

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – MESTRADO

ADRIANO VIEIRA RISSON

ESTUDO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE ANCORAGEM
POR CORDÃO DE FIBRA DE CARBONO PARA VIGAS
REFORÇADAS COM PRFC

MARINGÁ

2016

ADRIANO VIEIRA RISSON

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE ANCORAGEM
POR CORDÃO DE FIBRA DE CARBONO PARA VIGAS
REFORÇADAS COM PRFC**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof.^a Dra. Nara Villanova Menon

MARINGÁ

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

R596e Risson, Adriano Vieira
 Estudo experimental de sistema de ancoragem por
 cordão de fibra de carbono para vigas reforçadas com
PRFC / Adriano Vieira Risson. -- Maringá, 2016.
 159 f. : il. color., figs., tabs.

 Orientador: Prof.^a Dr.^a Nara Villanova Menon.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2016.

 1. Concreto armado. 2. Fibras de Carbono. 3.
Concreto armado - Reforço. 4. Concreto armado -
Ancoragem. I. Menon, Nara Villanova, orient. II.
Universidade Estadual de Maringá. Centro de
Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDD 21.ed. 624.1834

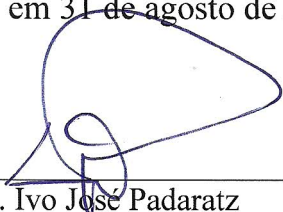
GVS-003694

ADRIANO VIEIRA RISSON

ESTUDO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE ANCORAGEM
POR CORDÃO DE FIBRA DE CARBONO EM VIGAS
REFORÇADAS COM PRFC.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de agosto de 2016.



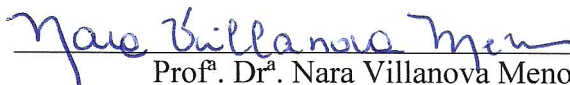
Prof. Dr. Ivo José Padaratz

Membro UFSC



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

Membro UEM



Profª. Drª. Nara Villanova Menon

Orientadora UEM

Dedico este trabalho à minha esposa Kathleen Dall
Bello de Souza Risson.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me guiou sempre.

À minha esposa Kathleen, por todo seu incentivo e compreensão no período de execução deste trabalho.

À toda minha família, pela compreensão, paciência e incentivo durante o curso, em especial aos meus pais Angelo e Luiza, pelo exemplo e dedicação.

À família Dall Bello pela compreensão nos momentos que fiquei ausente.

À minha orientadora Prof^a. Dra. Nara Villanova Menon, pela oportunidade, confiança e atenção prestada. Agradeço pelos conselhos acadêmicos, profissionais e de vida, e pelo exemplo de profissionalismo, inteligência e humildade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, por todas as contribuições fundamentais para minha formação.

À Sika S.A., pelo fornecimento do material utilizado na pesquisa experimental, em especial ao Eng. Gustavo Perez e Eng. Figueiro, pelo gentil atendimento na visita unidade e pelas informações fornecidas sobre o produto.

À Marli Pereira, por sua dedicação nos esclarecimentos relacionados aos assuntos acadêmicos do PCV.

Ao Centro Universitário Dinâmica das Cataratas – UDC, pela disponibilização dos laboratórios para a realização da pesquisa.

Aos funcionários do laboratório da UDC, Fabiano Dias, Fernando do Carmo, Gabriel Dreher e Wilson Wurmeister, pelo auxílio na execução das atividades laboratoriais.

Ao Maurício Ichikawa e Fábio Willrich, pelo auxílio e tempo dispensado na instrumentação dos ensaios.

Aos amigos e colegas pelo incentivo.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado, reforçadas com tecido de fibras de carbono, utilizando mecanismo de ancoragem composto pela inserção de cordão de fibras de carbono no concreto. São apresentados, através de estudos existentes, conhecimentos sobre rupturas de elementos reforçados através do descolamento ou desprendimento do compósito, assim como a avaliação de outros sistemas de ancoragem que visam minimizar o efeito de colapso prematuro. Foram ensaiadas dez vigas divididas em dois grupos. O grupo 1 é composto por cinco vigas para análise do sistema aplicado em reforços de flexão. Para o grupo 2 foram utilizadas cinco vigas com o objetivo de avaliar o mecanismo aplicado em reforços de cisalhamento. Todas as vigas foram ensaiadas à aplicação de carregamentos transversais e instrumentadas para avaliar a carga de ruptura, deslocamento vertical, deformação específica no aço, concreto e reforço e o modo de ruptura. Através dos resultados, verificou-se que o mecanismo de ancoragem estudado atuou impedindo que o elemento estrutural chegasse a ruína prematuramente por descolamento ou desprendimento do reforço. Foram constatados ganhos principalmente na ductilidade das vigas e no aumento de sua capacidade resistente, que chegou a apresentar acréscimos superiores a 300% das vigas sem reforço. Através deste resultado, concluiu-se que o sistema de ancoragem por inserção de cordão de fibras de carbono se mostrou eficiente para ambos os tipos de reforço.

Palavras-chave: Concreto armado. Fibras de Carbono. Reforço. Ancoragem.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the structural behavior of reinforced concrete beams, reinforced with carbon fiber fabric, using an anchoring mechanism composed of carbon fiber strand inserted in concrete. It is displayed through existing studies; knowledge of breaks in reinforcing members through the detachment or loosening of the composite, as well as evaluation of other anchoring systems, which aim to minimize the effect of premature breakdown. Fourteen beams were divided into two groups. Group 1 consists of five beams to analyze the system applied in bending reinforcements. For group 2 five beams were used in order to evaluate the mechanism applied in shear reinforcements. All beams were applied to the transverse loadings and instrumented to measure the breaking load, vertical displacement, deformation specifically in steel, concrete and reinforcement and failure mode. The results concluded that the studied anchoring mechanism acts to prevent the structural element from premature destruction through detachment or loosening of the reinforcement. The main improvements were made in the ductility of the beams and increase in their load capacity, which made an increase of more than 300% over unreinforced beams. Through this result, it was concluded that the mooring system by insertion of carbon fiber strand was efficient for both types of reinforcement.

Key-words: Reinforced concrete. Carbon fibers. Reinforcement. Anchorage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tower Bridge	26
Figura 2- Aspecto visual das fibras: (a) de carbono; (b) de aramida; (c) de vidro.....	29
Figura 3– Diagrama tensão-deformação dos PRFs e do aço	29
Figura 4 – Ilustração do sistema de reforço em concreto com PRFC	37
Figura 5 – Delaminação causada por falha no cobrimento da armadura.....	41
Figura 6 – Modos de falha de viga de concreto reforçada com PRF	41
Figura 7 – Perda de aderência do elemento de concreto reforçado	42
Figura 8 – Diferentes linhas de delaminação no concreto	43
Figura 9 – Modos de falha de viga de concreto reforçada com PRF	45
Figura 10 - Distribuição de tensões normais no reforço e tensões de cisalhamento na interface entre o PRF e o substrato de concreto	45
Figura 11 - Distribuição das tensões de cisalhamento na interface concreto-PRF no comprimento de ligação.....	46
Figura 12 - Ancoragem em sulco	48
Figura 13 - Vistas laterais das vigas estudadas.....	49
Figura 14 - Detalhamento das vigas estudadas.....	50
Figura 15 – Sistema de ancoragem por parafusos	51
Figura 16 – Ancoragem mecânica em laje	52
Figura 17 – Prismas com comprimentos de ancoragem variados	53
Figura 18 – Prismas mecanismos de ancoragem dos tecidos de PRFC.....	53
Figura 19 – Ancoragem por chapas de aço em “U”	54
Figura 20 – Ancoragem por chapas de aço com fixadores químicos	55
Figura 21 – Ancoragem por mantas cruzadas	56
Figura 22 – Amostras para ensaio de arrancamento.....	57
Figura 23 – Corpo de prova de concreto com a colagem do PRFC	58
Figura 24 – Variáveis testadas com os sistemas de ancoragem	59
Figura 25 - (a) feixe de fibra de carbono; (b) furação para fixação do sistema de ancoragem; (c) inserção do feixe no furo; (d) colagem da parte externa na manta	59
Figura 26 – Domínios de estado-limite último de uma seção transversal	62
Figura 27 – Fluxograma de determinação de momento fletor x curvatura da seção.....	63
Figura 28 – Esforços e deformações na seção transversal.....	64

Figura 29 – Modelo triangular de cisalhamento x deslizamento.....	67
Figura 30 – Modelos de aplicação dos reforços em PRF para cisalhamento	74
Figura 31 – Variáveis dimensionais utilizadas no dimensionamento do reforço em PRF	75
Figura 32 – Detalhamento da armadura – Vigas Grupo 1	88
Figura 33 – Detalhamento dos sistemas de reforço e ancoragem à flexão; (a) VFR; (b) VF0; (c) VF1, VF2 e VF3.....	89
Figura 34 – Detalhamento da armadura – Vigas Grupo 2.....	91
Figura 35 – Detalhamento dos sistemas de reforço ao cisalhamento	92
Figura 36 – (a) Fôrmas com armadura posicionada; (b) espaçadores da armadura	92
Figura 37 – Ensaio de abatimento de tronco de cone	93
Figura 38 – Vigas após moldagem	93
Figura 39 – Corpos de prova cilíndricos	95
Figura 40 – Preparação do substrato.....	96
Figura 41 – Preparação para aplicação da ancoragem: (a) furação; (b) conferência da profundidade; (c) execução das fendas, e; (d) arredondamento dos cantos	97
Figura 42 – Preparação do cordão	98
Figura 43 – Sistema de ancoragem aplicado	98
Figura 44 – Procedimento de corte do tecido	99
Figura 45 – Aplicação do adesivo sobre o substrato de concreto.....	100
Figura 46 – (a) colocação do tecido; (b) aplicação da segunda camada do adesivo	100
Figura 47 – Vigas com reforço aplicado: (a) flexão; (b) cisalhamento	101
Figura 48 – Vigas com aplicação de carregamento	102
Figura 49 – Esquema de ensaio – Vigas do Grupo 1.....	102
Figura 50 – Esquema de ensaio – Vigas do Grupo 2.....	103
Figura 51 – Aquisição de dados	104
Figura 52 – Detalhe da aplicação do extensômetro	106
Figura 53 – Marcação das fissuras	106
Figura 54 – Cargas de fissuração – Grupo 1	108
Figura 55 – Variação da carga de fissuração – Grupo 1.....	108
Figura 56 – Cargas de ruptura – Grupo 1	110
Figura 57 – Variação da carga de ruptura – Grupo 1	110
Figura 58 – Deslocamento vertical das vigas – Grupo 1	112
Figura 59 – Deformação específica da armadura – Grupo 1	113

Figura 60 – Deformação específica no concreto – Grupo 1	115
Figura 61 – Deformação específica no reforço – Grupo 1	116
Figura 62 – Ruptura da armadura tracionada – Viga VFR.....	117
Figura 63 – Fissuras – Viga VFR	118
Figura 64 – Panorama de fissuração – Viga VFR	118
Figura 65 – Desprendimento do reforço – Viga VF0.....	119
Figura 66 – Fissuras – Viga VF0.....	119
Figura 67 – Panorama de fissuração – Viga VF0.....	119
Figura 68 – Ruptura do reforço – Viga VF1	120
Figura 69 – Fissuras – Viga VF1.....	120
Figura 70 – Panorama de fissuração – Viga VF1.....	121
Figura 71 – Panorama de fissuração – Viga VF1.....	121
Figura 72 – Fissuras – Viga VF2	122
Figura 73 – Panorama de fissuração – Viga VF2.....	122
Figura 74 – Ruptura do reforço – Viga VF3	122
Figura 75 – Fissuras – Viga VF3.....	123
Figura 76 – Panorama de fissuração – Viga VF3.....	123
Figura 77 – Comparativo de cargas de fissuração (Teórico x Experimental) – Grupo 1	124
Figura 78 – Comparativo de cargas de fissuração (Teórico x Experimental) – Grupo 1	127
Figura 79 – Contribuição do concreto, aço e PRFC das vigas	130
Figura 80 – Modo de ruptura – Viga VCR.....	131
Figura 81 – Panorama de fissuração – Viga VCR.....	131
Figura 82 – Descolamento do reforço – Viga VC0-90.....	131
Figura 83 – Fissuras – Viga VC0-90.....	132
Figura 84 – Panorama de fissuração– Viga VC0-90	132
Figura 85 – Panorama de fissuração– Viga VC1	133
Figura 86 – Fissuras – Viga VC1	133
Figura 87 – Panorama de fissuração – Viga VC1	134
Figura 88 – Fissuras – Viga VC2	134
Figura 89 – Panorama de Fissuração – Viga VC2.....	134
Figura 90 – Ruína da viga – Viga VC3	135
Figura 91 – Panorama de fissuração – Viga VC3	135
Figura 92 – Deslocamento vertical das vigas reforçadas à 90° – Grupo 2	136

Figura 93 – Deformação específica do estribo nas vigas reforçadas à 90° – Grupo 2	137
Figura 94 – Deformação específica do concreto nas vigas reforçadas à 90° – Grupo 2.....	138
Figura 95 – Deformação específica do reforço nas vigas reforçadas à 90° – Grupo 2.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da armadura	83
Tabela 2 – Características da manta de fibra de carbono	84
Tabela 3 – Características do adesivo de impregnação	84
Tabela 4 – Características do cordão de fibra de carbono (SikaWrap®FX-50C)	85
Tabela 5 – Características da resina de impregnação da ancoragem.....	85
Tabela 6 – Características do adesivo de injeção para ancoragem.....	86
Tabela 7 – Dimensionamento preliminar à flexão da viga VFR – Grupo 1.....	89
Tabela 8 – Dimensionamento preliminar ao cisalhamento – Grupo 1	89
Tabela 9 – Controle tecnológico do concreto	94
Tabela 10 – Comparação entre as cargas e deformações específicas no escoamento do aço – Grupo 1	114
Tabela 11 – Variação entre as cargas teóricas e experimentais de fissuração– Grupo 1	124
Tabela 12 – Comparativo entre os valores teórico e experimental das cargas de desprendimento do reforço – Grupo 1	125
Tabela 13 – Comparativo entre os valores teórico e experimental das cargas de ruína das vigas – Grupo 1	126
Tabela 14 – Cargas de ruína das vigas reforçadas ao cisalhamento – Grupo 2.....	128
Tabela 15 – Comparativo dos valores teóricos e experimentais da viga VCR – Grupo 2	140
Tabela 16 – Comparativo dos valores teóricos e experimentais da viga VCR – Grupo 2	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais características e aspectos de instalação de sistemas de reforço com PRFC	33
Quadro 2 – Características do concreto	81
Quadro 3 – Consumo de materiais para dosagem do concreto.....	81
Quadro 4 – Ensaio de caracterização do agregado miúdo	82
Quadro 5 – Ensaio de caracterização do agregado graúdo	82
Quadro 6 – Especificação das vigas – Grupo 1	87
Quadro 7 – Especificação das vigas – Grupo 2	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	19
1.2 JUSTIFICATIVA	21
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo geral.....	22
1.3.2 Objetivos específicos.....	22
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1 HISTÓRICOS DA UTILIZAÇÃO DE REFORÇOS COM FIBRAS DE CARBONO	25
2.2 DEFINIÇÃO.....	26
2.3 FORMA DOS COMPÓSITOS	27
2.4 MATERIAIS CONSTITUINTES DO COMPÓSITO.....	28
2.4.1 Fibras	28
2.4.2 Matriz	32
2.5 SISTEMAS DE REFORÇOS EM PRFC	32
2.6 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE REFORÇO COM PRFC	34
2.6.1 Características dos reforços com PRFC	34
2.6.2 Aplicação do reforço em PRFC	36
2.7 COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC SUBMETIDAS À FLEXÃO	37
2.8 MODO DE RUPTURA DE VIGA DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC	38
2.9 DESCOLAMENTO OU DESTACAMENTO DO REFORÇO EM PRFC	39
2.9.1 Descolamento	40
2.9.2 Delaminação/Destacamento	40

2.10 INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA DO PRF NO CONCRETO PARA A GARANTIA DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA	43
2.11 FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA DO REFORÇO COM O CONCRETO.....	44
2.12 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ANCORAGENS.....	47
2.13 CONTRIBUIÇÕES EXPERIMENTAIS	47
2.13.1 Khalifa <i>et al.</i> (1999).....	48
2.13.2 Ferrari (2002)	48
2.13.3 Barros e Fortes (2004)	49
2.13.4 Meneghel (2005)	50
2.13.5 Chahrour e Soudki (2005).....	51
2.13.6 Maaddawy e Soudki (2007).....	51
2.13.7 Costa e Oliveira (2009).....	52
2.13.8 Mendes e SilvaCosta (2010)	54
2.13.9 Marini (2011)	57
2.13.10 Santiago (2011).....	57
2.13.11 Breña e McGuirk (2013)	58
2.13.12 Borba (2015).....	60
3 ANÁLISE TEÓRICA SIMPLIFICADA	61
3.1 COMPORTAMENTO DAS VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO	61
3.1.1 Carga de Ruptura (ELU).....	61
3.1.2 Ruptura prematura	66
3.1.3 Carga de fissuração	69
3.2 COMPORTAMENTO DAS VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO.....	71
3.2.1 Critérios da NBR 6118 (2014)	71
3.2.2 Critérios da ACI 440.2R (2008).....	73
3.2.3 Critérios da Bulletin FIB 14 (2004).....	77
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	80

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	80
4.1.1 Fôrmas	80
4.1.2 Concreto	81
4.1.3 Agregados	81
4.1.2 Aço	82
4.1.3 Sistema de reforço em PRFC	83
4.2 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS	86
4.2.1 Vigas reforçadas à flexão	86
4.2.2 Vigas reforçadas ao cisalhamento	90
4.3 PREPARO DOS PROTÓTIPOS	92
4.3.1 Moldagem dos corpos de prova	94
4.4 APLICAÇÃO DO REFORÇO	95
4.4.1 Preparação do substrato	95
4.4.2 Aplicação do sistema de ancoragem	96
4.4.3 Aplicação do reforço	99
4.5 ANÁLISE EXPERIMENTAL	101
4.5.1 Ensaio das vigas à flexão	101
4.5.2 Tipo de ensaio	102
4.5.3 Instrumentação	104
4.5.3.1 Aplicação e avaliação da carga	105
4.5.3.2 Avaliação da flecha	105
4.5.3.3 Avaliação das deformações	105
4.5.3.4 Avaliação das fissuras	106
5 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES	107
5.1 VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO	107
5.1.1 Carga de fissuração	107
5.1.2 Carga de ruptura	109

5.1.3 Deslocamentos verticais	111
5.1.4 Deformações específicas.....	113
5.1.5 Comportamento das vigas	117
5.1.6 Comparação entre resultados teóricos e experimentais.....	123
5.2 VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO	127
5.2.1 Carga de ruptura	128
5.2.2 Contribuição do PRFC.....	129
5.2.3 Comportamento das vigas	130
5.2.4 Deslocamento vertical.....	135
5.2.5 Deformação específica do aço	136
5.2.6 Deformação específica do concreto	137
5.2.7 Deformação específica do reforço	138
5.2.8 Comparação entre os resultados teóricos e experimentais	139
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	142
6.1 CONCLUSÕES.....	142
6.1.1 Vigas reforçadas à flexão – Grupo 1.....	142
6.1.2 Vigas reforçadas ao cisalhamento – Grupo 2.....	143
6.1.3 Considerações finais.....	144
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	144
7 REFERÊNCIAS	145
APÊNDICE A – Carga de ruína por desprendimento do reforço.....	151
APÊNDICE B – Processo iterativo momento - curvatura.....	151
APÊNDICE C – Carga teórica de fissuração	151
APÊNDICE D – Caracterização dos agregados	151

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A utilização do concreto armado como elemento estrutural vem sendo aprimorado ao longo dos anos. A facilidade de conformação e a boa resistência à compressão do concreto, aliada com a adição do aço para resistir aos esforços de tração, fez com que o concreto armado se desenvolvesse no mundo (CARVALHO, 2008). Entretanto, com as novas técnicas construtivas e de cálculo, essas estruturas passaram a ser construídas de forma mais esbelta, leve, econômica e racional.

Apesar da evolução destas técnicas, pode-se constatar que a qualidade e durabilidade dos elementos estruturais geraram certa preocupação. A concepção de que o concreto armado possui grande durabilidade e resistência tem sido questionada devido ao aparecimento de um número cada vez maior de patologias nas estruturas. Segundo Beber (2003), mesmo com a utilização em larga escala e seu desempenho, a durabilidade de estruturas de concreto pode ser considerada aquém do desejável.

Nesse contexto, nas últimas décadas, foi observado o desenvolvimento de técnicas de reforço que objetivam recuperar as estruturas de concreto de forma mais rápida, fácil e eficaz. Após larga utilização no setor industrial, os materiais fibrosos começaram a ser mais conhecidos na construção civil, principalmente como reforços de estruturas de concreto armado.

Com isso, a aplicação de compósitos de fibra de carbono no concreto armado tem sido difundida no mundo. A necessidade de recuperar estas estruturas, cada vez mais freqüente, aliada a facilidade de execução, leveza, rapidez e trabalhabilidade do material, além da resistência à corrosão, podem ser considerados fatores importantes na difusão da utilização dos compósitos de fibra de carbono em substituição a outros reforços, como por exemplo, as chapas de aço.

O surgimento destas novas técnicas de reforço levou a uma crescente utilização em estruturas, no entanto, o fato da aplicação do compósito ser feita por meio de colagem gera uma necessidade de se estudar melhor o comportamento conjunto dos materiais, de modo a aumentar a confiança e segurança do reforço. Muitas publicações têm dado atenção especial à zona de ligação dos materiais concreto, adesivo e PRFC (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), com o objetivo aprimorar o conhecimento do comportamento geral desta região,

criando critérios para prevenir e eliminar as rupturas prematuras (MENON e PADARATZ, 2008).

A aderência entre a manta de fibras de carbono e o substrato de concreto é um dos fatores mais estudados em pesquisas com esse sistema de reforço. Existe a possibilidade da ocorrência de ruptura prematura do elemento estrutural, caracterizada pela ocorrência nas extremidades do reforço, onde ocorrem tensões elevadas normais e tangenciais, provocando o descolamento do compósito ao concreto (MENDES e COSTA, 2010).

Entre os modos de ruptura do reforço em PRF (Polímeros Reforçados com Fibras), destacam-se dois: o descolamento do compósito em relação ao substrato de concreto na linha de colagem, ocorre em uma seção distante da extremidade de ligação entre o elemento reforçado e o reforço e; a delaminação do reforço, que ocorre com o destacamento do cobrimento de concreto próximo às extremidades do compósito (ACI 440.2R, 2008).

Em um elemento estrutural reforçado com este sistema, as forças internas no concreto devem ser transmitidas ao compósito de PRF pela interface de ligação. Quando acontece uma falha na adesão entre o compósito e o substrato, o mesmo pode perder completamente a ação de reforço (FIB-BULLETIN 14, 2004).

Conforme a ACI 440.2R (2008), a delaminação do reforço ou o descolamento do compósito, modos de ruptura de elementos reforçados, podem ocorrer se a força solicitante no PRF for maior que o substrato de concreto pode resistir.

A distribuição da tensão de cisalhamento entre o substrato de concreto e o compósito de PRF pode variar de acordo com a intensidade da força de tração no reforço. Para cargas menores a concentração de tensões está localizada mais distante da extremidade de ligação entre o concreto e o reforço, enquanto que conforme se eleva o carregamento, esse pico de tensões se aproxima do extremo do compósito (FIB-BULLETIN 14, 2004).

Neste sentido, diversas técnicas vêm sendo estudadas para melhorar a ancoragem do compósito de fibras de carbono. Costa e Oliveira (2009), afirmam que se tornou necessário, com a ampla aplicação do reforço de fibra de carbono, o aprimoramento da ancoragem destes sistemas, objetivando melhorar a utilização do material e o melhor aproveitamento do reforço quanto às solicitações.

Dessa forma, surge a necessidade de se estudar novos sistemas de ancoragem dos reforços de fibras de carbono. Com isso, o presente trabalho será baseado em um estudo experimental de sistema de ancoragem de reforços de fibra de carbono introduzido ao concreto.

1.2 JUSTIFICATIVA

O projeto de uma estrutura de concreto armado prevê uma vida útil prolongada da edificação. Porém, devido a diversos fatores, muitos são os casos em que as mesmas precisam de tratamentos corretivos em função de seu grau de deterioração apresentado. Souza e Ferrari (2012) exemplificam que, fatores como mudança de utilização da edificação, erros de projetos ou de execução, ações sísmicas ou alterações de normas técnicas podem evidenciar a necessidade da aplicação de reforços em determinadas estruturas.

Entre os métodos de incremento de capacidade de carga mais utilizados para reforços de estruturas de concreto armado, está a aplicação de compósitos de fibras de carbono. Sua eficiência em função da colagem externa nos elementos estruturais vem sendo cada vez mais estudada.

A aderência entre a manta de fibras de carbono e o substrato de concreto é um dos fatores mais estudados em pesquisas com esse sistema de reforço. Segundo Ferrari e Padaratz (2004), o desprendimento prematuro do reforço antecipa a ruína da viga reforçada, causando receio em alguns projetistas, visto que a aderência externa das fibras com a superfície de concreto é que permite a transferência de tensões entre o elemento de concreto e o reforço.

O desprendimento do compósito de fibras de carbono ao substrato da viga pode causar perda completa ou parcial da ação do reforço na transferência de tensões para o concreto, acarretando em diminuição da capacidade de carga do elemento estrutural. Esse efeito é caracterizado por ocasionar uma ruptura frágil (FIB-BULLETIN 14, 2004).

As vigas de concreto armado podem ser reforçadas à flexão e ao cisalhamento. Entre os elementos reforçados ao cisalhamento, pode-se destacar alguns sistemas: envolvimento completo, envolvimento em “U” e colagem de faixas laterais. Segundo Chen, Teng e Chen (2012) a falha em praticamente todas as vigas reforçadas com o sistema de colagem lateral e na maioria das vigas reforçadas com o processo de envolvimento em “U” é causado pelo desprendimento do compósito.

Segundo Kang *et al.*(2012), na engenharia há uma significativa preocupação sobre a segurança e eficácia dos reforços de elementos de concreto com PRF em função do grande potencial de falhas de descolamentos. Fonseca (2007) reforça a necessidade de um conhecimento cuidadoso dos compósitos utilizados e de sua aplicação, evitando resultados de desempenho muito abaixo do esperado. Segundo a autora, a utilização de adesivos à base de

resina epóxi é considerada frequentemente como eficiente, sem restrições, o que pode levar resultados desastrosos.

Alguns dados de testes existentes de ancoragem de PRF em elementos de concreto sugerem que o principal modo de falha acontece no concreto, em função da atuação de tensões de cisalhamento sobre o mesmo. Isso acontece, geralmente, poucos milímetros da superfície onde está aplicado o reforço, evidenciando, dessa forma, a dependência da resistência do concreto (CHEN e TENG, 2001).

Nesse sentido, por meio do conhecimento do problema de desprendimento do compósito com o substrato de concreto, ocasionando a ruína prematura do elemento estrutural, surge a necessidade de estudos com mecanismos de ancoragem que possibilitem a fixação do reforço em camadas internas do concreto.

Azevedo (2008) afirma que sem a utilização de sistemas de ancoragem, o reforço utilizado tem seu aproveitamento das potencialidades muito reduzido, tornando uma solução não economicamente vantajosa.

Atualmente, é imprescindível a busca por novas tecnologias que viabilizem a aplicação de novos materiais para esse meio, que possibilitem garantir eficiência e segurança, aliada a facilidade e economia na execução. Nesse sentido, fazem-se necessários estudos de novos sistemas de ancoragem de reforço estrutural de fibras de carbono.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente a eficiência da aplicação de sistema de ancoragem para reforço de vigas com fibra de carbono, submetidas à flexão e ao cisalhamento, por meio da utilização de inserção de cordão de fibra de carbono no elemento de concreto.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, delinearão-se outros objetivos específicos, que buscam:

- a) Realizar um estudo bibliográfico nacional e internacional sobre incrementos de aderência entre o compósito de fibra de carbono e o substrato de concreto;
- b) Analisar, através de ensaios, o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com manta de fibra de carbono ancorada com sistema de inserção de cordão de fibra de carbono em suas extremidades, comparando-o com as vigas reforçadas sem o sistema de ancoragem;
- c) Verificar o modo de ruína das vigas de concreto armado e analisar o quanto o sistema de ancoragem pode alterar na intensidade da carga de desprendimento do reforço;
- d) Comparar os resultados experimentais obtidos através dos ensaios em laboratórios, com os resultados teóricos analíticos;
- e) Analisar e comparar os resultados de deformação das vigas entre as reforçadas e ancoradas com o sistema de cordão de fibras de carbono e as vigas sem o sistema de ancoragem;
- f) Avaliar a viabilidade da utilização do sistema de ancoragem por cordão em vigas reforçadas por colagem externa.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho encontra-se dividida em 6 capítulos, cujas abordagens estão descritas a seguir:

O capítulo 1 se refere à introdução da dissertação, onde é apresentada uma contextualização sobre o tema em estudo, seguido da justificativa e dos objetivos da pesquisa em questão.

No capítulo 2 são apresentadas informações sobre a utilização de reforços em fibras de carbono em vigas de concreto armado, a aderência entre o compósito e o substrato e os sistemas de ancoragem e suas funções. Também são mostradas as contribuições experimentais de outros autores sobre assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

Um estudo analítico simplificado é desenvolvido no capítulo 3, objetivando prever o comportamento dos elementos estruturais estudados na pesquisa experimental.

O programa experimental é abordado no capítulo 4, onde estão descritos os sistemas de ensaios, modelos utilizados, formas de instrumentação e caracterização dos materiais componentes da pesquisa.

O Capítulo 5 é destinado a apresentação dos resultados e discussões da pesquisa experimental, além da comparação com os dados teóricos.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas por meio dos resultados experimentais e teóricos, e desenvolve sugestões para trabalhos futuros sobre o assunto estudado.

Após o capítulo 6 estão descritas as referências bibliográficas utilizadas, seguida dos apêndices.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta etapa do presente trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica, com o objetivo de fundamentar e delimitar o tema estudado, bem como promover uma discussão sobre o assunto.

2.1 HISTÓRICOS DA UTILIZAÇÃO DE REFORÇOS COM FIBRAS DE CARBONO

A aplicação de compósitos reforçados com fibras em estruturas de concreto, como substituto ao aço se iniciou em meados do século XX (RUBINSKY E RUBINSKY, 1954 *apud* SOUZA E RIPPER, 1998).

No final da década de 60, com as primeiras pesquisas sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com chapas de aço coladas com resina epóxi, no ITBTP da França, obtiveram-se resultados satisfatórios. Com isso, buscando alternativas ao aço, através de materiais mais leves e duráveis, um conjunto de pesquisadores se dedicou à investigação de novos materiais. Surgiu então a ideia de utilizar polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), material já utilizado em indústrias aeronáuticas, aeronaval, navais e automobilísticas, para reforços das estruturas de concreto armado (GALLARDO, 2002).

Em meados da década de 80, vários centros de pesquisa espalhados pelo mundo focaram seus estudos no desenvolvimento de diversos programas de pesquisa, com o objetivo de investigar esta nova técnica de reforço estrutural e seus aspectos relacionados. Assim se deu início às investigações mais avançadas sobre os reforços estruturais empregando compósitos de fibra de carbono (BEBER, 2003).

Segundo Souza e Ripper (1998), essa tecnologia para reforço de estruturas de concreto com compósito de fibras de carbono recebeu alguns importantes ajustes e se desenvolveu consideravelmente após a ocorrência do sismo de Kobe, em 1995.

A primeira aplicação de reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono no Brasil foi em 1998, na cidade de Belo Horizonte. A recuperação foi realizada para elevar a capacidade resistente do viaduto Santa Tereza, construído em 1927, à classe 45 tf (MACHADO, 2002).

Luca (2006) cita alguns outros exemplos de aplicação de PRFC:

- a) recuperação da Tower Bridge, na cidade de Londres, em 2000. Na ocasião, a aplicação do reforço não poderia alterar as características originais da ponte, por se

tratar de uma edificação que é tombada como patrimônio histórico mundial. A intervenção foi necessária devido ao aparecimento de fissuras próximos aos apoios, geradas pelas vibrações excessivas provocadas pelo intenso tráfego, e pelas movimentações térmicas, que colocavam em risco sua integridade estrutural;

Figura 1- Tower Bridge



- b) Grande Hotel, localizado na cidade de Araxá, Minas Gerais, onde foi realizada a primeira aplicação em edifícios comerciais no Brasil;
 - c) recuperação da ponte de acesso ao Peneiramento PP2 da Mina de Conceição, localizada da cidade de Itabará, Minas Gerais;
 - d) aplicação de reforço na BR-040, em viaduto de acesso ao BH Shopping, na cidade de Belo Horizonte. Nessa intervenção, não foi necessária a interrupção do tráfego;
- Além das obras citadas, existem inúmeras aplicações deste tipo de reforço no Brasil e no restante do mundo.

Borba (2015) afirma que nos últimos anos o comportamento de estruturas de concreto armado reforçadas com PRFC vem sendo objetivo de estudos a fim de analisar como é o comportamento deste sistema face aos carregamentos nele aplicados.

