e definir os parâmetros a serem avaliados, tais como dimensões das vigas e tipos de ancoragem a serem avaliados. Esta fase do trabalho é de extrema importância, pois os parâmetros devem ser definidos de modo que os resultados obtidos sejam significativos e passíveis de comparação para que se possa concluir algo do estudo. Após a definição dos parâmetros, **adquiriu-se os materiais para ensaio** nas quantidades e especificações necessárias para a **moldagem e aplicação do reforço**.

Na sequência, **ensaios segundo as normas específicas** foram realizados sobre os corpos de prova definidos no programa experimental. Assim, informações foram levantadas sobre o comportamento das ancoragens propostas no trabalho. A etapa de **análise dos resultados**, subsequente, buscará encontrar explicações acerca dos resultados obtidos pelo comportamento dos corpos de prova.

Por fim, foram feitas **considerações finais**, de maneira que a questão de pesquisa deste trabalho seja respondida.

3 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os compósitos de polímeros combinados com fibras (PRF) são constituídos por duas fases distintas: uma fase contínua, a matriz, e uma fase dispersa, as fibras. Dessa forma, cada fase do material confere ao compósito características fundamentais para um bom desempenho dos PRF. Enquanto a matriz protege e envolve as fibras, estas dão ao elemento resistência mecânica.

Segundo Eckold (1994), os primeiros registros de estudos com PRF datam da década de 1920, quando os irmãos Griffith reportaram resistências de 6000 MPa com fibras de vidro. Mesmo assim, foi apenas a partir da década de 40, com o advento das resinas curadas a frio, que a indústria expandiu o uso deste compósito para uso em embarcações, automóveis e equipamentos resistentes à corrosão.

Dessa forma, o uso dos polímeros reforçados com fibras chegou também no setor da construção civil. Suas características físicas e mecânicas, que serão discutidas adiante, permitem que uma grande variedade de projetos seja executada com estes compósitos. Algumas das possibilidades de uso dos PRF são:

- a) Estruturas totalmente poliméricas;
- b) Armaduras passivas de PRF em concreto armado;
- c) Armaduras ativas de PRF em concreto armado (protensão) e;
- d) Reforço estrutural com uso de PRF.

A área de estudo de reforços estruturais com uso de PRF tem recebido bastante atenção na indústria da construção civil, principalmente pela necessidade de manutenção das edificações existentes, normalmente de concreto armado, que têm sua vida útil reduzida por deterioração de seus elementos estruturais (DARBY, 1999). Outros fatores também podem ser determinantes para o uso de reforço estrutural, como o aumento de tráfego em uma ponte, exemplificado por Meier (1995).

Os estudos brasileiros sobre reforço estrutural com PRF iniciaram-se na da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em pesquisas realizadas dentro do Laboratório de

Ensaio e Modelos Estruturais (LEME). Ainda na década de 1990 os primeiros resultados sobre reforço por colagem externa de tecidos de fibra de carbono foram publicados por Beber (1999). Posteriormente, em 2005, o mesmo grupo de pesquisa iniciou investigações com fibras de vidro e aramida coladas externamente a vigas (GARCEZ et al., 2005 e MENEGHETTI, 2006). Ainda, Marques (2017) estudou diferentes sistemas de reforço estrutural com PRFC laminado para vigas de concreto armado submetidas à flexão.

Este trabalho tem como foco a utilização do polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) para uso em reforços estruturais, mais especificamente, o desempenho das ancoragens nestas intervenções. Desta forma, este capítulo versa sobre este material, o PRFC, suas características e aplicações que embasam esta pesquisa.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO PRFC

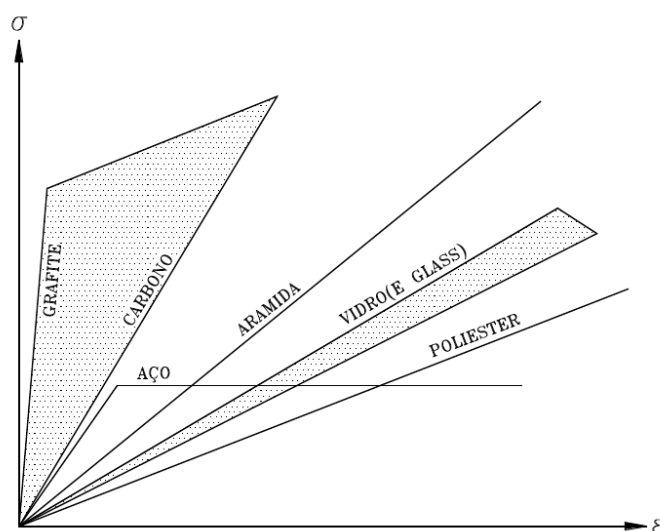
As fibras de carbono resultam da carbonização das fibras precursoras. Esse é um processo térmico, com temperaturas que variam de 1000°C até 3000°C e consiste na oxidação de fibras precursoras. As matérias primas para produção das fibras de carbono são o PAN (poliacrilonitril), rayon (polímero celulósico) e piche (alcatrão de petróleo ou carvão) (GARCEZ, 2007). O uso de temperaturas mais elevadas no processo acaba por conferir ao compósito com maior módulo de elasticidade. No caso do carbono, os PRF produzidos a altas temperaturas recebem o nome de fibras de grafite. A figura 2 apresenta o diagrama tensão *versus* deformação de diferentes tipos de PRF, bem como do aço.

As fibras podem ser encontradas no mercado em diferentes formas. Entre as mais utilizadas para reforços estruturais estão os tecidos e os laminados. A diferença entre essas duas formas da fibra de carbono é que os tecidos ainda não constituem um compósito. Ele é utilizado para se formar um compósito *in situ*. Dessa forma, ao misturar uma resina com as fibras, o compósito é formado. Esta solução de uso de fibra de carbono, por ser flexível e moldável, é bastante vantajosa quando é necessário reforçar substratos curvos, como no caso de um pilar a ser confinado, por exemplo. Os laminados, por sua vez, são materiais que já formam um compósito rígido, que será solidarizado à estrutura existente por meio de um adesivo compatível com o substrato (GARCEZ, 2007). Há de se esclarecer que são dois sistemas diferentes, possuindo vantagens e desvantagens. Cabe ao projetista avaliar qual a melhor opção para o projeto

considerando os fatores que julgar relevantes, como por exemplo, mão de obra capacitada, facilidade no transporte e uso racional dos materiais.

A seguir serão apresentadas as características físicas, mecânicas e de desempenho das fibras de carbono utilizadas como reforço estrutural.

Figura 2 – Diagrama tensão *versus* deformação dos PRF



(fonte: MACHADO, 2006)

3.1.1 Características físicas e mecânicas do PRFC

Sabendo que os PRFC são utilizados de maneira a reforçar estruturas, é de suma importância que se tenha conhecimento a respeito das suas características físicas e mecânicas para fins de um projeto seguro e econômico. Uma das principais características dos PRF em geral é que são materiais anisotrópicos, o que significa que possuem diferentes propriedades em diferentes direções.

Nesta seção serão apresentadas as características do material referentes a resistência à tração, rigidez, resistência à compressão e ductilidade.

3.1.1.1 Resistência à tração e rigidez

Em relação à resistência mecânica à tração, os compósitos apresentam quase nenhuma resistência na direção perpendicular à direção das fibras, quando estas estão alinhadas. Para garantir resistência em diferentes direções, alguns compósitos utilizam camadas de fibras

sobrepostas orientadas de maneira distinta, ou então são dispostos em forma de tecido, com as fibras trançadas (DARBY; IBELL, 2014).

Dessa forma, os PRFC são materiais que atingem resistências à tração elevadas, podendo variar de 1300 MPa a 6200 MPa dependendo da matéria-prima e do processo de fabricação (MACHADO, 2010). Para fins de dimensionamento, devem-se utilizar os dados de resistência e módulo de elasticidade fornecidos pelo fabricante. Entretanto, na falta destas informações, os parâmetros podem ser calculados segundo a fórmula 1, derivada da lei de misturas, que considera a contribuição de fibras em diferentes direções da solicitação imposta:

$$E_c = \eta_{\theta} \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (\text{fórmula 1})$$

Em que:

E_c – módulo de elasticidade do compósito;

E_f – módulo de elasticidade da fibra;

V_f – fração de volume de fibras;

E_m – módulo de elasticidade da matriz;

η_{θ} – fator de eficiência pela contribuição das fibras na direção da solicitação, dado por:

$$\eta_{\theta} = \sum \alpha_n \cdot \cos^4 \theta \quad (\text{fórmula 2})$$

Em que:

α_n – proporção total de fibras na direção n;

θ – ângulo formado entre as fibras na direção n e a linha de atuação da solicitação

De maneira análoga, a resistência à tração pode ser obtida pela fórmula 3:

$$\sigma_c = \eta_{\theta} \cdot \sigma_f \cdot V_f + \sigma'_m \cdot V_m \quad (\text{fórmula 3})$$

Em que:

σ_c – resistência à tração do compósito;

σ_f – resistência à tração das fibras;

σ'_m – resistência da matriz no rompimento da fibra.

Os compósitos geralmente empregados na construção civil possuem um alto volume percentual de fibras na sua composição (60 a 70%) e é a sua carga de ruptura que define a falha do material (GARCEZ, 2007). Por esse motivo, e pela relativa baixa resistência, a parcela de contribuição da matriz para os parâmetros de resistência à tração e rigidez pode ser desprezada quando o volume percentual de fibras no compósito superar 50% (IBELLL; DARBY, 2014).

3.1.1.2 Resistência à compressão

Os compósitos de fibra de carbono normalmente são utilizados para solicitações de tração, mas pode haver casos em que o material deve absorver esforços de compressão. Por se tratar de um material com comportamento frágil, a resistência à compressão difere da resistência à tração. A resistência à compressão da fibra de carbono chega a 78% da resistência à tração, e é o maior valor se comparado às outras fibras utilizadas na indústria da construção (vidro e aramida) (ISIS¹, 2003 apud GARCEZ, 2007).

Para as solicitações de compressão, o comportamento da matriz polimérica é de maior relevância, pois tem papel fundamental na prevenção da flambagem, visto que tem a função de manter as fibras unidas. A perda de resistência se dá por falhas locais (microscópicas) progressivas, levando à perda de rigidez e consequente flambagem das fibras (DARBY; IBELLL, 2014).

¹ INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATIVE STRUCTURES. **ISIS Educational Modules about FRP.** Winnipeg: ISIS, 2003. ISIS Educational Modules 1 to 4 – Intelligent Sensing For Innovative Structures, 2003.

3.1.1.3 Ductilidade

Segundo Callister (2002):

A ductilidade é uma propriedade importante, que representa uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado quando da fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma deformação plástica quando da sua fratura é chamado de frágil.

Esta propriedade é de grande importância para os PRFC porque são materiais que possuem comportamento elástico-linear até a sua falha, caracterizando-os como frágeis. Desta forma, quando chegam à falha, uma grande quantidade de energia é liberada rapidamente, causando o colapso da estrutura sem grandes deformações aparentes, ao contrário do modo de falha das estruturas de concreto armado convencional (LEES; BURGOYNE, 1996).

Considerando esta propriedade, ainda segundo Lees e Burgoyne (1996), fica evidente que o comportamento frágil dos PRFC impede que o dimensionamento de reforços estruturais com fibras seja feito a partir da aplicação do conceito de ductilidade utilizado para reforços com aço. Para esse dimensionamento, é aplicado o fator de performance (FP), proposto por Mufti et al. (1996), que considera fatores de resistência (FR) e fatores de deformabilidade (FD).

3.1.2 Durabilidade do PRFC

As características de durabilidade do PRFC são aspectos importantes que devem ser avaliados antes da sua aplicação. Segundo o American Concrete Institute (ACI) sugere no documento ACI 440.2R-08 (ACI, 2008), o engenheiro deve selecionar o sistema de PRF baseado no comportamento conhecido do sistema para as condições de serviço. Esta etapa não deve ser ignorada, pois propriedades mecânicas dos PRF como resistência à tração, compressão e módulo de elasticidade podem sofrer grandes alterações quando expostos a certos ambientes com presença de alcalinidade, água salgada, produtos químicos, luz ultravioleta, altas temperaturas, alta umidade e ciclos de gelo-degelo.

Ainda conforme o documento da ACI, um fator de redução da capacidade de carga do compósito deve ser utilizado dependendo da classe de exposição ambiental. Esses valores estão dispostos na tabela 1.

O PRFC tem desempenho, em geral, melhor do que os outros PRF frente às ações do meio ambiente, como serão apresentados nesta seção para características referentes a umidade e resistência a altas temperaturas.

Tabela 1 – Fator de redução para PRFC em diferentes condições de exposição

Condição de Exposição	Fibra e Tipo de Resina	Fator de Redução Ambiental C_E
Exposição ao interior	Carbono/Epóxi	0,95
Exposição exterior (pontes, garagens descobertas)	Carbono/Epóxi	0,85
Ambiente agressivo (produtos químicos e estações de tratamento de água)	Carbono/Epóxi	0,85

(fonte: adaptado de ACI 440.2R-08)

3.1.2.1 Umidade

Nos PRF, a umidade é absorvida por um processo controlado de difusão até o seu ponto de saturação, como descrito por Crank (1975). As fibras de vidro (PRFV) sofrem grandes reduções de resistência e módulo de elasticidade quando em contato com ambientes úmidos, como comentado no documento ACI 440.2R-08 (ACI, 2008). Por outro lado, segundo o estudo experimental de Selzer e Friedrich (1996), as fibras de carbono mantêm praticamente inalteradas as características de resistência e módulo de elasticidade mesmo quando saturadas.

Desta forma, pode-se considerar que as fibras de carbono são materiais inertes à ação da água. Mesmo assim, os efeitos da umidade nas matrizes dos PRFC não podem ser negligenciados (fib², 2001 apud GARCEZ, 2007).

² FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. **Design and Use of Externally Bonded FRP Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures**. Lausanne: FIB, 2001. Progress Report – Fédération Internationale du Béton, 2001.

3.1.2.2 Resistência a altas temperaturas

Os reforços estruturais com fibras de carbono são excelentes escolhas para ambientes nos quais a temperatura de serviço fica abaixo da T_g (temperatura de transição vítrea) da matriz. Para adesivos à base epóxi, esta temperatura de transição varia de 55-60°C, enquanto para adesivos à base de cimento essa temperatura pode chegar a dobrar (HASHEMI; AL-MAHAIDI, 2011).

As fibras de carbono, por sua vez, segundo o Comitê 440 da ACI, degradam a temperaturas mais elevadas, na ordem de 275°C. E, mesmo que a sua capacidade de carga não seja prejudicada até esta temperatura, o compósito tem sua resistência à tração reduzida, pois a transferência de carga da resina para as fibras já está prejudicada.

3.2 APLICAÇÕES DO PRFC COMO REFORÇO ESTRUTURAL

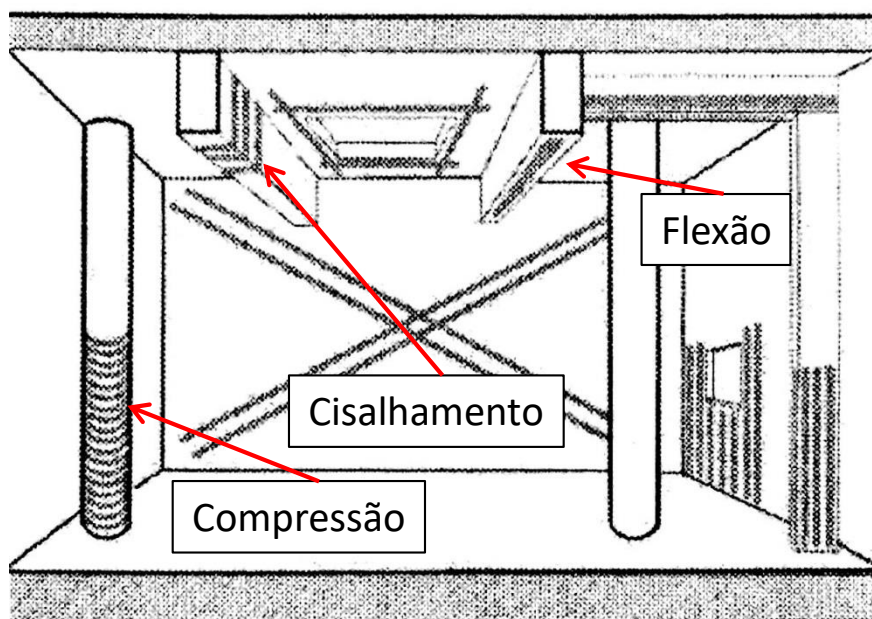
O PRFC é um material versátil quando utilizado como reforço estrutural, pois pode ser empregado para as diferentes solicitações da estrutura. De maneira fundamental, há três possibilidades para o uso do PRFC colado à estrutura como reforço:

- a) Reforço à flexão: o momento resistente de vigas, lajes, e pilares é aumentado aplicando-se o PRFC longitudinalmente na face tensionada do elemento;
- b) Reforço ao cisalhamento: a resistência ao cisalhamento dos elementos estruturais pode ser aumentada aplicando-se o PRFC transversalmente;
- c) Reforço de pilares: pode ser atingida uma maior resistência axial e deformação dos pilares através do confinamento do elemento com o compósito.

Evidentemente, esses reforços também podem ser sobrepostos, dado que a maioria dos elementos estruturais trabalha com mais de um esforço ao mesmo tempo. Uma viga, por exemplo, pode ser reforçada à flexão e ao cisalhamento, se necessário. A figura 3 ilustra os diferentes usos do PRFC como reforço.

Esta seção explora com mais detalhes a aplicação do PRFC como reforço à flexão, apresentando modo de aplicação, modos de ruptura do reforço, e os mecanismos de interação do concreto com o compósito.

Figura 3 – Diferentes aplicações do PRFC como reforço estrutural



(fonte: IBELL; DARBY, 2014, p.155)

3.2.1 Modo de aplicação

Para que possuam um bom desempenho, uma série de cuidados devem ser tomados previamente à aplicação do reforço de PRFC.

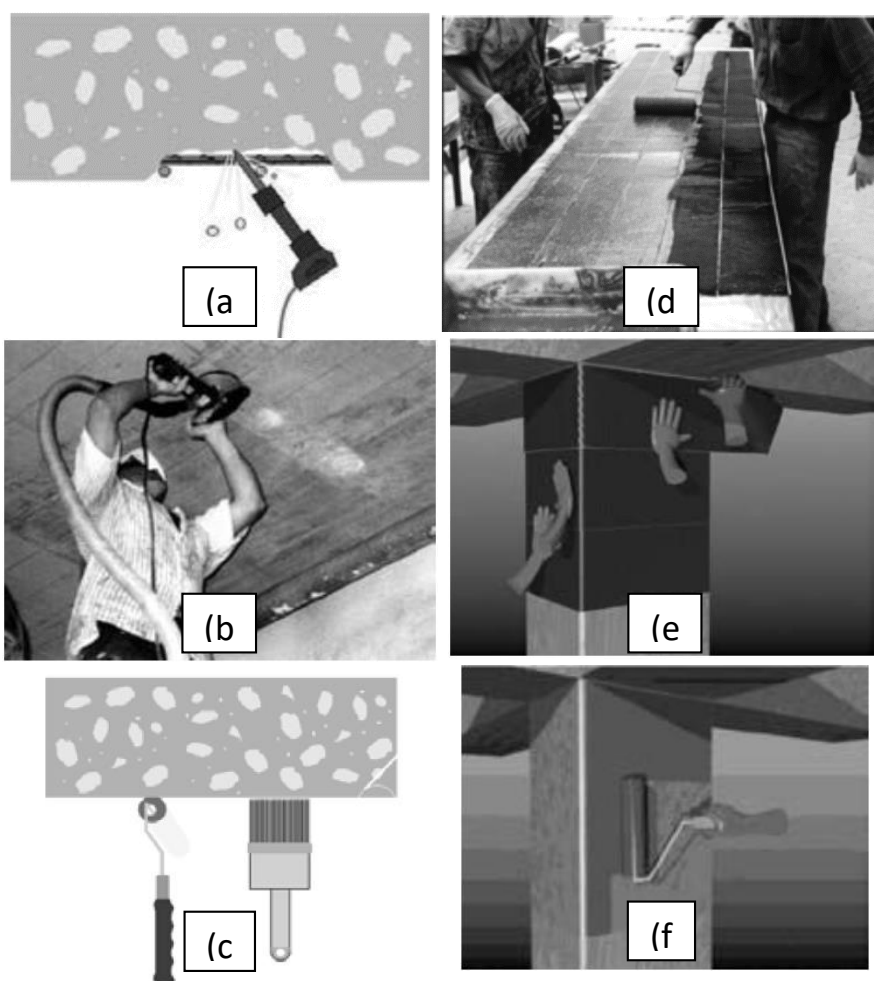
Primeiramente, deve-se avaliar as condições do concreto que receberá o reforço. Assim, procura-se corrigir qualquer patologia existente no substrato. Uma ocorrência frequente é a existência de armaduras corroídas. Assim, é necessário o reparo das armaduras a fim de evitar que a corrosão continue gerando composto expansivo, que pode levar ao descolamento de placas de concreto, juntamente com o reforço aderido à estrutura (fig. 4a).

A partir de então, prepara-se o substrato que irá receber o reforço, já que as condições da superfície na qual o reforço será aplicado são essenciais para garantir uma boa aderência entre os materiais. Para isso, deve-se certificar que o concreto encontra-se limpo, sem restos de argamassa, materiais soltos, fungos, óleos ou graxas. Ainda, é necessário preparar a superfície para que possua uma textura levemente rugosa, ideal para o recebimento do reforço. Essa preparação pode ser feita a partir da utilização de abrasivos, jatos de areia ou limalhas de metálicas. Podem ser utilizadas, ainda, politrizes acopladas com aspiradores de pó (fig. 4b). (MACHADO, 2006).

Após estas etapas, o substrato encontra-se pronto para receber o reforço. Aplica-se, então, um imprimador primário ao concreto, que penetra nos poros, colmatando-os (fig 4c).

Para o uso de mantas de PRFC, estas devem ser saturadas com adesivo de base epóxi (fig. 4d) e então posicionadas no elemento de concreto (fig. 4e). Após esta etapa, uma segunda camada de resina é aplicada, cobrindo a superfície reforçada (fig. 4f).

Figura 4 – Etapas de aplicação do reforço estrutural



(fonte: MACHADO, 2006)

No caso de laminados, estes devem ser limpos, antes de receberem o adesivo apropriado, que deve ser aplicado ao longo de toda a sua extensão. Da mesma forma, o adesivo deve ser aplicado à superfície do concreto que receberá o reforço.

3.2.2 Modos de ruptura

Elementos estruturais submetidos à flexão e reforçados com PRFC na face tracionada possuem diversos modos de falha. Os principais estão representados na figura 5. Aqui são representados (a) falha na flexão por ruptura do PRFC; (b) falha na flexão por compressão do concreto; (c) falha por cisalhamento; (d) separação da camada de cobrimento do concreto; (e) descolamento do final placa de PRFC na interface com o concreto e; (f) descolamento da placa de PRFC induzido por fissuras intermediárias.

Dentre essas possibilidades de ruptura, verifica-se que as três primeiras não são totalmente diferentes daquelas observadas no concreto armado convencional. Por outro lado, os outros três modos de ruptura são encontrados apenas em vigas de concreto reforçados na face tencionada. Comumente refere-se a esses modos de falha como modos de falha por descolamento prematuro, já que ocorrem antes de se atingir a capacidade de carga para falha pelos modos (a), (b) ou (c) (SMITH, TENG, 2002).

Segundo Teng et al. (2000), os três modos de descolamento podem ser classificados, de maneira geral, em dois grupos: (I) os que iniciam no final ou próximo ao final da placa de reforço ou; (II) os que iniciam em uma fissura intermediária e propagam o descolamento até o final da placa de reforço. Segundo a literatura, o rompimento nas proximidades do final da placa de reforço é o tipo de descolamento e consequente falha prematura mais comum desses dois modos. Nestas condições, verifica-se que este mecanismo de falha tem relação direta com a ancoragem do sistema e, portanto, será apresentada em maiores detalhes a seguir.

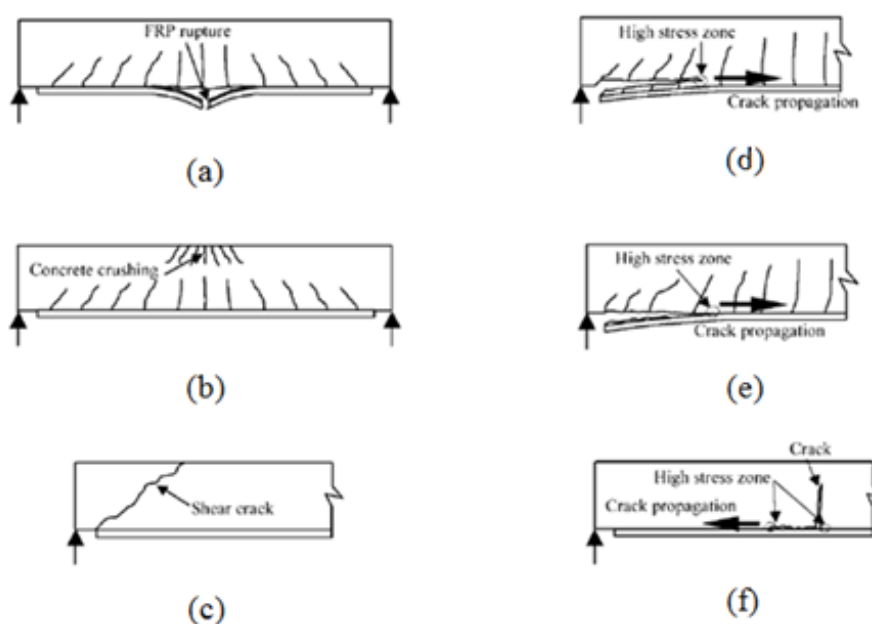
3.2.2.1 Falha por descolamento no final do reforço

Como referido anteriormente, há duas possibilidades de falha da estrutura por descolamento no final da placa de reforço: separação da camada de cobrimento de concreto (fig. 5d) e descolamento da placa na interface com o concreto (fig. 5e).

Para o caso da separação da camada de cobrimento de concreto, acredita-se que ela é causada por uma fissura que surge no final da placa de reforço. Assim, a fissura propaga-se até o nível

da armadura e então progride horizontalmente, resultando na separação da camada de concreto (GARDEN; HOLLAWAY³, 1998, apud SMITH; TENG, 2002).

Figura 5 – Modos de falha de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC. (a) falha na flexão por ruptura do PRFC; (b) falha na flexão por compressão do concreto; (c) falha por cisalhamento; (d) separação da camada de cobrimento do concreto; (e) descolamento do final placa de PRFC na interface com o concreto; (f) descolamento da placa de PRFC induzido por fissuras intermediárias.



(fonte: SMITH, TENG, 2002)

Já no caso do descolamento da placa de reforço, a falha inicia devido às altas concentrações de tensões cisalhantes e de tração interfacial perto do final da placa, que excedem a resistência do elemento mais frágil, normalmente o concreto (VARASTEHPOUR; HAMELIN, 1997).

Dessa forma, pesquisadores desenvolveram diversos modelos para prever a capacidade dos reforços previamente à ruptura por algum dos tipos de descolamento. Muitos conceitos aplicados para os modelos de estruturas reforçadas com PRFC foram importados de conhecimentos adquiridos ao se estudar o reforço com placas de aço, que produziu modelos baseados em capacidade cisalhante, modelos de “dentes de concreto” e modelos baseados em tensões interfaciais. Estes modelos são discutidos de maneira mais aprofundada por Smith e

³ Garden HN, Hollaway LC. **An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams.** Composite Structures 1998; 42:175–88.

Teng (2002). Ainda segundo os autores, todos os modelos de capacidade de carga estudados especificamente para reforços com compósitos levam em consideração as premissas de tensões interfaciais.

3.2.3 Interação concreto/adetivo/fibra

Quando uma viga reforçada com uma placa colada à sua face tensionada entra em carga, esforços de tração e cisalhamento devem ser transmitidos do reforço para a estrutura. Isso se dá na interface entre a placa do reforço e a viga original. Smith e Teng (2000), Tounsi et al. (2008) e outros autores estudaram as solicitações interfaciais em vigas de concreto armado com reforço, tanto de placa de aço, quanto de compósitos PRF.