2.2 DEFINIÇÃO

O compósito é formado pela união de dois ou mais materiais de diferentes naturezas. Os componentes são misturados ao nível macroscópico, onde um deles pode ser chamado de fase de reforço e o outro denominado matriz, que é responsável pela impregnação do reforço. Com a junção dos constituintes, o material possui comportamento superior àquele de seus

componentes analisados separadamente. Para a utilização do reforço geralmente se forma um arranjo de fibras, podendo ser contínuas ou não, de um material resistente impregnado em uma matriz com resistência inferior à das fibras (CNR-DT 200, 2004).

Os PRF são compósitos em que os materiais unidos são fibras e matriz polimérica. Estes compósitos podem ainda fillers e aditivos em sua composição. Estes componentes podem ser adicionados para redução de custos, controles de fissuração, melhoria de propriedades mecânicas, retardadores de combustão e melhoria da trabalhabilidade (FONSECA, 2007).

Beber (2003) afirma que uma das funções da matriz polimérica no compósito é proteger as fibras, a qual forma uma fina camada entre as fibras e o ambiente. Estas matrizes protegem as fibras contra oxidação, umidade, abrasão e agentes agressivos, químicos e biológicos.

Gamino (2007) define Polímero Reforçado com Fibras (PRF) o compósito reforçado com fibras fabricado a partir de polímeros. As propriedades dos compósitos irão depender do tipo de elemento de reforço e do tipo de polímero que forma a matriz. A combinação de matrizes poliméricas com fibras de alto desempenho permite alternativas interessantes na utilização de materiais voltados para aplicação de reforço estrutural em elementos de concreto armado.

Beber (2003) complementa que as propriedades térmicas, elétricas e químicas dos compósitos podem ter resultados diferentes de acordo com a escolha da resina que compõe a matriz polimérica.

Além da união das fibras, a transmissão de tensões e deformações também é função da matriz. Dessa forma, a fibra deve estar totalmente associada à matriz, passando a ser tratada como um corpo monolítico. A resistência e a rigidez do compósito são relacionadas às fibras (SARTURI, 2014).

Fortes (2000) explica que, no compósito, o volume das fibras é consideravelmente menor que o volume da matriz, entretanto as fibras tem como principal função servir de reforço mecânico para as matrizes.

Outra função da matriz polimérica é manter as fibras posicionadas corretamente no compósito (BEBER, 2003).

2.3 FORMA DOS COMPÓSITOS

Segundo Arquez (2010), a orientação das fibras no polímero do PRFC deve estar em conformidade com esforços solicitantes, e classifica 3 sistemas distintos:

- a) Sistema Unidirecional: utilizado em estruturas lineares, onde o reforço atua em conjunto com o concreto e o aço, como as barras, cabos, fios e laminados;
- b) Sistema Bidirecional: para esse sistema, o reforço atua do aumento da resistência nas duas direções quaisquer, contidas no plano. Podem ser dados como exemplos os reforços em lajes e tabuleiros de pontes, os quais são reforçados com manta ou grelha de barras de PRFC.
- c) Sistema Multidirecional: pode ser definido como a combinação dos dois sistemas anteriores. Mais raro, esse sistema é indicado para estruturas mais complexas com comportamento e geometria tridimensionais.

2.4 MATERIAIS CONSTITUINTES DO COMPÓSITO

Nesta seção são descritas as principais características dos materiais constituintes do compósito em PRF.

2.4.1 Fibras

A fibra pode ser definida como elemento constituinte que fornece ao compósito características mecânicas como rigidez e resistência à ruptura. As fibras podem ser curtas, com alguns centímetros de comprimento, as quais são utilizadas injetadas no momento da moldagem da peça, ou longas, podendo ser cortadas após a fabricação do elemento estrutural (MENON, 2008).

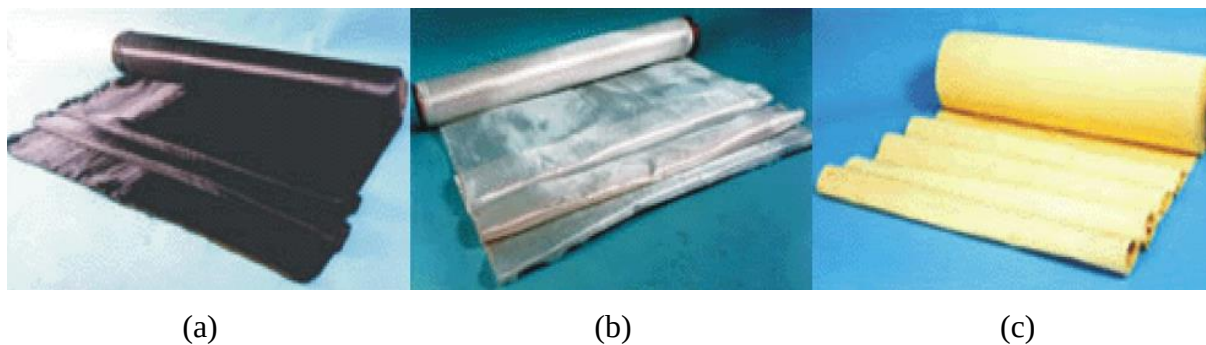
De acordo com a ACI 440-R (2008), fibras são objetos em forma de fio, natural ou sintético, cujo seu comprimento é pelo menos 100 vezes o seu diâmetro.

Meneghetti (2007) afirma que, os materiais na forma fibrosa apresentam maior rigidez e resistência, visto que há uma relação maior comprimento-diâmetro e quantidade de defeitos reduzida, o que é comum em seções transversais pequenas.

As propriedades das fibras têm grande importância na determinação das propriedades mecânicas de um polímero reforçado com fibras (PRF), visto que representam cerca de 50 a 70% da porcentagem do compósito, em volume. Para a seleção das fibras mais adequadas na formação do compósito, devem ser observadas considerações como resistência, custo, rigidez e comportamento do material ao longo do tempo. As performances podem variar de acordo com a escolha da fibra a ser utilizada (GARCEZ, 2007).

Os compósitos mais utilizados como reforço estrutural são os compostos por fibras de vidro (PRFV), fibras de aramida (PRFA) e fibras de carbono (PRFC). Há também registros de utilização de fibras de sílica, tungstênio, boro, basalto e berílio, porém em escala reduzida (MENEGETTI, 2007).

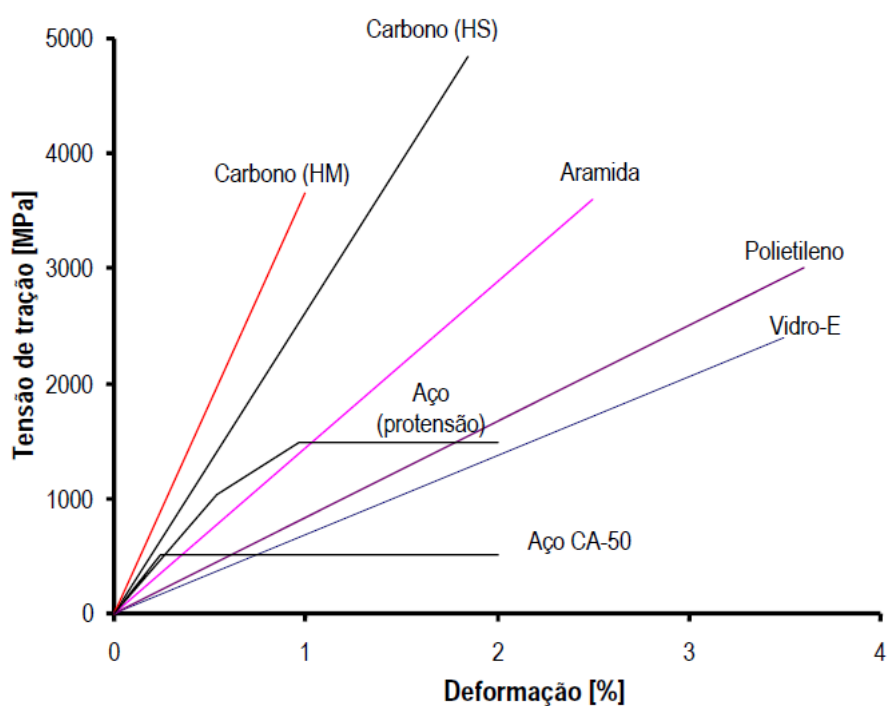
Figura 2- Aspecto visual das fibras: (a) de carbono; (b) de aramida; (c) de vidro



Fonte: Garcez *et al.* (2005)

Um comparativo entre fibras de carbono, de vidro, de aramida e o aço é mostrado pelo diagrama tensão-deformação a seguir.

Figura 3– Diagrama tensão-deformação dos PRFs e do aço



Fonte: Beber (2003)

As características das fibras de vidro, fibras de aramida e fibras de carbono serão descritas a seguir.

2.4.1.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro podem ser consideradas como as mais populares das fibras, devido ao seu custo baixo e sua alta resistência quanto embebidas em uma matriz polimérica. Porém, para algumas aplicações estruturais, as fibras de vidro não apresentam rigidez necessária. São formadas a partir de diferentes composições, baseadas na química do vidro para atingir as propriedades físicas e químicas almejadas (FERRARI, 2002).

Segundo Almeida (2004), um fator importante no comportamento das fibras de vidro são as características de superfície, visto que pequenas imperfeições podem afetar suas propriedades elásticas. O atrito das fibras de vidro com outros materiais duros pode gerar falhas. A exposição destas fibras à atmosfera também pode interferir na união com a matriz.

Para compósitos estruturais, são utilizados três tipos de fibras de vidro: E, S e AR. As fibras do tipo E são mais indicadas para aplicações elétricas, e são as mais utilizadas. Já as fibras tipo S são consideradas de alta resistência, com bom desempenho em altas temperaturas, tornando-as mais caras. As fibras do tipo AR são resistentes aos ataques álcalis do cimento (MENEGETTI, 2007).

2.4.1.2 Fibras de aramida

Bernardi (2003) caracteriza a aramida como uma fibra sintética de alto desempenho, com durabilidade superior a grande parte das fibras com características semelhantes, como a fibra de carbono, e com um custo reduzido. Ainda pouco utilizada na construção civil, a fibra de aramida é largamente empregada em outras indústrias, graças ao seu bom comportamento mecânico.

As fibras de aramida foram comercializadas inicialmente em 1972. Assim como as fibras de carbono, possuem elevada resistência e baixa densidade. Por suas características, as fibras de aramida são empregadas principalmente em cordas, cabos, proteção balística, assim como reforço de matrizes poliméricas aplicadas em quantidade maior nas indústrias aeroespacial, marítima e de automóveis (VENTURA, 2009).

Em relação à suscetibilidade de deformação e ruptura, as fibras de aramida podem ser classificadas como intermediária quando comparada com as fibras de carbono e de vidro (ACI 440-R, 2008).

2.4.1.3 Fibras de carbono

A CNR-DT 200 (2004) explica que as fibras de carbono são utilizadas para a fabricação de compósitos de alto desempenho e são caracterizadas pela sua alta resistência e elevado módulo de elasticidade.

São fabricadas a partir de um processo de carbonização de fibras de polímeros orgânicos, onde a estrutura molecular obtida é diretamente relacionada com seu comportamento mecânico. Após um processo de produção das fibras de carbono, que requer temperaturas na ordem de 3000° C, excepcionais características mecânicas, como elevado módulo de elasticidade e grande resistência à tração, podem ser adquiridos a partir do agrupamento de um conjunto de dezenas de milhares de filamentos, os quais assumem a espessura de um cabelo (SOUZA e RIPPER, 1998).

Segundo Escobar (2003), as fibras de carbono possuem um alto módulo de elasticidade, variando de 200 a 800 GPa, e a deformação última entre 0,3% e 2,5%. O autor afirma ainda que o material não absorve água, são resistentes a muitas soluções químicas, possuem excelente comportamento à fadiga, não apresentam corrosão sob tensão, não fissuram e apresentam menor taxa de relaxação quando comparada às cordoalhas de protensão de aço de relaxação baixa.

Sarturi (2014) descreve algumas características das fibras de carbono:

- a) possuem os maiores módulos de elasticidade e as maiores resistências entre todos os materiais utilizados em reforços;
- b) retém módulos de tração elevados e grandes resistências mesmo em temperaturas elevadas, podendo ser problemática a situação de oxidação por altas temperaturas;
- c) não são afetadas por umidade ou variedade de solventes, tanto ácido como básicos, em temperatura ambiente;
- d) desenvolveu-se processos de fabricação do material relativamente baratos, possibilitando boa relação custo-benefício;
- e) possuem a maior relação entre resistência e rigidez e o peso próprio;

Permite diversas aplicações em função da variedade de características físicas e mecânicas.

2.4.2 Matriz

Para polímeros reforçados com fibras, as matrizes atuam como um material com a função de ligar as fibras em conjunto, transferir os esforços e protege-las contra o ataque ambiental e danos devido ao manuseio (ACI 440-R, 2008).

Outra função das matrizes poliméricas é atuar como protetora das fibras. A mesma forma uma camada entre as fibras e o ambiente, a qual protege contra umidade, oxidação, abrasão e agente agressivos, de natureza química e biológica (BEBER, 2003).

A CNR-DT 200 (2004) cita alguns tipos de matrizes poliméricas utilizadas em compósitos para reforço:

- a) resina epóxi: são caracterizadas por boa resistência quanto a ataques de agentes químicos e umidade. Possuem ótimas propriedades adesivas.
- b) resina de poliéster: caracterizam-se por uma viscosidade mais baixa do que a do epóxi e são bastante versáteis. Possuem resistência mecânica e propriedades adesivas mais baixas que a resina epóxi.

Em contrapartida às melhores características mecânicas da resina epóxi, o custo da resina poliéster é mais baixo (FIB-BULLETIN 14, 2004).

2.5 SISTEMAS DE REFORÇOS EM PRFC

Menon (2008) classifica em duas categorias os compósitos de fibra de carbono para utilização em concreto armado: como barras e grelhas para utilização como substituto do aço, e como tecidos e laminados para sistemas de reforço. Estes últimos podem ser divididos em sistemas pré-fabricados e sistemas curados *in situ*.

Os laminados, que fazem parte do sistema de reforço pré-fabricado, se apresentam como um material industrializado, com seção e rigidez definida, visto que se apresentam totalmente curados. Pode ser observada uma maximização da resistência e rigidez nesse sistema em função da orientação unidirecional das fibras. Dessa forma, ele é indicado para esforços provenientes de cisalhamento e flexão, por exemplo (ARQUEZ, 2010).

A principal vantagem do sistema pré-fabricado, os laminados, é a garantia de uma incorporação maior de fibras de carbono no compósito, deixando-o com espessura maior (SANTIAGO, 2011).

Nos sistemas curados *in situ*, a resina de impregnação das fibras se comporta como agente adesivo e de polimerização do compósito. Também chamado de resina de saturação, o adesivo também desempenha o papel de matriz polimérica, promovendo a transferência de esforços entre as fibras e das fibras para o substrato do elemento reforçado (BEBER, 2003).

Algumas características dos dois sistemas são mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais características e aspectos de instalação de sistemas de reforço com PRFC

Características	Sistemas pré-fabricados	Sistemas curados <i>in situ</i>
Forma	Tiras ou laminados	Mantas ou tecidos
Espessura	1,0 a 1,5 mm	0,1 a 0,5 mm
Utilização	Colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo	Colagem e impregnação das mantas e tecidos com resina (moldado e curado <i>in situ</i>)
Aspectos típicos da instalação	Salvo condições especiais, aplicável somente em superfícies planas	Independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos
	Adesivo tixotrópico para colagem	Resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação
	Geralmente uma única camada	Frequentemente várias camadas
	Rigidez do compósito e tixotropia do adesivo permitem a tolerância de algumas imperfeições na superfície reforçada	Aplicação do <i>putty</i> é necessária para prevenir o descolamento por imperfeição da superfície
	Aplicação simplificada, maior garantia de qualidade (sistema pré-fabricado)	Versatilidade de aplicação, necessita de rigoroso controle de qualidade
	Controle de qualidade (má aplicação e mão de obra de baixa qualidade = perda da ação compósita entre o reforço e a estrutura, problemas da integridade do reforço a longo prazo)	

Fonte: Beber (2003)

No mercado, as mantas e tecidos disponíveis para aplicação como reparo ou reforço de estruturas, podem ser fornecidas em forma de rolos pré-impregnadas com resina ou secas, sem

resina. As mantas pré-impregnadas são fornecidas com resina para manter o alinhamento das fibras e facilitar o manuseio (GARCEZ, 2007).

2.6 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE REFORÇO COM PRFC

Nesta seção, serão discutidas informações quanto às características de reforço em fibras de carbono, bem como sua aplicação para recuperação de estruturas de concreto armado.

2.6.1 Características dos reforços com PRFC

Algumas características e propriedades dos polímeros reforçados em fibras de carbono são descritas à seguir.

2.6.1.1 Durabilidade

Os compósitos reforçados com fibras de carbono não são deteriorados em função da ação dos agentes agressivos químicos biológicos ou físicos, sendo vantajoso com relação as chapas de aço. Uma atenção especial deve ser dispensada quanto a exposição solar (BEBER, 2003).

As condições ambientais devem ser levadas em consideração desde o início do processo de concepção estrutural, de modo que as influências relacionadas à durabilidade sejam consideradas e, se necessário, possam ser tomadas medidas de proteção (FIB-BULLETIN 14, 2004).

2.6.1.2 Exposição solar

Os materiais poliméricos sofrem degradação quando expostos a radiação UVA e UVB, podendo provocar a dissociação das ligações químicas. Após esse processo, a reação com o oxigênio pode acarretar em uma oxidação, assim como o corte da cadeia, a ligação cruzada ou a perda de outras pequenas moléculas (FIB-BULLETIN 14, 2004).

Segundo a ACI 440-R (2008), é extremamente recomendado que barras de FRP sejam protegidas da exposição direta da luz solar, antes da aplicação no concreto.

Vaz, Aguiar e Camões (2005), concluem em seu trabalho que o PRFC, quando aplicado em ambientes quentes, necessita de cuidados especiais. Dessa forma, pode-se registrar temperaturas bastante elevadas capazes de afetar a eficácia do reforço, mesmo em uma simples exposição solar.

2.6.1.3 Temperatura

Fortes *et al.* (2003), avalia em seu trabalho a influência da temperatura na capacidade resistente de elementos estruturais de concreto reforçados com laminados ou mantas de PRFC por colagem externa e reforçados com laminados de PRFC em entalhes realizados no concreto. Foi constatada variação de 15% da capacidade resistente das peças de concreto quando foi elevada a temperatura de 30°C para 70°C, e 30% quando alcançada a temperatura de 150°C. Os autores afirmam a importância de se utilizar um coeficiente de minoração da capacidade resistente no dimensionamento de estruturas reforçadas com PRFC, principalmente quando as mesmas possuem riscos elevados de incêndio.

Ainda segundo Fortes *et al.* (2003), os laminados aplicados em entalhes apresentaram cargas de ruptura maiores que as reforçadas por colagem externa, o que mostra que a proteção do compósito torna a estrutura mais eficaz.

Quanto à temperatura do ambiente, é recomendável também que o adesivo utilizado no reforço em PRFC possua uma temperatura de transição vítrea 10°C a 20°C superior à temperatura máxima prevista no local, que se possa prever proteção do reforço por aplicação de sistemas de isolamento térmico e que haja supervisão adequada em sua execução (VAZ, AGUIAR e CAMÕES, 2005).

2.6.1.4 Manutenção

Os materiais compósitos não necessitam de manutenção periódica, diminuindo os custos da adoção deste sistema, ao contrário dos reforços em chapas de aço que precisam de pinturas protetoras, acarretando em elevados custos operacional (BEBER, 2003).

2.6.1.5 Facilidade de execução

Fortes, Barros e Padaratz (2002) citavam que o sistema de reforço utilizando chapas metálicas já vinha sendo substituído pela técnica de colagem de PRFC devido, principalmente, à facilidade da aplicação do sistema e das excelentes propriedades mecânicas do compósito.

O peso específico reduzido dos compósitos em PRFC confere uma maior facilidade no transporte e manuseio do material (DIAS, JUVANDES e FIGUEIRAS, 2004).

De acordo com Ferrari (2002), o baixo peso, flexibilidade e facilidade no manuseio permitem sua aplicação em espaços restritos. O reduzido peso específico dos compósitos de PRFC proporciona uma facilidade de transporte e de manuseamento.

Conforme Araújo (2002), os polímeros reforçados com fibras são constituídos pelas fibras (componente estrutural) e pela resina polimérica (componente matricial).

As principais formas comercializadas dos compósito em discussão, dividem-se em três grupos: unidirecionais, bidirecionais e multidirecionais (JUVANDES, 1999).

O adesivo é o responsável pela colagem e transferência de tensões entre o compósito e o elemento solicitado, permitindo que os materiais funcionem em conjunto na resposta às ações aplicadas. No sistema de reforço curado ‘*in situ*’, o adesivo de colagem do compósito à estrutura é a própria resina, que, neste caso, é responsável não só pela transmissão de tensões do compósito para o elemento estrutural, como também do compósito para as fibras do reforço. A resina mais utilizada para esse caso é a do tipo epóxi (BEBER, 2003).

Os compósitos de fibras de carbono podem ser projetados com o objetivo de atender a casos particulares, sendo possível a variação das proporções de fibra e resina, modificando as propriedades do compósito para a aplicação na solução particular. Segundo o autor, vêm sendo utilizados compósitos de fibra de carbono com resistência de 3 a 5 vezes maior que o do aço, para a aplicação em reforços estruturais (BEBER, 2003).

2.6.2 Aplicação do reforço em PRFC

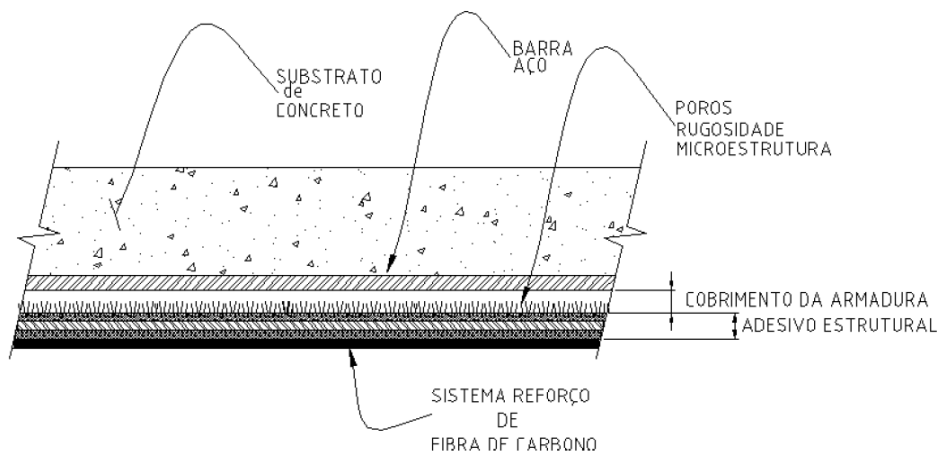
Segundo Marini (2011), a execução de qualquer sistema de reforço com fibras de carbono deve seguir as seguintes etapas:

- a) preparação do substrato;
- b) aplicação do adesivo para “colagem da fibra”;
- c) aplicação da fibra de carbono;

d) aplicação da resina de impregnação sobre as fibras.

Meneghetti (2007) afirma que um desempenho eficiente do sistema de reforço depende da competência da equipe que executa o trabalho, e que as etapas devem receber atenção tanto dos operários quanto do engenheiro responsável.

Figura 4 – Ilustração do sistema de reforço em concreto com PRFC



Fonte: Marini (2011)

2.7 COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC SUBMETIDAS À FLEXÃO

As edificações existentes durante a ocorrência do sismo Kobe, e anteriormente a ele, tinham suas estruturas analisadas quanto ao reforço com compósitos de fibras de carbono no sentido do aumento da capacidade resistente dos elementos, seja na flexão ou ao esforço transversal. Posteriormente, a orientação passou a ser no sentido do aumento da ductilidade (SOUZA e RIPPER, 1998).

Juvandes (1999) apresentou em sua pesquisa ensaios que determinaram um comportamento linear dos compósitos de fibras de carbono até sua ruptura, sem uma reserva plástica de deformação, ou seja, ruptura frágil. Quando aplicados como reforço em vigas, os modelos apresentaram um comportamento inicial linear elástico, acompanhados do surgimento de fissuras limitadas à região central do momento fletor.

Segundo Menon (2008), o fato de o comportamento do compósito ser linear até a ruptura é considerado um problema quanto à ductilidade da estrutura de concreto, principalmente perante ações sísmicas.

Escobar (2003) afirma ainda que, apesar de apresentarem excelentes qualidades, o uso de PRFC em estruturas requer atenção especial ao projeto para garantir a segurança da edificação quanto a uma possível ruptura repentina do material, visto seu comportamento elástico linear.

Araújo (2002) apresenta que, para o dimensionamento de vigas reforçadas com fibras de carbono, a teoria da flexão simples pode ser utilizada para avaliar a sua capacidade resistente, desde que sejam estabelecidos limites adequados para a deformação do reforço e os possíveis modos de ruptura da viga.

2.8 MODO DE RUPTURA DE VIGA DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC

Gamino (2007) divide em duas classes os modos de ruína de elementos de concreto armado reforçados à flexão externamente com compósitos de PRF. A primeira é quando o compósito é acionado completamente até a ruptura do concreto. Este caso representa o modo de ruína clássico de estruturas de concreto armado, podendo ocorrer escoamento da armadura seguida de esmagamento do concreto, escoamento da armadura seguida de ruptura do compósito e esmagamento do concreto. A segunda se refere às condições em que a ruptura ocorre antes da ação completa do PRF. Neste, o modo de ruína é caracterizado pelo descolamento do compósito ou falha na ligação com o substrato de concreto.

Juvandes (1999) cita em sua tese que alguns ensaios com laminados de PRFC, executados por pesquisadores do EMPA, tais como Kaiser (1989), Deuring (1993) e Meier *et al.* (1993), conduzem à observação de alguns modos de ruptura dos elementos reforçados:

- a) ruptura brusca na seção mais tracionada do reforço em PRFC, após o surgimento de fissuras e deformações excessivas no concreto;
- b) esmagamento da região comprimida do concreto;
- c) escorregamento de uma seção do concreto por esforço transversal;
- d) destacamento do reforço devido ao deslizamento do concreto na região tracionada, ocasionando em ruptura prematura, de forma brusca;
- e) corte interlaminar ou delaminação do reforço em PRFC;
- f) esgotamento da resistência à fadiga.

Segundo Juvandes (1999), há ainda alguns outros modos de ruptura que não foram citados anteriormente, como:

- g) ruptura na coesão interna do adesivo;
- h) ruptura de aderência entre o laminado e o adesivo;
- i) ruptura de aderência entre o concreto e o adesivo

Gamino (2007) explica que, quando ocorre um descolamento do compósito ao substrato de concreto, e a ação do mesmo é perdida, fazendo com que o elemento perca sua capacidade de receber carga, este modo de ruína é chamado de “*peeling-off*”. Dessa forma, sem a distribuição de tensões do reforço para o elemento de concreto reforçado, a ruína ocorre de forma brusca, podendo ser caracterizada como ruptura frágil.

Essa falha na ligação entre compósito e concreto pode ocorrer em diferentes interfaces como, na zona de ancoragem não fissurada, causada por fissuras de flexão, por fissuras de cisalhamento, ou ainda por irregularidades na superfície do substrato, o qual provoca um acúmulo de tensões (GAMINO, 2007).

No caso de sistema de reforço aplicado externamente, uma falha de aderência entre o concreto e o PRF pode ocasionar perda completa da ação do compósito (FIB-BULLETIN 14, 2004).

Segundo Fib-Bulletin 14 (2004), a maioria das falhas observadas em testes de flexão de elementos em concreto reforçados com o sistema EBR são causadas pelo *peeling-off* do compósito, sendo que o ponto mais fraco da ligação é a camada de concreto próximo à superfície.

2.9 DESCOLAMENTO OU DESTACAMENTO DO REFORÇO EM PRFC

Nos elementos reforçados com laminados ou mantas flexíveis, o papel da ligação entre o concreto e o compósito é de grande importância visto que a perda de adesão entre os materiais ocasiona um mecanismo de ruptura do tipo frágil. Pelo princípio hierárquico do mecanismo de resistência, essa falta de aderência não deve preceder o colapso por flexão ou cisalhamento do elemento reforçado (CNR-DT 200, 2004).

Entre os tipos de falha na aderência do compósito com o concreto estão o descolamento e a delaminação/desprendimento. A delaminação ou o descolamento do compósito PRF pode ocorrer se a força atuante no reforço não puder ser resistida pelo substrato de concreto. Esse comportamento é considerado como um desligamento, independentemente da região onde a falha acontece (ACI 440-2R, 2008).

2.9.1 Descolamento

Fib-Bulletin 14 (2004) define descolamento como uma falha local na zona de aderência entre o concreto e o reforço.

De maneira geral, o descolamento do PRFC surge mesmo com um baixo nível de aumento de capacidade de carga do elemento submetido à flexão. Isso pode acontecer devido a problemas na fase de aplicação do reforço, como ancoragem inadequada e propriedades insuficientes das resinas (FERRARI, 2002).

O descolamento do PRF pode iniciar a partir de fissuras de flexão, fissuras de flexão/cisalhamento ou ambas, geralmente próximo à região de momento fletor máximo. Sob carregamento, estas fissuras induzem uma alta tensão de cisalhamento que provoca o descolamento na interface do reforço (ACI 440-2R, 2008).

Normalmente, a falha por descolamento não envolve o agregado do concreto, progredindo através de uma camada fina e rica em argamassa que compreende a superfície do concreto (ACI 440-2R, 2008).

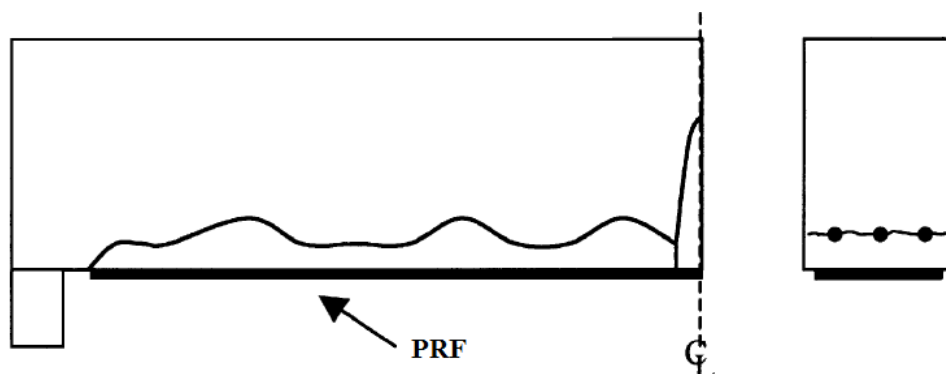
As propriedades do concreto desempenham um papel fundamental em relação às falhas por descolamento. Estudos indicam que quase todas as vigas ensaiadas com sistema de reforço por colagem lateral ou por colagem em “U”, tiveram seus modos de ruptura por falha na interface de colagem (CHEN e TENG, 2003).

2.9.2 Delaminação/Destacamento

Conforme a CNR-DT 200 (2004), a delaminação nas extremidades do reforço pode ocorrer por diversos fatores, como a localização da área de formação de fissuras e seu tipo, a presença de irregularidades na superfície e a concentração de tensões na região de ancoragem.

A delaminação do reforço pode ser causada pelas tensões normais desenvolvidas nas extremidades do PRF, colado externamente. Nesse tipo de falha, a armadura de aço atua como um interruptor de ligação do concreto, fazendo com que o cobrimento da viga se afaste do restante do elemento estrutural, conforme Figura 5 (ACI 440-2R, 2008).

Figura 5 – Delaminação causada por falha no cobrimento da armadura

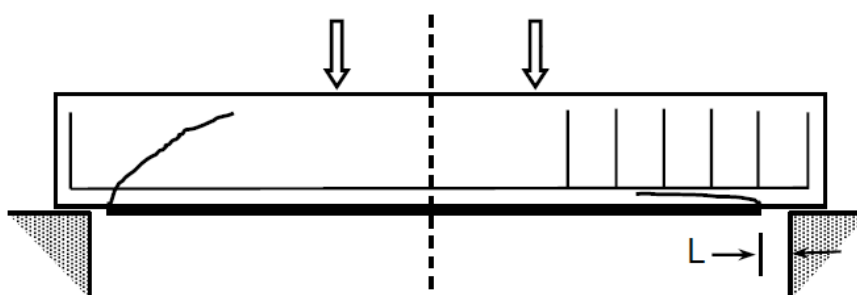


Fonte: Adaptado de ACI 440-2R (2008)

Em caso de desprendimento do PRFC, isso acontece em casos de vigas de concreto com baixa resistência à tração e/ou cobrimento da armadura insuficiente, após aumento de capacidade de carga considerável. Em vigas com concreto de alta resistência à compressão se observa a ocorrência do destacamento do PRFC semelhando ao descolamento, sem a retirada de pedaços expressivos de concreto aderidos ao compósito (FERRARI, 2002).

Estudos realizadas por Oehlers e Moran (1990) e Jansze (1997), indicam que quando os reforços colados externamente tiverem suas extremidades de ancoragem a uma certa distância dos apoios, uma fissura quase vertical pode iniciar ao final do PRF, continuando a crescer inclinada. Entretanto, em função dos estribos verticais internos, as fendas ocorrem na camada de cobrimento de concreto, surgindo a delaminação, conforme mostrada na Figura 6 (FIB-BULLETIN 14, 2004).