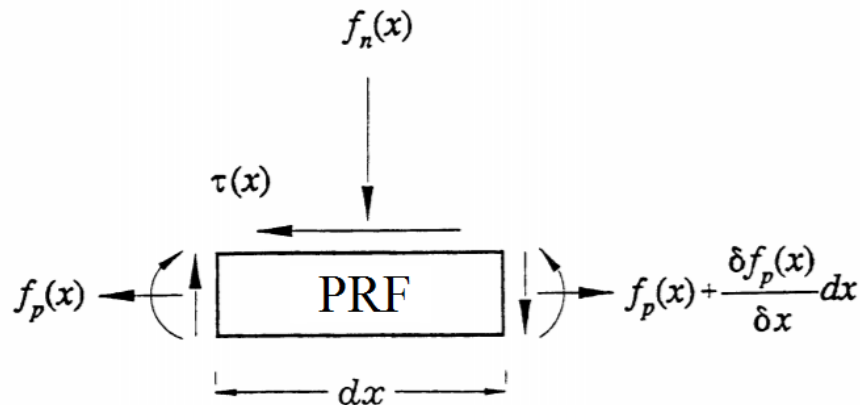
O entendimento desta interação é importante para o futuro estudo das ancoragens das estruturas reforçadas, pois o descolamento prematuro do reforço muitas vezes se torna uma limitante no dimensionamento dos reforços. Diversos modelos foram desenvolvidos para calcular as tensões interfaciais em vigas reforçadas simplesmente apoiadas, com premissas de que a camada de adesivo está sujeita a esforços normais e cisalhantes constantes ao longo de toda a sua espessura (SMITH; TENG, 2000). Embora esta premissa não satisfaça a condição da inexistência de esforços cisalhantes na borda do adesivo, a adição desta condição torna os modelos extremamente complexos.

O descolamento, portanto, ocorre devido às elevadas tensões normais e de cisalhamento que ocorrem na interface do concreto com o adesivo e o compósito. A figura 6 ilustra os esforços atuantes na placa de PRFC, em que os esforços cisalhantes são denotados por $\tau(x)$ e os esforços normais no compósito são denotados por $f_p(x)$.

Os esforços cisalhantes que atuam na camada adesiva estão relacionados com a diferença de deslocamento longitudinal entre o topo e a base do adesivo. Dessa forma, ao entrar em carga, esses esforços cisalhantes são gerados a partir das deformações axiais e por flexão. Embora considerada em poucos modelos, como o de Liu e Zhu⁴ (1994, apud SMITH; TENG, 2000), as deformações de cisalhamento também geram esforços interfaciais de cisalhamento no adesivo.

⁴ Liu Z, Zhu B. **Analytical solutions for R/C beams strengthened by externally bonded steel plates**. J Tongji Univ 1994;22(1):21– 6 (em Chinês).

Figura 6 – Solicitações atuantes no PRF colado à viga.



(fonte: adaptado de Malek et al., 1998)

Por sua vez, as tensões interfaciais de tração estão relacionadas com a compatibilidade de deformações entre a viga e a placa de reforço. Assim, os esforços de tração na interface são gerados a partir de deformações por cisalhamento e flexão. O quadro 1 explicita essas duas solicitações e suas formas de atuação.

Quadro 1 – Comparação dos esforços atuantes na interface do concreto com o PRF.

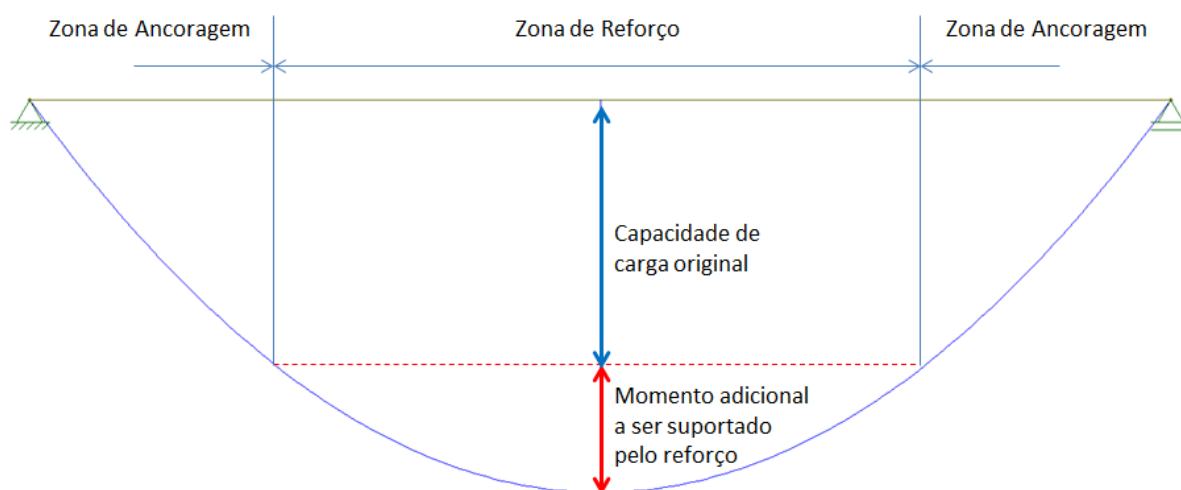
SOLICITAÇÃO INTERFACIAL	MODO DE ATUAÇÃO	DEFORMAÇÕES ATUANTES
Cisalhamento	Diferença de deslocamento longitudinal entre o topo e a base do adesivo	Deformação axial
		Deformação por flexão
		Deformação de cisalhamento
Tensão Normal	Compatibilidade de deformações entre a viga e a placa de reforço	Deformação por flexão
		Deformação de cisalhamento

(fonte: elaborado pelo autor)

3.3 ANCORAGENS

O conceito de ancoragens para reforços é o mesmo do concreto armado: há de se haver um prolongamento do reforço depois que a zona de reforço foi ultrapassada. Isto é necessário para que os esforços discutidos na seção anterior possam ser transmitidos integralmente para o concreto pelos diferentes tipos de aderência (atrito, adesão, dispositivos mecânicos). A figura 7 ilustra o diagrama de momentos uma viga reforçada submetida à flexão, bem como as zonas de reforço e ancoragem.

Figura 7 – Diagrama de momentos e representação da zona de ancoragem em vigas reforçadas com PRFC.



(fonte: adaptado de IBELL; DARBY, 2014)

A função principal da ancoragem é prevenir ou então retardar o processo de descolamento do PRFC, que acontece devido às excessivas tensões interfaciais existentes entre o concreto e o reforço. Outra possível função das ancoragens é a de, em alguns casos, prover uma ruptura dúctil ao invés de frágil (GRELLE; SNEED, 2013). Ainda, segundo os mesmos autores, o desempenho dos sistemas de ancoragem é crítico para o dimensionamento dos reforços de PRFC, já que podem limitar a capacidade do sistema por completo.

Uma das formas de superar este problema, segundo o documento ACI 440.2R-08 (ACI, 2008) é dimensionar o reforço para uma deformação máxima muito abaixo da deformação de ruptura do compósito. Esta abordagem, entretanto, diminui muito a eficiência do reforço e pode reduzir muito a ductilidade da estrutura. Sendo assim, diversos estudos foram desenvolvidos visando melhorar as possibilidades de ancoragem do sistema de reforço estrutural com PRFC.

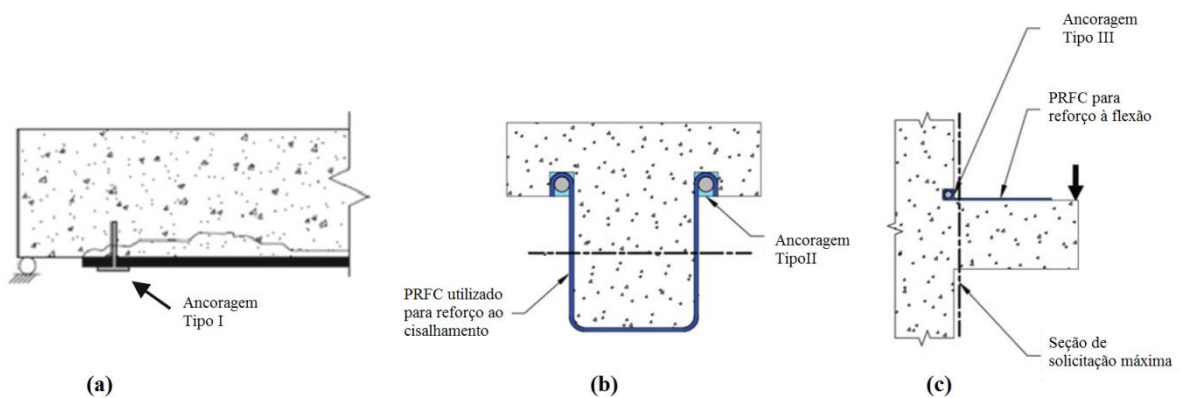
Dessa forma, o entendimento do comportamento da ancoragem é de grande importância para um dimensionamento seguro e eficiente, e será apresentado em maiores detalhes a seguir.

3.3.1 Tipos de uso

É importante atentar ao fato de que há diferentes tipos de ancoragens devido aos diferentes esforços nas estruturas. De maneira geral, segundo Grelle e Sneed (2013), as ancoragens servem a um ou mais dentre os seguintes propósitos: (I) prevenir ou retardar a abertura de fissuras interfaciais; (II) aumentar a transferência de esforço cortante interfacial através do aumento da área pelo qual o esforço é transferido; (III) fornecer um mecanismo de transferência de cargas em casos nos quais não há comprimento de ancoragem disponível além da seção mais solicitada.

A figura 8 ilustra possibilidades de sistemas de ancoragem para os três casos citados acima.

Figura 8 – (a) Exemplo de Ancoragem Tipo I; (b) Exemplo de Ancoragem Tipo II; (c) Exemplo de Ancoragem Tipo III.



(fonte: adaptado de GRELE; SNEED, 2013)

3.3.2 Comprimento de ancoragem na flexão

Como apresentado anteriormente, para vigas submetidas à flexão, os modos de ruptura relacionados a falhas nas ancoragens são o descolamento da placa de PRFC e a separação da camada de cobrimento do concreto e isso se deve às elevadas tensões na interface do concreto com o compósito. Estes esforços são atenuados quando se estende o comprimento do reforço (zona de ancoragem), todavia, há um limite máximo para o comprimento de ancoragem, após o qual não há ganho na transferência de carga do compósito para a viga. Esse comprimento é aqui denominado como comprimento efetivo de ancoragem e é função do módulo de elasticidade da fibra, da espessura do reforço e da resistência do concreto, como apresentado na fórmula 4 (IBELL; DARBY, 2014).

$$l_{t,max} = 0,7 \sqrt{(E_{fd} \cdot t_f / f_{ctk})} \quad (\text{fórmula 4})$$

Em que:

$l_{t,max}$: comprimento efetivo de ancoragem;

E_{fd} : módulo de elasticidade da fibra;

t_f : espessura do reforço;

f_{ctk} : resistência característica de tração do concreto

Para o comprimento efetivo de ancoragem, a força máxima de ancoragem é dada por:

$$T_{k,max} = 0,5 k_b \cdot b_f \sqrt{(E_{fd} \cdot t_f / f_{ctk})} \quad (\text{fórmula 5})$$

Em que:

$T_{k,max}$: força máxima de ancoragem;

k_b : fator de forma, definido pela fórmula 6;

b_f : largura do reforço.

$$k_b = 1,06 \sqrt{(2 - (b_f / b)) / (1 + (b_f / 400))} \geq 1 \quad (\text{fórmula 6})$$

Em que:

b : largura da viga reforçada.

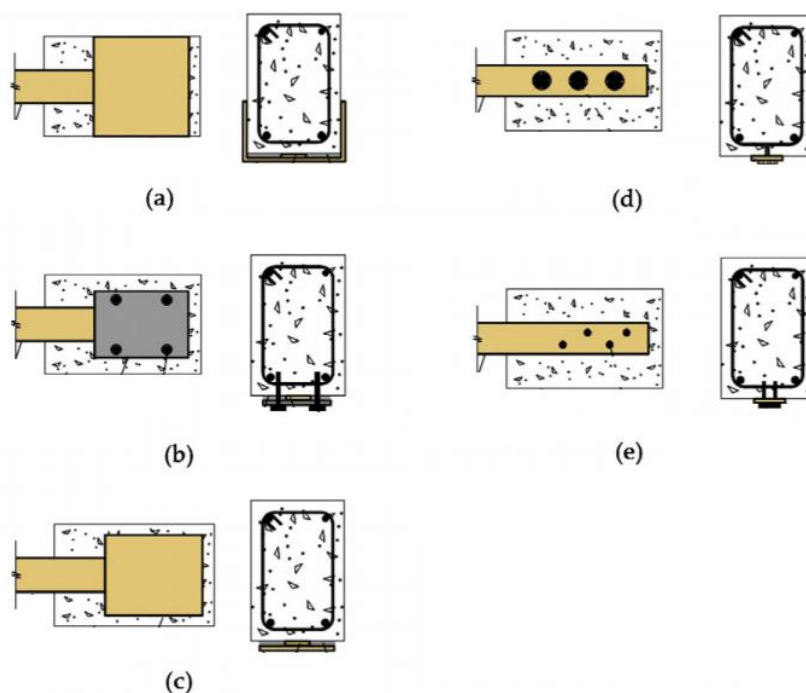
Assim, têm-se os valores de resistência máxima do reforço antes da falha na ancoragem. A partir de então, e a fim de aumentar a capacidade de carga das ancoragens, diversos estudos foram realizados propondo sistemas voltados para este fim. Alguns destes sistemas são apresentados a seguir.

3.3.3 Sistemas de ancoragem para reforços à flexão

Diversos mecanismos para incremento de ancoragem já foram propostos e estudados. Entre eles podem ser citados a colocação de laços de manta de fibra de carbono em forma de “U” (fig. 9a); a utilização de chapas de metal parafusadas ao final do reforço (fig. 9b); a colagem de mais uma camada de manta de fibra sobre o reforço, aumentando a área de transferência de carga (fig.9c); o uso de ancoragens de PRFC em formato de spikes (fig. 9d); e a colocação de parafusos diretamente sobre o reforço (fig. 9e). Estes são apenas alguns métodos de ancoragem propostos, e alguns estudos, como o de Kalfat e Al-Mahaidi (2016) e Ferrari et al. (2002), avaliaram o uso de dois mecanismos sobrepostos com o intuito de melhorar o desempenho da ancoragem.

Esta seção, por sua vez, faz uma breve revisão dos principais sistemas de ancoragem existentes na literatura, apresentando seus métodos de execução, bem como vantagens e desvantagens de cada sistema.

Figura 9 – Exemplos de sistemas de ancoragem.



(fonte: adaptado de Biscaia et al. 2014)

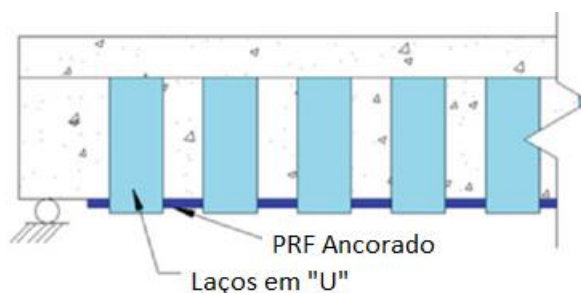
3.3.3.1 Laços em U

Os laços em “U”, também conhecidos como “*U wrapping*”, são mantas de PRFC coladas transversalmente à seção, fazendo a volta na mesma, ficando no formato de “U”. Esta camada de manta confere um efeito de “*clamping*”, evidenciado pela deformação no dispositivo, o que confere a capacidade de ancoragem do sistema (GRELLE; SNEED, 2013). A figura 10 ilustra este sistema de ancoragem.

Uma das vantagens deste sistema de ancoragem é que ele pode ser feito a partir do mesmo material que o reforço, o que elimina uma potencial corrosão causada por materiais diferentes. Por outro lado, a instalação deste sistema pode ser difícil, dependendo da geometria do elemento, bem como da possibilidade de acesso às faces laterais.

Estudos como o de Ferrari et al. (2002) avaliaram o uso desse sistema para ancorar reforços com fibra de carbono. Em seus experimentos, os autores observaram falha por ruptura do reforço, apontando este método como eficiente para evitar descolamento prematuro das mantas.

Figura 10 – Sistema de ancoragem por laços em “U”



(fonte: GRELE; SNEED, 2013)

Outros estudos também comprovaram a eficiência deste sistema de ancoragem, como o de Smith e Teng⁵ (2003, apud KALFAT et al. 2013), em que os autores observaram a mudança no modo de ruína de descolamento do final do reforço na interface com o concreto (fig. 5d) para o descolamento do reforço induzido por fissuras intermediárias (*intermediate crack debonding*) (fig. 5f). Dessa forma, com o intuito de melhorar ainda mais o desempenho do reforço, foi proposta a colocação de laços transversais de manta ao longo de todo o vão da viga.

3.3.3.2 Chapa metálica parafusada

O uso de chapas metálicas como sistema de ancoragem (fig. 9b) foi um dos primeiros a serem estudados, ainda no final da década de 1990 (KALFAT et al., 2013). Diversas configurações deste método foram propostas, mas de maneira geral, as chapas metálicas são coladas ao PRFC e então parafusadas no substrato de concreto (GRELE; SNEED, 2013). Assim, os esforços são transmitidos do PRFC à chapa metálica através da interface de contato dos dois materiais, e então transmitido ao concreto por meio da conexão dos parafusos. Wu e Huang⁶ (2008, apud GRELE; SNEED, 2013) testaram este sistema para vigas submetidas à flexão e verificaram pequena deformação lateral (cisalhamento) nos parafusos, indicando que o aumento na capacidade de ancoragem pode ser atribuído, na maior parte, pelo atrito causado pela pressão exercida no PRFC pela ancoragem.

Um ponto bastante importante no uso de chapas e parafusos metálicos juntamente com o PRFC é a possibilidade de corrosão eletrolítica na ancoragem, especialmente se a chapa metálica e o

⁵ Smith, S. T., and Teng, J. G. (2003). **Shear-bending interaction in debonding failures of FRP-plated RC beams**. *Adv. Struct. Eng.*, 6(3), 183–199.

⁶ Wu, Y. F., and Huang, Y. (2008). **Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures**. *J. Compos. Constr.*, 12(3), 266–273.

parafuso forem de metais diferentes. Dessa forma, deve-se ter cuidado com o ambiente ao qual o reforço estará exposto, visando minimizar os efeitos de corrosão.

Por outro lado, estudos (WU; HUANG⁶, 2008, apud KALFAT et al., 2013) indicaram que esse sistema de ancoragem confere maior ductilidade ao elemento reforçado, que vem a ser um ponto extremamente positivo, dado que um dos grandes problemas do PRFC é a sua natureza de ruptura frágil. No estudo, foi observado que os elementos ancorados com chapas metálicas tinham perda de ductilidade de 40-75%, enquanto elementos sem ancoragem apresentaram perda de ductilidade em torno de 70-80%. Isso se deve pelo sistema promover um descolamento gradual do reforço ao longo do tempo.

3.3.3.3 Camada de manta sobreposta

Este método (fig. 9c) é considerado como mais simples e fácil de ser aplicado, pois consiste na colagem de uma nova camada de manta sobreposta ao reforço, com as fibras orientadas perpendicularmente à direção da força no PRFC de reforço. Assim como os laços em U, esta ancoragem pode ser feita com o mesmo material do reforço, evitando processos de corrosão e facilitando a construção do sistema.

Entretanto, dentre os métodos de ancoragem estudados, este se mostra como o menos eficiente, sem resultados consistentes quanto ao seu uso. Ferrari et al. (2002) obteve, para dois corpos de prova, duas formas de ruptura diferentes, sendo uma delas a falha na ancoragem. Apesar de parecer similar aos laços em U, este método não promove o efeito de “*clamping*” citado anteriormente.

3.3.3.4 Ancoragem por *spikes*

Também conhecidos como ancoragens de PRF, esse dispositivo consiste de mantas enroladas sobre si, formando um pequeno cilindro (fig. 11). Uma parte do cilindro é inserida no substrato de concreto em uma cavidade previamente perfurada (anchor dowel), enquanto a outra parte recebe uma camada de resina epóxi para ser ligada ao reforço de PRFC (anchor fan) (fig 12).

Este tipo de ancoragem é bastante versátil, podendo ser aplicado a diversos elementos estruturais, como vigas, paredes e lajes. Além disso, os spikes podem ser feitos de fibra de carbono, o que elimina problemas relacionados à corrosão.

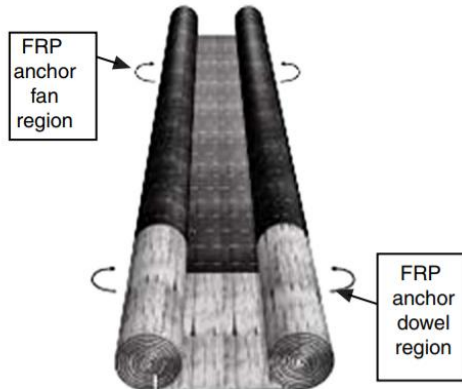
Por serem extremamente simples, estes dispositivos podem ser fabricados à mão em laboratório ou no próprio local da obra. Devido a tamanha simplicidade e facilidade da sua produção, há também que se notar a grande variabilidade na confecção destes dispositivos. Entretanto, estudos (ZHANG⁷ et al., 2012, apud KALFAT et al. 2013) indicaram que esta variabilidade não afeta os resultados.

3.3.3.5 Parafusos sobre PRFC

O uso de parafusos aplicados diretamente sobre o PRFC é mais uma possibilidade de ancoragem fixada mecanicamente. Este método consiste simplesmente em colocar parafusos metálicos através do reforço, entrando no substrato de concreto (fig. 13). Estes parafusos podem ser aplicados com ou sem arruelas. Em seu estudo, Martinelli et al. (2013) avaliaram o desempenho deste tipo de ancoragem com variação de espaçamento, quantidade de parafusos e presença ou ausência de arruelas. Os resultados para elementos com arruelas foram mais regulares do que os elementos sem arruelas e também foi observado que o espaçamento entre parafusos possui grande influência no desempenho da ancoragem.

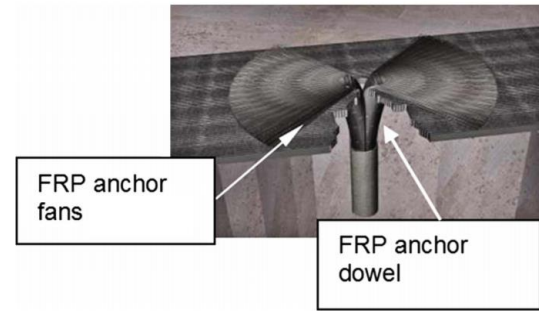
⁷ Zhang, H. W., Smith, S. T., and Kim, S. J. (2012). **Optimisation of carbon and glass FRP anchor design.** *Construction Building Materials.*, 32, 1–12.

Figura 11 – Construção do dispositivo



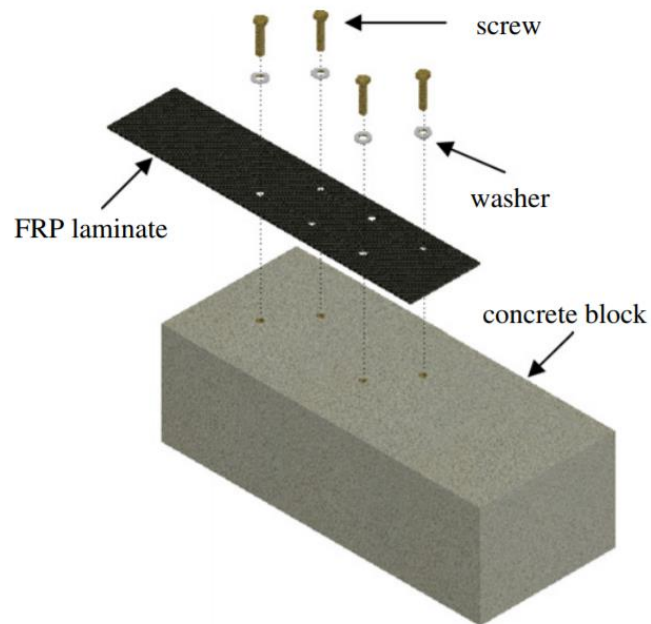
(fonte: KALFAT et al., 2013)

Figura 12 – Dispositivo colocado no reforço



(fonte: KALFAT et al., 2013)

Figura 13 – Ancoragem com parafusos sobre PRFC



(fonte: MARTINELLI et al., 2013)

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito o programa experimental do trabalho, apresentando a metodologia utilizada para o estudo, materiais e métodos de ensaio. Todos os ensaios foram realizados no LEME/UFRGS.

4.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

A metodologia de pesquisa, proposta no presente trabalho para avaliar o desempenho de diferentes tipos de ancoragens para reforço estrutural com fibra de carbono em elementos de concreto armado submetidos à flexão, foi desenvolvida com base nos estudos de Skuturna e Valivonis (2016) e Beber (2003) e adaptados quanto às condições de execução disponíveis no laboratório.

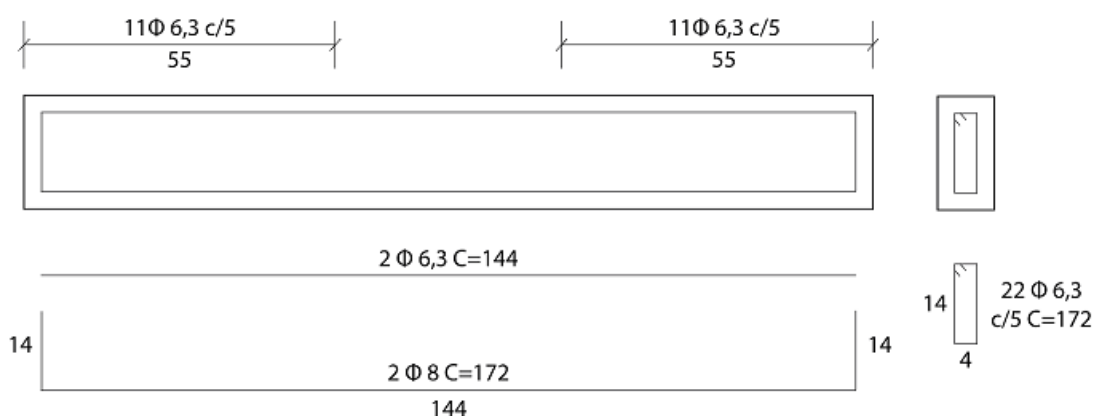
O número de vigas foi determinado em função dos objetivos inicialmente elaborados para a execução do programa experimental aqui proposto. Foram moldadas 6 vigas com dimensões 10 cm x 20 cm e 150 cm de comprimento. As vigas foram então divididas em 3 grupos distintos quanto às ancoragens do reforço, cada grupo contendo dois exemplares. O grupo das vigas de referência, ou testemunho, foi denominado VT, e são vigas que não possuem nenhum dispositivo de ancoragem no reforço. O Grupo I corresponde às vigas que possuem ancoragem de laços em “U” nas suas extremidades (V-GI). Já o Grupo II engloba as duas vigas que contém, nas suas extremidades, ancoragens com chapas de laminado de fibra de carbono fixadas com parabol (V-GII). Este sistema foi especialmente proposto neste trabalho, não havendo literatura sobre a execução de ancoragens desta maneira.

As armaduras utilizadas foram iguais às do estudo de Skuturna e Valivonis (2016). Cabe ressaltar que a armadura longitudinal é reduzida, de forma que seja possível avaliar o reforço, enquanto que a armadura transversal é superestimada, de modo que a ruptura ao cisalhamento ocorra por esmagamento da biela (para uma carga elevada) e não pelo escoamento dos estribos (BEBER, 2003).

4.1.1 Vigas

A armadura longitudinal inferior consiste em duas barras de aço CA-50 com 8 mm de diâmetro, que corresponde a uma taxa de armadura de $\rho = 0,00502$. A armadura superior é composta por duas barras de diâmetro 6,3 mm, também de aço CA-50. A armadura transversal consiste de estribos de 6,3 mm de diâmetro espaçados uniformemente de 5 cm e dispostos apenas na zona onde há esforço cortante durante o ensaio. O cobrimento utilizado foi de 3 cm, que, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), é o cobrimento mínimo para a classe de agressividade II (ambientes urbanos). A figura 14 apresenta o detalhamento das vigas do estudo.