Figura 6 – Modos de falha de viga de concreto reforçada com PRF

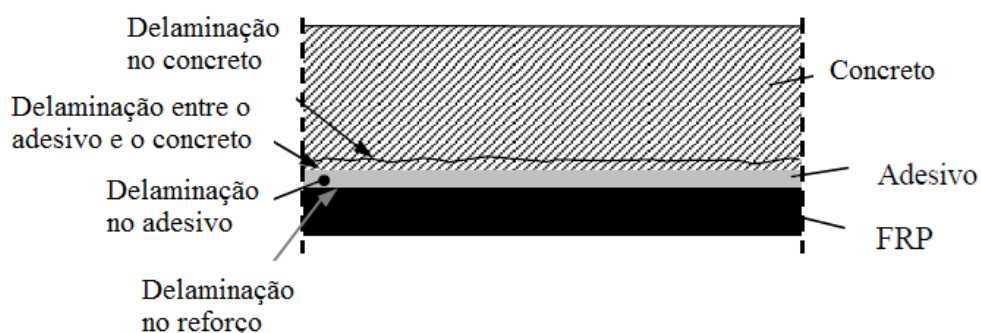


Fonte: Fib-Bulletin 14 (2004)

A delaminação pode ocorrer no adesivo, entre o concreto e o adesivo, no concreto ou no reforço em fibras. Em casos de reforços aplicados corretamente, uma vez que a resistência

do adesivo é muito maior que a do concreto, a delaminação ocorre causando uma remoção de uma camada do material, cuja espessura pode variar entre alguns milímetros ou até mesmo comprometer todo o cobrimento de concreto para a armadura (CNR-DT 200, 2004).

Figura 7 – Perda de aderência do elemento de concreto reforçado

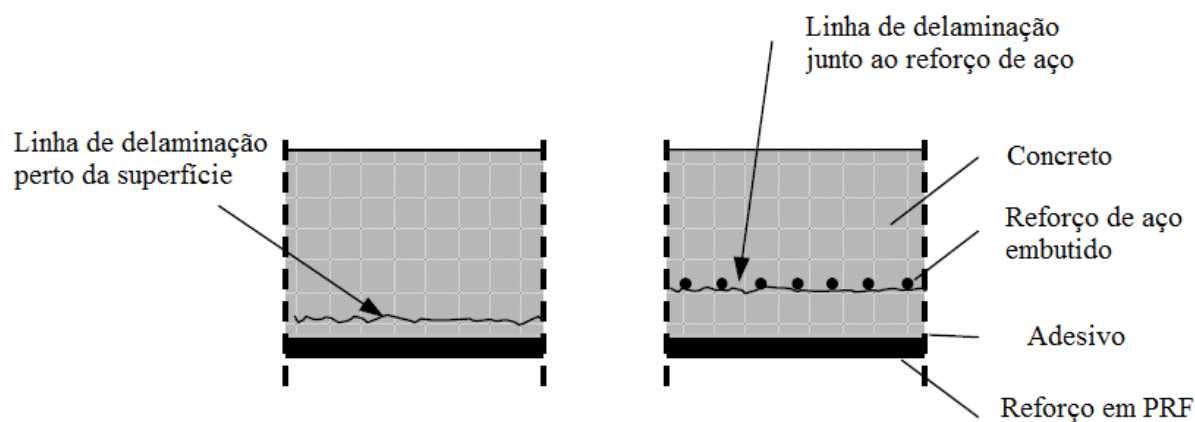


Fonte: Adaptado de CNR-DT 200 (2004)

Fib-Bulletin 14 (2004) explica cada tipo de delaminação em vigas de concreto armado com polímeros reforçados com fibras:

- delaminação no concreto: ocorre no concreto ou perto da superfície ao longo de uma camada enfraquecida, como por exemplo, a linha reforçada pelo aço;
- delaminação no adesivo: geralmente esse mecanismo não ocorre em função da resistência à tração e ao cisalhamento da resina normalmente ser maior que no concreto. Isso somente pode acontecer se a resistência do adesivo for mais baixa que a do concreto, como por exemplo em altas temperaturas ou quando a resistência do concreto for elevada.
- delaminação na interface entre o concreto e o adesivo: esse tipo de ruptura só ocorrerá se houver insuficiente preparação da superfície de concreto durante o processo de aplicação de PRF, pois a força de coesão de resinas epóxi é mais baixa do que a força de adesão.
- delaminação no reforço: pode ser explicado como uma falha de cisalhamento interlaminar. Como o reforço é um compósito, o descolamento pode ocorrer entre as fibras e a resina. Este mecanismo de falha irá ocorrer uma vez que a propagação de fissuras no PRF é mais propícia que no concreto, como em casos de concretos de alta resistência. Entretanto, esse é um modo de falha secundário, que ocorre somente após iniciar a fratura de ligação no concreto, não determinando, neste caso, a resistência da ligação.

Figura 8 – Diferentes linhas de delaminação no concreto



Fonte: Adaptado de Fib-Bulletin 14 (2004)

Se o efeito de delaminação acontecer antes de qualquer outro mecanismo de falha, o elemento estrutural pode sofrer uma ruptura frágil (CNR-DT 200, 2004).

2.10 INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA DO PRF NO CONCRETO PARA A GARANTIA DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA

Conforme Molina *et al.* (2011), a capacidade do reforço está diretamente ligada a capacidade de ancoragem na interface PRF – concreto. Na medida em que o concreto é capaz de transferir as tensões ao compósito, este é solicitado e colabora com o mecanismo de resistência do elemento estrutural.

O projeto de reforço em PRF no sistema EBR deve considerar a capacidade de transferência de forças por meio da interface de ligação com o concreto (FIB-BULLETIN 14, 2004).

Conhecer o comportamento na interface entre o PRF e o concreto é fundamental para garantir a segurança do reforço (MOLINA *et al.*, 2011).

Nos modelos de cálculo, várias relações são propostas com o objetivo de estimar a carga de descolamento do reforço em PRF do substrato de concreto, geralmente baseadas em parâmetros calibrados a partir de testes experimentais (COLOMBI, FAVA e POGGI, 2014).

Tem-se como exemplo o modelo proposto pela ACI 440-2R (2008), para a determinação do momento fletor resistente de um elemento reforçado com PRF, é utilizado um fator de redução ψ_f aplicado na contribuição do reforço à flexão. Recomenda-se que o valor deste

coeficiente seja de 0,85. A utilização deste é baseada na confiabilidade do reforço, visto os diferentes modos de ruptura, em função de pesquisa estatística elaborada por Okeil *et al.* (2007).

Em uma pesquisa analítica, baseada em resultados teóricos e experimentais, Chen, Teng e Chen (2013) concluíram que o modelo de cálculo de reforço em PRF ao cisalhamento da ACI 440.2R (2008) mostra desempenho insatisfatório, provavelmente, devido à sua natureza empírica e a utilização de modelo inadequado para o comprimento de ligação com o concreto. Segundo os autores, a CNR-DT 200 (2004) geralmente apresenta previsões conservadoras para reforços em tiras laterais de PRF, porém nos de envolvimento em “U” sua resistência é superestimada.

2.11 FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA DO REFORÇO COM O CONCRETO

Em reforços de elementos de concreto armado, a ligação entre o PRF e o substrato de concreto é um fator muito importante. A aderência entre a interface é influenciada pelas propriedades físicas e mecânicas do concreto, compósito e adesivo, bem como pelo tratamento da superfície do substrato de concreto (COLOMBI, FAVA e POGGI, 2014).

Em um sistema de reforço de PRF colado, o elo mais fraco na interface entre o substrato e o compósito é o concreto. A eficácia total do sistema fica, dessa forma, limitada à resistência à tração do concreto (ACI 440-2R, 2008).

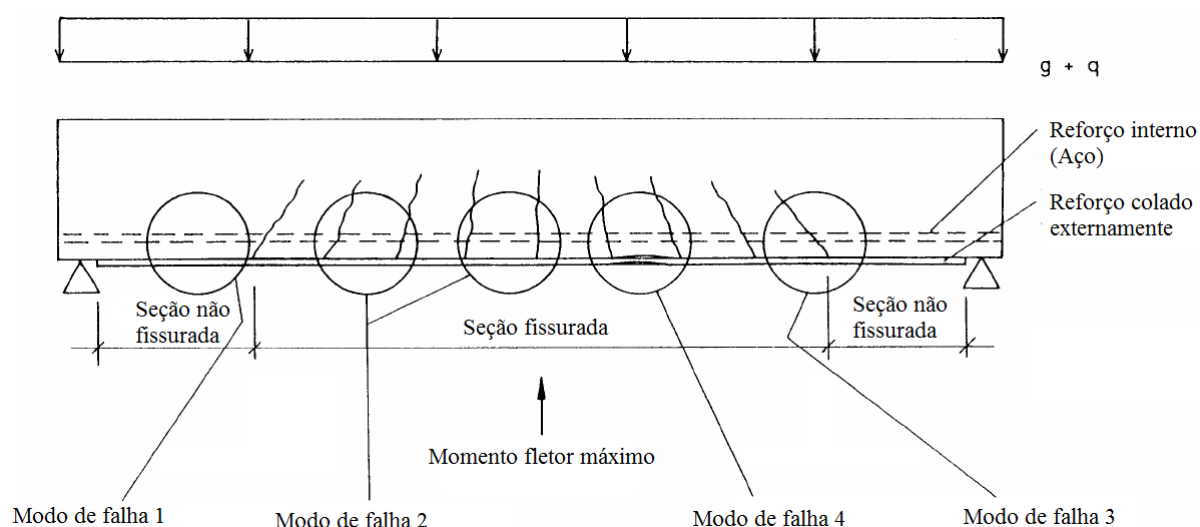
Chen e Teng (2001) afirmam que o principal modo de falha de reforços em PRF acontece pelo efeito de tensões de cisalhamento no concreto, ocorrendo geralmente a poucos milímetros da superfície de colagem do compósito. Os autores concluem que a resistência de ligação na interface depende diretamente da resistência do concreto.

Alguns modos de falhas relacionados com a superfície de colagem do reforço em PRF são relacionados a seguir, conforme Figura 9 (FIB-BULLETIN 14, 2004):

- a) modo de falha 1: o compósito PRF pode delaminar-se na zona de ancoragem ocasionada por uma fratura de cisalhamento no concreto;
- b) modo de falha 2: fissuras verticais no concreto causadas pelo efeito da flexão podem propagar-se horizontalmente, gerando descolamento do PRF em regiões longe da ancoragem do reforço;
- c) modo de falha 3: destacamento do PRF ocasionado por fissuras de cisalhamento do concreto, a qual provoca aberturas verticais e horizontais no elemento;

- d) modo de falha 4: fratura causado pela irregularidade da superfície de concreto. Essas irregularidades podem ocasionar descolamento localizado do PRF, podendo propagar o *peeling-off*.

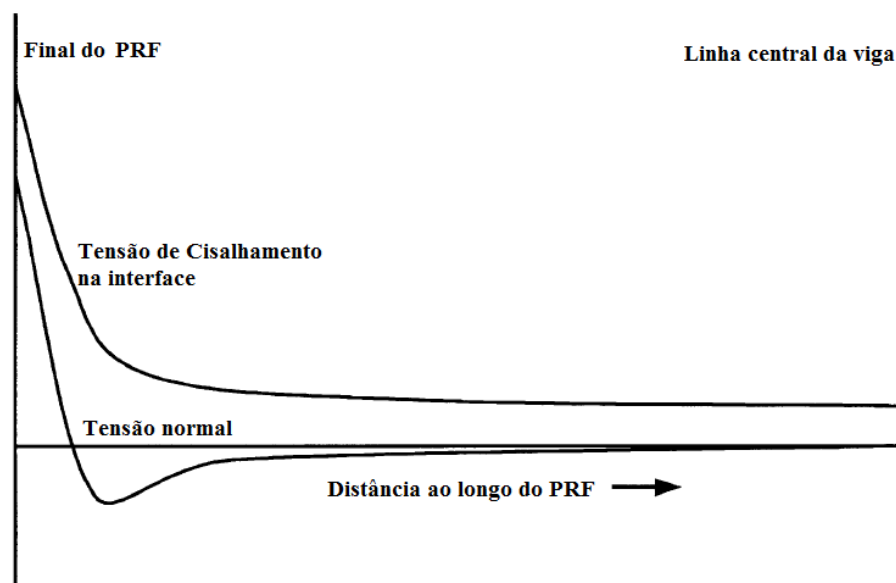
Figura 9 – Modos de falha de viga de concreto reforçada com PRF



Fonte: Adaptado de Blaschko *et al.* (1998) *apud* Fib-Bulletin 14 (2004)

A distribuição das tensões de cisalhamento na interface de ligação entre o concreto e o reforço em PRF, e as tensões normais ao longo do compósito é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Distribuição de tensões normais no reforço e tensões de cisalhamento na interface entre o PRF e o substrato de concreto

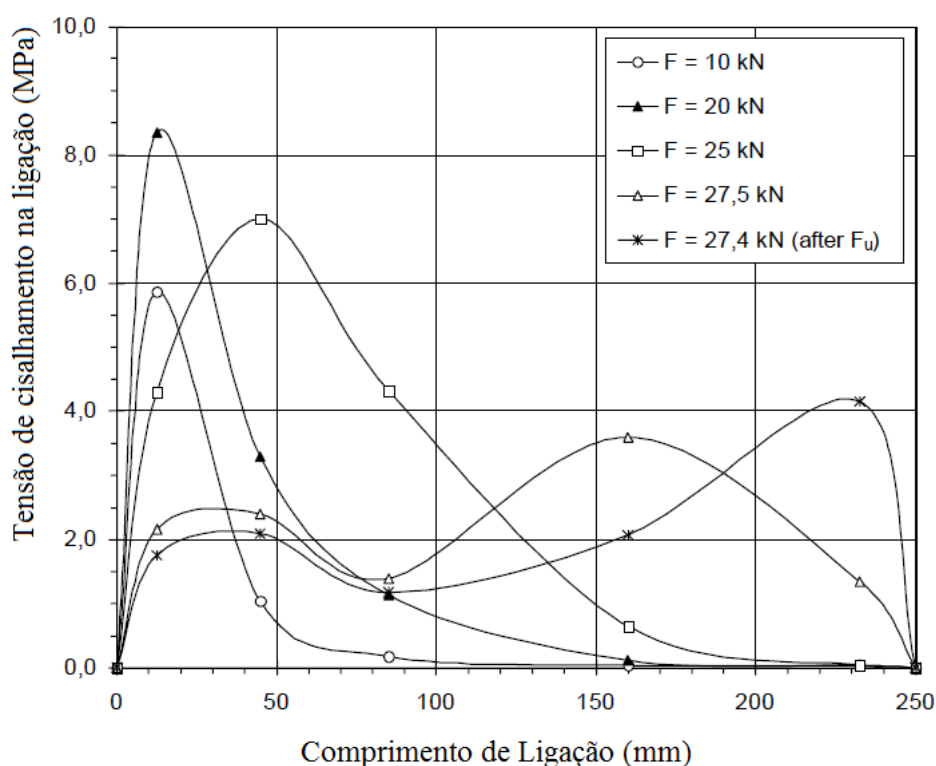


Fonte: Adaptado de Roberts e Haji-Kazemi (1989) e Makel *et al.*, (1998) *apud* ACI 440-2R (2008)

Outro aspecto importante sobre o comportamento de aderência entre o reforço e o substrato é que existe um comprimento de ligação ótimo. Dessa forma, mesmo sendo aumentado esse comprimento, a resistência da união pode não melhorar (CHEN e TENG, 2001).

A distribuição das tensões de cisalhamento ao longo do comprimento de ligação de um reforço em PRFC pode variar para diferentes níveis de carregamento, como mostrado na Figura 11. Em elementos tracionados, para baixos níveis de carregamentos, as tensões estão concentradas mais distantes da extremidade do reforço. Enquanto as cargas são aumentadas, a concentração da tensão de cisalhamento é deslocada para o limite da colagem da fibra. Para elementos fletidos, a distribuição exata é influenciada por tensões normais ocasionadas pelo efeito de flexão (FIB-BULLETIN 14, 2004).

Figura 11 - Distribuição das tensões de cisalhamento na interface concreto-PRF no comprimento de ligação



Fonte: Adaptado de Fib-Bulletin 14 (2004)

2.12 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM

Um projeto baseado na previsão da força de delaminação do reforço em PRF não é confiável em função da complexidade das variáveis que podem influenciar nesse efeito, tais como a resistência à tração do concreto. Entretanto, utilizar uma concepção com base na resistência à tração do PRF também não pode ser levado em consideração visto que o reforço não desenvolve sua capacidade máxima a menos que as forças na fibra seja transferidas para o concreto por meio de sistemas de ancoragem (KIM, JIRSA e BAYRAK, 2013).

Sistemas de ancoragem mecânicas pode fornecer uma solução eficiente para os casos em que o comprimento de colagem do PRF não é suficiente para aproveitar sua capacidade total (Khalifa *et al.*, 1999).

Segundo Greele e Sneed (2013), apesar de a ligação do PRF ser o papel crítico do sistema de reforço em uma viga de concreto reforçada, há uma falta de conhecimento aprofundado sobre o comportamento dos sistemas de ancoragem do reforço.

Falhas por delaminação do cobrimento no concreto podem ser evitadas desde que controlado o nível de tensões no ponto final do PRF. Em geral, esse modo de falha pode ser minimizado com a utilização de ancoragens (ACI 440-2R, 2008).

Para CNR-DT 200 (2004), quando utilizados sistemas de ancoragem especiais, pode-se desconsiderar a aplicação de coeficientes de segurança específicos para o caso de delaminação, desde que se tenha certificação do dispositivo de ancoragem baseada em estudos experimentais. Tais estudos devem apresentar os materiais utilizados, o sistema específico, a sequência de aplicação fornecida pelo fabricante, os tempos de execução e condições ambientais.

Entretanto, conforme a ACI 440-2R (2008), o desempenho estrutural de qualquer sistema de ancoragem de reforço em PRF deve ser fundamentado por testes.

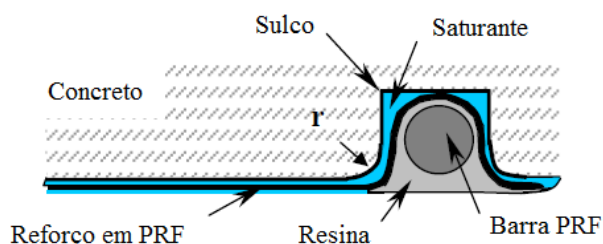
2.13 CONTRIBUIÇÕES EXPERIMENTAIS

Neste item, serão apresentados trabalhos experimentais que tem como tema principal assuntos relacionados com o tema deste trabalho. Dessa forma, serão descritas pesquisas envolvendo análises de sistemas de ancoragem de reforço com manta de fibras de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão. Também serão apresentados estudos sobre a aderência entre o compósito e o substrato de concreto.

2.13.1 Khalifa *et al.* (1999)

Nesta pesquisa os autores estudaram um sistema de ancoragem de reforço por polímeros de fibras baseado na ideia de incorporar uma porção dobrada da extremidade (ou próximo) do reforço em PRF em um sulco executado no concreto. A ranhura é preenchida com a resina e pode, ou não, ser utilizada com uma barra transversal, conforme Figura 12.

Figura 12 - Ancoragem em sulco



Fonte: Adaptado de Khalifa *et al.* (1999)

Segundo os autores, o sistema proporcionou um acréscimo de resistência do elemento estrutural, comparado a outro elemento sem o sistema de ancoragem. Observou-se nas amostras ensaiadas que não houve descolamento do reforço em relação ao substrato de concreto.

2.13.2 Ferrari (2002)

Em sua dissertação de mestrado, o autor submeteu nove vigas de concreto armado, com armaduras longitudinal e transversal idênticas, à ensaios de flexão por quatro pontos. Foram analisados diferentes mecanismos de ancoragem de reforços em PRFC, os quais foram divididos em cinco grupos.

O grupo 1 foi composto por apenas uma viga, sem nenhum tipo de reforço. O grupo 2, composto por duas vigas reforçadas pela colagem de manta de fibras de carbono na região tracionada do concreto.

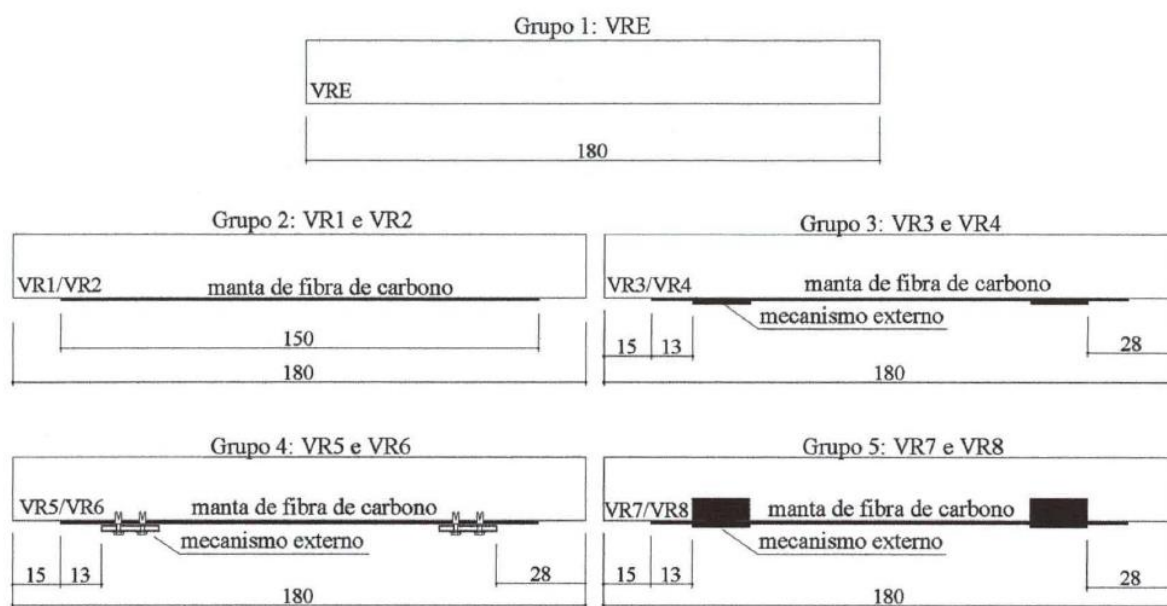
Já o grupo 3, constituído por duas vigas reforçadas com manta em PRFC e com um mecanismo externo de ancoragem que consistiu na aplicação de uma manta de fibra de carbono colada transversalmente ao eixo longitudinal da viga.

O grupo 4, formado por mais duas vigas, teve como diferencial o mecanismo externo de ancoragem composto pela aplicação de uma chapa de aço-carbono fixada ao concreto por

meio de parafusos, comprimindo transversalmente a manta de PRFC, para evitar o seu desprendimento.

O último grupo de vigas, composto por duas vigas, reforçadas com manta em PRFC idênticas ao grupo 2, porém com um sistema de ancoragem constituído por laços de manta de fibra de carbono, na forma de “U”, fixados próximos das extremidades.

Figura 13 - Vistas laterais das vigas estudadas



OBS: cotas em cm

Fonte: Ferrari (2002)

As principais conclusões obtidas pelo autor foram:

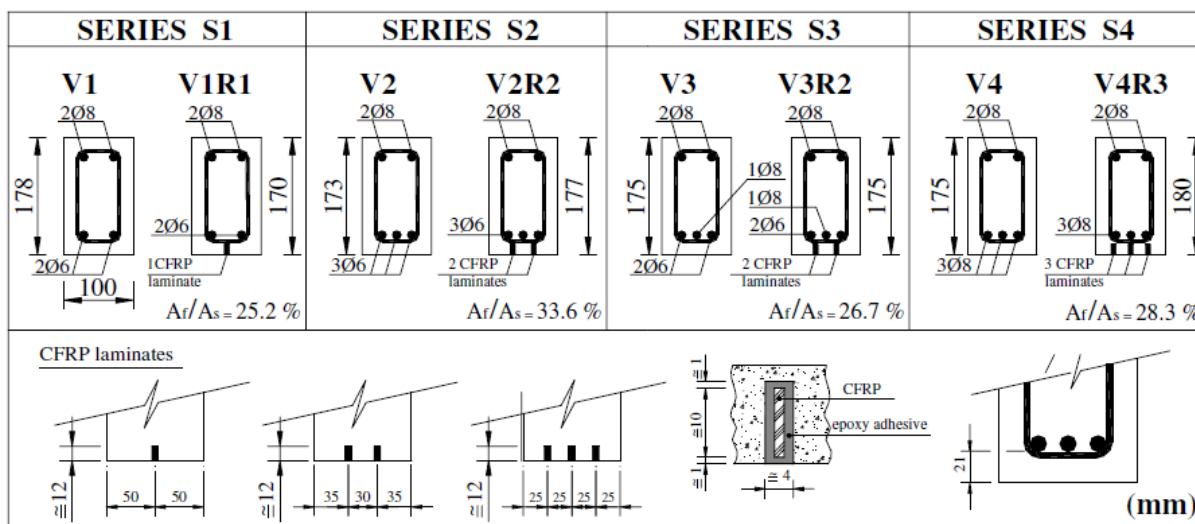
- As vigas ensaiadas sem a utilização de mecanismos de ancoragem tiveram ruptura após o desprendimento do reforço. Exceto a viga VR3, todas as demais que utilizaram mecanismos de ancoragem tiveram seu modo de ruína caracterizado pela ruptura da manta de PRFC;
- Os resultados experimentais mostraram que é possível, desde que se utilize mecanismos de incremento de ancoragem, que o reforço em manta de PRFC seja rompido por tração, aproveitando sua capacidade máxima.

2.13.3 Barros e Fortes (2004)

A pesquisa foi baseada na aplicação da técnica NSM de reforço à flexão, que consiste na aplicação de tiras de laminados de fibras de carbono em fendas abertas na face tracionada da

viga em estudo. Foram ensaiadas oito vigas à flexão por quatro pontos, variando o número de tiras de PRFC aplicadas.

Figura 14 - Detalhamento das vigas estudadas



Fonte: Barros e Fortes (2004)

Segundo os autores, a técnica proporcionou um aumento significativo do carregamento no estado limite de utilização, bem como a rigidez após a fissuração do concreto. A tensão máxima nos laminados de PRFC atingiu valores entre 62% e 91% de sua deformação última.

2.13.4 Meneghel (2005)

A pesquisa da autora se baseou em um programa experimental sobre a aderência entre compósitos com manta de fibras de carbono e o substrato de concreto. Foram realizados ensaios com nove corpos de prova, com três resistências à compressão do concreto aos 28 dias, de 20,5 MPa, 28,7 MPa e 38,1 MPa e duas larguras de tecido iguais a 50mm e 100mm.

Foram realizados ensaios de tração-compressão de corpos de prova compostos por dois blocos de concreto, colados por tiras de manta de PRFC.

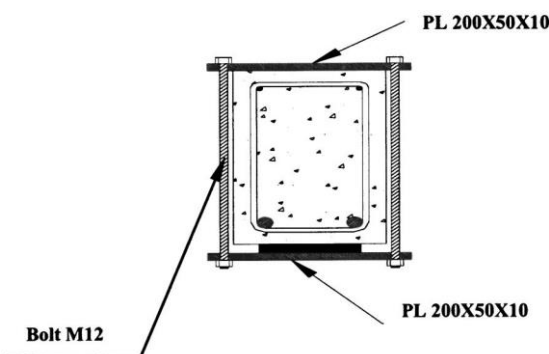
A partir dos resultados, a autora concluiu que a resistência à compressão do concreto não interfere na resistência de aderência do reforço com o substrato.

2.13.5 Chahrour e Soudki (2005)

Os autores realizaram um estudo experimental com o objetivo de analisar o incremento de resistência promovido por um mecanismo de ancoragem do compósito de fibras de carbono em vigas de concreto armado.

Foram testadas seis vigas no total, com seção transversal de 15 cm de largura, 25 cm de altura e comprimento de 240 cm. Destas, uma viga foi deixada como referência, sem a aplicação de reforço. Outra viga, com as mesmas características, foi reforçada com PRFC, porém sem a utilização do mecanismo de ancoragem. As quatro vigas restantes receberam um sistema de ancoragem mecânica que foi composto por placas de aço, mantidas apertadas por parafusos, pressionando o reforço contra a superfície de concreto, conforme Figura 15.

Figura 15 – Sistema de ancoragem por parafusos



Fonte: Chahrour e Soudki(2005)

Após a obtenção dos resultados, os autores concluíram que as vigas reforçadas com compósito de fibras de carbono ancoradas mecanicamente provocaram um aumento de resistência se comparados às vigas sem o mecanismo;

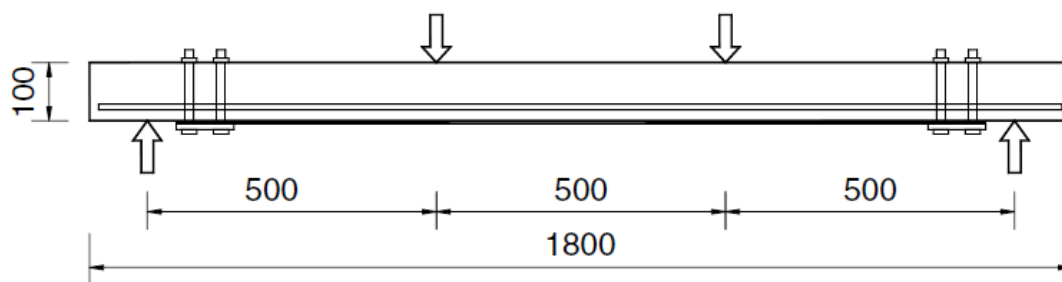
2.13.6 Maaddawy e Soudki (2007)

Neste estudo, os autores apresentaram uma avaliação de lajes de concreto armado, deficientes aos esforços de flexão, reforçadas com polímeros de fibras de carbono e utilizando um sistema de ancoragem mecânico. Foram ensaiadas seis amostras de lajes com 10 centímetros de espessura, 50 centímetros de largura e 1,80 metros de comprimento.

Os elementos foram reforçados com tiras de 50 mm de largura e 1,2 mm de espessura de PRFC. O sistema de ancoragem das fibras foi composto por placas de aço de 10 mm de

espessura, 100 mm de largura e 130 mm de comprimento. As placas foram instaladas sob as tiras de PRFC e fixadas por meio de quatro parafusos com 15 mm de diâmetro cada, inseridos em orifícios pré-furados no concreto. Os parafusos foram apertados pela face superior da laje, por meio de porcas e arruelas.

Figura 16 – Ancoragem mecânica em laje



Fonte: Maaddawy e Soudki (2007)

O sistema de ancoragem composto por placas metálicas possibilitou um ligeiro aumento da carga de ruptura, porém obteve uma expressiva melhoria na deflexão da laje em carga final. O acréscimo da carga última foi de 62% em relação a laje de referência, enquanto a deflexão foi 19% inferior.

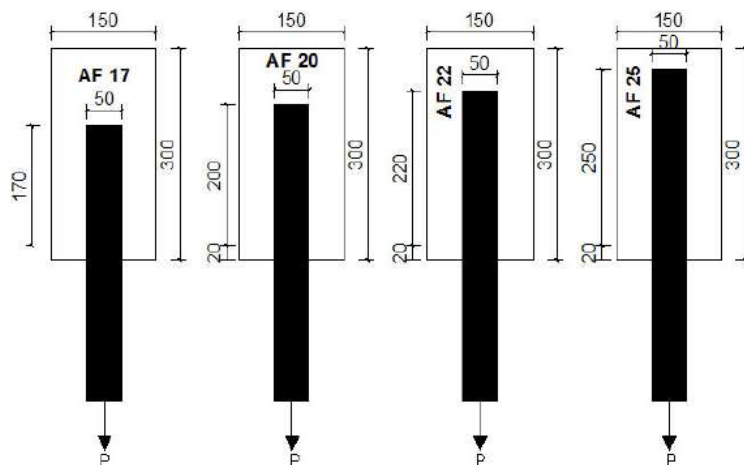
2.13.7 Costa e Oliveira (2009)

A pesquisa realizada pelos autores teve como objetivo avaliar o desempenho estrutural de sistemas de ancoragem para reforço com polímeros de fibras de carbono.

Foram ensaiados 13 prismas de concreto com dimensões de 120 mm de largura, 150 mm de altura e 300 mm de comprimento, e ensaiados até a ruptura no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Os prismas receberam a aplicação de duas camadas de tecido de fibra de carbono com largura de 50mm, variando os comprimentos de ancoragem e os dispositivos mecânicos de ancoragem, os quais tiveram como função melhorar a aderência do reforço com ancoragens retas. As amostras foram divididas em dois grupos. O Grupo 1 foi composto por oito prismas com ancoragens retas, em que foram variados os comprimentos de ancoragem das fibras, conforme mostrado na Figura 17.