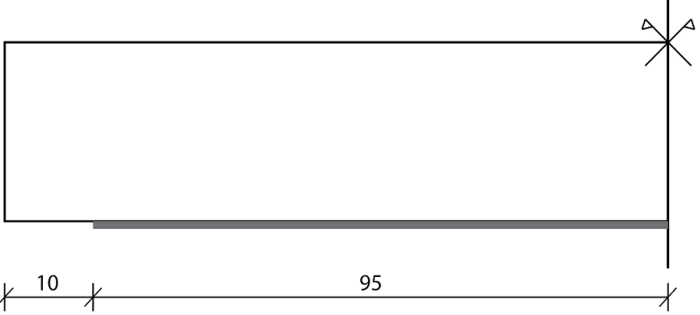
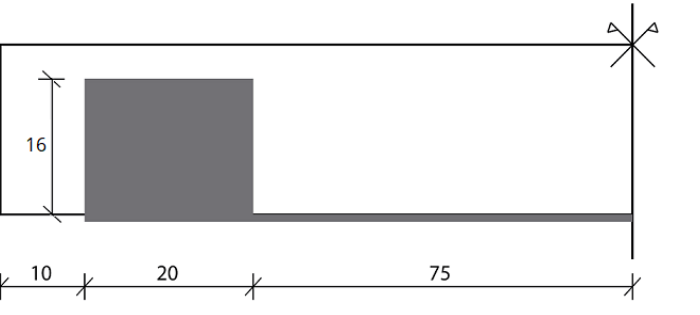
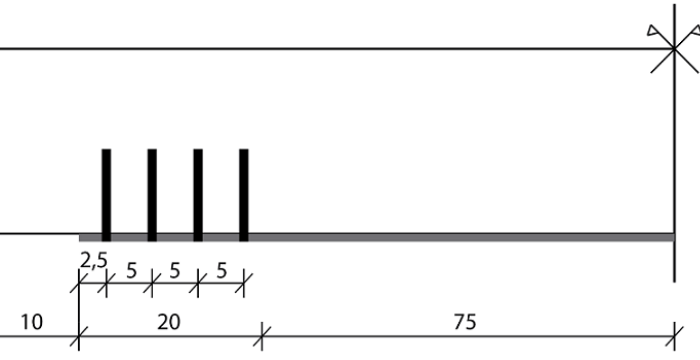
Figura 14 – Detalhamento das armaduras das vigas



(fonte: elaborado pelo autor)

Para cada configuração de reforço e ancoragem foram produzidas duas vigas. Todas foram reforçadas com duas camadas de fibra de carbono. O quadro 2 apresenta o esquema de reforço e ancoragem de cada grupo de vigas.

Quadro 2 – Esquema de reforço e ancoragem das vigas

Grupo de Vigas	Tipo de Ancoragem	Esquema da viga
VT	-	
V-GI	Laços em "U"	
V-GII	Laminado + parabol	

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 MATERIAIS

Este item apresenta todos os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova do estudo.

4.2.1 Cimento

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). De acordo com a NBR 5.733 (ABNT, 1991), este tipo de cimento possui no mínimo 95% de clínquer e sulfato de cálcio e até 5% de material carbonático. Desta forma, o CP V – ARI é um dos produtos mais puros do mercado, o que leva a resultados mais constantes e consistentes para ensaios, motivo pelo qual foi escolhido para o presente estudo.

4.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado neste trabalho foi a areia natural, proveniente do Rio Jacuí/RS e classificada como areia média, com dimensão máxima de 4,8 mm. A figura 15a apresenta o agregado miúdo.

4.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 1 de basalto. A figura 15b apresenta o material utilizado.

Figura 15a – Agregado miúdo do concreto



Figura 15b – Agregado graúdo do concreto



(fonte: própria do autor)

4.2.4 Água

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento do DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto - de Porto Alegre.

4.2.5 Armaduras

As armaduras utilizadas foram de aço CA-50 obtidas por doação da Arcelor Mittal.

4.2.6 Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)

Para o presente trabalho foram utilizados dois tipos de PRFC: manta de fibra de carbono e laminado de fibra de carbono. É discorrido sobre cada um deles a seguir.

4.2.6.1 Tecido de Fibra de Carbono

Para os reforços na zona de tração das vigas foi utilizado o tecido de fibra de carbono weber.rep fiber C. As características do tecido estão dispostas na tabela 2:

Tabela 2 – Características físicas do tecido de fibra de carbono

Fibra de Carbono weber.rep fiber C	
Tipo	Alta resistência
Massa Unitária	300 g/m ²
Massa Específica	1,80 g/cm ³
Espessura de projeto	0,167 mm
Resistência à tração de projeto	3.550 MPa
Módulo de deformação à tração	235 Gpa
Alongamento na ruptura	1,50%

(fonte: Weber, 2018)

O tecido possui largura de 50 cm, mas pode ser facilmente cortado com tesoura e estilete (Figura 16). Desta forma é possível cortar o tamanho de fibra correto para a aplicação do reforço.

Figura 16 – Materiais utilizados para o corte da manta de fibra de carbono



(fonte: própria do autor)

4.2.6.2 Laminado de Fibra de Carbono

O laminado pré-fabricado de fibra de carbono foi utilizado para a realização das ancoragens do Grupo III. Para tal, utilizou-se o laminado S&P CFK 150/2000, cujas características estão dispostas na tabela 3:

Tabela 3 – Características físicas do Laminado de Fibra de Carbono

S&P Laminates CFK	
Tipo de Laminado	150/2000
Resistência à tração (MPa)	> 2800
Módulo de Elasticidade (GPa)	168
Espessura (mm)	1,4
Seção transversal (mm ²)	70

(fonte: S&P, 2018)

O laminado possui 5 cm de largura e foram cortadas tiras de 9 cm de comprimento, que posteriormente foram coladas justapostas na zona de ancoragem da viga reforçada.

4.2.6.3 Primer

Antes da aplicação das camadas de resina e fibra de carbono, a superfície foi saturada com o resina epóxi bi componente para impregnação (primer). A resina utilizada foi a S&P RESIN 50 PRIMER, com rendimento de 120 g/m² e proporção de 2:1 (resina:endurecedor), como indicado pelo fabricante. As características dos componentes do primer estão dispostas na tabela 4.

Tabela 4 – Características dos componentes do primer.

Características dos componentes		
	Resina Componente A	Resina Componente B
Aparência	líquido translúcido viscoso	líquido âmbar
Viscosidade, 25°C, cPS	1000 a 1.5000	200 a 600
Peso Específico, 25°C, g/cm ³	1,12 +/- 0,01	1,00 +/- 0,02

(fonte: S&P, 2013)

4.2.6.4 Resina Epóxi

Para realizar a saturação e colagem da manta e do laminado de fibra de carbono foi utilizada resina epóxi bi componente para laminação de compósitos. A resina utilizada foi a S&P RESIN

55 LAMINAÇÃO, com rendimento de 600 g/m² e proporção de 2:1 (resina:endurecedor), como indicado pelo fabricante. As características dos materiais estão relacionadas na tabela 5:

Tabela 5 – Características dos componentes da resina de laminação.

Características dos componentes		
	Resina Componente A	Resina Componente B
Aparência	líquido translúcido viscoso	líquido âmbar
Viscosidade, 25°C, cPS	4000 a 7000	200 a 600
Peso Específico, 25°C, g/cm ³	1,10 +/- 0,01	1,00 +/- 0,02
Índice tixotrópico	Mín. 1,5	Mín 1,0

(fonte: S&P, 2013)

4.2.7 Parafusos auto fixantes (Parabolt)

Para incrementar a solução de ancoragem do Grupo II, foram utilizados quatro parafusos auto fixantes, parabolts, de diâmetro 8 mm e comprimento 10 cm em cada extremidade da viga. Parabolts são chumbadores mecânicos constituídos de uma porca e uma “camisa”, que funciona de maneira análoga a uma bucha de parafuso. Após posicionado até o final do furo, aplica-se um torque na porca, fazendo com que a “camisa” se expanda, ancorando o parabolt na estrutura.

4.3 PRODUÇÃO DAS VIGAS

Nesta seção estão descritos todos os passos seguidos para a produção das vigas com o reforço e ancoragem de fibra de carbono.

4.3.1 Montagem das armaduras

As armaduras foram adquiridas já cortadas e dobradas, de maneira que foi necessária apenas a amarração dos estribos para a finalização das armaduras. Para isto, foi utilizado arame recozido e a amarração foi feita com a ajuda da torquesa.

4.3.2 Concreto

O traço utilizado para o concreto foi de 1:2,9:3,6 (cimento:areia:brita) em massa, com fator água cimento (a/c) igual a 0,65. Cabe ressaltar que o concreto é do tipo convencional, sem a presença de aditivos.

4.3.3 Quantidade de material

Devido às limitações de mistura da betoneira, foram realizadas duas concretagens separadas, ambas com o mesmo traço do concreto, de modo que cada concretagem foi suficiente para preencher as formas para três vigas e três corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm.

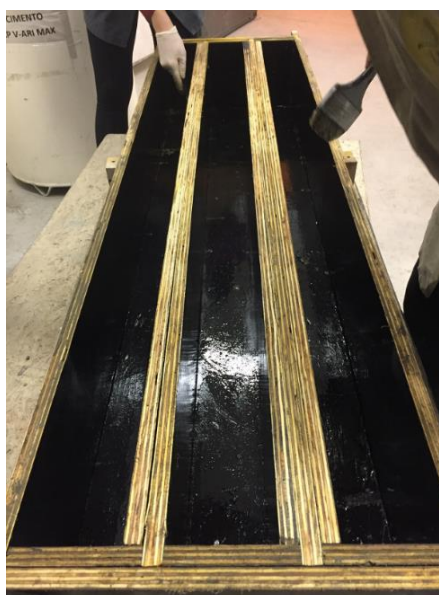
4.3.4 Formas

As formas utilizadas para a moldagem das vigas foram de compensado naval e a construção das mesmas foi executada pelos técnicos do LEME. Para as concretagens, foram utilizados dois conjuntos de formas. Antes das concretagens, as formas receberam aplicação de desmoldante (Figura 17).

4.3.5 Concretagem

A mistura do concreto foi realizada em betoneira intermitente de eixo inclinado com capacidade de 400 litros. As vigas foram concretadas em duas camadas e vibradas com vibrador de imersão (Figura 18a). O arrasamento superior foi realizado de maneira manual.

Figura 17 – Forma recebendo aplicação de desmoldante antes da concretagem



(fonte: própria do autor)

4.3.5.1 Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone (slump)

Para ambas as concretagens foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) de acordo com a NBR 7223:1992 (ABNT, 1992). Em ambas as concretagens obteve-se abatimento dentro da faixa de 10 ± 1 cm (Figura 18b).

Figura 18a – Vibrador de Imersão



Figura 18b – Ensaio de abatimento de tronco de cone



(fonte: própria do autor)

4.3.6 Cura

Devido ao uso do cimento de alta resistência inicial, as vigas foram desmoldadas aos 3 dias de idade. A cura úmida foi realizada através do envolvimento das vigas em lonas plásticas em temperatura ambiente e estendeu-se desde o final da concretagem até o vigésimo primeiro dia.

4.3.7 Preparação da superfície

Para o recebimento do reforço, deve-se retirar a camada de nata de cimento da superfície do elemento, de modo que os poros fiquem expostos e a superfície regular. Desta forma, foi utilizada uma esmerilhadeira com disco diamantado. A figura 19a apresenta o equipamento utilizado e a figura 19b apresenta a superfície já preparada.

Ainda, foi dada especial atenção ao arredondamento dos cantos das vigas do Grupo I, que receberam ancoragem de laços em “U”. Este procedimento é especialmente importante para

garantir uma melhor distribuição de tensões para a ancoragem e, conseqüentemente, melhorar a performance do sistema. Ao final deste processo, as superfícies foram limpas com broxa, de modo a retirar qualquer poeira e resíduo.

Após preparada a superfície, foi aplicado o *primer*, que possui dois objetivos fundamentais: (i) reforçar o substrato de concreto e; (ii) criar uma ponte de aderência para receber a resina de saturação. Este produto, bi componente, foi dosado em balança de precisão e misturado de maneira manual até obter-se uma mistura homogênea. A aplicação se deu com um rolo, cobrindo toda a superfície que recebeu reforço (figura 19c).

Figura 19a – Esmerilhadeira com disco diamantado

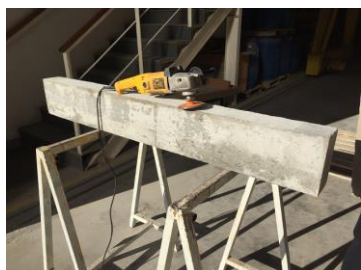


Figura 19b – Superfície pronta para recebimento do reforço



Figura 19c – Aplicação do primer



(fonte: própria do autor)

4.3.8 Aplicação do reforço

Após a preparação da superfície com o *primer*, deve-se esperar cerca de 40 minutos até que o material impregne na superfície do concreto e adquira uma aparência fosca para que se possa proceder com a aplicação do reforço. Da mesma forma que o *primer*, a resina foi dosada em balança de precisão e misturada manualmente, como mostra a figura 20a.

Desta maneira, aplicou-se uma primeira camada de resina epóxi na superfície, que serviu como camada de saturação para a manta de fibra de carbono. É sempre necessário que a resina esteja abaixo e acima de todas as camadas de fibra, de maneira a formar um “sanduíche” no reforço.

A principal função da resina é formar a matriz do compósito. Adicionalmente, a resina também é responsável pela aderência na superfície do concreto. É importante ressaltar que a camada de

resina não pode ser tão fina a ponto de comprometer a aderência do compósito, nem tão espessa a ponto de comprometer a resistência do reforço.

Após, foi posicionada a primeira camada de fibra de carbono (Figura 20b), seguida de nova camada de resina. Foi possível, então, aplicar a segunda e última camada de fibra e a última camada de resina.

Figura 20a – Resina de laminação após mistura manual



Figura 20b – Posicionamento da manta de fibra de carbono



(fonte: própria do autor)

4.3.9 Aplicação da ancoragem

A seguir são apresentados os métodos para aplicação e posicionamento da ancoragem.

4.3.9.1 Ancoragens do Grupo I

Para ancorar o reforço das vigas do Grupo I foram cortados pedaços de manta de 20 cm de largura e 42 cm de comprimento. Desta forma a manta cobre 80% da altura da viga, de modo a simular a presença de uma laje e consequente limite de avanço da ancoragem.

Esta manta foi posicionada sobre as mantas do reforço e as fibras foram posicionadas de maneira ortogonal às fibras do reforço, formando uma malha. O processo foi o mesmo para as duas vigas, como apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Detalhe das vigas do Grupo I



(fonte: própria do autor)

4.3.9.2 Ancoragens do Grupo II

Já para ancorar o reforço das vigas do Grupo II, foram utilizados pedaços de laminado de fibra de carbono com 9 cm de largura e 5 cm de comprimento e realizado um furo na parte central da placa, para posterior posicionamento do parabolts. Após a aplicação do reforço, 4 pedaços do laminado foram solidarizados junto à estrutura com a mesma resina epóxi utilizada para o reforço, estendendo-se, então, por 20 cm para a ancoragem do sistema. A figura 22a apresenta o laminado posicionado sobre o reforço. O sistema foi então deixado para curar com um peso sobre a zona de ancoragem, visando manter o laminado na posição correta.

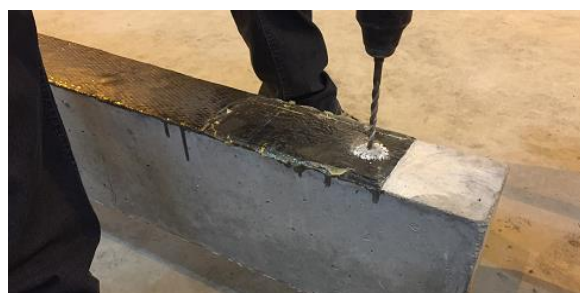
Após a cura da resina, prosseguiu-se para a fixação dos parabolts. A figura 22b apresenta o momento em que a viga estava sendo furada para que o parabolts pudesse ser fixado. Os furos seriam idealmente posicionados onde o laminado já havia sido furado, mas percebeu-se que alguns desses furos coincidiram com a posição dos estribos, o que impossibilita a perfuração total. Para contornar o problema, alguns destes furos tiveram que ser feitos em outros pontos sobre o laminado.

Uma vez feitos os furos, os parabolts foram posicionados na viga com o auxílio de uma marreta e então apertados com a chave de boca. Desta maneira, foram posicionados 4 parabolts em cada extremidade da viga, espaçados a cada 5 cm.

Figura 22a – Placas de laminado posicionadas sobre a viga.



Figura 22b – Furação da viga para fixação dos parabolts.



(fonte: própria do autor)

4.4 ENSAIOS

Os ensaios desenvolvidos neste trabalho foram completamente automatizados, de maneira a garantir a qualidade e fidelidade dos resultados obtidos, que serão apresentados no capítulo subsequente. Para tal, o sistema de carregamento foi realizado através da prensa de ensaios universal do LEME, com capacidade de 2000 kN (Shimadzu 2000kNA). A seguir estão descritos os ensaios para controle da resistência do concreto e flexão a 4 pontos (flexão pura).

4.4.1 Controle tecnológico do concreto

Para cada betonada, foram moldados três corpos de prova como previsto na NBR 5738:2015 (ABNT, 2015), que foram rompidos aos 40 dias de idade, devido a fatores de logística de materiais e disponibilidade do laboratório. O ensaio seguiu as recomendações da NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), com velocidade constante de carregamento de 0,45 MPa/s. A resistência média dos corpos de prova das concretagens 1 e 2 foi de 33,31 MPa. Os resultados estão disposto na Tabela 6.

Tabela 6 – Resistência à compressão do concreto

Resistência à Compressão					
Concretagem	Corpo de Prova	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
C1	CP1	250,5	31,87	33,31	2,04
	CP2	250,5	31,87		
	CP3	284,5	36,19		
C2	CP1	281,5	35,82	33,31	1,80
	CP2	254,5	32,37		
	CP3	249,5	31,73		

(fonte: elaborado pelo autor)

4.4.2 Ensaio de flexão em 4 pontos

A taxa de carregamento com deslocamento foi controlado de 2 mm/min. Como não há normatização para este tipo de ensaio, utilizou-se o mesmo valor adotado nos estudos de Beber (2003). Todos os protótipos foram ensaiados com cargas concentradas aplicadas nos terços médios. As vigas foram posicionadas sobre um apoio de primeira ordem e outro apoio de segunda ordem, como mostram as figuras 23a e 23b. Cada apoio possui 10 cm de largura, de modo a centrar a carga no eixo do apoio. Desta forma, para fins de cálculo, considera-se a viga com 140 cm de vão livre. A figura 24 representa um esquema do ensaio.

Figura 23a – Apoio de primeira ordem



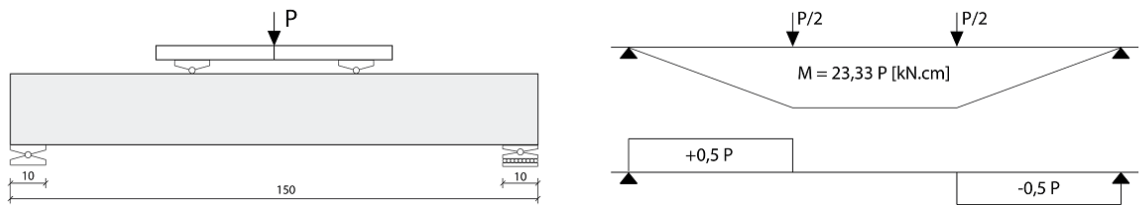
Figura 23b – Apoio de segunda ordem



(fonte: própria do autor)

Para a aferição dos deslocamentos verticais utilizou-se um par de LVDT'S (*linear variation displacement transducer*). Os LVDT'S foram posicionados na seção central da viga, um de cada lado. Desta maneira obtém-se um valor mais preciso do deslocamento do elemento.

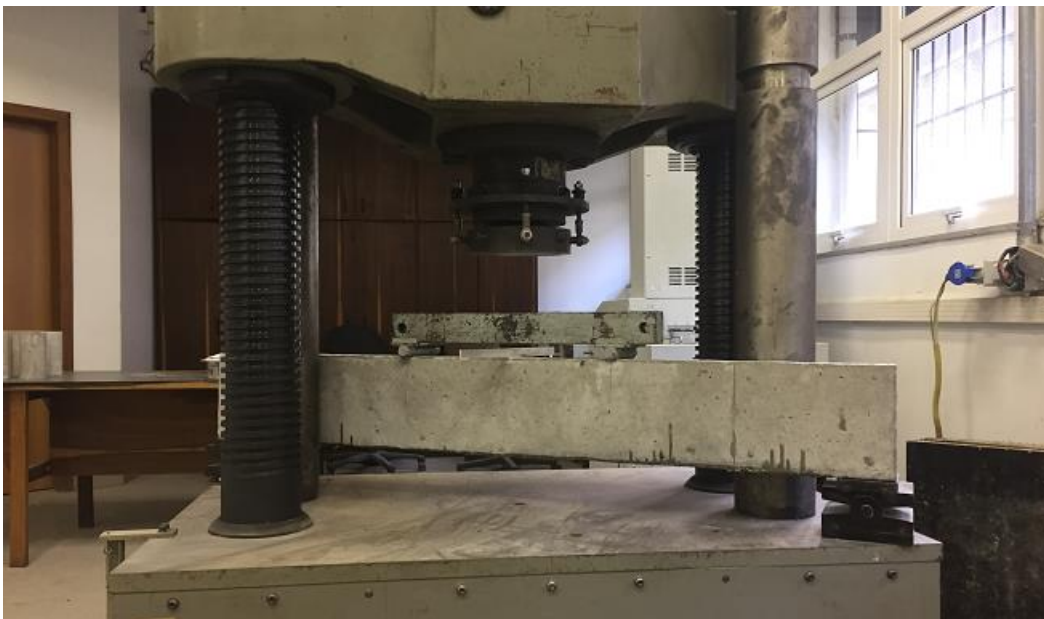
Figura 24 – Esquema do ensaio



(fonte: elaborado pelo autor)

A aquisição de dados tanto da prensa quanto dos LVDT'S foi realizada através de uma ponte multicanal computadorizada, calibrada em 5 Hz para o armazenamento de dados. A figura 25 apresenta uma das vigas posicionada para o ensaio.

Figura 25 – Viga posicionada para o ensaio



(fonte: própria do autor)

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 4.

O uso correto de ancoragens para o sistema de reforço com PRFC é essencial para obter um desempenho seguro e economicamente viável. São discutidas as principais implicações estruturais e de execução quando da aplicação dos diferentes tipos de ancoragem.

5.1 MODOS DE RUPTURA

Como apresentado no capítulo 3, a aplicação de reforços estruturais de PRF implica no surgimento de novos possíveis modos de falha para as vigas (fig. 5). Desta forma, esta seção apresenta com maiores detalhes os modos de ruptura para cada uma das soluções de viga estudadas.

5.1.1 Vigas Testemunho

O grupo de vigas de controle, aqui denominadas como testemunho (VT) obteve o resultado esperado, com ruptura na zona de ancoragem com separação da camada de cobrimento do concreto. Este modo ocorre porque o concreto é o elemento com menor resistência à tração no sistema, e, conseqüentemente, o material que inicia o processo de ruptura. Desta maneira, as tensões tangenciais e de tração são as responsáveis pela falha do sistema. A figura 26 apresenta uma das vigas testemunho após a sua ruptura.

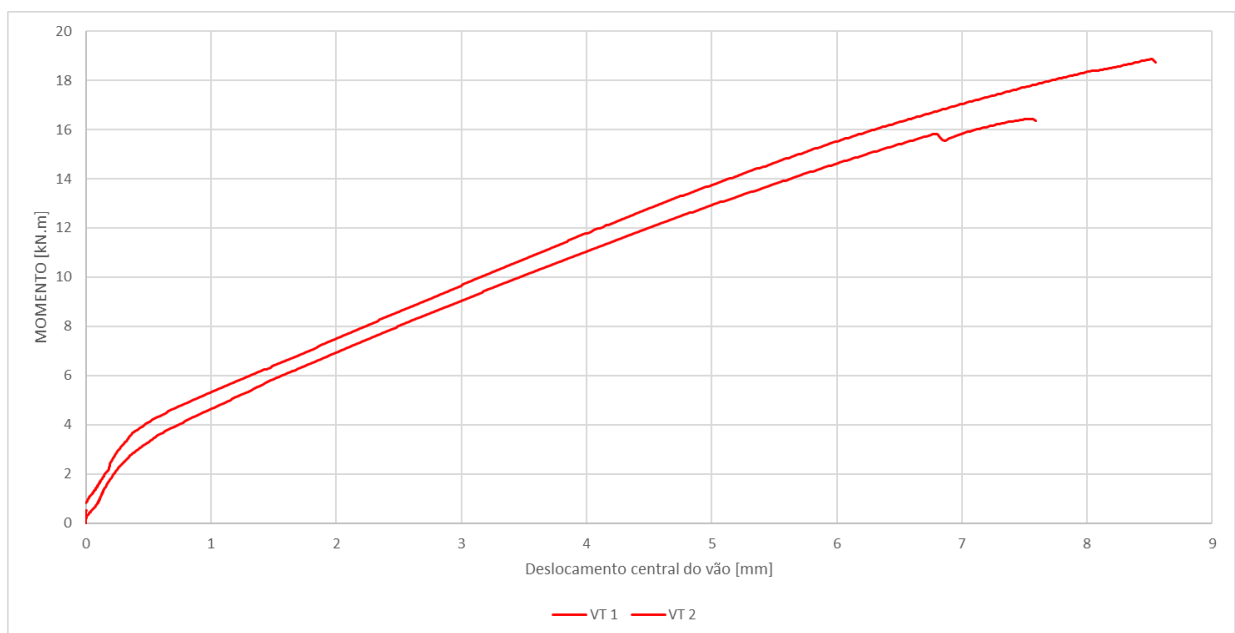
Figura 26: Detalhe da ruptura da VT – 2 na região próxima ao apoio



(fonte: própria do autor)

A figura 27 apresenta as curvas de momento último e deslocamento no centro do vão para as duas vigas testemunho ensaiadas.

Figura 27 – Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas testemunho



(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados obtidos nos ensaios das vigas testemunhos estão dispostos na tabela 7.

Tabela 7 – Cargas e modo de ruptura das vigas testemunho

Viga	Sistema de ancoragem	Modo de ruptura	Carga de Ruptura (kN)	Momento de Ruptura (kNm)
VT 1	-	Separação da camada de concreto	70,4	16,4
VT 2			80,9	18,9

(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.2 Vigas do Grupo I

As vigas do Grupo I, com sistema de ancoragem de laços em “U” foram as que obtiveram melhor resultado quanto ao incremento de carga e, conseqüentemente, da ancoragem. Pôde-se observar, com o aumento do carregamento, que as fissuras na parte central do vão ficaram cada vez maiores, devido ao escoamento da armadura longitudinal. Desta forma, o reforço torna-se responsável pela maior parte das tensões de tração. Contudo, a rigidez do reforço na direção paralela ao carregamento é baixa, fazendo com que o reforço seja muito sensível a deslocamentos verticais diferenciais. Assim, as fissuras e conseqüente separação do concreto na parte central do vão desencadeiam o processo de descolamento do reforço, como mostra a figura 28.

Mesmo assim, o carregamento pôde continuar a ser aplicado, e o colapso total do sistema se deu com o escorregamento da manta no final do reforço, próximo ao apoio.

É interessante notar que a ancoragem de laços em “U” conferiu ao concreto uma boa capacidade de absorver os esforços tangenciais e de tração, fazendo com que não ocorresse a separação da camada de concreto, e sim o escorregamento na interface entre o reforço e o concreto, também chamado de *slip off*. Desta forma, a separação da camada de cobertura do concreto deixou de ser o ponto mais frágil do sistema reforço/ancoragem, fazendo com que a ruptura final ocorresse na interface entre reforço e concreto. Este modo de ruptura ocorre devido à falta de aderência entre o substrato (concreto) e o reforço (PRFC), sendo a execução do reforço uma possível causa para esta falha. A figura 29 mostra o detalhe da falha na zona da ancoragem, com a ruptura do laço em “U” no sentido transversal da fibra.

Além disso, a viga quase chegou ao limite da resistência do concreto, visto que quando do rompimento da ancoragem, já havia iniciado a plastificação da seção comprimida da viga, detalhe que também pode ser observado na figura 28.