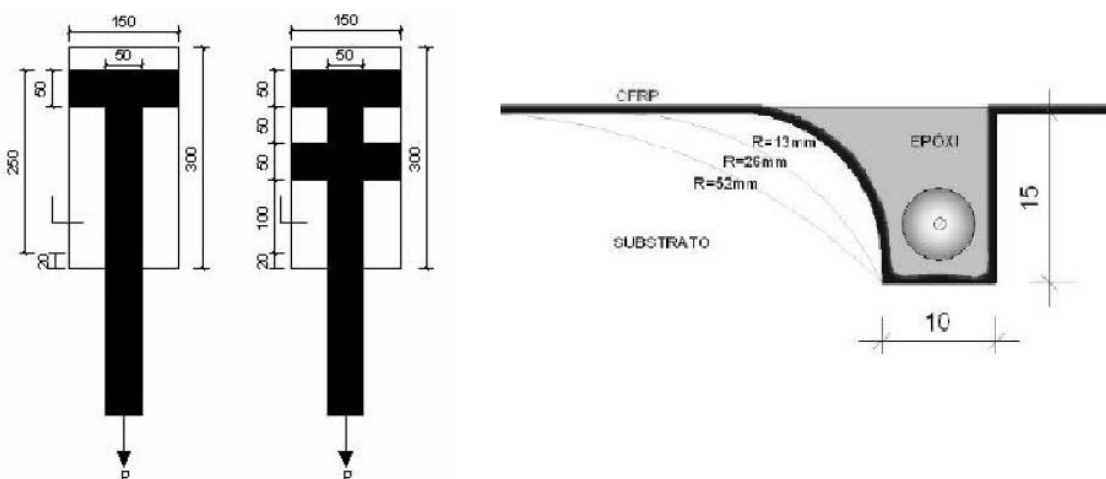
Figura 17 – Prismas com comprimentos de ancoragem variados



Fonte: Costa e Oliveira(2009)

Já os prismas do Grupo 2, num total de cinco unidades, foram utilizadas ancoragem adicional. Estes sistemas foram compostos por faixas de fibra de carbono em forma de “U” aplicado sobre o comprimento de ancoragem reto, e por barras de aço fixadas em sulcos com arestas arredondadas executados transversalmente ao eixo do prisma, no substrato do concreto. Essas barras foram fixadas com adesivo epóxi e o abaulamento das arestas nos sulcos teve suas dimensões variadas para permitir avaliar o acúmulo de tensões na região e a influência nos comprimentos de ancoragem. A Figura 18 apresenta estes mecanismos do Grupo 2.

Figura 18 – Prismas mecanismos de ancoragem dos tecidos de PRFC



Fonte: Costa e Oliveira (2009)

Verificou-se nos ensaios realizados que, quanto maior o comprimento de ancoragem do reforço, menor a resistência de aderência. Através de comparações com outras pesquisas os

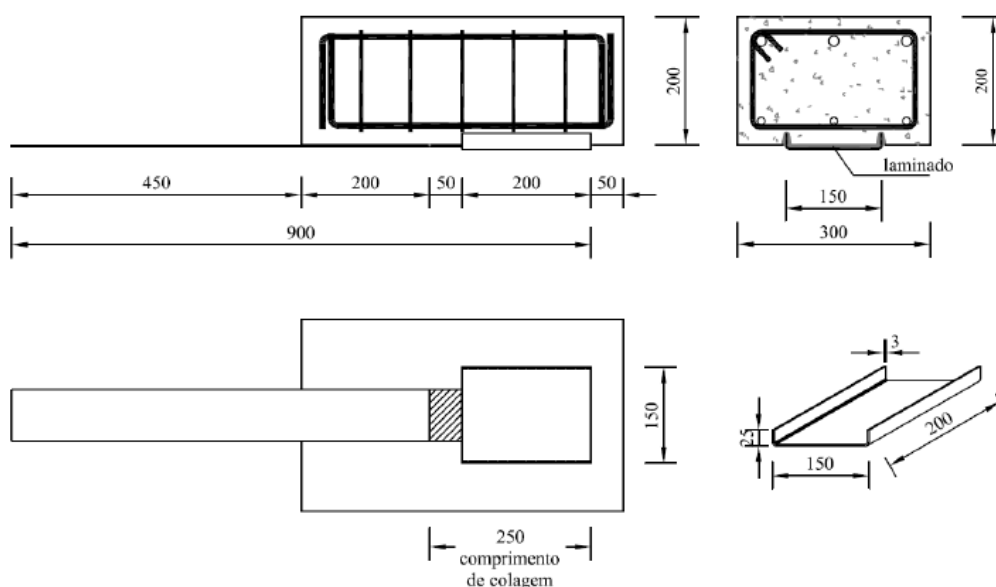
autores concluíram que o comprimento de ancoragem dos PRFC pode ser dimensionado em função da tensão de aderência, e que o seu aumento sem o devido controle do comprimento de ancoragem pode resultar em desprendimento do compósito ao substrato de concreto.

Já os dispositivos de ancoragem tiveram resultados satisfatórios e se mostraram eficientes, com um acréscimo de até 88% na resistência de aderência do sistema de reforço em PRFC. Os autores destacaram não haver necessidade de perfurar lajes ou paredes para melhorar a resistência de aderência, utilizando estes mecanismos.

2.13.8 Mendes e SilvaCosta (2010)

No estudo desenvolvido pelos autores, foram estudados três sistemas de ancoragem de reforço em laminados de PRFC, desenvolvidos e testados com o objetivo de melhorar a eficiência do reforço. Os sistemas testados são de simples aplicação, os quais consistem da utilização de chapas de aço em formas de “U” fixadas na região de recobrimento do concreto, de chapas de aço fixadas com buchas metálicas, e por fim em um sistema composto por duas camadas de mantas unidirecionais cruzadas aplicadas sobre o laminado.

Figura 19 – Ancoragem por chapas de aço em “U”



Fonte: Mendes e SilvaCosta (2010)

No primeiro sistema, foram utilizadas chapas de aço em formato de “U”, com 3 mm de espessura, 200 mm de comprimento, 150 mm de largura e bordas laterais com 25 mm. As peças

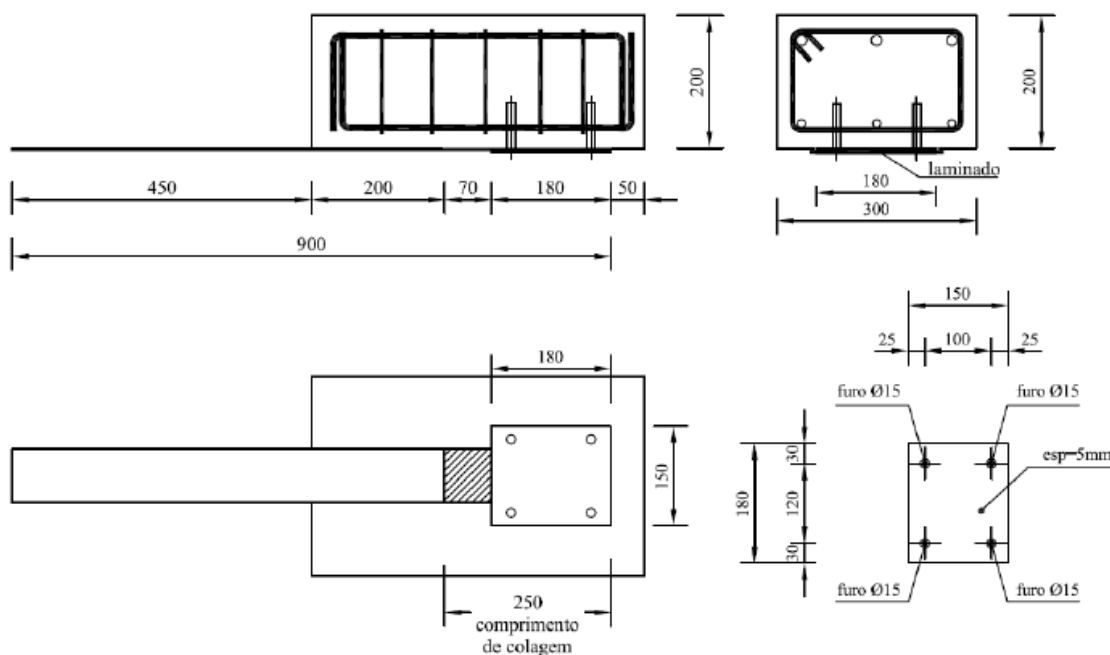
foram coladas sobre o laminado já aplicado, de modo que as bordas ficassem inseridas dentro do concreto, na espessura correspondente ao cobrimento da armadura, conforme mostrado na Figura 19. As chapas foram coladas com o mesmo adesivo utilizado no laminado.

No segundo modelo de ancoragem, foram utilizadas chapas de aço com dimensões de 200 mm de comprimento, 180 mm de largura e 5 mm de espessura, instaladas no trecho final do reforço. As chapas foram coladas sobre o laminado e fixadas ao concreto por meio de buchas químicas.

Assim como no caso anterior, a chapa de aço foi colada com a mesma resina utilizada no laminado, e sua espessura foi controlada pelo aperto das porcas de fixação das buchas químicas.

A Figura 20 demonstra o sistema de aplicação da ancoragem com chapas e o processo de ensaio realizado.

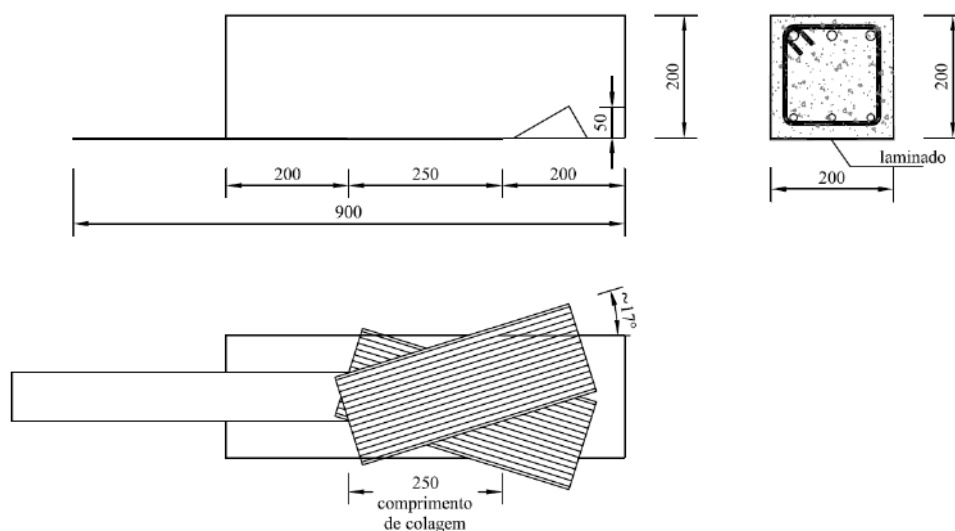
Figura 20 – Ancoragem por chapas de aço com fixadores químicos



Fonte: Mendes e SilvaCosta (2010)

Já o terceiro mecanismo de ancoragem verificado na pesquisa foi composto pela aplicação de duas camadas de mantas de PRFC em cada direção. Foram utilizadas tiras de tecido com 150 x 400 mm coladas desde a extremidade do laminado, formando um ângulo de aproximadamente 17° com relação ao eixo longitudinal do elemento de concreto.

Figura 21 – Ancoragem por mantas cruzadas



Fonte: Mendes e SilvaCosta (2010)

Devido às dimensões, não foi possível a colagem total das mantas na face inferior do concreto, devendo serem dobradas suas pontas às faces laterais, conforme Figura 21. Para evitar a concentração de tensões no compósito, as arestas da viga de concreto foram arredondadas com um raio de cerca de 15 mm.

Após a obtenção dos resultados, pôde-se observar que para todos os sistemas de ancoragem do sistema de reforço adotado, a ruptura aconteceu de forma brusca e sem aviso prévio, correspondendo a um modo de ruína frágil. Os autores destacam a sensibilidade do comportamento destes elementos e a importância da adoção de coeficientes de segurança adequados.

Analisando as tensões de aderência entre o compósito e o concreto, observou-se que os sistemas de ancoragem com chapas de aço em “U” e com mantas cruzadas, constatou-se que seus valores foram idênticos.

Para os elementos testados, a introdução dos mecanismos de ancoragem conduziu a aumentos entre 150,6 % e 226,0 % em relação à força última transmitida à ancoragem de referência. Entre os sistemas testados, destacam-se os resultados do mecanismo feito por buchas químicas que, em todos os casos obteve valores de tensão de aderência mais satisfatórios que os demais.

Todos os corpos de prova ensaiados romperam por deslizamento do reforço ou pelo destacamento do sistema de ancoragem.

2.13.9 Marini (2011)

O autor, em sua dissertação de mestrado, realizou um estudo para avaliar a aderência entre o sistema de reforço com fibras de carbono e concretos com resistência à compressão de 15 MPa, 40 MPa e 60 MPa.

O ensaio utilizado foi o *pull-out*, baseado na NBR 14050, que consiste na aplicação de uma tensão de tração perpendicular à seção transversal do reforço com fibras de carbono, para determinar a resistência de aderência, como um ensaio de arranque.

Conforme os resultados obtidos, o autor concluiu que quanto maior a resistência à compressão do concreto, maior é a resistência de aderência entre o sistema de reforço em PRFC e o substrato.

Figura 22 – Amostras para ensaio de arrancamento



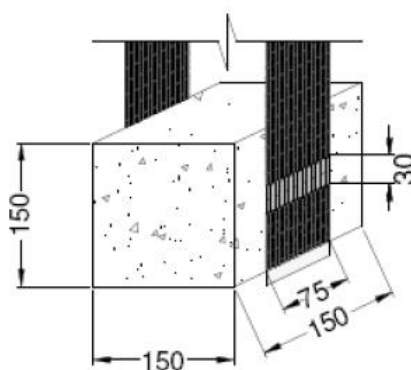
Fonte: Marini (2011)

2.13.10 Santiago (2011)

Foi realizada uma análise experimental sobre os efeitos das cargas de impacto de curta duração na resistência de aderência entre o reforço em PRFC e o concreto, verificando a influência da taxa de carregamento.

Foram realizados ensaios em 35 corpos de prova, constituídos por blocos cúbicos de concreto e tiras de tecido PRFC coladas nas laterais opostas dos blocos, variando o modo de carregamento. Também foram adotados dois comprimentos de ancoragem, 30mm e 70mm, verificando o efeito dessa variável na resistência de aderência.

Figura 23 – Corpo de prova de concreto com a colagem do PRFC



Fonte: Santiago (2011)

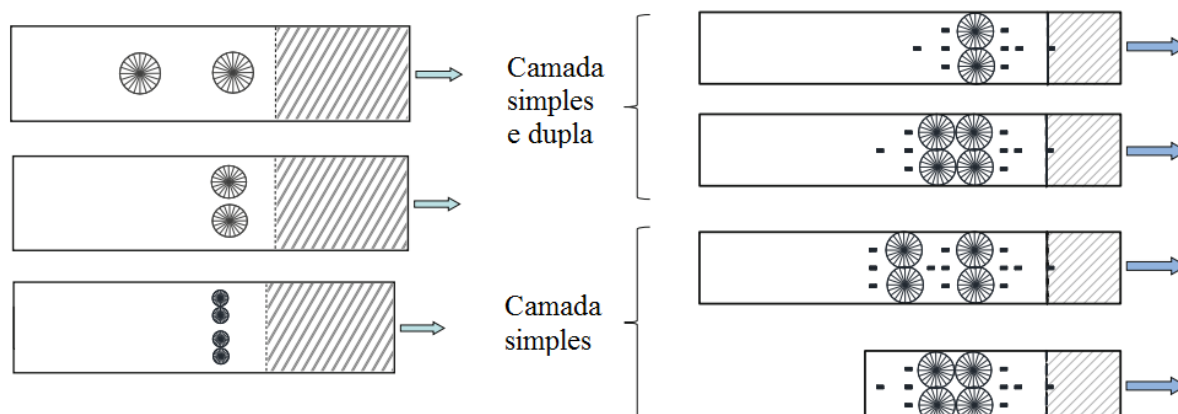
O autor concluiu que o aumento do comprimento de ancoragem estudado na pesquisa levou a uma diminuição da resistência de aderência. Isso se deve ao fato de a resistência não se encontrar distribuída ao longo de toda a área do reforço, e sim apenas naquela que resiste ao carregamento.

2.13.11 Breña e McGuirk (2013)

Nesta pesquisa os autores apresentam resultados sobre uma pesquisa elaborada na Universidade de Massachushts Amherst, que visa avançar com a interpretação com comportamento de sistemas de ancoragem para reforços em PRF no concreto.

Na pesquisa, utilizou-se um sistema de ancoragem baseado na fixação de fibra de carbono penetrada no concreto através de um furo transversal. Pelos ensaios, foi analisado o desempenho do sistema considerando algumas variáveis, tais como diâmetro do feixe inserido, profundidade de ancoragem, e número de camadas da manta.

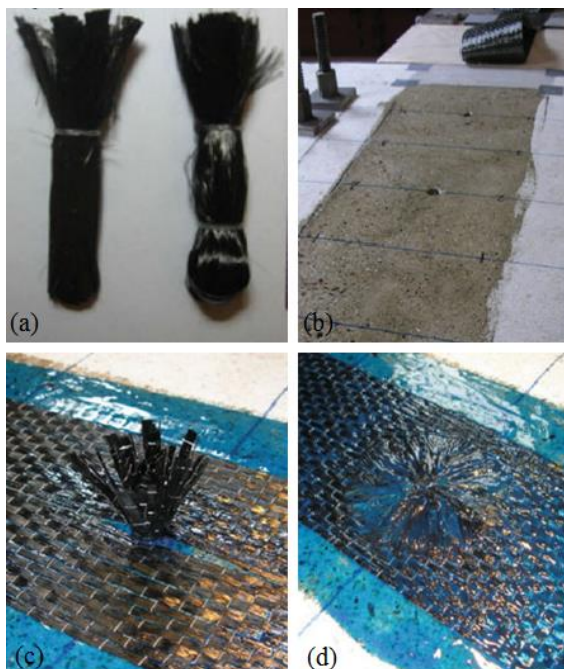
Figura 24 – Variáveis testadas com os sistemas de ancoragem



Fonte: Adaptado de Breña e McGuirk (2013)

Para formar as “âncoras”, uma folha de manta em fibra de carbono foi cortada e enrolada, formando um feixe. O comprimento deste se deu pela soma furo onde foi inserido e a parte externa, a qual foi colada sobre o reforço conforme a Figura 25.

Figura 25 - (a) feixe de fibra de carbono; (b) furação para fixação do sistema de ancoragem; (c) inserção do feixe no furo; (d) colagem da parte externa na manta



Fonte: Breña e McGuirk (2013)

Baseado na avaliação experimental, os autores concluíram que, na região onde o feixe de fibras é colado na manta, ocorrem altas tensões e deformações. Considerando que o objetivo

da técnica é que uma possível ruptura ocorra no reforço, o mecanismo de ancoragem deve ser aplicado em toda a largura do tecido.

Pôde-se verificar que o espaçamento longitudinal entre os mecanismos deve ser limitado a uma distância dentro do comprimento de ancoragem e de transferência das tensões.

Segundo os autores, o diâmetro do feixe deve ser dimensionado de acordo com a necessidade de força para o tecido, entretanto são necessárias mais pesquisas para determinar modelos adequados para determinar o dimensionamento do sistema.

2.13.12 Borba (2015)

A autora, em sua pesquisa de mestrado, realizou um trabalho que teve como objetivo principal avaliar a ligação entre laminados de PRFC com o substrato de concreto, por meio de ensaios de corte simples. O texto também tem como finalidade desenvolver uma solução analítica que descreve o comportamento completo do descolamento do compósito, validando-o por estudo experimental e com os dados bibliográficos disponíveis.

Com base nos ensaios experimentais e do modelo analítico proposto pela autora, observou-se que, tanto para a técnica EBR quanto para NSM, a força transmitida do concreto para o compósito aumenta em função do comprimento de ancoragem. Entretanto, a resistência de ligação deixa de aumentar para um determinado comprimento, que foi denominado como comprimento efetivo da ligação. Concluiu-se que para a técnica EBR esse comprimento está entre 150 e 185 mm.

3 ANÁLISE TEÓRICA SIMPLIFICADA

Neste capítulo, são apresentados modelos teóricos simplificados, com o objetivo de prever o comportamento das vigas estudadas. Neste sentido, as formulações se basearão na determinação da carga de ruptura da viga, das tensões e deformações nas armaduras longitudinais, transversais e no reforço, dos deslocamentos verticais das vigas e da previsão de desprendimento do reforço.

As análises serão tanto para as vigas reforçadas à flexão quanto ao cisalhamento.

3.1 COMPORTAMENTO DAS VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO

A determinação do comportamento de elementos de concreto armado submetidos à flexão, bem como sua capacidade resistente são baseadas em hipóteses básicas da teoria da flexão e de considerações analíticas elaboradas a partir pesquisas teóricas e experimentais.

3.1.1 Carga de Ruptura (ELU)

O dimensionamento da viga é baseado nas equações de equilíbrio, onde a seção transversal se mantém em equilíbrio quando os esforços externos são equivalentes aos esforços internos. Para isso, é considerada a proporcionalidade entre as deformações pela extensão da altura da seção, conforme hipótese de Bernoulli.

Para a determinação teórica da capacidade de carga de uma viga de concreto armado, para estado limite último (ELU), são consideradas as seguintes hipóteses:

- a) até a ruptura, as seções transversais permanecem planas;
- b) a deformação específica por encurtamento máximo do concreto é 3,5‰;
- c) a deformação específica por alongamento máximo do aço é de 10,0‰;
- d) a resistência à tração do concreto deve ser desprezada;
- e) a aderência entre a armadura e o concreto é considerada perfeita, e;

Nas vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC, a determinação da capacidade resistente do elemento estrutural deve levar em consideração as seguintes hipóteses básicas:

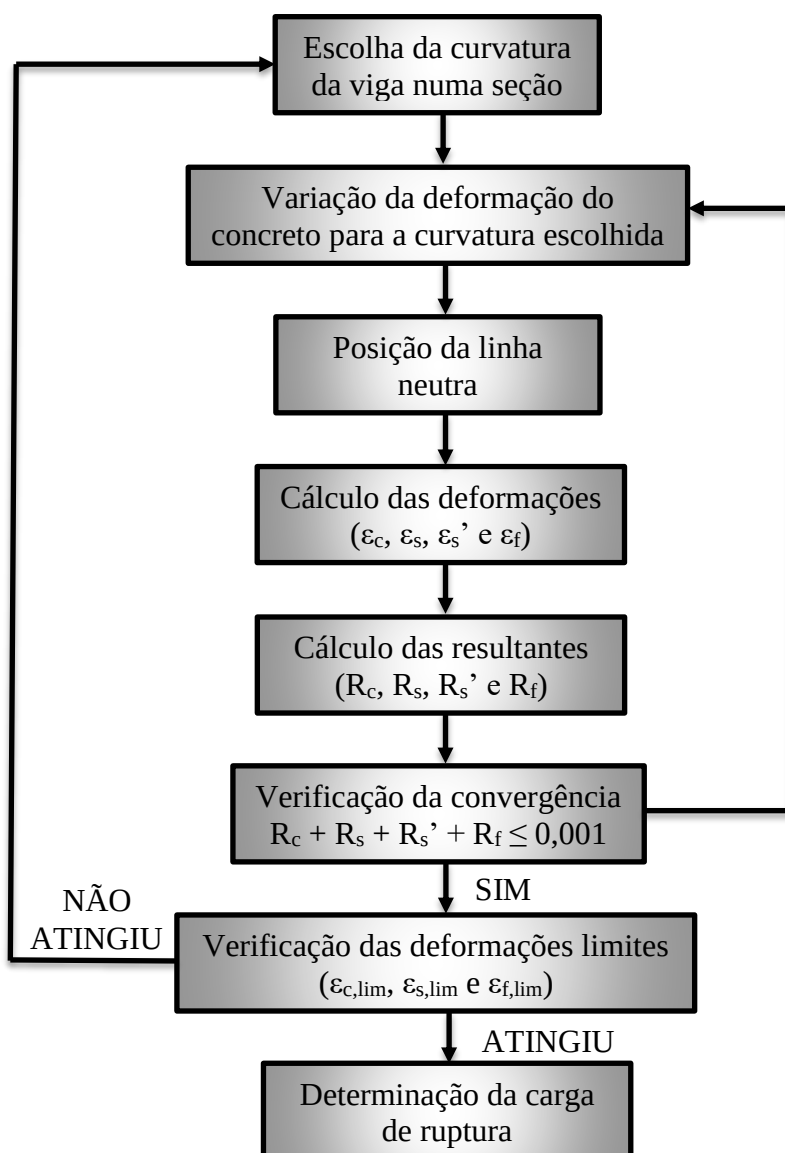
- a) as deformações no concreto, na armadura e no reforço são diretamente proporcionais à distância com a linha neutra;

- d) compressão não uniforme, sem tração na seção: domínio 5;
- e) compressão uniforme: reta b .

O estudo experimental foi baseado no estado de deformações do domínio 2. Levando em consideração que as equações de equilíbrio não são suficientes para resolver o número de incógnitas para este caso, a verificação da capacidade de carga do elemento de concreto deve ser feita por um processo iterativo.

Para isso, foi utilizado um procedimento de iteração que leva em consideração a variação do momento fletor e curvatura da seção transversal, baseado nos estudos apresentados por Fortes (2000), Ferrari (2002) e Beber (2003).

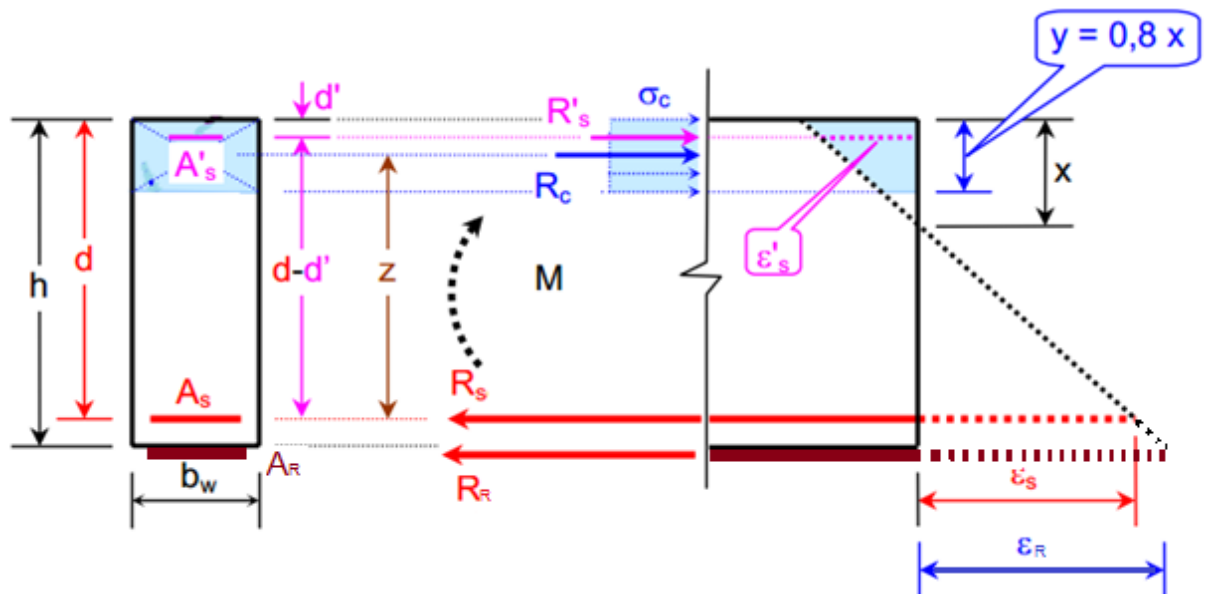
Figura 27 – Fluxograma de determinação de momento fletor x curvatura da seção



O processo iterativo utilizado é baseado na combinação da curvatura de uma dada seção transversal com a deformação específica do concreto que satisfaça a condição de equilíbrio da seção. Estes valores são alterados até que um dos limites de deformação desejado (concreto, aço ou reforço) seja alcançado.

A escolha do domínio 2 de deformações foi obtida para que se possa analisar o desempenho do reforço à flexão, sem que ocorra ruptura da viga por encurtamento excessivo do concreto. A distribuição dos esforços na seção transversal da viga, bem com as deformações dos materiais, é mostrada na Figura 28.

Figura 28 – Esforços e deformações na seção transversal



Fonte: Adaptado de Marino (2006)

Para o processo utilizado, a posição da linha neutra em relação à fibra mais comprimida do concreto (x) é obtida pela Equação 3.1.

$$x = \frac{\varepsilon_c \cdot h}{\theta} \quad (3.1)$$

em que:

- ε_c : deformação específica do concreto;
- h : altura da seção transversal, e;
- θ : curvatura da seção.

Conforme a NBR 6118 (2014), a distribuição das tensões de compressão no concreto é feita de acordo com um diagrama parábola retângulo, com tensão de pico de 0,85 da resistência do concreto. Esse diagrama pode ser substituído por um retângulo de profundidade $0,8 x$. Assim, a determinação da resultante de tensões de compressão no concreto (R_c) é dada pela equação seguinte.

$$R_c = (b_w) \cdot (0,8 \cdot x) \cdot (0,85 \cdot f_{ck}) \quad (3.2)$$

em que: b_w : largura da seção transversal, e;
 f_{ck} : resistência característica do concreto.

E, por sua vez, a posição da resultante de compressão do concreto é determinada por:

$$Z_c = \frac{0,8 \cdot x}{2} \quad (3.3)$$

Para que sejam obedecidos os limites de força aplicados no concreto, armaduras e fibra, as deformações ε_s , ε_s' e ε_R são obtidas pela equação:

$$\varepsilon_i = \frac{x - d_i}{h} \cdot \theta \quad (3.4)$$

em que: d_i : distância da fibra mais comprimida até o centro de gravidade do material.

Para as resultantes de tensão de tração na armadura positiva (ε_s), na armadura negativa (ε_s') e no reforço (ε_R), são aplicadas as seguintes equações:

$$R_s = A_s \cdot \sigma_s \quad (3.5)$$

$$R_s' = A_s' \cdot \sigma_s' \quad (3.6)$$

$$R_R = A_R \cdot \sigma_R \quad (3.7)$$

em que: A_i : Área transversal do material, e;

σ_i : Tensão normal no material.

Considerando os valores das forças resultantes do aço, concreto e reforço, e suas posições na seção transversal, é possível determinar o momento fletor resistente (M_R) da viga, obtido do equilíbrio destas resultantes na seção transversal, conforme Equação 3.8.

$$M_R = R_c \cdot (c - Z_c) + R_s \cdot (c - d) + R'_s \cdot (c - d') + R_R \cdot (c - d_R) \quad (3.8)$$

em que: c : distância da posição do centro de gravidade da viga até a fibra mais comprimida.

E por fim, pode-se calcular a carga de ruína (P_R) que pode ser aplicada na viga em estudo, objeto da análise experimental.

$$P_R = \frac{2 \cdot M_R}{a} \quad (3.9)$$

em que: a : distância da linha de aplicação da carga parcial ($P/2$) até o apoio.

3.1.2 Ruptura prematura

A verificação da carga de ruptura de elementos de concreto armado reforçados à flexão com PRF deve levar em consideração os possíveis modos de ruptura. Além das falhas por convencionais por tensões normais no aço, concreto e reforço, a aderência entre o concreto e o reforço também deve ser verificado.

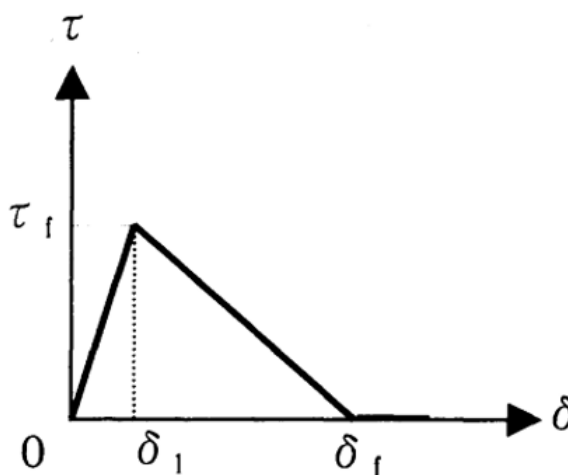
Esse modo de falha é caracterizado por ser prematuro, ou seja, os materiais não atingem sua capacidade máxima de tensões normais.

Diversos estudos são realizados com o objetivo de desenvolver formas de verificar estes modos de ruptura. O desenvolvimento destes modelos de análise pode ser dividido em três grupos baseados em: estudos experimentais, mecânica da fratura e modelos analíticos. O primeiro considera parâmetros estatísticos, enquanto que o segundo apresenta modelos bastante complexos e com difícil aplicação. Entretanto, o terceiro é elaborado com um tratamento simplificado, que visa a aplicação de ferramentas de dimensionamento e verificação das estruturas com o reforço (BEBER, 2003).

Entre alguns estudos conhecidos, o modelo proposto por Chen e Teng (2001) se apresenta como um dos mais confiáveis. A pesquisa é baseada em uma análise da mecânica da fratura e observações experimentais.

Por meio de revisões de outras bibliografias, concluiu-se que, após uma série de ensaios de aderência elementos de concreto com PRFC, tanto para falhas por destacamento do concreto como para descolamento do reforço, a relação entre a tensão de cisalhamento e o deslizamento pode ser representada pelo modelo triangular mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Modelo triangular de cisalhamento x deslizamento



Fonte: Yuan, Wu e Yoshizawa (2001)

Com base neste estudo, a partir de um banco de dados de pesquisas experimentais, é possível determinar a força referente ao descolamento ou destacamento do reforço, simbolizado por P_f , conforme equação 3.10.

$$P_f = 0,427 \cdot \beta_P \cdot \beta_L \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_f L_e \quad (3.10)$$

em que:

- β_P : coeficiente de largura do reforço;
- β_L : coeficiente de comprimento de ancoragem;
- b_f : largura do reforço, e;
- L_e : comprimento de ancoragem efetivo.