Figura 28 – Descolamento do reforço após deformações excessivas na região central do vão



(fonte: própria do autor)

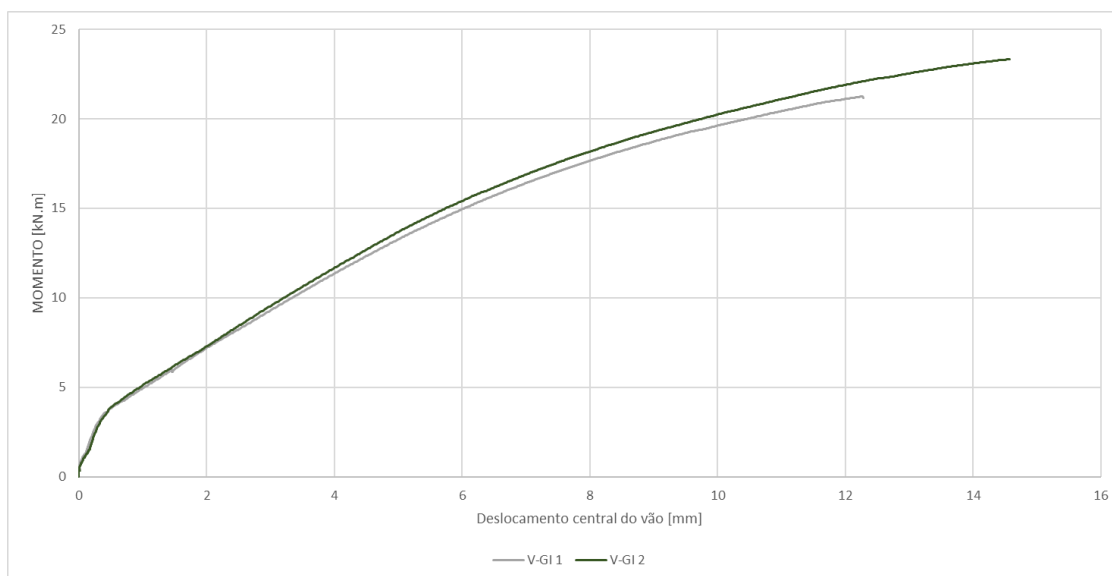
Figura 29 – Detalhe do rompimento do laço em “U” após o escorregamento (*slip off*) do reforço



(fonte: própria do autor)

A figura 30 apresenta as curvas de momento último e deslocamento no centro do vão para as duas vigas testemunho ensaiadas.

Figura 30 – Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas do Grupo I



(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados obtidos nos ensaios das vigas testemunhos estão dispostos na tabela 8.

Tabela 8 – Cargas e modo de ruptura das vigas do Grupo I

Viga	Sistema de ancoragem	Modo de ruptura	Carga de Ruptura (kN)	Momento de Ruptura (kNm)
V-GI 1	Laços em "U"	Separação da camada de concreto	91,0	21,2
V-GI 2			100,0	23,3

(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.3 Vigas do Grupo II

As vigas do Grupo II, com o sistema de ancoragem executado com chapas de laminado e parabolts, tiveram sua ruptura na ancoragem, devido à alta concentração de tensões tangenciais e de tração, tal como nas vigas testemunho. Mesmo assim, a carga registrada foi superior às vigas testemunho, e após o rompimento das vigas, não foi possível separar manualmente o reforço da viga, indicando que os parabolts agiram “costurando” a ligação do reforço com o bloco de concreto, provável causa do aumento na carga última de ruptura. A figura 31 mostra o detalhe da ruptura de uma das vigas do Grupo II.

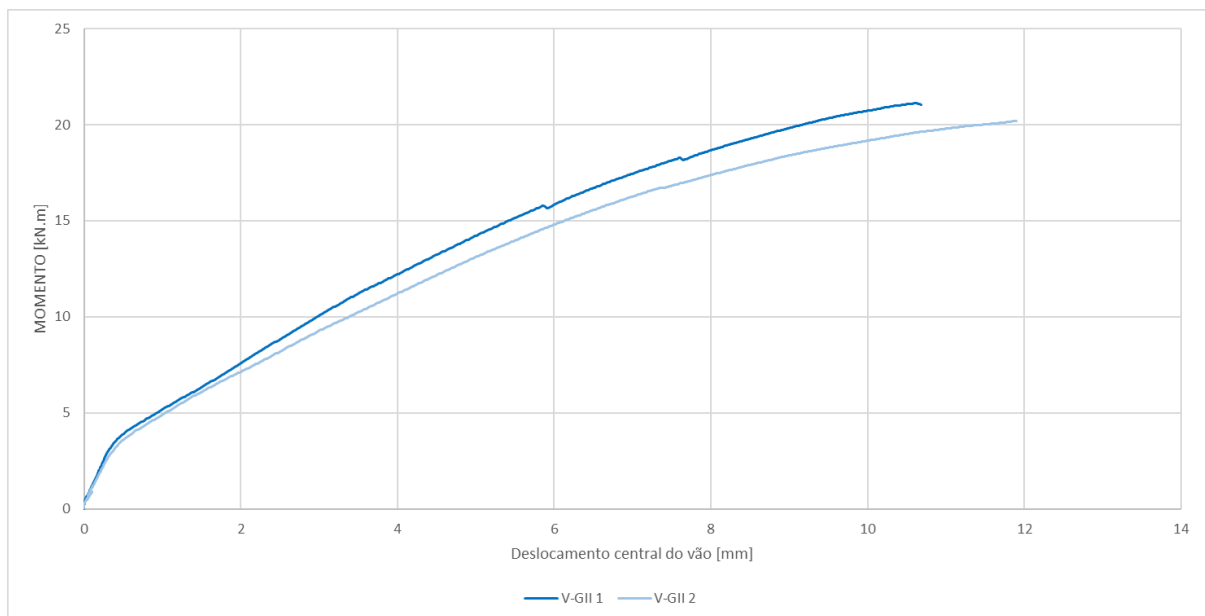
Figura 31 – Detalhe do rompimento da ancoragem da viga do Grupo II



(fonte: própria do autor)

A figura 32 apresenta as curvas de momento último e deslocamento no centro do vão para as duas vigas testemunho ensaiadas.

Figura 32 – Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas do Grupo II



(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados obtidos nos ensaios das vigas testemunhos estão dispostos na tabela 9.

Tabela 9 – Cargas e modo de ruptura das vigas do Grupo II

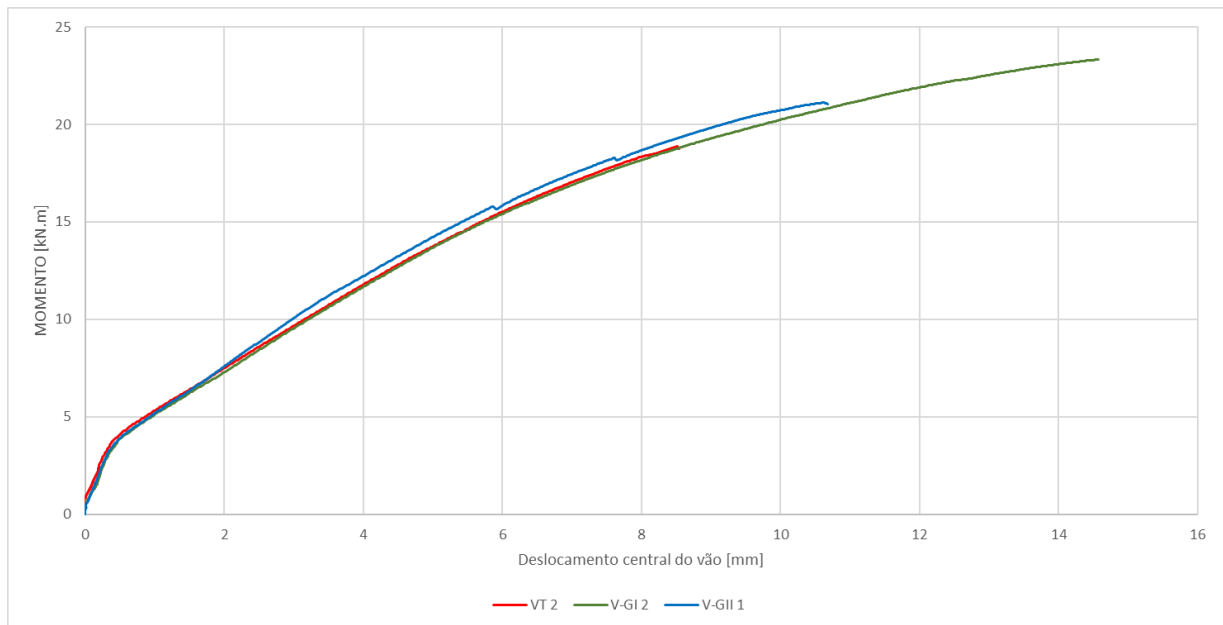
Viga	Sistema de ancoragem	Modo de ruptura	Carga de Ruptura (kN)	Momento de Ruptura (kNm)
V-GII 1	Laminado +	<i>Slip off</i>	90,5	21,1
V-GII 2	Parabolt		86,5	20,2

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 APRESENTAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS

Considerando os pontos anteriormente expostos, pôde-se analisar as soluções de ancoragem, juntamente com a viga testemunho, e traçar o diagrama de momento fletor x deslocamento para as vigas de melhor desempenho de cada um dos grupos. A figura 33 apresenta o gráfico que compara essas vigas.

Figura 33 – Diagrama momento fletor x deslocamento para as vigas dos três grupos



(fonte: elaborado pelo autor)

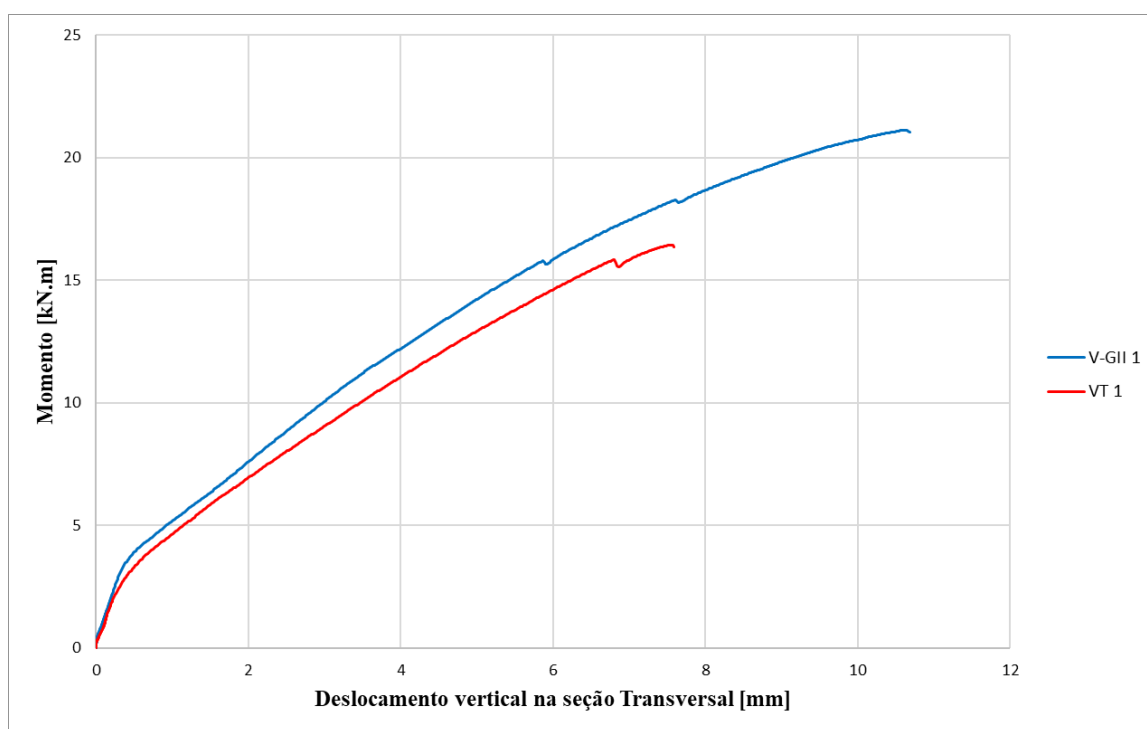
A partir do gráfico podemos verificar claramente que as vigas possuem um comportamento praticamente igual durante o carregamento, indicando que a ancoragem em nada altera a rigidez do elemento. Os sistemas de ancoragem, desta forma, alteram apenas a capacidade de carregamento da viga.

Também é possível perceber a alteração na rigidez dos elementos a partir de quando o momento de fissuração do concreto é atingido, em aproximadamente 4 kN.m. É neste momento que

reforço começa a atuar de forma efetiva. Desta forma, o reforço atua restringindo a abertura de fissuras, deformações e deslocamentos da viga (BEBER, 2003).

Outro ponto que sempre vale a pena ser retomado é o da natureza da ruptura dos elementos reforçados: a partir do momento em que um elemento estrutural recebe a aplicação de reforço, o aço passa a não ser mais o direcionador da ruptura, fazendo com que apenas os materiais frágeis (fibra e concreto) sejam responsáveis pelos diversos modos de ruptura possíveis. Isso ocorre porque as deformações da viga reforçada são menores, fazendo com que é fácil de avaliar que em todas as configurações aqui estudadas as rupturas foram frágeis e repentinas, sem a presença de grandes fissurações previamente ao colapso dos materiais. Desta forma reitera-se o extremo cuidado que se deve ter ao utilizar reforços com materiais frágeis, como no caso da fibra de carbono. Este comportamento ficou bastante evidente em dois, dos seis ensaios das vigas. A figura 34 representa o gráfico destes dois ensaios:

Figura 34 – Diagrama momento fletor x deslocamento para vigas com rupturas frágeis parciais durante o ensaio



(fonte: elaborado pelo autor)

É possível ver que as duas curvas possuem “dentes”, que representam momentos em que a estrutura passa por pequenas rupturas frágeis locais. No caso da viga do Grupo II (curva azul), a primeira ruptura parcial ocorre praticamente com a mesma carga da ruptura parcial da viga testemunho (curva vermelha). Mesmo com a estrutura portando cerca de 75% da sua capacidade

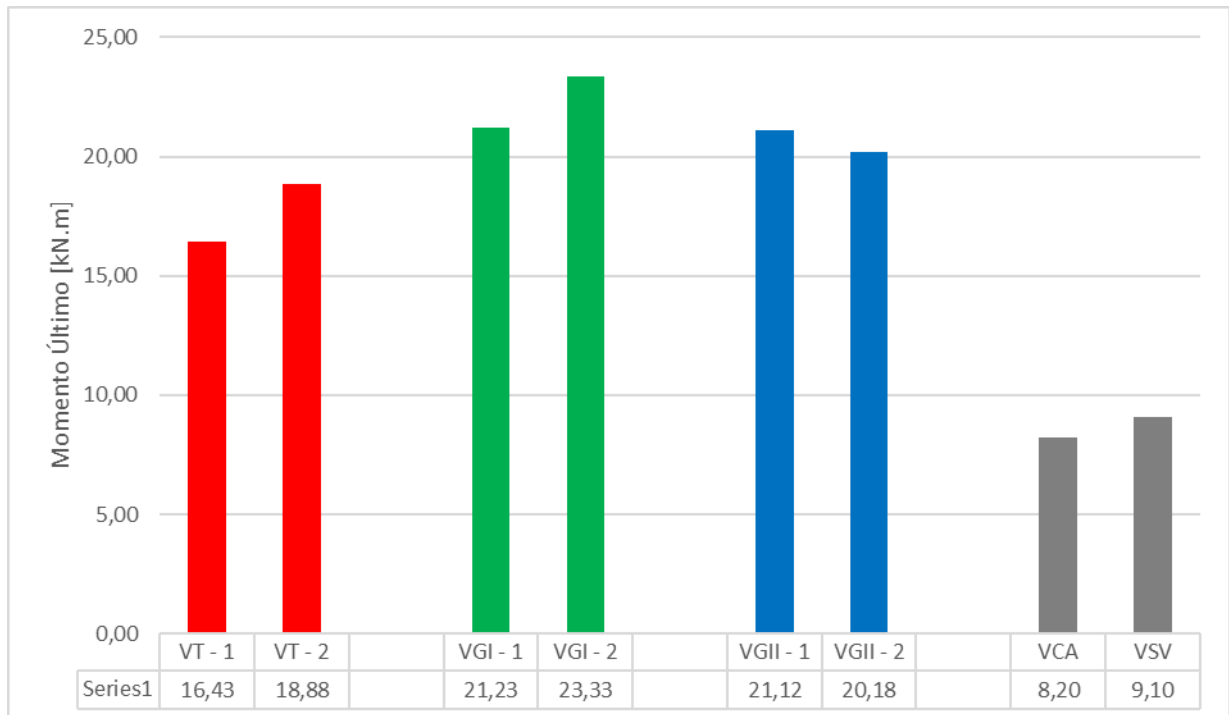
de carga, este não é um comportamento aceitável para fins de serviço, visto que este evento pode desencadear outras rupturas, levando ao colapso da estrutura.