É necessário que seja levado em consideração a relação entre a largura da viga e a largura do reforço. Esse fator pode afetar significativamente na resistência de aderência do

elemento. Conforme Teng *et al* (2001) *apud* Beber (2003), a diferença entre larguras do reforço e do concreto gera uma distribuição de tensões de aderência não uniforme, e esta disparidade pode resultar em aumento de tensões de cisalhamento na ligação. Essa relação entre as larguras pode ser obtida pela equação a seguir.

$$\beta_P = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b_w}}{1 + \frac{b_f}{b_w}}} \quad (3.11)$$

O comprimento de ancoragem L_e é obtido através da associação entre a resistência do concreto e o deslizamento do reforço ao ser solicitado, conforme apresentado na Equação 3.12.

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ck}}} \quad (3.12)$$

em que: E_f : módulo de elasticidade do reforço, e;
 t_f : espessura do reforço.

Já o coeficiente de relação entre os comprimentos de ancoragem β_L é obtido por meio da Equação 3.13.

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen} \left(\frac{\pi \cdot L}{2 \cdot L_e} \right) & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (3.13)$$

Por fim, pode ser determinada a máxima tensão normal aplicada no reforço dividindo a força P_f pela área da seção transversal do reforço.

$$\sigma_p = 0,427 \cdot \beta_p \cdot \beta_L \cdot \sqrt{\frac{E_p \cdot \sqrt{f'_c}}{t_p}} \quad (3.14)$$

Após determinada a máxima tensão normal, pode-se calcular a deformação específica ε_f do reforço e verificar a carga de ruptura da viga por descolamento ou destacamento do compósito no processo iterativo proposto no item 3.1.1.

Cabe ressaltar que o processo de cálculo para carga de ruína por desprendimento do reforço baseado no estudo de Chen e Teng (2001) não leva em consideração as características do adesivo e o substrato do concreto, podendo gerar divergências com valores experimentais

3.1.3 Carga de fissuração

Com o objetivo de encontrar a carga teórica referente ao aparecimento da primeira fissura nas vigas estudadas, e poder comparar com a análise experimental, este capítulo apresenta um modelo de cálculo, baseado em estudos feitos por Ferrari (2002), Beber (2003) e Fortes (2000).

Segundo a NBR 6118 (2014), nos estados-limites de serviço as estruturas de concreto trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II, sendo que essa transição é dada pelo momento de fissuração. Esse momento pode ser calculado de forma aproximada pela Equação 3.15.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (3.15)$$

em que: M_r : momento de fissuração;
 f_{ct} : resistência à tração do concreto ($f_{ct} = 0,7 \cdot f_{ctk,inf}$, onde $f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm}$);
 I_c : momento de inércia da seção bruta do concreto;
 Y_t : distância do centro de gravidade da seção até a fibra mais tracionada
 α : fator de correlação aproximada da resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta (para seção retangular $\alpha = 1,5$)

Na obtenção do momento de fissuração, admite-se a transição do estágio I (comportamento de viga não fissurada) para o estágio II (viga fissurada). Para isso, pode-se utilizar a teoria clássica de Resistência dos Materiais, utilizando uma seção homogeneizada, transformando-se a seção do aço e do reforço em uma seção equivalente ao do concreto. Conforme Beer e Johnston (1996), esta homogeneização pode ser feita com a relação entre os módulos de elasticidade de cada material, conforme mostrado nas equações seguintes.

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.16)$$

$$\alpha_a = \frac{E_a}{E_c} \quad (3.17)$$

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (3.18)$$

em que: α_s : relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto;
 α_a : relação entre os módulos de elasticidade do adesivo e do concreto;
 α_f : relação entre os módulos de elasticidade do reforço e do concreto;
 E_s : módulo de elasticidade do aço;
 E_a : módulo de elasticidade do adesivo;
 E_f : módulo de elasticidade do reforço, e;
 E_c : módulo de elasticidade inicial do concreto.

A posição da linha neutra pode ser obtida com a soma dos momentos estáticos da seção transversal homogeneizada dividida pela área total da seção, também homogeneizada. Para a viga sem reforço, tem-se:

$$x_I = \frac{(b_w \cdot h) \cdot 0,5 \cdot h + \alpha_s \cdot (A_s \cdot d + A'_s \cdot d')}{(b_w \cdot h) + \alpha_s \cdot (A_s + A'_s)} \quad (3.19)$$

E para a viga reforçada:

$$x_I = \frac{(b_w \cdot h) \cdot 0,5 \cdot h + \alpha_s \cdot (A_s \cdot d + A'_s \cdot d') + \alpha_a \cdot (A_a \cdot d_a) + \alpha_f \cdot (A_r \cdot d_r)}{(b_w \cdot h) + \alpha_s \cdot (A_s + A'_s) + \alpha_a \cdot (A_a) + \alpha_f \cdot (A_r)} \quad (3.20)$$

em que: A_a : área da seção transversal do adesivo, e;
 d_a : distância da fibra mais comprimida do elemento até o centro de gravidade do adesivo.

Os momentos de inércia da seção transversal da viga de referência e da viga reforçada pode ser calculada pela Equação 21 e 22, respectivamente.

$$I = \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_w \cdot h) \cdot (x_I - 0,5 \cdot h)^2 + \alpha_s \cdot [A_s \cdot (d - x_I)^2 + A'_s \cdot (x_I - d')^2] \quad (3.21)$$

$$I = \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_w \cdot h) \cdot (x_I - 0,5 \cdot h)^2 + \alpha_s \cdot [A_s \cdot (d - x_I)^2 + A'_s \cdot (x_I - d')^2] + \alpha_a \cdot [A_a \cdot (d_a + x_I)^2] + \alpha_f \cdot [A_f \cdot (d_f - x_i)^2] \quad (3.22)$$

Dessa forma, considerando que a análise experimental foi realizada submetendo as vigas estudadas à uma flexão por quatro pontos, conforme ilustra a Figura 49 do programa experimental, por meio das equações apresentadas, pode-se encontrar a carga referente ao surgimento da primeira fissura (P_r), conforme a Equação 23.

$$P_r = 2 \cdot \frac{M_r}{a} \quad (3.23)$$

em que: a : distância da linha de aplicação da força até o apoio mais próximo.

3.2 COMPORTAMENTO DAS VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO

Os critérios de dimensionamento das vigas para o efeito de cisalhamento serão baseados nas hipóteses básicas propostas pelas normas regulamentadoras. Para a análise das armaduras transversais será utilizado os conceitos apresentados pela NBR 6118 (2014). Já para o comportamento dos reforços em PRFC ao cisalhamento serão destacados os métodos teóricos conforme ACI 440.2R (2008) e Bulletin FIB 14 (2004).

3.2.1 Critérios da NBR 6118 (2014)

Para garantia das condições de segurança, admite-se dois modelos de cálculo, baseados na analogia de treliça, com banzos paralelos e associados por mecanismos resistentes complementares desenvolvidos dentro do elemento e representados com um componente adicional V_c .

Para o atendimento aos critérios de segurança do elemento estrutural, de uma determinada seção transversal, as condições a seguir devem ser satisfatórias quando verificadas simultaneamente:

$$VSW_D < V_{Rd2} \quad (3.24)$$

$$VSW_D < V_{Rd3} = V_c + V_{sw_w} \quad (3.25)$$

em que: V_{sw_d} : força cortante solicitante de cálculo, na seção;
 V_{Rd2} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;
 V_{Rd3} : $V_c + V_{sw_w}$, sendo V_c a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça e V_{sw_w} a parcela absorvida pela armadura transversal.

Admitem-se dois modelos de cálculo para satisfazer essas condições:

- a) Modelo I: admite diagonais de compressão inclinadas de $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal da viga de concreto e que a parcela de V_c tenha valor constante;
- b) Modelo II: admite diagonais de compressão inclinadas de θ variando de 30° a 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e que a parcela complementar V_c sofra redução com o aumento de V_{sd} .

3.2.1.1 Modelo de cálculo I

Neste modelo, são asseguradas as condições de segurança do elemento estrutural realizando a verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (3.26)$$

E pelo cálculo da armadura transversal, representado por:

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (3.27)$$

em que: $\alpha_{v2} = (1 - f_{ck} / 250)$, sendo que f_{ck} é expresso em megapascal (MPa);
 $V_{sw} = (A_{sw} / s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} (\sin \alpha + \cos \alpha)$
 $V_c = 0$ nas peças tracionadas, em casos onde a linha neutra se situa fora da seção;
 $V_c = V_{co}$ para flexão simples e flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;
 $V_c = (V_{co} + V_{co} \cdot M_o / M_d) \leq 2 \cdot V_{co}$ na flexo-compressão com $V_{co} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$;
 M_o : momento fletor que anula a tensão de compressão na borda da seção;

$M_{d,max}$: momento fletor máximo de cálculo no trecho;

$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$, onde $f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm}$, e

$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$, com f_{ck} expresso em MPa.

3.2.1.2 Modelo de cálculo II

Para este modelo, são asseguradas as condições de segurança do elemento estrutural realizando a verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \quad (3.28)$$

E pelo cálculo da armadura transversal, representado por:

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (3.29)$$

em que: $V_{sw} = (A_{sw} / s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} (\cotg \alpha + \cotg \theta) \sin \alpha$

$V_c = 0$ nas peças tracionadas, em casos onde a linha neutra se situa fora da seção;

$V_c = V_{c1}$ para flexão simples e flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = (V_{c1} + V_{cl} \cdot M_o / M_d) \leq 2 \cdot V_{c1}$ na flexo-compressão com $V_{c1} = V_{co}$ quando

$V_d = V_{co}$, e;

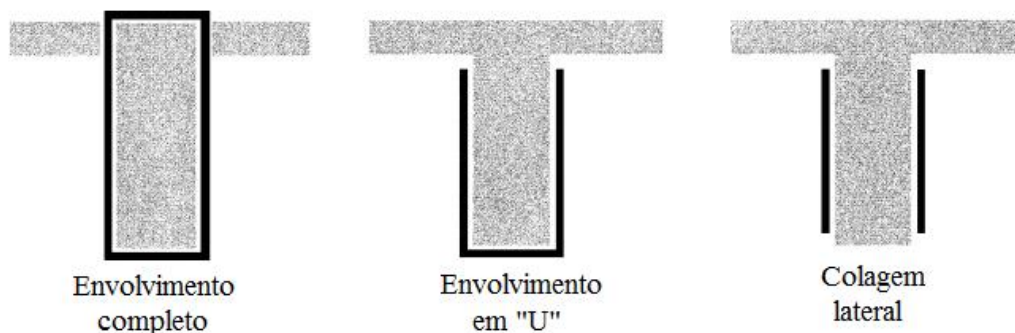
$V_{c1} = 0$ quando $V_d = V_{Rd2}$, interpolando-se linearmente em valores intermediários.

3.2.2 Critérios da ACI 440.2R (2008)

O processo de dimensionamento de reforços em PRF para esforços de cisalhamento em vigas de concreto depende de diversos fatores como geometria da peça, características do concreto e formas de envolvimento do compósito.

Os modelos de cálculo propostos são baseados em 3 possíveis modos de aplicação do compósito. O mais eficiente deles é o envolvimento completo do PRF na viga, seguido pelo sistema de envolvimento em “U” e por fim a colagem lateral, a qual é considerada menos eficaz em função da maior probabilidade de descolamento do reforço. Os modelos são apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Modelos de aplicação dos reforços em PRF para cisalhamento



Fonte: ACI 440.2R (2008)

A capacidade resistente nominal ao esforço cortante de um elemento de concreto reforçado com PRF ao cisalhamento deve ser maior que a força cortante solicitante, conforme Equação 3.7. Para determinação das resistências aos esforços cortantes no elemento, deve-se utilizar os coeficientes de segurança propostos pela ACI 318 (2005), como por exemplo a aplicação de um coeficiente de redução da resistência do elemento reforçado ϕ .

$$\phi \cdot V_n \geq V_u \quad (3.30)$$

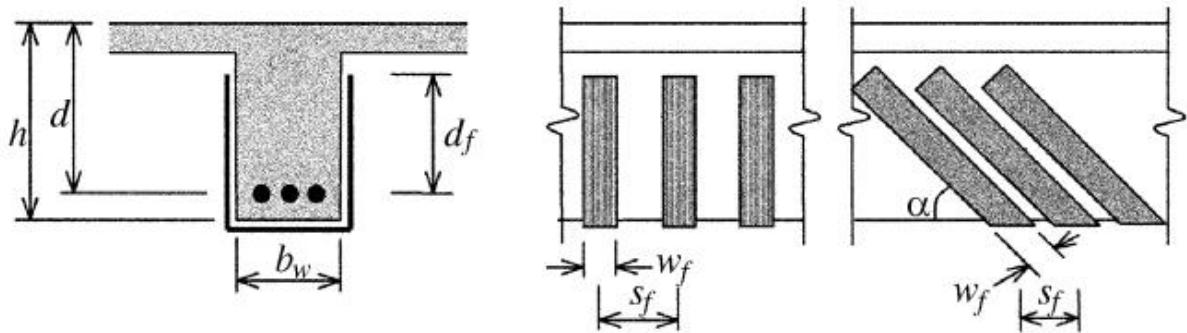
A resistência ao cisalhamento de um elemento estrutural reforçado com PRF pode ser determinada pela soma das contribuições da armadura transversal (V_s), do concreto (V_c) e das fibras (V_f). Um fator de redução ψ_f é aplicado à contribuição do PRF.

$$\phi \cdot V_n = \phi \cdot (V_c + V_s + \Psi_f \cdot V_f) \quad (3.31)$$

Para a aplicação de ψ_f , recomenda-se a utilização de valor igual a 0,95 para aplicações do PRF com envolvimento completo na viga, ou de 0,85 para envolvimento em “U” e colagem lateral.

Algumas variáveis dimensionais são utilizadas para o cálculo da contribuição do PRF à resistência ao cisalhamento em vigas, conforme mostradas na Figura 31.

Figura 31 – Variáveis dimensionais utilizadas no dimensionamento do reforço em PRF



Fonte: ACI 440.2R (2008)

A contribuição do sistema de PRF à resistência ao cisalhamento de uma viga de concreto é baseada na orientação das fibras e de um padrão de fissuração assumido (KHALIFA *et al.*, 1998 *apud* ACI.2R, 2008). Esta resistência ao esforço cortante fornecida pelo reforço em PRF pode ser determinada através da força resultante da tensão de tração na fibra pela fissura, e é dada pela Equação 3.9.

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d_f}{s_f} \quad (3.32)$$

A área da seção transversal do reforço pode ser obtida pela Equação 3.10.

$$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (3.33)$$

E a tensão no reforço de PRF é diretamente proporcional à deformação específica do compósito surgido no reforço.

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (3.34)$$

em que:

- f_{fe} : Tensão efetiva na fibra;
- n : Número de camadas de fibras;
- t_f : Espessura das fibras;
- ε_{fe} : Deformação específica do reforço, e;
- E_f : Módulo de elasticidade longitudinal do reforço.

3.2.1.1 Deformação efetiva do reforço em PRF

A deformação efetiva e a deformação máxima do compósito em PRF pode ser obtida em função do modo de ruptura do sistema de reforço e do elemento de concreto armado. O projetista deve considerar todos os possíveis modos de falha e utilizar uma deformação específica que representa o modo de ruptura.

Em elementos de concreto armado envolvidos completamente com sistema em PRF, observa-se perda de aderência do agregado ocorrendo deformações nas fibras menores que a deformação última. Com o objetivo de se evitar esse modo de ruptura, a deformação máxima utilizada no dimensionamento deve ser limitado a 0,4% para esse tipo de aplicação. Essa limitação é baseada em estudos experimentais e deformações superiores não devem ser utilizadas para elemento reforçados ao cisalhamento com PRF.

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (3.35)$$

em que: ε_{fu} : Deformação específica última do reforço.

Já em elementos reforçados ao cisalhamento com envolvimento em “U” ou por colagem nas faces laterais, observa-se a ocorrência de delaminação do concreto. Desta forma, torna-se necessário levar em consideração tensões de aderência para este sistema e o nível de tensão efetiva que pode ser aplicada. Para valores de cálculo, utiliza-se um coeficiente de redução κ_v ao reforço.

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (3.36)$$

Esse coeficiente de redução do efeito de ligação é obtido pela Equação 3.14, levando em consideração a força no concreto, o tipo de envolvimento do reforço e a rigidez das lâminas de fibras.

$$\kappa_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (3.37)$$

O comprimento de ligação efetiva L_e , onde concentra-se a maior parte dos esforços de aderência, pode ser obtido por:

$$L_e = \frac{23300}{(n.t_f.E_f)^{0,58}} \quad (3.38)$$

O coeficiente de redução do efeito de aderência também depende dos fatores de modificação k_1 e k_2 , que levam em consideração a resistência do concreto e o modo de envolvimento das fibras na viga, os quais são expressos pelas Equações 3.16 e 3.17.

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3} \quad (3.39)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv}-L_e}{d_{fv}} & \text{envolvimento em "U"} \\ \frac{d_{fv}-2.L_e}{d_{fv}} & \text{colagem lateral} \end{cases} \quad (3.40)$$

A metodologia utilizada para determinação de κ_v foi validada para elementos estruturais com tensões de cisalhamento altas e momento fletor baixo. Apesar de não ser confirmada para a utilização em vigas reforçadas ao cisalhamento combinadas com tensões por flexão altas, considera-se que este coeficiente seja conservador o suficiente para estes casos.

Fixações mecânicas podem ser utilizadas nas extremidades a fim de desenvolver maior aderência do PRF ao concreto, porém em nenhum caso a deformação no compósito pode ultrapassar 0,4%.

A força resistente de cisalhamento na viga reforçada é determinada pela soma da contribuição do compósito em PRF e da armadura transversal. Esta soma deve ter uma limitação baseada nos critérios da ACI 318 (2005), conforme apresentado na Equação 3.18.

$$V_s + V_f \leq 0,66 \cdot \sqrt{f'_c \cdot b \cdot d} \quad (3.41)$$

3.2.3 Critérios da Bulletin FIB 14 (2004)

Para o modelo de cálculo utilizado, o reforço de PRF pode ser tratado de modo análogo à armadura transversal, considerando que o compósito é solicitado por tensões normais na

direção principal das fibras. A contribuição do reforço ao cisalhamento por PRF pode ser obtido pela Equação 3.19.

$$V_{fd} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \text{sen}\alpha \quad (3.42)$$

em que:

- $\varepsilon_{fd,e}$: Valor de cálculo da deformação efetiva do PRF;
- b_w : Largura mínima da seção;
- d : Altura útil da seção transversal
- E_{fu} : Módulo de elasticidade principal do PRF;
- θ : Ângulo de inclinação da fissura do concreto em relação ao eixo da viga, normalmente assumido como 45°, e;
- α : Ângulo de inclinação da orientação das fibras em relação ao eixo da viga.

Em casos de utilização do reforço ao cisalhamento com aplicação de tecido contínuo, a taxa de reforço ρ_f é dado por:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot \text{sen}\alpha}{b_w} \quad (3.43)$$

Já para aplicação de reforços em PRF por meio de faixas com espessura t_f e espaçadas por s_f , a taxa ρ_f pode ser obtida por:

$$\rho_f = \left(\frac{2 \cdot t_f}{b_w} \right) \cdot \left(\frac{b_f}{s_f} \right) \quad (3.44)$$

Para rupturas por aderência, nos casos de aplicação do compósito com envolvimento em “U” ou colagem lateral, utiliza-se um fator de segurança $\gamma_f = 1,3$.

Para os elementos reforçados com envolvimento total, o controle de ruptura dado pela deformação específica do PRFC é determinado por:

$$\varepsilon_{f,e} = 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (3.45)$$

Já para elementos reforçados ao cisalhamento com envolvimento em “U” ou por colagem lateral, a deformação específica efetiva deve ser obtida pelo menor dos valores seguintes, que levam em consideração o descolamento e a ruptura do PRFC, respectivamente.

$$\varepsilon_{f,e} = \text{menor} \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} ; 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \right] \quad (3.46)$$

em que: ε_{fu} : Deformação específica de ruptura do PRFC, e;

f_{cm} : Resistência média à compressão do concreto.

Por o valor da deformação específica do PRFC se tratar de um valor médio, utiliza-se multiplica-lo por um fator $k = 0,8$ para se obter o valor característico da deformação.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O método de pesquisa realizado foi experimental. Este capítulo será iniciado pelo estudo preliminar que consiste em um levantamento do comportamento de estruturas de concreto reforçadas com compósitos de fibras de carbono e seu modo de ruptura quanto ao desprendimento do reforço ao substrato de concreto.

O trabalho consiste na avaliação do comportamento de vigas de concreto armado reforçados à flexão e ao cisalhamento, com a adição de sistema de ancoragem da manta por meio de cordão de fibra de carbono, posicionados nas extremidades dos reforços. Após a realização dos ensaios descritos, são apresentadas as análises dos dados obtidos.

O estudo experimental foi desenvolvido nos laboratórios do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Dinâmica das Cataratas – UDC, na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná.

Inicialmente serão apresentadas as características dos materiais componentes do concreto utilizado para a confecção dos elementos estruturais estudados, com base nos ensaios de caracterização. Em seguida, serão descritas as características técnicas dos produtos utilizados para o reforço da estrutura. Por fim, serão expostas as características das vigas estudadas e os métodos de avaliação de seu comportamento estrutural.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Para o melhor entendimento do comportamento estrutural das vigas estudadas, serão apresentadas neste capítulo as características dos materiais que compuseram os elementos analisados.

4.1.1 Fôrmas

Para a moldagem das vigas foram utilizadas fôrmas de madeira serrada, da espécie Pinus Taeda. Nas faces que ficarão em contato com o concreto foi realizado lixamento manual. Para garantir a desforma das vigas, foi utilizado desmoldante e protetor de fôrma, conforme ficha técnica do fabricante.

4.1.2 Concreto

Para as vigas foi utilizado concreto dosado em central, cujas características fornecidas pelo fabricante estão descritas na Quadro 2.

Quadro 2 – Características do concreto

Dados fornecidos pelo fabricante	
Resistência	f_{ck} 30 MPa
Abatimento	10 cm (± 1)
Cimento	CP II F 40
Aditivo	Maximent PXT 70 – Matchem
Agregados	Areia Média Areia de Rocha Basalto VSI Brita 1 - Basalto VSI

A dosagem estabelecida pela concreteira para atingir as características solicitadas foi determinada pelo consumo de materiais apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Consumo de materiais para dosagem do concreto

Cimento (kg/m ³)	Areia Média (kg/m ³)	Areia de Rocha (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (ml/m ³)
345	563	303	1032	190	2418

Para um melhor entendimento do comportamento do concreto, fez-se a caracterização dos materiais que o compõem. Para isso, foram coletadas amostras dos agregados no depósito da empresa fabricante do concreto, seguindo as orientações da NBR NM 26 (2009), e levadas ao laboratório de materiais de construção para a caracterização.

4.1.3 Agregados

Para conhecimento das características do agregado grão e miúdo que serão utilizados no concreto das vigas em estudo, foi realizada uma caracterização dos materiais conforme as

normas brasileiras vigentes. Os resultados de caracterização dos agregados graúdos e miúdos estão detalhados no Apêndice D.

4.1.1.1 Agregado miúdo

A areia natural utilizada nesta pesquisa é extraída do Rio Paraná, no Porto de Guaíra, e transportada por meio de balsas até a região de Foz do Iguaçu – PR. A areia de rocha basáltica foi extraída de pedreira situada em Foz do Iguaçu – PR. Para os ensaios de caracterização do material foram utilizadas as normas vigentes apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Ensaios de caracterização do agregado miúdo

Característica	Norma
Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária em estado compactado ou solto	ABNT NBR NM 45:2006

4.1.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nessa pesquisa é extraído de pedreira localizada no município de Foz do Iguaçu – PR, e é proveniente da britagem de rochas basálticas. Para os ensaios de caracterização do material foram utilizadas as normas vigentes apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Ensaios de caracterização do agregado graúdo

Característica	Norma
Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
Determinação da massa específica	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006

4.1.2 Aço

O aço utilizado para a confecção da armadura que foi usada no concreto das vigas estudadas é da categoria CA-50 e CA-60 para as armaduras longitudinal e transversal. Foram

ensaiadas quatro amostras de cada diâmetro utilizado, sendo que o primeiro para obter somente a tensão de ruptura de referência e para os outros três foi também encontrada a tensão de escoamento. A tabela 1 apresenta os valores da caracterização do aço.

Tabela 1 – Características da armadura

Amostra	Diâmetro (mm)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	4,2	625,4	795,3
2	4,2	607,2	804,2
3	4,2	623,3	799,3
1	5,0	645,0	822,5
2	5,0	645,8	821,3
3	5,0	651,3	829,3
1	6,3	561,5	745,6
2	6,3	549,8	741,1
3	6,3	560,0	743,7
1	16,0	581,4	728,5
2	16,0	582,1	722,4
3	16,0	580,6	730,1

Os valores obtidos neste ensaio foram utilizados para a análise teórica simplificada da carga de ruptura das vigas.

4.1.3 Sistema de reforço em PRFC

O sistema de reforço das vigas foi composto por tecido de fibra de carbono coladas externamente na face tracionada através de sua aplicação sobre resina epóxi. Para o sistema de ancoragem da manta, objeto de estudo dessa pesquisa, foi utilizada conexão estrutural por corda de carbono, aplicados com resina epóxi de baixa viscosidade.

A seguir são apresentadas as características técnicas dos produtos utilizados na produção das vigas. Por se tratar de produtos industrializados e certificados, considerou-se os dados fornecidos pelo fabricante em seus respectivos catálogos técnicos.

4.1.3.1 Tecido de fibra de carbono

O sistema de reforço à flexão e ao cisalhamento das vigas estudadas foi realizado utilizando tecido de fibra de carbono, unidirecional, que pode ser aplicado tanto por processo

úmido ou seco. As principais propriedades do produto SikaWrap[®]-300 C são apresentadas na Tabela 2

Tabela 2 – Características da manta de fibra de carbono

Característica	Dados técnicos
Gramatura	304 g/m ² + 10 g/m ²
Espessura do tecido (baseado na quantidade de fibra)	0,167 mm
Densidade da fibra	1,82 g/cm ³
Resistência à tração (nominal)	4.000 N/mm ²
Módulo de elasticidade	230.000 N/mm ²
Alongamento na ruptura (nominal)	1,7 %

Fonte: Sika (2015)

4.1.3.2 Adesivo de impregnação do tecido

O material utilizado para a colagem do tecido de fibra de carbono no substrato de concreto foi o Sikadur[®] 330, definido pelo fabricante como adesivo estrutural à base de epóxi, bicomponente para impregnação e colagem. Suas principais características técnicas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do adesivo de impregnação

Característica	Dados técnicos
Densidade	1,30 kg/l (+0,1 kg/l)
Resistência à tração	30 MPa (7 dias a + 23°C)
Resistência de aderência	Falha no concreto (> 4 MPa) em substrato jateado com areia, com mais de 1 dia de idade.
Módulo de elasticidade	Na flexão: 3800 MPa (7 dias a +23°C) Na tração: 4500 MPa (7 dias a +23°C)
Alongamento na ruptura	0,9% (7 dias a +23°C)

Fonte: Sika (2015)

4.1.3.3 Corda de fibra de carbono

O sistema de ancoragem do reforço à flexão e ao cisalhamento por meio de tecido de fibras de carbono, objeto da pesquisa, foi feito com a implantação de corda unidirecional de

fibra de carbono, envolta em embalagem plástica, que atua como fibra conectora para a ancoragem do tecido. As principais características do material estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do cordão de fibra de carbono (SikaWrap®FX-50C)

Característica	Dados técnicos
Densidade	1,82 g/cm ³
Resistência à tração	4.000 N/mm ²
Módulo de elasticidade	240.000 N/mm ²
Alongamento na ruptura (nominal)	1,6%

Fonte: Sika (2015)

4.1.3.4 Resina de impregnação da corda da ancoragem

A impregnação da corda de fibra de carbono utilizada para ancoragem do reforço foi realizada utilizando um adesivo epóxi de baixa viscosidade que, além desta finalidade, também é indicado para aplicação em reparos e injeção de trincas e fissuras estruturais no concreto. Denominado comercialmente por Sikadur®-43, o produto em questão tem como características principais os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Características da resina de impregnação da ancoragem

Característica	Dados técnicos
Resistência à tração	25 g/cm ³
Resistência à compressão	53 N/mm ²
Módulo de elasticidade	10.600 N/mm ²
Tensão de aderência sobre o concreto	4 N/mm ²

Fonte: Sika (2015)

4.1.3.5 Resina de injeção para ancoragem

A aplicação do sistema de ancoragem por cordão de fibras de carbono foi realizada com a utilização de resina de injeção, denominada comercialmente como Anchorfix®-4. Trata-se de um sistema epóxi bi-componente, 100% sólido, insensível à umidade e tixotrópico. Suas características são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do adesivo de injeção para ancoragem

Característica	Dados técnicos
Resistência ao cisalhamento	25,5 N/mm ²
Resistência à compressão	71,6 N/mm ²
Módulo de elasticidade	1.863 N/mm ²
Tensão de aderência sobre o concreto	20,6 N/mm ²

Fonte: Sika (2015)

4.2 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

Para se obter os resultados propostos nos objetivos desta pesquisa, foram analisadas vigas reforçadas com manta de fibras de carbono quanto aos esforços de flexão e cisalhamento.

A quantidade de vigas para as análises foi determinada com base nas bibliografias estudadas e nas limitações encontradas dos equipamentos disponíveis no laboratório. Outras limitações, como a disponibilidade de extensômetros para a instrumentação, também influenciaram na escolha das dimensões. As vigas dispuseram de seção transversal retangular com dimensões de 12 x 25 cm e comprimento total de 260 cm.

Para o dimensionamento das armaduras que compõem a viga foi levado em consideração o tipo de reforço aplicado. Além disso, para que fosse possível chegar mais próximo do valor real das cargas de ruptura, não foram aplicados quaisquer coeficientes de segurança, atribuindo somente as propriedades dos materiais obtidas por meio dos ensaios no laboratório.

As características das vigas e seus respectivos reforços estão descritos a seguir.

4.2.1 Vigas reforçadas à flexão

A análise experimental consiste em ensaios à flexão a quatro pontos, de cinco vigas de concreto armado, dimensionadas e armadas igualmente à flexão e ao cisalhamento. Essas vigas foram divididas conforme composição de reforço e incremento de ancoragem das fibras.

Foi executada uma viga de referência (VFR), feita em concreto armado somente, sem a utilização de algum tipo de reforço. A mesma serviu como parâmetro de referência para comparações com valores de rigidez das demais vigas, variando de acordo com a utilização dos reforços propostos.

A viga VF0 foi construída a partir da configuração original, com o incremento da utilização de reforço à flexão de manta em fibra de carbono, por meio de colagem do tecido na face tracionada do elemento de concreto armado. Esse modelo serviu para, além de comparar o aumento de rigidez provocado pela aplicação do reforço, também possibilitar a obtenção de valores de referência para um comparativo com as vigas que foram construídas com sistema de ancoragem da manta. Foi possível, nesse modelo, analisar o comportamento da viga reforçada, bem como seu modo de ruptura prematuro causado pelo desprendimento da manta ao substrato.

As vigas VF1, VF2 e VF3 foram executadas idênticas ao modelo da Viga VF0, entretanto, com o incremento de ancoragem do reforço em fibras de carbono através do sistema de cordão de fibras de carbono. Nesse modelo, objetivou-se analisar o aumento de rigidez das vigas que utilizam o sistema de ancoragem, com relação às vigas sem o sistema de ancoragem. Foi possível, também, analisar o modo de ruptura das mesmas.

O Quadro 6 demonstra a especificação de cada modelo de viga que foi analisado à flexão.

Quadro 6 – Especificação das vigas – Grupo 1

Vigas	Especificação
VFR	Viga de referência, sem reforço
VF0	Viga com reforço em manta de fibra de carbono
VF1	Viga com reforço em manta de fibra de carbono, com sistema de ancoragem
VF2	Viga com reforço em manta de fibra de carbono, com sistema de ancoragem
VF3	Viga com reforço em manta de fibra de carbono, com sistema de ancoragem

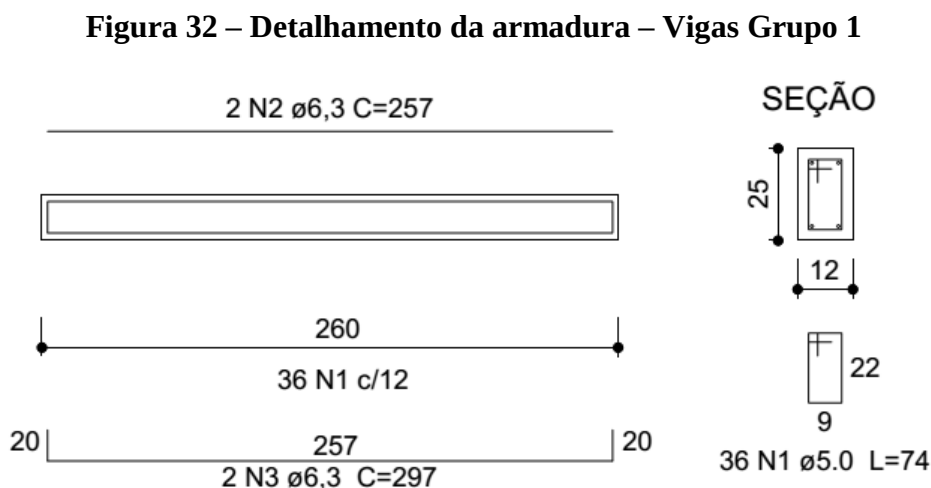
As armaduras longitudinais das vigas deste grupo foram dimensionadas por meio de processo iterativo de convergência momento x curvatura, conforme apresentado no Capítulo 3.1, de forma que as mesmas trabalhassem no domínio 2 de deformações, para que se possa avaliar o comportamento do reforço sem que haja ruptura do tipo frágil, por esmagamento da região comprimida do concreto.