Um diagrama comparativo dos momentos de ruptura está apresentado na figura 32. A partir da observação desses dados, em conjunto com o gráfico anterior, verifica-se que os dispositivos de ancoragem resultaram em um aumento da carga última para as vigas ensaiadas.

Foi adicionada, também, uma quarta categoria de viga (VCA), sem nenhum tipo de reforço, com as mesmas configurações de armadura e o mesmo concreto utilizado nos ensaios. Foi calculada a carga teórica de ruptura para o estado limite último, apenas para ilustrar como a utilização do reforço, mesmo com falha na ancoragem, aumenta a capacidade de carga de uma estrutura.

Cabe ressaltar que este é um resultado teórico que não significa que a aplicação do reforço com fibra de carbono irá dobrar a capacidade de carga do elemento fletido. Por exemplo no estudo de Beber (2003), foi possível aumentar em até 78,9% em relação à viga sem reforço. Já no estudo de Skuturna e Valivonis (2016), foi possível dobrar a carga para ruptura à tração do compósito de fibra de carbono. No mesmo estudo, os autores também ensaiaram vigas sem reforço de fibra de carbono, que estão representadas também na figura 32 como VSV. Estas vigas, que possuíam geometria e armadura idênticas às vigas deste estudo, atingiram o momento limite último com 9,10 kN.m.

Figura 32 – Momento último das vigas do estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

Após as análises apresentadas, pode-se inferir que, de forma geral, o sistema de ancoragem por laços em “U” aumentou em 26,2% a capacidade de carga, enquanto que o sistema proposto com laminado e parabolt aumentou em 17,0% a capacidade de carga. A tabela 10 apresenta de maneira compilada as informações obtidas nos ensaios, que serão discutidas a seguir.

Tabela 10 – Comparação entre cargas e modos de ruptura das vigas ensaiadas

Viga	Sistema de ancoragem	Modo de ruptura	Carga de Ruptura (kN)	Momento de Ruptura (kNm)	Incremento*
VT 1	-	Separação da camada de concreto	70,4	16,4	-
VT 2	-	Separação da camada de concreto	80,9	18,9	-
V-GI 1	Laços em "U"	Separação da camada de concreto	91,0	21,2	20%
V-GI 2			100,0	23,3	32%
V-GII 1	Laminado + Parabolt	<i>Slip off</i>	90,5	21,1	20%
V-GII 2			86,5	20,2	14%

*Comparado com a média entre VT 1 e VT 2

(fonte: elaborado pelo autor)

Ainda, foi calculado o momento último de ruptura das vigas, considerando a compatibilidade de deformações e a partir de método iterativo. Desta forma, pode-se avaliar a eficiência dos reforços e das ancoragens em relação à carga teórica esperada. Os dados referentes a esta comparação estão dispostos na tabela 11. As fórmulas referentes ao cálculo teórico podem ser encontradas no Anexo A ao final deste trabalho.

Tabela 11 – Comparação entre cargas de ruptura teóricas e experimentais

Viga	Sistema de ancoragem	Momento Último (kN.m)		Exp./Teó
		Exp.	Teó	
VT 1	-	16,4	29,1	0,56
VT 2		18,9		0,65
V-GI 1	Laços em "U"	21,2	29,1	0,73
V-GI 2		23,3		0,80
V-GII 1	Laminado + Parabolt	21,1	29,1	0,72
V-GII 2		20,2		0,69

(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que a capacidade última atingida pelos corpos de prova ficaram abaixo do valor teórico. Diversos fatores podem ter contribuído para estes resultados, entre eles modo de falha da viga e execução do reforço. Mesmo assim, a carga experimental de uma das vigas do grupo I chegou a 80% da carga última teórica, que considera. As próximas seções deste capítulo exploram em maiores detalhes estes resultados.

5.3 ANÁLISE DE CUSTO DOS SISTEMAS DE ANCORAGEM

Considerando que o custo financeiro é um grande direcionador de decisões para escolha de métodos de construção e reforço, esta seção busca avaliar os custos diretos relacionados a cada uma das duas soluções de ancoragem. Sendo assim, foram avaliados apenas os materiais utilizados em cada uma das soluções de ancoragem deste trabalho, sem considerar custos indiretos relacionados com mão de obra e materiais auxiliares. Ainda, foi utilizado o princípio de custeio por absorção ideal, que não considera perdas. Então foi possível relacionar este custo ao incremento médio de resistência na viga quando comparadas à resistência média das vigas testemunho. A tabela 12 representa este comparativo de maneira detalhada.

Tabela 12 – Comparativo de custo direto da execução das ancoragens dos Grupos I e II

Comparativo Custo de ancoragem								
Tipo de Ancoragem	Custo Total de Material de Ancoragem por Viga (R\$)						Incremento médio de resistência (kN.m)	Custo/ kN.m
	Primer	Resina	Manta	Laminado	Parabolt	Total (R\$)		
Grupo I	0,52	4,13	55,76	-	-	60,41	4,63	13,04
Grupo II	-	-	-	72,00	16,00	88,00	3,00	29,35

(fonte: elaborado pelo autor)

Com esta pequena análise de custo para as ancoragens deste estudo percebe-se que as ancoragens do Grupo II mostraram-se 25% mais caras para o incremento unitário de resistência à flexão. Grande parte deste custo deve-se ao laminado de fibra de carbono, que corresponde a mais de 80% do custo total do sistema.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões aqui apresentadas restringem-se aos materiais e metodologias que foram utilizados neste trabalho. Qualquer alteração nas condições aqui apresentadas podem conduzir a resultados diferentes.

A recuperação e o reforço das estruturas de concreto armado são cada vez mais necessárias no dia a dia da construção civil. Desta forma, os reforços com PRFC representam uma alternativa fácil e rápida de ser aplicada, além de conferir às estruturas grande resistência às solicitações.

Infelizmente, ao reforçar uma estrutura com PRFC, novos modos de falha surgem, e um dos mais críticos está relacionado a problemas na ancoragem do sistema de reforço. Desta maneira, torna-se essencial desenvolver técnicas para ancorar o reforço e, assim, aproveitá-lo da melhor maneira possível. Diversos estudos foram feitos propondo maneiras distintas de resolver este problema, que possui características complexas de interação de esforços entre diferentes materiais.

Desta forma, este estudo visou estudar métodos de ancoragem. Foi proposto um estudo com um método conhecido no mercado, o de laços em “U”, e um método até então nunca utilizado, que consiste na combinação de laminados de fibra de carbono fixados com parabolts metálicos. Estas duas formas de ancoragem fizeram com que fosse possível alcançar um incremento de carga de até 32% para os laços em “U” e de até 20% para o sistema proposto neste trabalho. Ambos os resultados tomam como base para comparação a resistência obtida para um corpo de prova sem nenhum dispositivo de ancoragem.

Foi feita também uma breve consideração do custo para o uso de cada tipo de ancoragem. A ancoragem do tipo laço em “U” possui um desempenho melhor e um custo menor.

Algumas questões se tornam relevantes para possíveis estudos posteriores a este. São elas: a real influência do laminado de carbono no desempenho das ancoragens no sistema proposto e; o uso de material não metálico em substituição aos parabolts.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures: ACI 440.2R-08**. Farmington Hills, 2008. 85p.
- ARAM, M. R.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. **Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams**. *Compos B Eng*, 39 (5) 2008, pp. 826-841.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Concreto: NBR 6118**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone: NBR 7223**. Rio de Janeiro, 1992.
- BEBER, A. J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibras de carbono**. Porto Alegre: UFRGS, 1999. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.
- BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.
- CERONI, F.; PECCE, M.; MATTHYS, S.; TAERWE, L. **Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets**. *Compos. Part B: Eng.*, 39(3), 2008 429–441.
- CHEN, J. F.; TENG, J.G. **Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding**. *Constr Build Mater*, 17 (1) 2003, pp. 27-41.
- CRANK, J. **The mathematics of Diffusion, second edition**. Clarendon Press, Oxford, UK, 1975. 415p.
- DARBY, J. J. **Role of bonded fibre-reinforced composites in strengthening of structures**. In: L. C. Hollaway, M. B. Leeming, ed. *Strengthening of reinforced concrete structures: using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. Cambridge: Boca Raton, 1999, pp.1-10.
- FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D.D.; **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem**. In: XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2022, Brasília. Anais... Brasília: UnB; 2002. CD-ROM.
- GARCEZ, M. R., MENEGHETTI, L. C., CAETANO, L. F., CAMPAGNOLO, J. L., SILVA FILHO, L. C. P. Utilização de fibras de alto desempenho como reforço à flexão em vigas de

concreto armado. In: CONGRESO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2005, Assunción. **Anais...** Assunción: VIII CONPAT, 2005. [CD-Rom].

GARCEZ, M. R. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. 2007. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GRELLE, S. V.; SNEED, L. H. **Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates**, International Journal of Concrete Structures and Materials, 2013, 17-33.

HASHEMI, S.; AL-MAHAIDI, R. **Flexural performance of CFRP textile-retrofitted RC beams using cement-based adhesives at high temperature**. Construction and Building Materials. 2011, 28, 791–797.

JONES, R.; SWAMY R.N.; CHARIF, A. **Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened with epoxy-bonded steel plates**. The Structural Engineer, 66 (5) 1988, pp. 85-94.

JÚLIO, E.S.; BRANCO, F.; SILVA, V. D. **Structural rehabilitation of columns using reinforced concrete jacketing**. Prog. Struct. Engng. Mater, 5 2003, pp. 29-37.

LEUNG, C. K. Y.; YANG, Y. **Energy-based modeling approach for debonding of FRP plate from concrete substrate** J Eng Mech, 132 (6) 2006, pp. 583-593.

MACHADO, A. P. **Fibras de Carbono: Manual prático de dimensionamento**. São Paulo: MBrace, 2006. 412p.

MALEK, A. M.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. **Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end**. ACI structural Journal, 1998.

MARQUES, G. G. **Análise Experimental de Sistemas de Reforço Estrutural à Flexão com Laminados de PRFC Aplicados a Vigas de Concreto Armado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEIER, U.. **Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites**. Journal of Composites for Construction, 9(6), 1995, pp.341-351.

OMBRES, L. **Prediction of intermediate crack debonding failure in FRP-strengthened reinforced concrete beams** Composite Structures, 92 (2) 2010, pp. 322-329.

PHAM, H.; AL-MAHAIDI, R. **Experimental investigation into flexural retrofitting of Reinforced Concrete Bridge beams using FRP composites**. Compos Struct, 66. 2004, pp. 617-625.

SCHMITT, C. M. **Por um modelo integrado de sistema de informações para a documentação de projetos de obras de edificação da indústria da construção civil**. 1998.

318 f. Tese (Doutorado em Administração) – Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SKUTURNA, T; VALIVONIS, J. **Experimental study on the effect of anchorage systems on RC beams strengthened using FRP**. Composites Part B, 2016, 283-290.

SMITH, S. T.; TENG, J. G. **FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength Models**, Engineering Structures, 2002, 385-395.

VARASTEHPOUR, H.; HAMELIN, P. **Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics**. Materials and Structures 1997;30:160–6.

YAO, J.; TENG, J.G. **Plate end debonding in FRP-plated RC beams–I: Experiments** Eng Struct, 29 (10) 2007, pp. 2457-2471.

YE, L.; LU, X.; CHEN, J. **Design proposals for the debonding strengths of FRP strengthened RC beams in the Chinese design code**. In: Proceedings of International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures, Hong Kong, China; 2005.

APÊNDICE A – Fórmulas para cálculo do momento último

COMPATIBILIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES

$$\varepsilon_{sn} = \frac{\varepsilon_c(x - d_{sn})}{x}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_c(d_s - x)}{x}$$

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_c(d_f - x)}{x}$$

$$\varepsilon_c = 0,35\%$$

Em que:

ε_{sn} – deformação da armadura longitudinal superior

ε_s – deformação da armadura longitudinal inferior

ε_f – deformação da fibra

ε_c – deformação do concreto

FORÇAS NO SISTEMA

$$R_{cc} = 0,8 x b_w f_c$$

$$R_{sc} = f_y A_{sn}$$

$$R_s = f_y A_s$$

$$R_f = f_f A_f$$

Em que:

R_{cc} – força de compressão no concreto

b_w – largura da seção transversal

f_c – resistência característica do concreto

R_{sc} – força de compressão na armadura superior

f_y – resistência característica do aço

A_{sn} – área de armadura longitudinal superior

R_s – força de tração na armadura longitudinal inferior

A_s – área de armadura longitudinal inferior

R_f – força de tração na fibra

f_f – resistência característica da fibra

A_f – Área de fibra