Para a mesma finalidade, a armadura transversal foi dimensionada, utilizando os critérios da NBR 6118 (2014), para que a ruptura das vigas não aconteça por esmagamento das bielas comprimidas ou por escoamento dos estribos.

Assim, as vigas deste grupo foram construídas com armadura longitudinal composta por quatro barras de aço CA-50, com 6,3 mm de diâmetro, sendo duas superiores e outras duas

inferiores. A armadura transversal foi formada por estribos de aço CA-60, com diâmetro de 5,0 mm, espaçados a cada 7 cm, uniformemente.

A Figura 32 apresenta o detalhamento das vigas do Grupo 1.



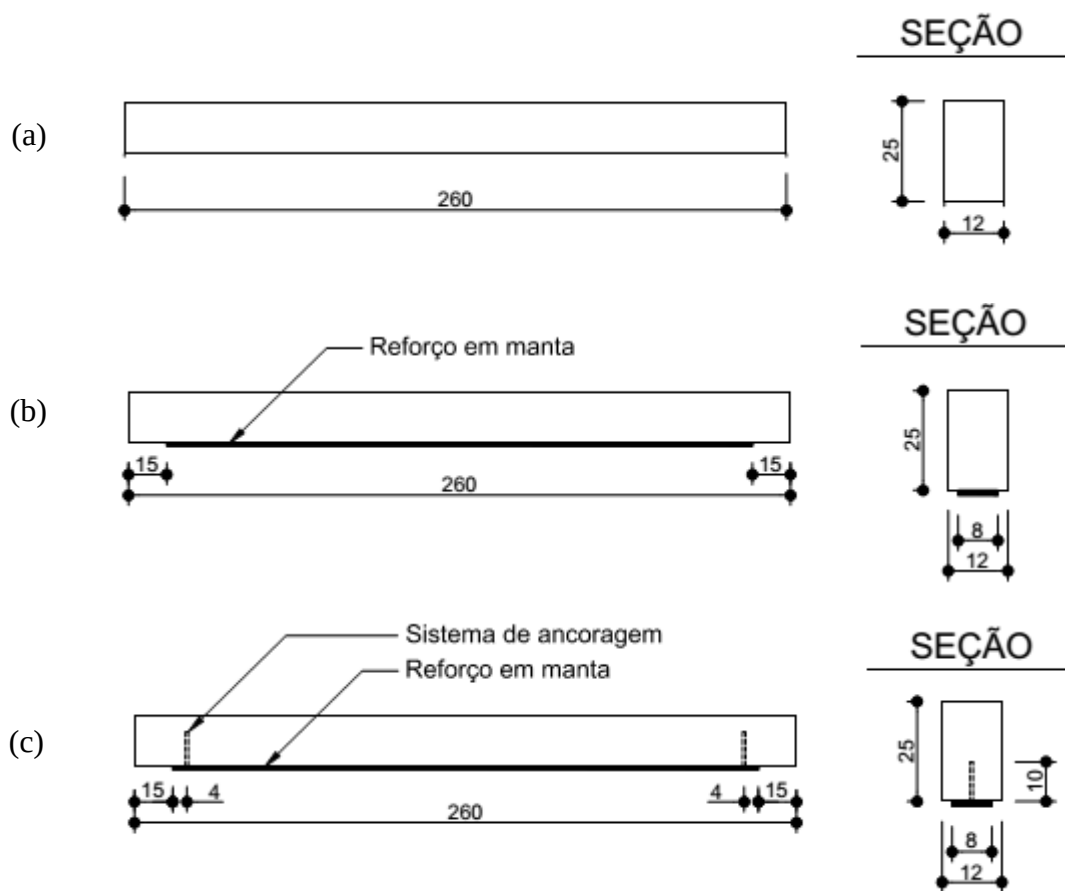
Os cobrimentos utilizados para a armadura foram de 1,5 cm, em função da seção transversal utilizada ser reduzida. Como o objetivo da pesquisa não teve relações com a durabilidade da estrutura, possibilitou-se descumprir as prescrições normativas da NBR 6118 (2014).

O mecanismo de ancoragem estudado visa evitar ou retardar o desprendimento do reforço, através do aumento da rigidez do PRFC em suas extremidades. O tecido foi aplicado em apenas uma camada na face tracionada da viga, no sentido longitudinal ao seu eixo, e sem envolvimento lateral.

O posicionamento do sistema de ancoragem foi definido baseado em alguns estudos que apresentam que a região de maior tensão de cisalhamento entre o compósito e o substrato de concreto é a região mais próxima da extremidade do reforço. Em função da falta de outros estudos que apresentem o comportamento do mecanismo quando solicitado, optou-se por utilizar essa configuração, podendo ser estendida a pesquisa com outros posicionamentos, em trabalhos futuros.

Na Figura 33 são apresentadas as configurações da viga de referência VFR e das vigas com reforço VF0, VF1, VF2 e VF3.

Figura 33 – Detalhamento dos sistemas de reforço e ancoragem à flexão; (a) VFR; (b) VF0; (c) VF1, VF2 e VF3.



Através do diagrama momento-curvatura, a viga de referência foi dimensionada, possibilitando a verificação do momento último de ruptura, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Dimensionamento preliminar à flexão da viga VFR – Grupo 1

Viga	f_c (MPa)	A_s (cm ²)	M_u (kNm)	P_u (kN)
VFR	30	1,247	7,67	18,80

Para verificação preliminar da carga de ruptura por cisalhamento foi utilizado os parâmetros da NBR 6118 (2014), conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Dimensionamento preliminar ao cisalhamento – Grupo 1

Viga	V_c (kN)	V_{sw} (kN)	V_u (kN)	P_u (kN)
VFR	38,15	74,17	112,32	224,63

4.2.2 Vigas reforçadas ao cisalhamento

Para este grupo, a análise experimental consistiu em ensaios à flexão por 3 pontos. As vigas do Grupo 2, tiveram suas armaduras longitudinal e transversal dimensionadas igualmente. Essas vigas foram divididas conforme composição de reforço e incremento de ancoragem das fibras.

Para este grupo, as armaduras foram dimensionadas de forma que a ruptura aconteça por escoamento dos estribos e não por flexão. Para isso, a armadura longitudinal foi superdimensionada, utilizando-se o processo momento x curvatura.

A armadura transversal foi calculada pelos critérios da norma brasileira NBR 6118 (2014), sendo, neste caso, subdimensionadas.

Para isso, as vigas do grupo 2 foram fabricadas com armadura longitudinal composta por quatro barras de aço CA-50, com 16,0 mm de diâmetro, sendo duas superiores e duas inferiores. A armadura transversal foi formada por estribos de aço CA-60, com 4,2 mm de diâmetro e espaçados a cada 18 cm.

Semelhante às vigas reforçadas à flexão, foi executada uma viga de referência (VCR), construída somente em concreto armado, sem a utilização de algum tipo de reforço. Esta serviu como parâmetro de referência para comparações com valores de rigidez das demais vigas, variando de acordo com a utilização dos reforços propostos.

A viga VC0-90 foi construída a partir da configuração original, com o incremento da utilização de reforço ao cisalhamento em manta de fibra de carbono, por meio da colagem do tecido nas faces laterais dos elementos de concreto armado, por tiras orientadas a 90° em relação ao eixo das vigas. Estes modelos também serviram para, além de comparar o aumento da rigidez provocado pela aplicação do reforço, também possibilitar a determinação de valores de referência para um comparativo com as vigas que serão construídas com o sistema de ancoragem da manta. Também foi possível analisar o comportamento das vigas reforçadas, bem como o modo de ruptura prematuro causado pelo descolamento ou desprendimento da manta.

As vigas VC1, VC2 e VC3 foram executadas idênticas ao modelo da viga VC0-90, porém com o incremento de ancoragem do reforço por meio do cordão de fibras de carbono, posicionados nas extremidades das tiras.

Para estes modelos, objetivou-se analisar o aumento da rigidez das vigas que utilizam o sistema de ancoragem, com relação às vigas sem o sistema. Também foi possível analisar o modo de ruptura das mesmas.

O Quadro 7 demonstra a especificação de cada modelo de viga que será analisado ao cisalhamento.

Quadro 7 – Especificação das vigas – Grupo 2

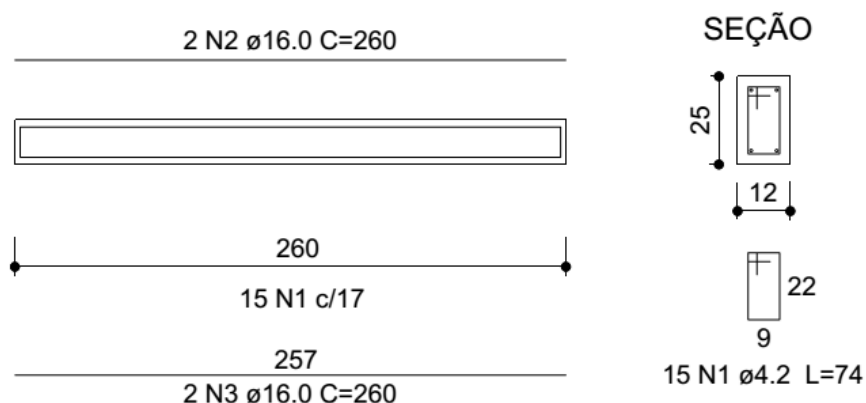
Vigas	Especificação
VCR	Viga de referência, sem reforço
VC0-90	Viga com reforço em manta de fibra de carbono em tiras, orientadas à 90° com relação ao seu eixo
VC1	Viga com reforço em manta de fibra de carbono em tiras, orientadas à 90° com relação ao seu eixo, com o sistema de ancoragem
VC2	Viga com reforço em manta de fibra de carbono em tiras, orientadas à 90° com relação ao seu eixo, com o sistema de ancoragem
VC3	Viga com reforço em manta de fibra de carbono em tiras, orientadas à 90° com relação ao seu eixo, com o sistema de ancoragem

Por os diâmetros das barras longitudinais serem elevados, foram utilizadas chapas metálicas como dispositivos de ancoragem. Estes chapas dispunham de quatro furos, onde as barras longitudinais foram soldadas.

Por limitações dos equipamentos utilizados, optou-se por reforçar somente um dos extremos da viga, visto que dessa forma foi possível determinar que a ruptura aconteceria naquele extremo, conforme aplicação do carregamento mostrado no item 4.5.2.

O detalhamento da armadura das vigas estudadas no Grupo 2 é ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Detalhamento da armadura – Vigas Grupo 2



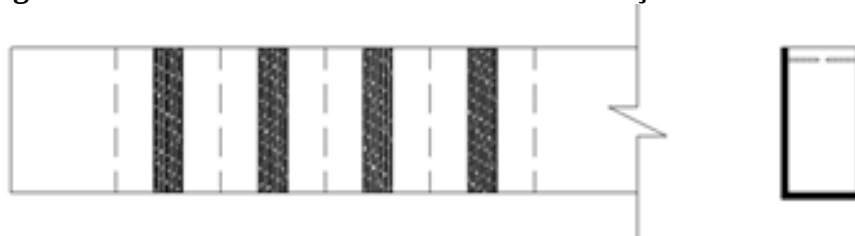
Os cobrimentos das armaduras utilizados foram os mesmo do Grupo 1. Os reforços em PRFC para o cisalhamento foram aplicados em uma camada na região sujeita ao maior esforço cortante.

O posicionamento do mecanismo de ancoragem seguiu a mesma concepção das vigas reforçadas ao cisalhamento, sendo aplicados nas extremidades do tecido.

Para as vigas VC0-90, VC1, VC2 e VC3, os tecidos foram aplicados com envolvimento em “U”.

As faixas tiveram largura de 50 mm para todos os casos. Os detalhes do reforço ao cisalhamento em fibras de carbono são mostrados na Figura 35.

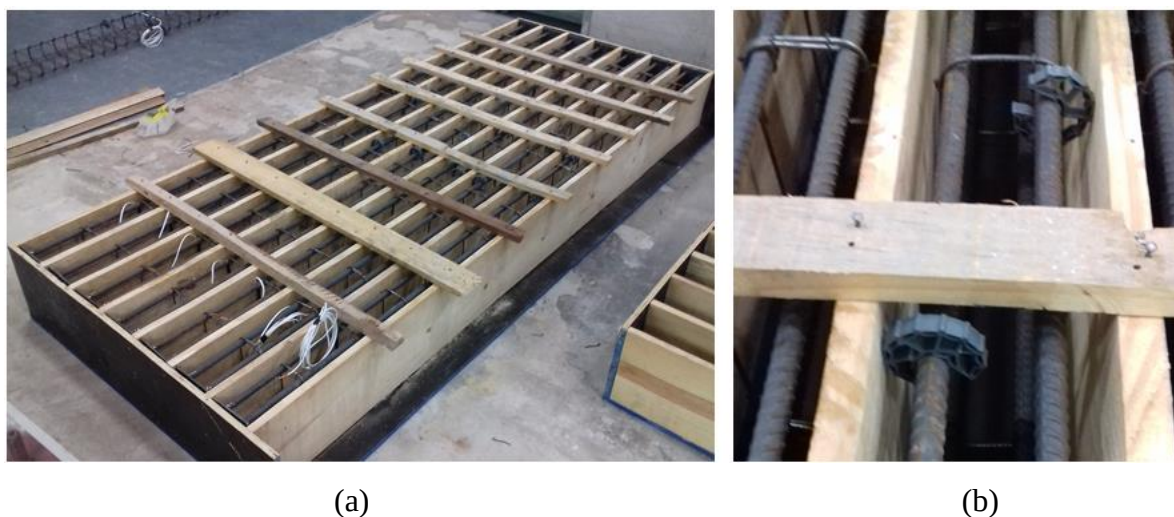
Figura 35 – Detalhamento dos sistemas de reforço ao cisalhamento



4.3 PREPARO DOS PROTÓTIPOS

As fôrmas foram construídas de forma a obedecer as dimensões previstas no dimensionamento. Após a confecção das armaduras conforme o projeto, as mesmas foram posicionadas dentro das fôrmas. Para garantir o cobrimento nominal desejado da armadura, utilizou-se espaçadores plásticos circulares, conforme mostrado na Figura 36.

Figura 36 – (a) Fôrmas com armadura posicionada; (b) espaçadores da armadura



Para a moldagem das vigas, o concreto foi transportado do caminhão betoneira até o local onde estavam as fôrmas através de carrinhos de mão. No ato do recebimento do concreto foi verificada sua consistência por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, mostrado na Figura 37. O valor encontrado para o abatimento foi de 14cm.

Figura 37 – Ensaio de abatimento de tronco de cone



Foi utilizado vibrador de imersão para o adensamento. Após preencher as fôrmas, foi realizado um ligeiro nivelamento da superfície superior, embora as irregularidades nessa face não interferem no resultado visto que não foram aplicados reforços nesta região.

Figura 38 – Vigas após moldagem



Logo após a concretagem, foi posicionada uma lona plástica sobre as vigas para evitar a evaporação prematura da água da mistura. Após cinco horas do término da concretagem foi iniciada a cura úmida por aspersão manual. No segundo dia após a moldagem, as vigas foram desformadas e levadas até a câmara úmida onde ficou submetida a aspersão contínua de água até o sétimo dia.

Após realizada a cura, observou-se que as vigas não apresentaram fissuras visíveis de retração, e as faces laterais e inferior se mostraram perfeitamente lisas e sem irregularidades, facilitando a aplicação dos reforços.

4.3.1 Moldagem dos corpos de prova

Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto foram obtido utilizando as normas NBR 5739 (2007) e NBR 8522 (2008), respectivamente.

Desse modo, foi possível determinar a resistência à compressão média referente a cada conjunto de vigas, conforme apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Controle tecnológico do concreto

Vigas	Corpo de Prova	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	E_c (MPa)	E_{cs} (MPa)
VF0 VF1	1	37,79	37,07	36.200	31.900
	2	38,24			
	3	35,19			
VFR VF2 VF3	4	36,92	37,06	36.150	31.750
	5	37,50			
	6	36,99			
	7	36,83			
VCR VC0-90	8	36,05	37,55	37.100	32.300
	9	37,37			
	10	38,32			
	11	38,46			
VC1 VC2 VC3	12	34,85	37,31	37.000	32.150
	13	37,84			
	14	37,14			
	15	39,41			

Para que fosse possível estimar a resistência a compressão do concreto de cada viga, e verificando que não seria possível ensaiar todas as vigas em estudo em um só dia, optou-se por dividir as rupturas dos corpos de prova proporcionalmente às rupturas das vigas.

A avaliação da resistência à compressão do concreto endurecido, foi realizada a moldagem, durante a concretagem, de vinte corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Estes foram desformados e curados submersos em água até a data de ruptura das vigas.

Figura 39 – Corpos de prova cilíndricos



4.4 APLICAÇÃO DO REFORÇO

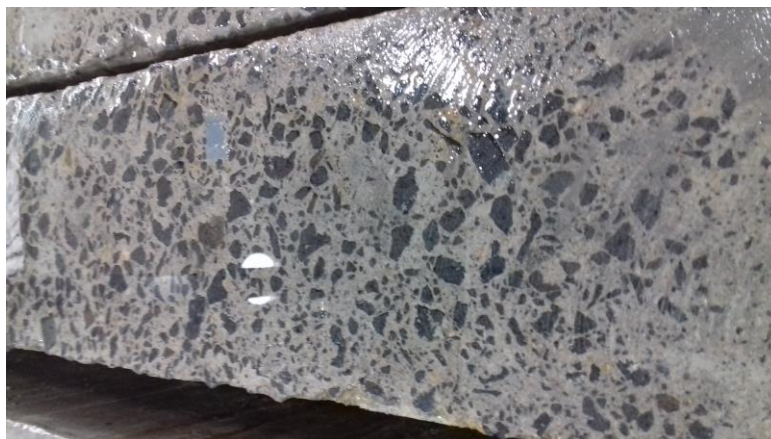
Neste item serão apresentadas as etapas seguidas das aplicações dos reforços e do sistema de ancoragem nas vigas estudadas. Todos os processos seguiram rigorosamente as recomendações do fabricante, visto a necessidade de eliminar a possibilidade de erros de aplicação, os quais podem influenciar nos resultados da pesquisa.

4.4.1 Preparação do substrato

O processo de preparação da superfície de concreto para a aplicação do reforço se fez com a utilização de uma esmerilhadeira manual equipada com disco diamantado. O

procedimento de retirada da camada superficial do concreto foi realizado com movimentos uniformes sobre o concreto até que os agregados graúdos ficassem expostos.

Figura 40 – Preparação do substrato



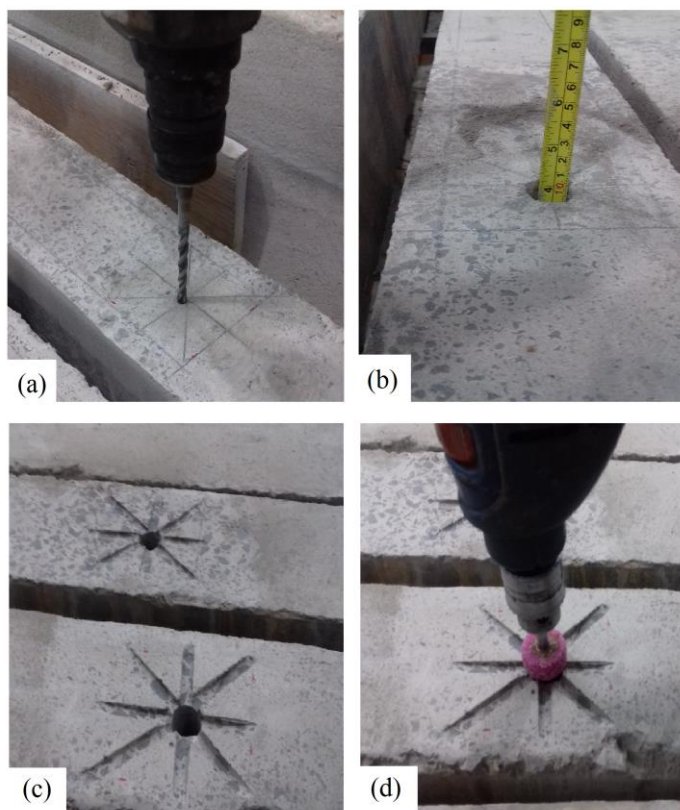
O preparo das superfícies se deu somente nas faces que receberiam a colagem do reforço, seja por flexão ou por cisalhamento.

4.4.2 Aplicação do sistema de ancoragem

O início da aplicação do sistema de ancoragem se deu com a marcação do posicionamento que iriam ser executados.

Após a determinação do local onde seriam executadas as ancoragens, fez-se a furação do concreto onde funcionaria o sistema de ancoragem. Os furos foram feitos com o auxílio de furadeira de impacto equipada com broca de diâmetro de 18 mm. Para os reforços de flexão, os furos foram feitos com profundidade de 100 mm. Já para os reforços ao cisalhamento a profundidade executada foi de 50 mm. Todas as dimensões das furações foram executadas de acordo com as recomendações do fabricante. O processo de preparação para aplicação do mecanismo é mostrado na Figura 41.

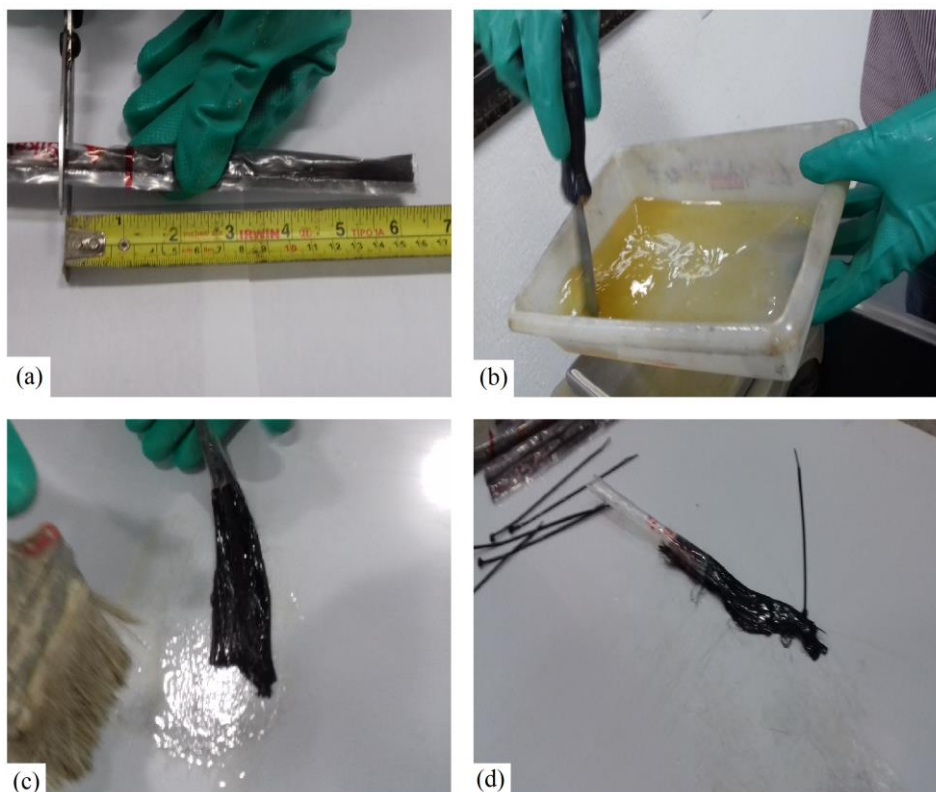
Figura 41 – Preparação para aplicação da ancoragem: (a) furação; (b) conferência da profundidade; (c) execução das fendas, e; (d) arredondamento dos cantos



Feitos os furos, procedeu-se a execução de oito fendas no concreto, em forma de estrela. Esta etapa foi executada com o auxílio de esmerilhadeira equipada com disco de desbaste. As fendas foram executadas com largura e profundidade de 8 mm aproximadamente.

Em seguida, utilizou-se furadeira com broca de desbaste na superfície dos furos para que os mesmos fossem arredondados e não apresentassem cantos vivos. Após todos estes processos, procedeu-se a limpeza dos furos e fendas com jatos de ar e escovas, para eliminar o pó das superfícies.

A aplicação do cordão de fibras de carbono como ancoragem foi realizada seguindo as seguintes etapas. Primeiramente o cordão é cortado ligeiramente maior que a profundidade do furo. O cordão é impregnado com a resina, amarrado na extremidade com abraçadeira plástica para facilitar sua inserção. As etapas de aplicação são mostradas na Figura 42.

Figura 42 – Preparação do cordão

Em seguida os furos foram preenchidos com o adesivo de injeção até próximo à superfície. O cordão, com comprimento maior que a profundidade do furo, tem seu excesso dividido nas oito fendas feitas no concreto e fixada com o adesivo de impregnação do reforço.

Figura 43 – Sistema de ancoragem aplicado

O comprimento das fendas a serem preenchidas foi determinado em função da largura do reforço a ser aplicado.

4.4.3 Aplicação do reforço

Inicialmente se fez a limpeza de toda a superfície a ser aplicada, com escova de cerdas plásticas, para que fossem retiradas todos os resíduos e/ou impurezas. O tecido foi cortado com o auxílio de estilete e régua de alumínio, para que fosse possível obter dimensões precisas.

Figura 44 – Procedimento de corte do tecido



A preparação do adesivo epóxi para a aplicação do tecido foi realizada misturando-se os componentes A e B, nas proporções indicadas pelo fabricante, e misturadas manualmente durante três minutos, até apresentar coloração e textura uniforme. Em função da rápida secagem do material após misturado, foi necessária a preparação do produto para a quantidade de três vigas por vez.

O processo de instalação do reforço consistiu na aplicação de uma primeira camada de adesivo, distribuída uniformemente com uma espátula plástica sobre a superfície de concreto, mantendo um consumo aproximado de 1,0 kg/m². A Figura 45 ilustra a aplicação do adesivo.

Figura 45 – Aplicação do adesivo sobre o substrato de concreto



Logo em seguida, procedeu-se a colocação da manta de fibra de carbono sobre o adesivo fresco, no sentido longitudinal ao eixo da viga. O tecido foi pressionado com as mãos até a resina refluir através de seus fios. Imediatamente após esse procedimento, aplicou-se a segunda camada do adesivo, também aplicada com espátula plástica e uniformemente distribuída sobre o tecido já colado. Para essa segunda camada, utilizou-se o consumo aproximado de $0,5 \text{ kg/m}^2$ de adesivo.

As Figuras 46 e 47 apresentam o procedimento de colagem dos reforços até o resultado da viga já reforçada.

Figura 46 – (a) colocação do tecido; (b) aplicação da segunda camada do adesivo

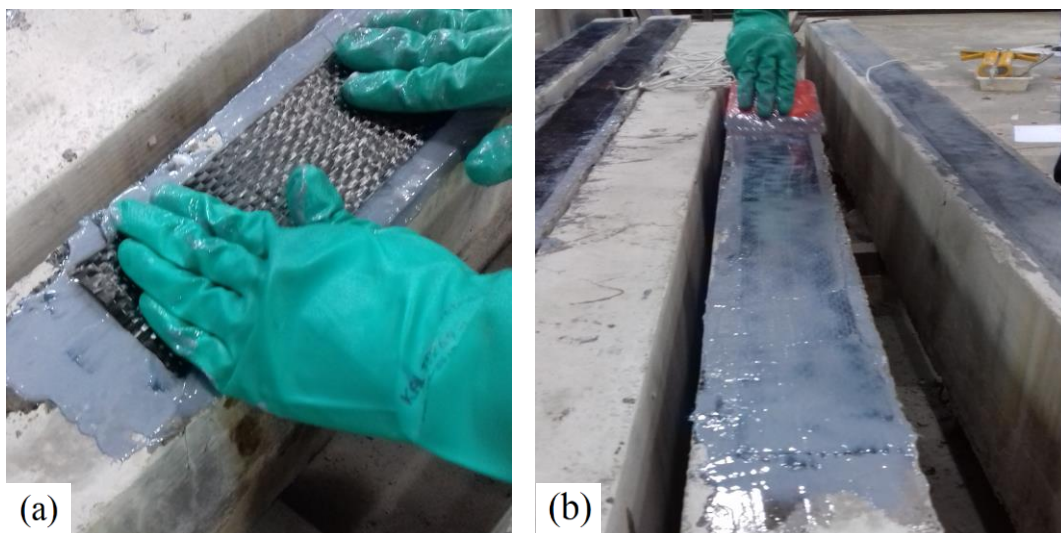
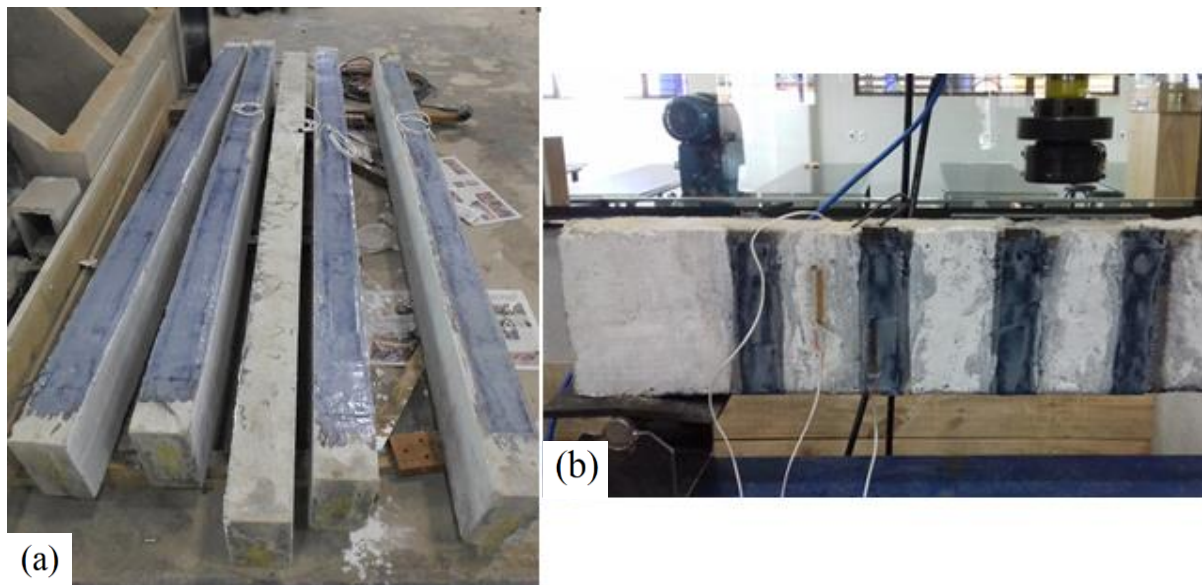


Figura 47 – Vigas com reforço aplicado: (a) flexão; (b) cisalhamento



4.5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados dentro do laboratório de engenharia civil do Centro Universitário Dinâmica das Cataratas – UDC, na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná.

4.5.1 Ensaio das vigas à flexão

Os estudos foram baseados em ensaios de vigas submetidas à flexão. As vigas descritas nos itens anteriores foram instaladas em um pórtico de reação equipado com cilindro hidráulico com capacidade de 500 kN. Para a leitura da carga aplicada utilizou-se uma célula de carga com capacidade de 500 kN.

As vigas foram posicionadas sobre roletes metálicos para simular apoios de primeiro e segundo gêneros. Os pontos de aplicação da força também dispuseram desse mecanismo. Entre os roletes e a superfície da viga foi colocada uma placa lisa metálica a fim de evitar o esmagamento da superfície de concreto, com uma melhor distribuição das tensões.

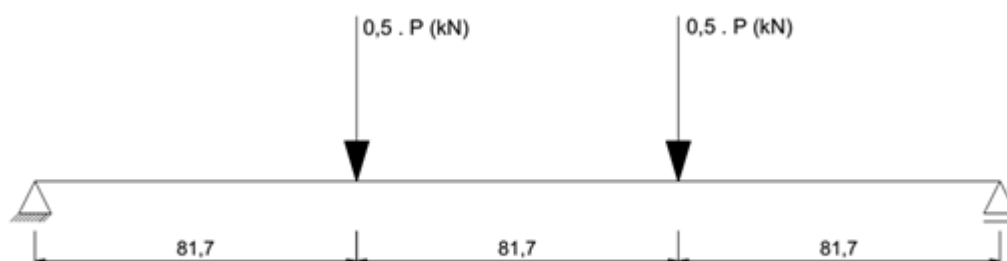
Quando necessário, para atingir os vãos estipulados e os espaçamentos entre as cargas concentradas aplicadas sobre a viga, foi utilizada uma viga metálica em perfil I, onde serão acoplados roletes para simular a articulação dos vínculos.

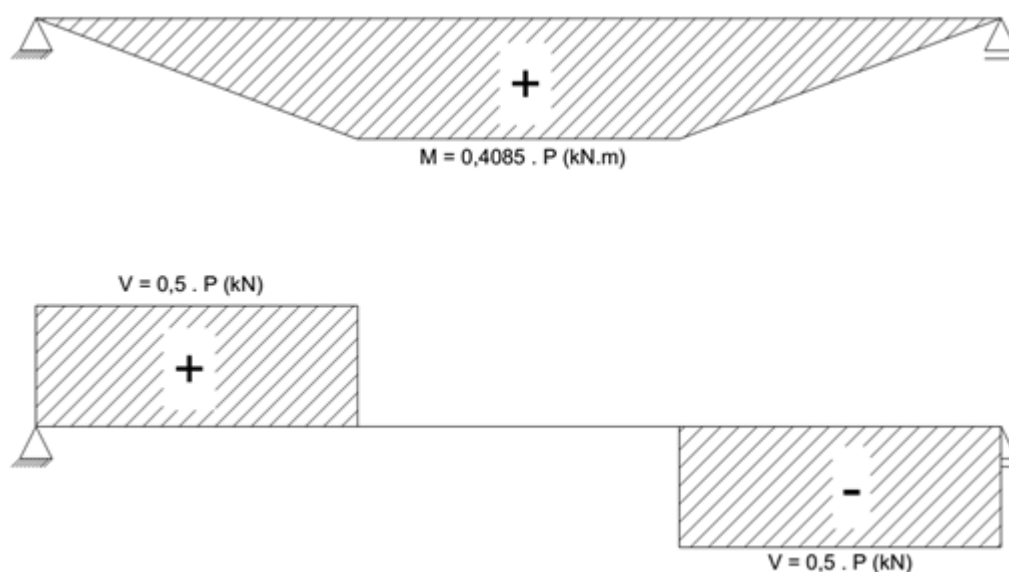
Figura 48 – Vigas com aplicação de carregamento

As vigas de concreto foram pintadas com tinta branca, para facilitar a visualização do aparecimento das fissuras. O aparecimento das fissuras será marcado para uma posterior análise do panorama de fissuração na viga.

4.5.2 Tipo de ensaio

Todas as vigas foram submetidas à flexão simples. A vigas do Grupo 1 foram testadas em ensaio por quatro pontos, com o objetivo de se aproximar ao máximo dos esforços provocados por uma carga distribuída, conforme representada pela Figura 49.

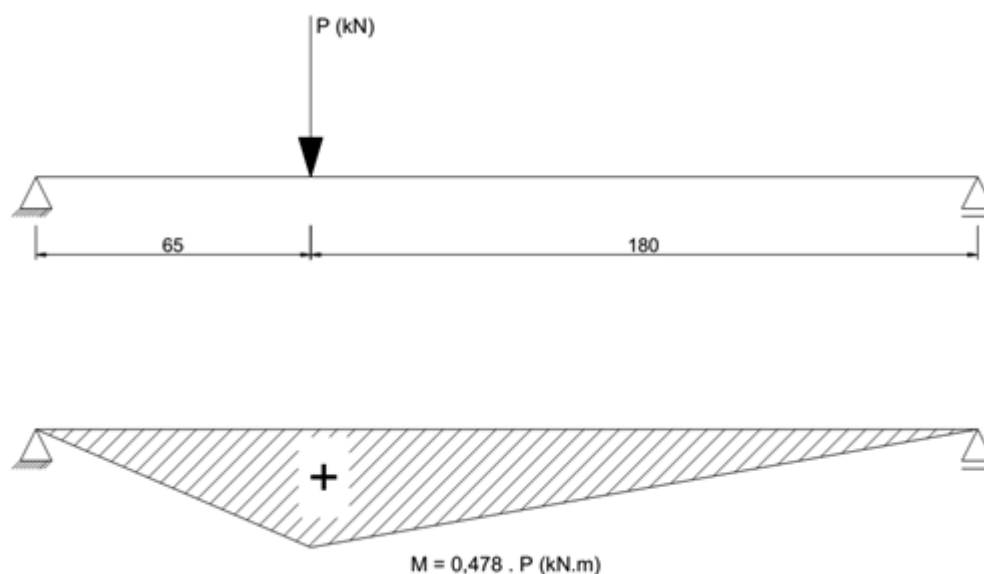
Figura 49 – Esquema de ensaio – Vigas do Grupo 1



Já para as vigas do Grupo 2, conforme justificado no item 4.2.2, a aplicação do carregamento se fez com apenas uma carga concentrada, posicionada próxima de um dos extremos da viga. Dessa forma, pôde-se conduzir a ruptura da viga ao lado com maior força cortante. Também foi possível instrumentar a viga somente no lado mais carregado.

A Figura 50 apresenta o esquema de ensaio das vigas do Grupo 2.

Figura 50 – Esquema de ensaio – Vigas do Grupo 2





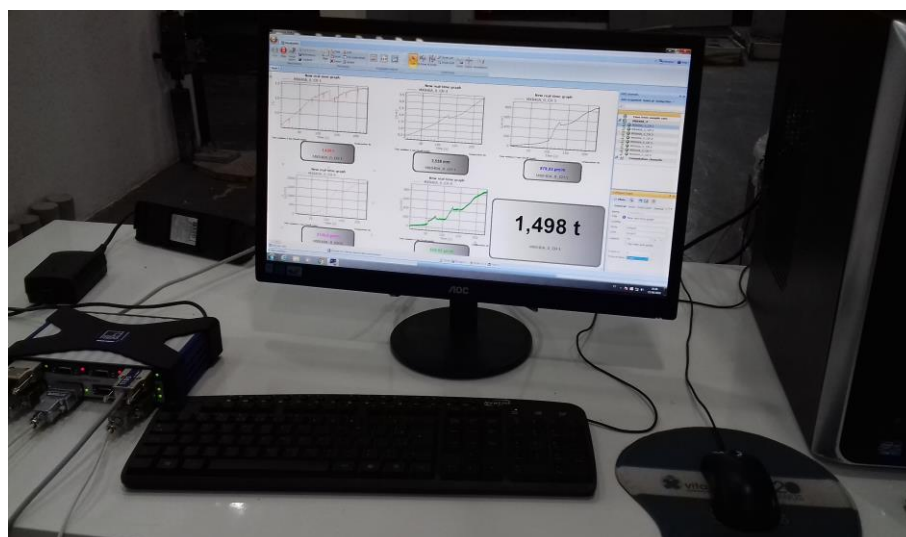
4.5.3 Instrumentação

A análise dos resultados foi realizada utilizando-se um sistema experimental composto por cilindro hidráulico com acionamento mecânico, célula de carga, extensômetros e transdutor de deslocamento potenciométrico.

Todos os instrumentos foram ligados a um sistema de aquisição de dados, da marca HBM, modelo MX840A, que por sua vez foi ligado a um computador, o qual foi possível fazer a visualização e o armazenamento dos dados por meio do programa Catman Easy, versão 3.4.2.

A Figura 51 ilustra o sistema de aquisição de dados em funcionamento para uma das vigas estudadas.

Figura 51 – Aquisição de dados



4.5.3.1 Aplicação e avaliação da carga

A carga foi aplicada mecanicamente com o auxílio de um cilindro hidráulico com capacidade de 500 kN. A intensidade das cargas aplicadas foram obtidas por célula de carga com capacidade final de 500 kN, posicionada sob o êmbolo do cilindro.

4.5.3.2 Avaliação da flecha

O deslocamento vertical foi obtido pela instalação de um transdutor de deslocamento potenciométrico, da marca HBM, modelo WA/100MM-T, localizado no ponto central de cada viga.

4.5.3.3 Avaliação das deformações

Uma avaliação criteriosa quanto à extensometria foi realizada, com o objetivo de se obter resultados confiáveis para a pesquisa. Foram instalados extensômetros em pontos estratégicos das vigas.

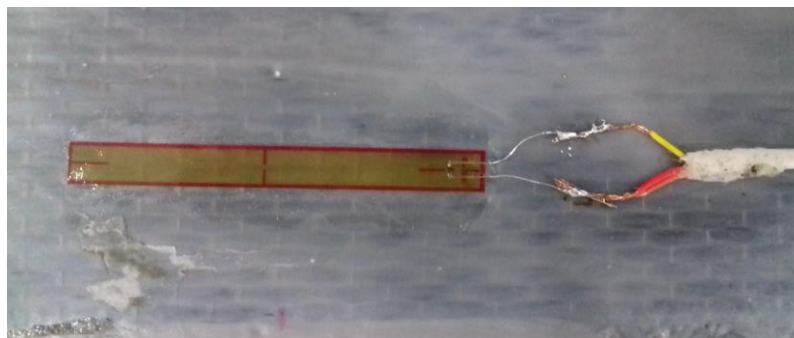
Para as vigas do primeiro grupo, reforçadas à flexão, foram instalados extensômetros localizados em pontos que se pudesse avaliar o comportamento do reforço com o sistema de ancoragem.

Para isso, todas as vigas do Grupo 1 dispuseram de um extensômetro na armadura longitudinal tracionada, em seu ponto médio. A instalação do dispositivo se fez com cuidado, protegendo-o com fita adesiva de auto fusão para que não ocorresse infiltração durante a concretagem.

Também se utilizou a aplicação de extensômetro na face tracionada de todas as vigas do Grupo 1, com o objetivo de analisar a deformação do concreto e compará-lo com os demais resultados obtidos.

Por fim, nas vigas reforçadas à flexão foram posicionados extensômetros sobre o tecido de fibra de carbono, obedecendo a orientação das fibras. O dispositivo para medição das deformações foi instalado no ponto médio de cada viga.

Figura 52 – Detalhe da aplicação do extensômetro



Para as vigas do Grupo 2, seguiram-se os mesmos critérios de posicionamento dos extensômetros. Porém, como neste caso o objetivo foi analisar os esforços transversais, os extensômetros da armadura foram posicionados no segundo estribo a partir da extremidade da viga.

Já o extensômetro que mediu a deformação do concreto foi instalado na face lateral da viga, exatamente sobre o posicionamento do segundo estribo.

Para as vigas reforçadas, foram posicionados extensômetros sobre o tecido, no sentido longitudinal às fibras. A faixa de reforço escolhida foi a que estava posicionada mais próxima ao segundo estribo da viga.

4.5.3.4 Avaliação das fissuras

Após serem pintadas de branco, as vigas foram avaliadas quanto ao surgimento das fissuras. Esse mapeamento foi evidenciado com o auxílio de uma caneta de tinta porosa, demarcando as fissuras a cada surgimento de nova fissura.

Figura 53 – Marcação das fissuras



5 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais, bem como as análises referentes aos dados. Em função da elevada quantidade de informações resultantes do programa experimental, utilizou-se um tratamento computacional para que estes sejam apresentados em forma de tabelas e gráficos, facilitando seu entendimento. Na sequência, são apresentadas as discussões e avaliações do comportamento das vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com PRFC e equipados com o sistema de ancoragem estudado.

Foram avaliados resultados de intensidade de carga aplicada, deslocamento vertical das vigas e deformações no compósito, na superfície de concreto mais próxima ao reforço e na armadura mais solicitada ao esforço preponderante.

Os ensaios de caracterização dos materiais do concreto e aço tiveram como finalidade buscar valores reais das características mecânica para a realização das análises teóricas simplificadas.

O capítulo será dividido basicamente em duas partes. A primeira tratará das análises e resultados obtidos para as vigas do Grupo 1, as quais foram reforçadas à flexão. Em seguida, serão apresentados os resultados e análises obtidas para as vigas reforçadas ao cisalhamento, descritas pelo Grupo 2.

5.1 VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO

Este capítulo apresenta os resultados das cargas de rupturas, deslocamentos verticais e deformações nos materiais de cada viga do Grupo 1.

É importante destacar que as intensidades de carga apresentadas para esse grupo de vigas referem-se ao carregamento obtido pela leitura da célula de carga, e que o valor das cargas concentradas aplicadas em cada viga deve ser considerada como metade do valor apresentado.

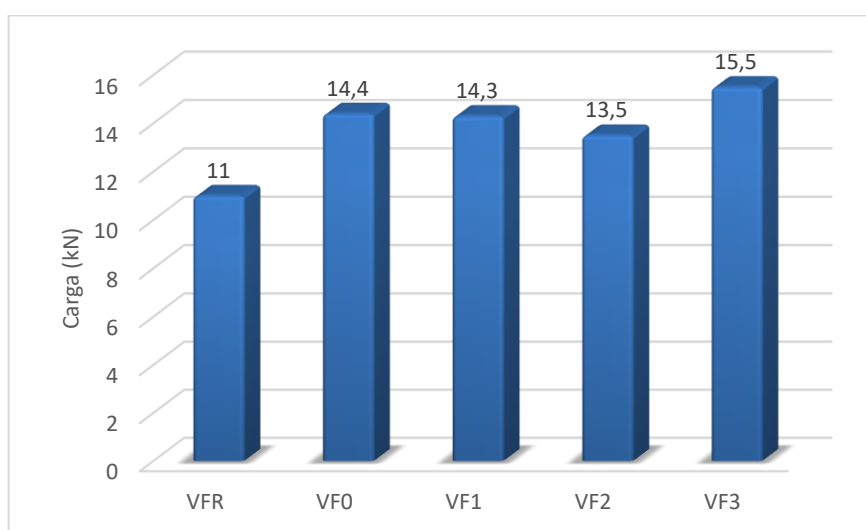
5.1.1 Carga de fissuração

A análise das cargas aplicadas às vigas é apresentada neste texto em dois momentos. Inicialmente serão apresentados os resultados do surgimento das primeiras fissuras na região tracionada do concreto.

Para este caso, a avaliação da carga de fissuração foi determinada por uma análise visual, onde foram observadas as cargas referentes ao aparecimento destas fissuras. Em função disso, é importante salientar que, apesar dos cuidados tomados nesta análise visual, os valores podem ser um tanto imprecisos.

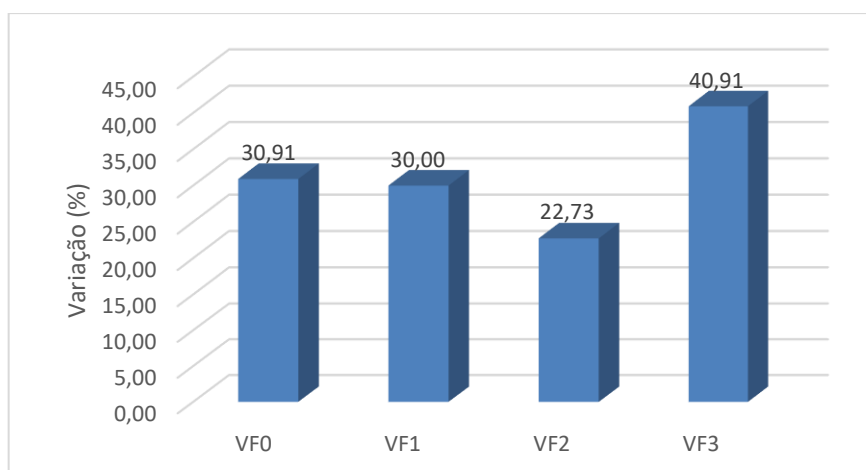
A figura 54 apresenta a comparação entre as cargas de fissuração das vigas estudadas no Grupo 1.

Figura 54 – Cargas de fissuração – Grupo 1



Já a Figura 55 ilustra a variação da carga de fissuração entre as vigas reforçadas em relação à viga de referência VFR.

Figura 55 – Variação da carga de fissuração – Grupo 1



Pode-se observar que a viga reforçada sem o mecanismo de ancoragem teve uma carga de fissuração de 30,91% superior à viga de referência. Já para as vigas VF1, VF2 e VF3 verificou-se valores com grande variação, que resultaram em uma média de carga de fissuração igual a 31,21% da viga VFR.

Silva (2001), em sua pesquisa experimental, verificou que somente as vigas com duas ou quatro camadas de reforço tiveram um retardamento do surgimento das primeiras fissuras, as quais resultaram em um acréscimo de carga de 29% e 43% maior que a viga de referência, respectivamente. Para viga com apenas uma camada, o autor observou um aumento de 14% e carga. Dessa forma, concluiu em seu trabalho que para o estado limite de utilização, o comportamento das vigas quanto ao aparecimento das fissuras só seria melhorado a partir da colagem da segunda camada de reforço.

Fortes (2000) destaca em sua pesquisa que, em seu estudo experimental, as vigas reforçadas à flexão com uma camada tiveram suas cargas de fissuração semelhantes à viga de referência. O autor justifica o ocorrido pelo fato de esse efeito ser dependente da resistência do concreto no banzo tracionado, a qual é sensível para pequenos deslocamentos.

Ferrari (2002) em sua dissertação de mestrado, observou que as vigas reforçadas apresentaram um acréscimo médio de carga de fissuração de cerca de 25%. Deve-se destacar que, das oito vigas reforçadas estudadas, cinco obtiveram carga de fissuração 29% maior que a viga de referência.

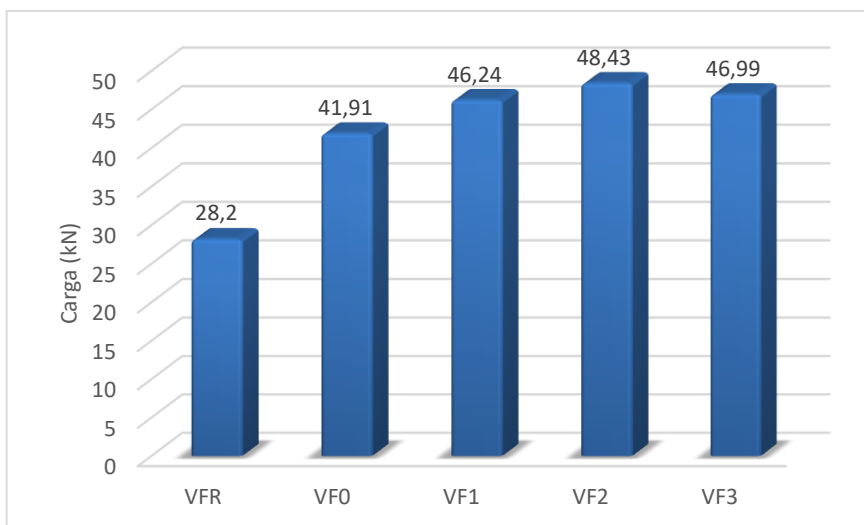
Dessa forma, pode-se considerar que a intensidade da carga de fissuração das vigas está diretamente ligada com a aderência do reforço com o substrato de concreto, bem como sua quantidade e rigidez. Isso justifica a variabilidade dos resultados obtidos nos estudos.

5.1.2 Carga de ruptura

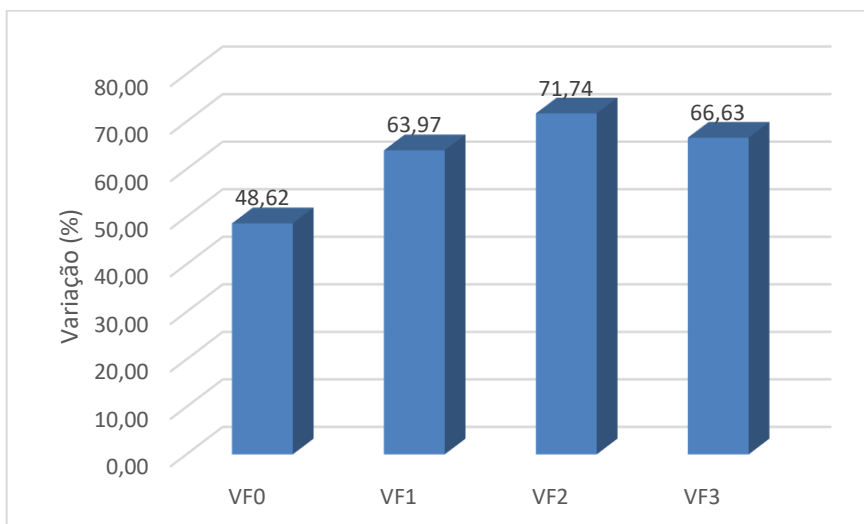
Para a análise do carregamento referente à ruptura por flexão das vigas ensaiadas a leitura foi feita por sistema eletrônico. Nesse capítulo, são apresentados os resultados da resistência das vigas à flexão utilizadas no estudo.

O modo de ruptura de cada viga é mostrado nos próximos capítulos para que se possam ser melhoradas as análises dos resultados.

A Figura 56 apresenta a intensidade das cargas de ruptura de cada uma das vigas do Grupo 1.

Figura 56 – Cargas de ruptura – Grupo 1

A Figura 57 demonstra a variação percentual entre as cargas de ruptura das vigas reforçadas em relação à viga de referência.

Figura 57 – Variação da carga de ruptura – Grupo 1

De acordo com as Figuras 56 e 57, a viga reforçada sem o sistema de ancoragem obteve um acréscimo de resistência à flexão de aproximadamente 48,62% em relação à viga de referência não reforçada. Analisando as vigas VF1, VF2 e VF3, foi possível observar que os mecanismos de ancoragem do reforço possibilitaram uma média de resistência à flexão de cerca de 67,44% maior que a viga VFR.

Chahrour e Soudki (2005) observaram que, no estudo experimental, a viga reforçada obteve um acréscimo de resistência à flexão de aproximadamente 26,3%. Para as vigas com mecanismo de ancoragem composto por chapas e parafusos, o incremento de carga foi de 36,2% em média.

Na pesquisa experimental de Beber (2003), as vigas reforçadas com uma camada de tecido em fibras de carbono apresentaram resistência à flexão média de 20,55% maior que a viga de referência não reforçada. Para as vigas reforçadas com seis camadas, esse acréscimo é de 63,4% de média.

Silva, Junior e Ferreira (2012) utilizaram um mecanismo de ancoragem composto por colagem de tira de tecido lateral. Neste caso, nas vigas reforçadas com uma camada de manta de fibra de carbono, pôde-se observar o alcance do momento fletor último, aumentando a capacidade de carga das vigas em 40%. Já para as vigas compostas por quatro camadas de tecido, observou-se um incremento da capacidade de carga de aproximadamente 257%.

Silva (2014) constatou em sua análise experimental que as vigas reforçadas, mesmo com um mecanismo de ancoragem composto por tiras de tecido de fibra de carbono colados transversalmente ao reforço, apresentaram colapso por descolamento do reforço ou destacamento do cobrimento.

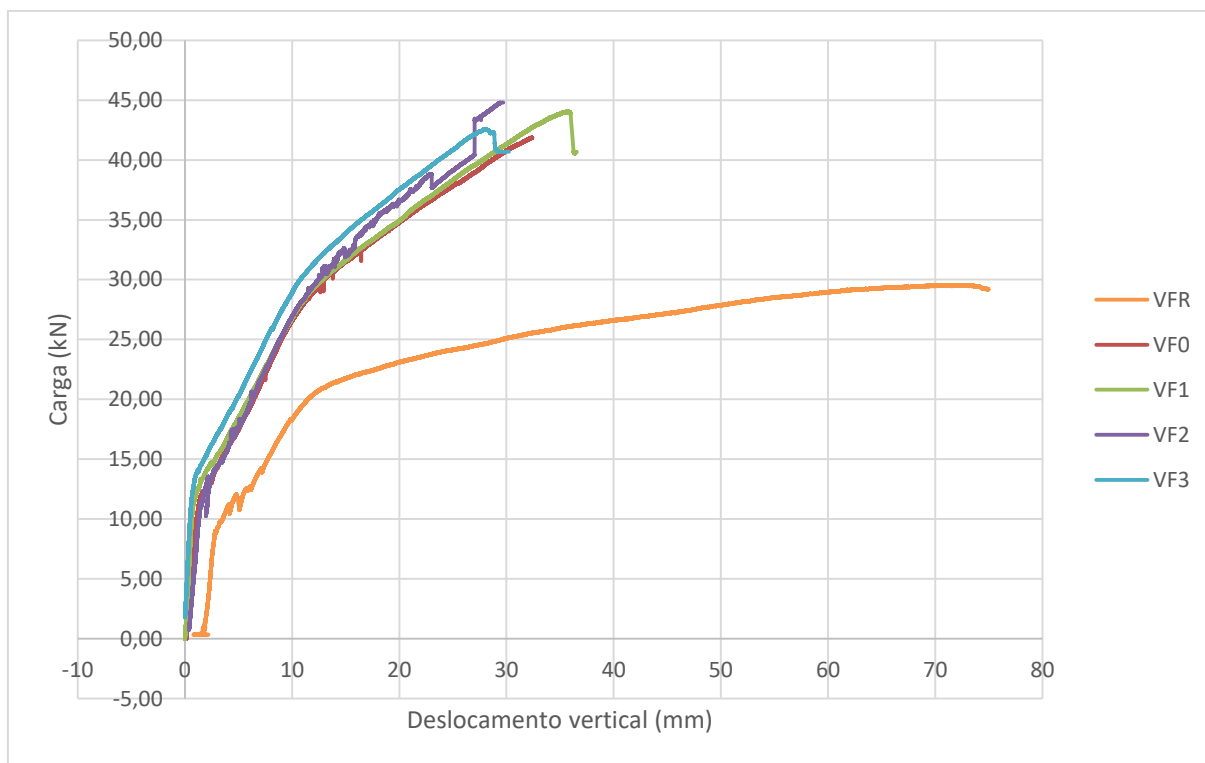
Para o estudo apresentado, cabe ressaltar que nas vigas VF1, VF2 e VF3 o reforço foi solicitado até sua capacidade máxima. Isso comprova que, se aumentado o número de camadas de tecido, o acréscimo de carga aplicada na viga deve aumentar significativamente em relação às demais.

5.1.3 Deslocamentos verticais

O deslocamento vertical observado na viga depende de alguns fatores como carga aplicada, vão, tipos de vinculação, características dos materiais e geométrica da peça.

A aplicação de reforço em PRFC em vigas de concreto armado são praticamente desprezíveis para o aumento de sua seção transversal. Entretanto, pelas propriedades da fibra de carbono, o momento de inércia de sua seção tem aumento significativo, influenciando diretamente na rigidez do elemento estrutural.

A Figura 58 apresenta o comparativo dos deslocamentos verticais no meio do vão de todas as vigas estudadas.

Figura 58 – Deslocamento vertical das vigas – Grupo 1

Nas pesquisas de Beber (2003) e Ferrari (2002), os autores observaram que, quanto aos deslocamentos verticais, todas as vigas estudadas tiveram comportamento semelhantes até a carga de fissuração.

Para Beber (2003), houve um aumento significativo da rigidez após a carga de fissuração, considerando o deslocamento vertical muito inferior quando comparado à viga de referência.

Araújo (2002), verificou em sua pesquisa que as vigas reforçadas à flexão com PRFC obtiveram aumento de rigidez, conforme variação da inclinação da curva apresentada no gráfico carga x deslocamento vertical.

Pode-se observar que, quanto aos deslocamentos verticais, todas as vigas reforçadas tiveram comportamento semelhante até próximo às cargas de ruptura. A viga VF0 apresentou rigidez muito parecida com as demais vigas reforçadas mesmo sem possuir os mecanismos de ancoragem, até a ruína por descolamento.

Nesse contexto, é importante analisar na Figura 58 que próximo às cargas de ruptura das vigas VF1, VF2 e VF3 acontecem algumas oscilações na relação carga aplicada por deslocamento vertical, até chegar à carga de ruína. Pode-se atribuir esse fato à uma possível

acomodação do reforço e, conseqüentemente, à solicitação dos sistemas de ancoragem nas extremidades.

5.1.4 Deformações específicas

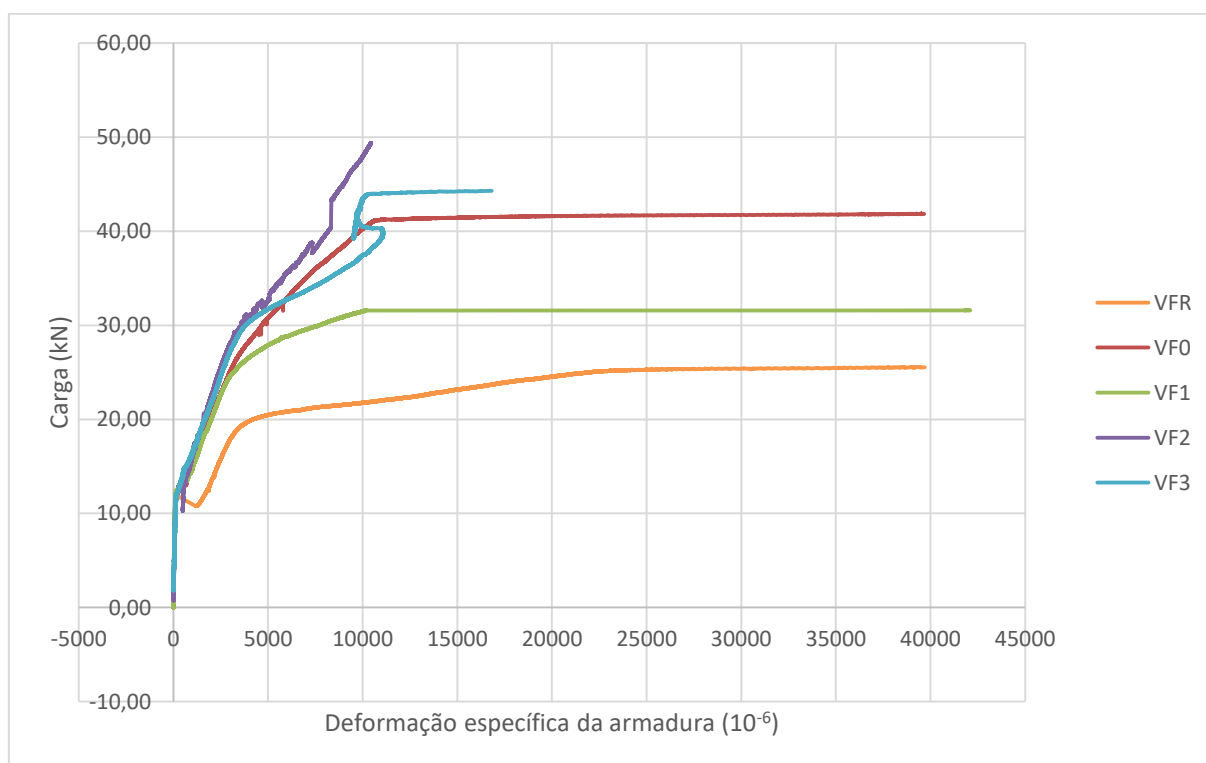
Com base no estudo experimental, será apresentado resultados de deformação específica na armadura, concreto e reforços, contribuindo para a análise do comportamento das vigas.

5.1.4.1 Deformações específicas nas armaduras

Além das modificações no comportamento das vigas quanto aos deslocamentos verticais, a aplicação de reforço à flexão na face tracionada possibilita que a resistência às tensões de tração da viga seja dividida entre a armadura e a fibra. Dessa forma, a presença de um elemento de reforço conduz a uma redução significativa da deformação específica na armadura e, conseqüentemente, à tensão que atua sobre a mesma.

A Figura 59 demonstra o comparativo de deformação específica da armadura de cada uma das vigas analisadas.

Figura 59 – Deformação específica da armadura – Grupo 1



Por meio dos resultados de tensão de escoamento do aço utilizado na armadura longitudinal, pôde-se observar que a carga de início de escoamento da armadura da viga de referência foi de 16,74 kN.

A viga reforçada VF0 confirmou que o reforço acarreta em um retardamento no escoamento do aço. Conforme os dados obtidos no ensaio experimental, o início do escoamento da armadura desta viga aconteceu com aproximadamente 23,73 kN, representando um aumento de 41,76% na carga, com relação à viga VFR.

Nas vigas reforçadas que possuem o mecanismo de ancoragem estudado também apresentaram resultados que confirmaram o aumento de carga para o início do escoamento da armadura. Foram observadas cargas de 23,54 kN, 26,7 kN e 25,7 kN para o início do escoamento da armadura das vigas VF1, VF2 e VF3, respectivamente.

Pode-se observar que para todas as vigas reforçadas, houve um aumento significativo na carga referente ao escoamento da armadura.

Observa-se também uma sensível redução na deformação específica da armadura de cada viga para uma carga de 16,74 kN, que representa o início do escoamento da viga de referência. Essa redução variou entre 50% e 60%. Estes valores, apresentados na Tabela 10, confirmam que a ação do reforço gera um retardamento no início do escoamento da armadura tracionada.

Tabela 10 – Comparação entre as cargas e deformações específicas no escoamento do aço – Grupo 1

Viga	Carga de início de escoamento da armadura (kN)	Diferença (%)	Deformação específica na carga de 16,74 kN (10^{-6})	Diferença (%)
VFR	16,74	-	2714,39	-
VF0	23,73	41,76	1320,23	-51,36
VF1	23,54	40,62	1358,54	-49,95
VF2	26,70	59,50	1072,30	-60,50
VF3	25,70	53,52	1073,24	-60,46

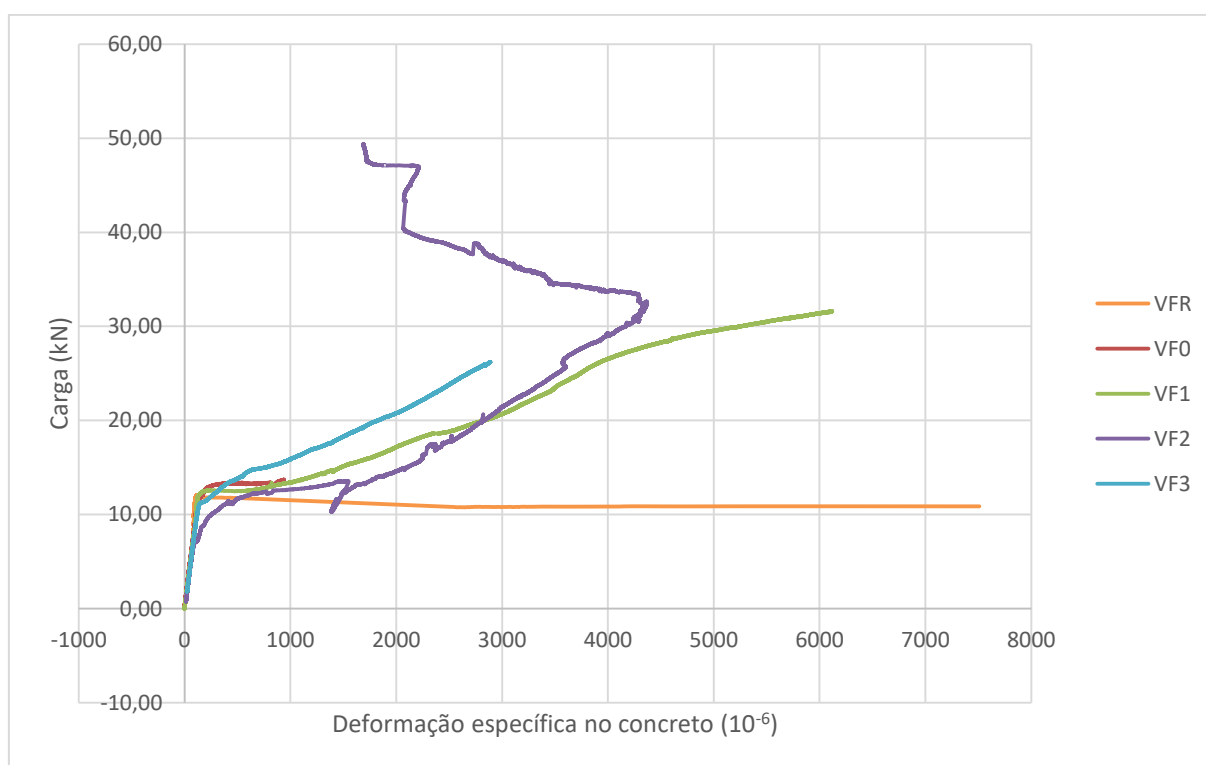
Por meio da análise dos demais resultados, é possível visualizar que a ação do reforço é considerável também após o escoamento do aço. Pode-se verificar que o compósito atenua grandes deformações. Conforme Beber (2003), a maior parcela do aumento da capacidade de carga é obtida após o início do escoamento da armadura, visto que a partir deste ponto o reforço passa a ser plenamente solicitado.

5.1.4.2 Deformações específicas no concreto

Os resultados das deformações específicas da superfície inferior das vigas analisadas apresentaram variações consideráveis. Isso aconteceu em função da dificuldade da manutenção do extensômetro em uma região que se conseguisse realizar a leitura da deformação sem danificá-lo.

A Figura 60 apresenta os resultados das deformações específicas do concreto em cada uma das vigas estudadas.

Figura 60 – Deformação específica no concreto – Grupo 1



Pode-se verificar que as deformações específicas do concreto tiveram grande variação quando comparadas as vigas. Entretanto, os pontos onde os valores das deformações dispararam, ou se perderam as leituras, foram próximo às cargas de fissuração.

Dessa forma, a variação dos valores justifica-se pela posição do extensômetro em relação às fissuras. Quando acontece o surgimento da fissura sob o extensômetro, este é danificado pela deformação excessiva.

Analisando os resultados, pode-se visualizar que, mesmo com a variação citada, conclui-se que a deformação específica no concreto das vigas reforçadas atinge valores maiores. Isso acontece pelo maior número de fissuras que a viga sem reforço apresenta.

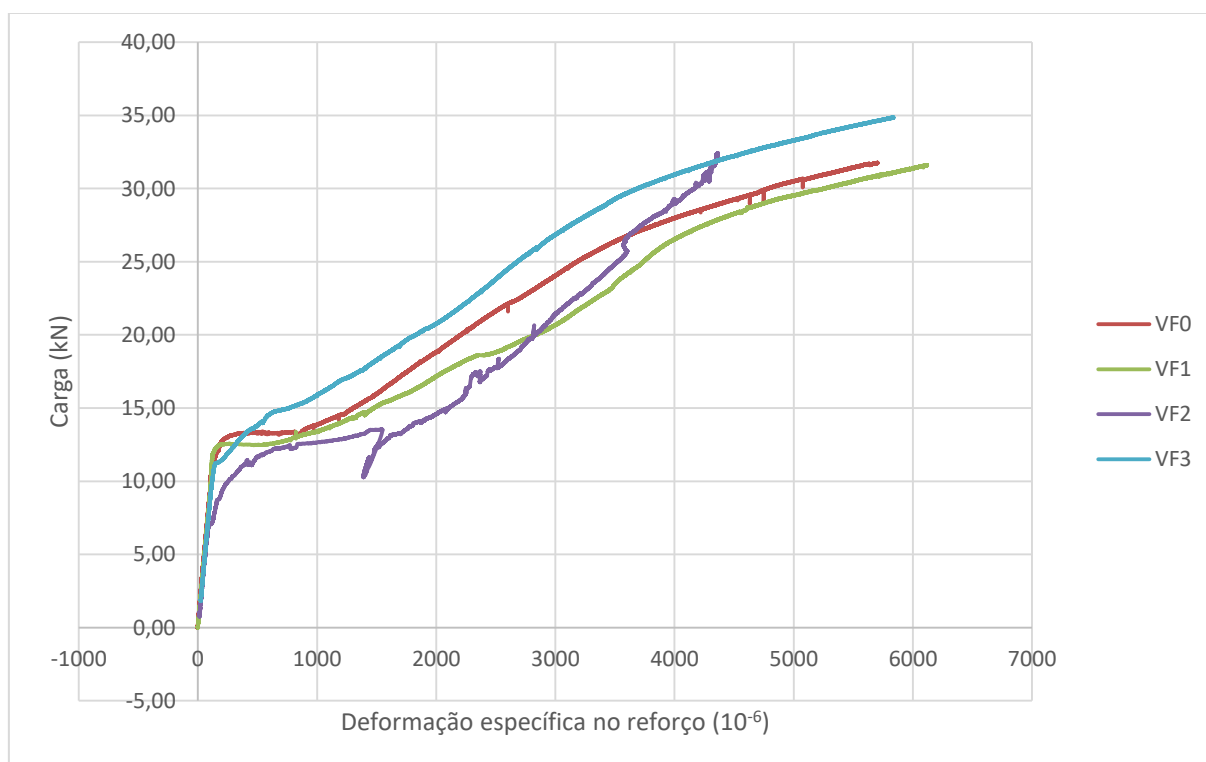
5.1.4.2 Deformações específicas no reforço

Analisando os resultados já apresentados, pode-se comprovar que a utilização de reforços em PRFC em vigas de carbono tem papel fundamental no aumento da rigidez e da resistência final das vigas.

Os valores de deformação específica do reforço obtidos nesta pesquisa visam complementar os efeitos ocorridos à aplicação das cargas.

A figura 61 apresenta o comparativo das deformações específicas ocorridas no compósito de PRFC.

Figura 61 – Deformação específica no reforço – Grupo 1



É possível observar que, assim como a armadura e o concreto, o reforço começa a se deformar consideravelmente após aplicação de 10 kN para todas as vigas. Pode-se verificar

inclusive, que o reforço tem sua atuação intensificada a partir da carga de início do escoamento de cada uma das vigas.

Entretanto, com estes resultados, não foi possível montar uma relação de semelhança entre as deformações do compósito e o sistema de ancoragem nas vigas VF1, VF2 e VF3 em relação à viga VF0.

5.1.5 Comportamento das vigas

O objetivo deste item é descrever o comportamento das vigas durante os ensaios experimentais, bem como apresentar, por meio de figuras, os modos de ruína e panoramas de fissuração observados na aplicação das cargas.

Estas análises estão apresentadas individualmente para cada viga.

5.1.5.1 Viga VFR

As vigas do Grupo 1 foram dimensionadas para atuarem até sua ruptura no domínio 2 de deformações. O modo de ruína ocorrido na viga de referência foi por deformação excessiva da armadura positiva (tracionada), até sua ruptura.

Figura 62 – Ruptura da armadura tracionada – Viga VFR

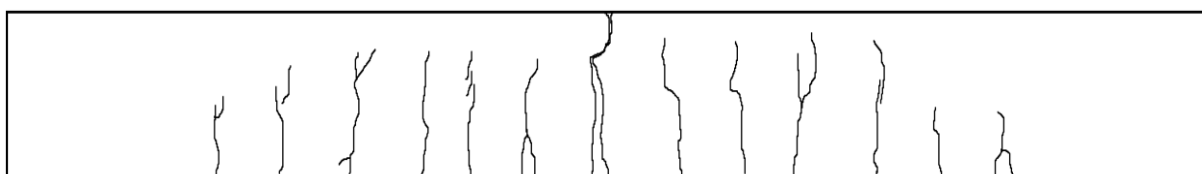


Instantes antes da ruptura, a viga apresentou grande número de fissuras por flexão com aberturas consideráveis. Também foi possível visualizar curvatura acentuada no vão. As Figura 63 e 64 ilustram o panorama de fissuração da viga.

Figura 63 – Fissuras – Viga VFR



Figura 64 – Panorama de fissuração – Viga VFR



5.1.5.2 Viga VF0

A viga reforçada com PRFC sem o sistema de ancoragem estudado teve como modo de ruptura o desprendimento do reforço em uma das extremidades. O tecido de fibras de carbono se destacou com uma fina camada de concreto aderida. A figura 65 demonstra o destacamento do reforço.

O desprendimento do reforço foi antecedido por estalos na ligação entre o reforço e o concreto e se iniciou na extremidade. É importante salientar que tal efeito aconteceu de forma repentina, impossibilitando o total aproveitamento das propriedades resistentes do tecido de PRFC.

Figura 65 – Desprendimento do reforço – Viga VF0

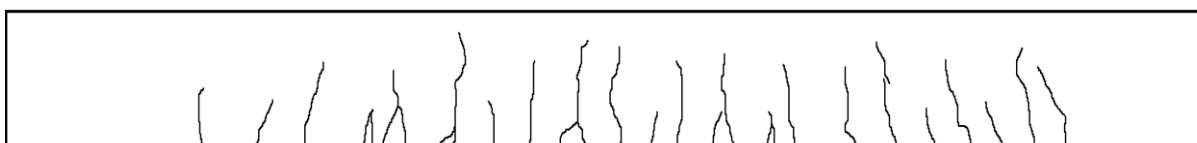


As Figuras 66 e 67 ilustram o panorama de fissuração.

Figura 66 – Fissuras – Viga VF0



Figura 67 – Panorama de fissuração – Viga VF0



Comparando-a com a viga VFR, é possível observar uma densidade maior de fissuras no vão da viga VF0, entretanto com aberturas menores.

5.1.5.3 Viga VF1

A viga VF1, reforçada à flexão com tecido de fibras de carbono e equipada com mecanismo de ancoragem nas extremidades apresentou no ensaio experimental um comportamento semelhante ao da viga VF0, porém sem o desprendimento do reforço. Na

aplicação da carga durante o ensaio, foi verificado um início de desprendimento no meio do reforço, caracterizados por estalos. Com o aumento dessa tendência ao desprendimento, e pelo seu impedimento provocado pelo mecanismo de ancoragem, a viga chegou à ruína por ruptura do reforço.

Verificou-se que a ruptura do reforço aconteceu em dois pontos simultaneamente, sendo que somente nas extremidades o PRFC ficou aderido ao substrato de concreto. Como já mencionado anteriormente, de acordo com a carga de ruptura, a viga em questão apresentou um incremento de resistência à flexão de cerca de 10,33% em relação à viga reforçada sem o mecanismo de ancoragem.

A Figura 68 apresenta a viga VF1 após a ruptura do reforço.

Figura 68 – Ruptura do reforço – Viga VF1



Após a ruína da viga foi possível avaliar o panorama de fissuração na face lateral do concreto, conforme apresentado nas Figuras 69 e 70.

Figura 69 – Fissuras – Viga VF1

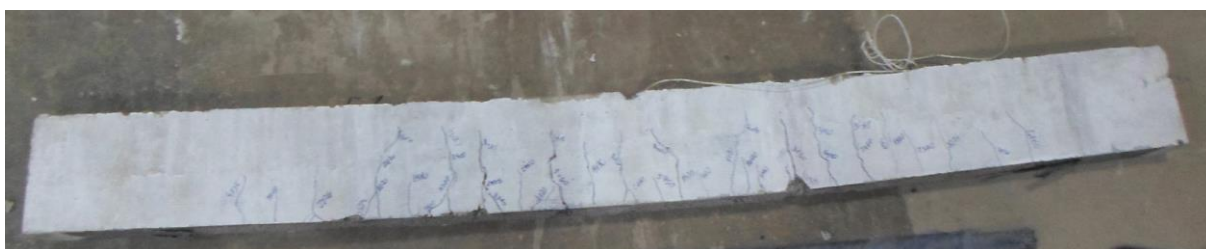
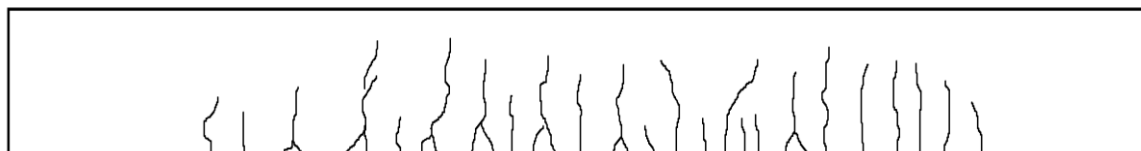


Figura 70 – Panorama de fissuração – Viga VF1



Observou-se semelhanças no panorama de fissuração das vigas reforçadas.

5.1.5.4 Viga VF2

A viga VF2 obteve a maior resistência aos esforços de flexão das vigas estudadas no Grupo 1. Em relação a viga VF0 pôde ser constatado um incremento de carga até a ruptura de aproximadamente 15,56%. Em relação à viga sem reforço, o acréscimo de carga foi de 71,74%.

A ruína da viga aconteceu de forma semelhante à viga VF1, com estalos característicos de desprendimento do reforço seguidos pela ruptura do tecido, conforme apresentado na Figura 71.

Figura 71 – Panorama de fissuração – Viga VF1



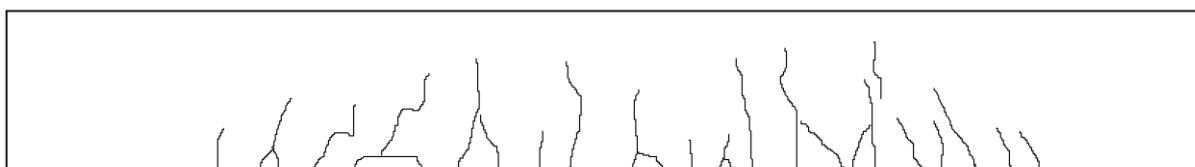
Conforme mencionado anteriormente, o incremento de resistência das vigas reforçadas com o sistema de ancoragem em estudo em relação pode ser consideravelmente maior com o aumento de camadas de PRFC. Essa afirmação pode ser justificada pelo modo de ruptura em que as vigas apresentaram.

As Figuras 72 e 73 apresentam o panorama de fissuração da viga VF2.

Figura 72 – Fissuras – Viga VF2



Figura 73 – Panorama de fissuração – Viga VF2



5.1.5.5 Viga VF3

A viga VF3 apresentou desempenho muito semelhante à viga VF1. Seu incremento de carga em relação à viga VF0 foi de aproximadamente 12,12%, e em relação à viga VFR de 66,63%.

A ruína da viga se deu pelo esgotamento da capacidade resistente de tração do reforço, seguido de seu rompimento. A Figura 74 ilustra a forma de ruptura do reforço.

Figura 74 – Ruptura do reforço – Viga VF3



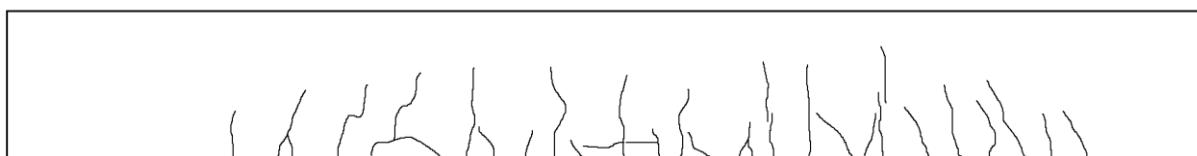
O rompimento do reforço à tração ocorreu próximo à extremidade, onde está posicionado o sistema de ancoragem. Esse fato evidencia que se não houvesse o mecanismo, é provável que a ruptura aconteceria por desprendimento do PRFC.

As Figuras 75 e 76 apresentam o panorama de fissuração ocorrido na viga VF3.

Figura 75 – Fissuras – Viga VF3



Figura 76 – Panorama de fissuração – Viga VF3



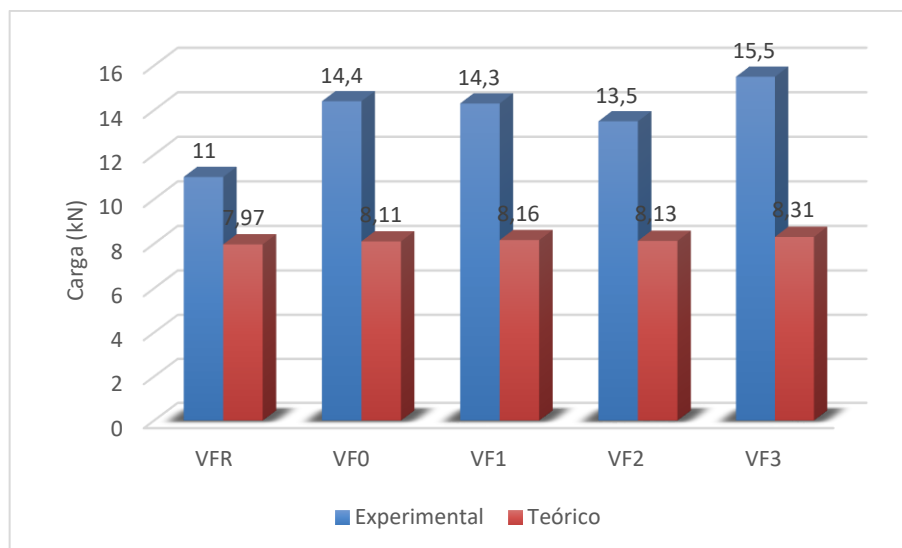
5.1.6 Comparação entre resultados teóricos e experimentais

Este capítulo tem como objetivo realizar um comparativo entre os resultados experimentais e os teóricos, determinados por meio de modelos analíticos apresentados no capítulo 3.

5.1.6.1 Carga de fissuração

Para a determinação da previsão teórica da carga de fissuração foram utilizados os conceitos apresentados pela NBR 6118 (2014), combinados com os modelos de cálculo baseados nos estudos realizados por Fortes (2000), Ferrari (2002) e Beber (2003).

O comparativo obtido pela carga teórica e a carga experimental de fissuração apresentou uma divergência entre os resultados, principalmente nas vigas reforçadas, conforme ilustrado pela Figura 77.

Figura 77 – Comparativo de cargas de fissuração (Teórico x Experimental) – Grupo 1

Através dos resultados, fez-se uma análise da variação apresentada pelos valores das cargas de fissuração obtidas em laboratório e as determinadas pelo modelo teórico utilizado na metodologia, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Variação entre as cargas teóricas e experimentais de fissuração– Grupo 1

Vigas	Carga de Fissuração (kN)		Variação (%)
	Experimental	Teórica	
VFR	11,00	7,97	37,94
VF0	14,40	8,11	77,56
VF1	14,30	8,16	75,24
VF2	13,50	8,13	66,05
VF3	15,50	8,31	86,52

Pode-se verificar que houve uma diferença considerável nos valores de cargas de fissuração entre a análise teórica e os resultados experimentais. Para a viga de referência, a variação foi de aproximadamente 38%, enquanto para as vigas reforçadas essa diferença foi de 75% em média.

Fortes (2000) apresentou em sua pesquisa que os valores das cargas de fissuração obtidas experimentalmente foram aproximadamente 30% superiores aos da análise numérica.

Ferrari (2002) analisou dois modelos teóricos, sendo que um deles é o proposto pela revisão NBR 6118 (2000). Em sua pesquisa, o autor verificou que a variação dos resultados experimentais para o modelo teórico foi de aproximadamente 44,13%, em média, para as vigas reforçadas.

Tanto na presente pesquisa quanto no estudo de Ferrari (2002) verificou-se que a diferença entre os resultados experimentais e os teóricos das vigas não reforçadas foram menores que para as vigas com reforço. Nesse contexto, pode-se considerar que as características dos materiais de reforço e suas variáveis são mais propícias às divergências para análises teóricas.

É importante destacar que, assim como mencionado anteriormente, a análise da fissuração realizada em laboratório foi feita de forma visual, por meio de monitoramento do surgimento da primeira fissura da região tracionada de cada viga. Esse fator deve ser levado em consideração visto que provavelmente as fissuras devem ter acontecidas antes da visualização realizada no ensaio, podendo minimizar a diferença apresentada.

Conforme Fortes (2000), para melhorar a precisão do registro da carga de fissuração nas vigas é interessante que seja montado um sistema específico de ensaios não destrutivo, com a utilização de ultrassom ou radar, por exemplo.

5.1.6.2 Carga de ruína por desprendimento do reforço

Para análise do comportamento das vigas reforçadas, foi realizado um comparativo da carga de ruína das vigas por desprendimento do reforço com o resultado experimental obtido no ensaio. Como somente a viga VF0 apresentou esse modo de ruptura, a análise foi feita exclusiva para esse caso.

Para a análise teórica, utilizou-se o modelo analítico simplificado proposto por Chen e Teng (2001) que visa determinar a máxima tensão normal atuante no reforço e, através do processo iterativo momento-curvatura, determinar a carga de desprendimento do reforço, ocasionando a ruína da viga.

A Tabela 12 apresenta o comparativo entre os valores teórico e experimental da carga de ruína por desprendimento do reforço. O roteiro de cálculo para determinação da carta teórica está apresentado no Apêndice A.

Tabela 12 – Comparativo entre os valores teórico e experimental das cargas de desprendimento do reforço – Grupo 1

Viga	Carga de desprendimento do reforço (kN)		Variação (%)
	Experimental	Teórica	
VF0	41,91	26,55	57,85

Nota-se nos resultados apresentados que houve uma divergência considerável no valor da carga de ruína obtido por meio do modelo teórico simplificado e o resultado encontrado através do ensaio em laboratório. Esse efeito pode ter relação com o fato de o modelo utilizado para a determinação da carga teórica não levar em consideração as características do adesivo e de sua colagem à superfície de concreto.

5.1.6.3 Carga de ruína das vigas

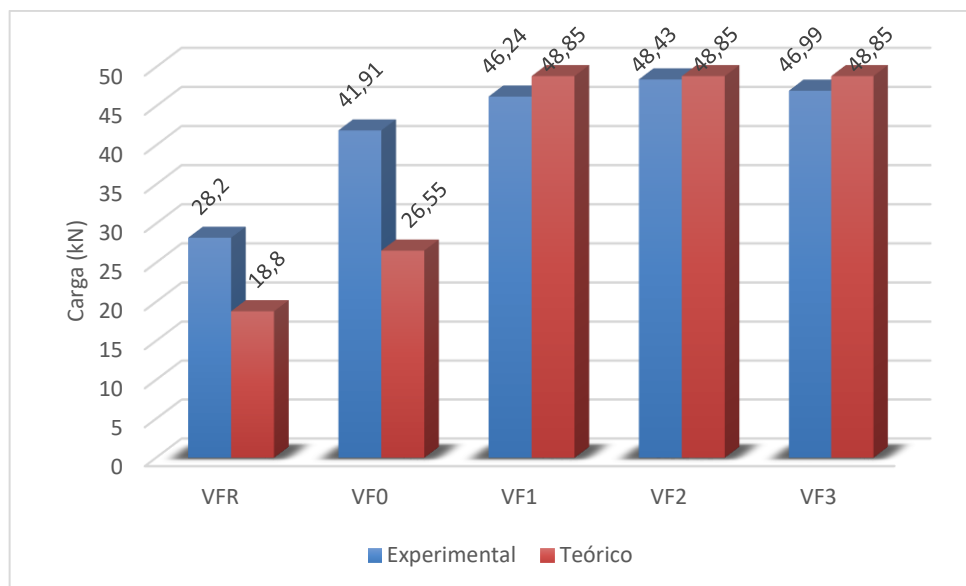
Através do processo iterativo momento-curvatura foi possível prever a ruína de cada uma das vigas estudadas, utilizando suas características mecânicas e geométricas.

Para essa análise, nas vigas que dispunham do mecanismo de ancoragem estudado, desprezou-se a possibilidade de desprendimento ou descolamento do reforço, obtendo-se a carga de ruína da viga considerando a utilização da capacidade máxima do tecido de fibra de carbono.

A Tabela 13 e a Figura 78 apresenta o comparativo entre as cargas de ruína obtidas através do modelo teórico e dos resultados experimentais.

Tabela 13 – Comparativo entre os valores teórico e experimental das cargas de ruína das vigas – Grupo 1

Viga	Carga de desprendimento do reforço (kN)		P_{exp} / P_{teo}
	Experimental	Teórica	
VFR	28,2	18,8	1,50
VF0	41,91	26,55	1,58
VF1	46,24	48,85	0,95
VF2	48,43	48,85	0,99
VF3	46,99	48,85	0,96

Figura 78 – Comparativo de cargas de fissuração (Teórico x Experimental) – Grupo 1

Através dos resultados obtidos, pode-se avaliar que as vigas reforçadas com tecido em fibras de carbono e que dispunham de mecanismo de ancoragem, tiveram sua carga de ruptura com intensidade muito próxima do valor obtido pelo modelo teórico.

Esse fato pode ser justificado pelo modo de ruptura das vigas VF1, VF2 e VF3. É importante salientar que o mecanismo de ancoragem por cordão de fibra de carbono impediu o descolamento ou desprendimento do tecido, fazendo com que a ruptura acontecesse pelo esgotamento da capacidade resistente do reforço.

Dessa forma, foi possível estimar a ruptura do reforço pelo alongamento limite da fibra de carbono que, segundo o fabricante, é de 1,7%.

5.2 VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO

O presente capítulo irá apresentar os resultados obtidos na pesquisa relacionados às vigas do Grupo 2 do programa experimental. As vigas do grupo mencionado foram reforçadas ao cisalhamento com faixas de tecido de fibras de carbono.

Cabe ressaltar que as intensidades de carga apresentadas neste grupo referem-se ao carregamento obtido da célula de carga. Considerando que para os ensaios proposto utilizou-se a aplicação de uma carga concentrada aplicada próxima à extremidade reforçada, a mesma deve ser compreendida como a carga obtida na leitura dos ensaios experimentais.

Para as vigas reforçadas ao cisalhamento com tiras de tecido de fibras de carbono orientadas à 90° em relação ao eixo da viga foram avaliadas as cargas de ruptura, deslocamentos verticais, deformação específica do aço, concreto e reforço, e por fim realizou-se um comparativo entre os valores teóricos e experimentais.

Em função das limitações dos equipamentos disponíveis no laboratório, as vigas foram reforçadas e instrumentadas somente em uma das extremidades, conforme apresentado no programa experimental.

Os itens seguintes apresentam os resultados das vigas estudadas, bem como suas análises.

5.2.1 Carga de ruptura

Para esta análise foram comparadas as cargas e o modo de ruína das vigas VFR, VF0-90, VC1, VC2 e VC3. A Tabela 14 apresenta os resultados de cada viga, relacionado com o modo de ruína.

Tabela 14 – Cargas de ruína das vigas reforçadas ao cisalhamento – Grupo 2

Viga	Carga (kN)	Incremento (%)	Modo de ruína
VCR	85,31	-	Cisalhamento
VC0-90	102,51	20,16	Descolamento do reforço
VC1	195,60	129,28	Arrancamento do mecanismo de ancoragem
VC2	312,91	266,79	Cisalhamento no trecho não reforçado
VC3	334,59	292,20	Cisalhamento do trecho não reforçado

Nota-se que a viga reforçada com PRFC sem o mecanismo de ancoragem obteve um aumento de resistência relativamente pequeno em relação à viga de referência VCR. Isso se deve à ocorrência do descolamento prematuro do compósito.

Beber (2003) explica que o descolamento do reforço está associado, entre outros fatores, a uma fissura diagonal de tração. Este descolamento acontece próximo à essa fissura. Após iniciado o descolamento do reforço, a ruína da viga acontece rapidamente, sendo que somente a aderência entre o compósito em PRFC e o substrato de concreto pode controlar esse colapso.

Chen, Teng e Chen (2013) afirmam que as vigas reforçadas ao cisalhamento com tiras laterais ou envolvimento em “U” costumam falhar por descolamento do compósito. Esse descolamento acontece, geralmente, de forma frágil, com pequenas fissuras. Em alguns casos,

os estribos da viga podem nem ter sido solicitados à tensão de escoamento do aço. Esses fatos podem reduzir significativamente os benefícios do reforço em PRFC.

Verifica-se nesse caso que a aderência entre o compósito e o substrato de concreto da viga VC0-90 não foi eficiente ao ponto de retardar significativamente o colapso da viga. As análises das deformações dos materiais componentes da viga devem complementar as conclusões.

Analizando as vigas reforçadas e que dispunham do mecanismo de ancoragem composto pela inserção do cordão de fibras de carbono, verificou-se um incremento de resistência significativo. Exceto a viga VC1, que apresentou acréscimo de carga de 129,28%, as demais vigas com esse mecanismo obtiveram carregamento de ruptura em média 279,50% maior que a viga de referência.

Beber (2003), em sua pesquisa experimental, analisou vigas reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC com envolvimento em “U”. Nesta pesquisa, o autor observou o colapso das vigas do referido grupo por descolamento do reforço e seu incremento de ancoragem, para as três vigas estudadas, foi de 72,9%, 119,3% e 63,3%.

Em outro grupo, Beber (2003) analisou o mesmo sistema de reforço, porém com envolvimento completo das tiras, evitando o descolamento do compósito. Para estas vigas o colapso aconteceu por ruptura do reforço, e tiveram como incremento de resistência 104,4%, 123,6% e 146,2% em relação à viga de referência.

Menon (2008) analisou em sua pesquisa, vigas reforçadas com tiras de fibras de carbono orientadas à 90° em relação ao eixo da viga, aplicadas com envolvimento completo. Para estas vigas, foi observado colapso por flexão, sem descolamento ou ruptura do reforço. Nestes casos o acréscimo de resistência foi de 51% em média.

5.2.2 Contribuição do PRFC

Considerando os conceitos utilizados pelos códigos normativos de dimensionamento de elementos de concreto armado, reforçados com PRFC, com relação ao esforço cortante, tem-se:

$$V_u = V_c + V_{sw} + V_f \quad (5.1)$$

em que: V_u : Força cortante última;

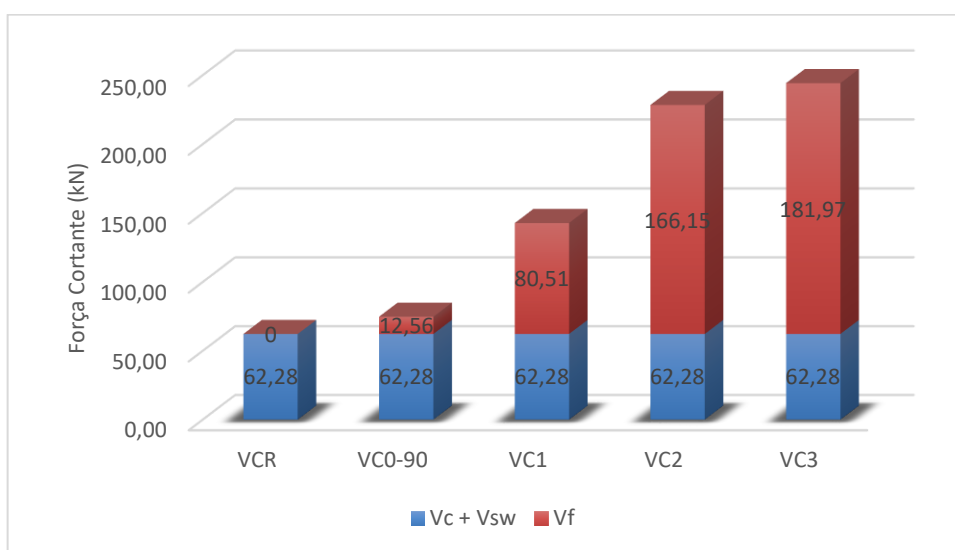
V_c : Contribuição do concreto;

V_{sw} : Contribuição da armadura transversal, e;

V_f : Contribuição do PRFC.

A Figura 79 apresenta o valor da força cortante última de cada viga, bem como as parcelas de contribuição do concreto, aço e reforço. O valor da contribuição do concreto e do aço foram obtidos através do resultado da viga de referência.

Figura 79 – Contribuição do concreto, aço e PRFC das vigas



Nota-se, através dos resultados, que a ancoragem do reforço é um fator preponderante na eficiência do sistema, e que pode levar a resultados satisfatórios.

5.2.3 Comportamento das vigas

Neste é apresentado o aspecto final de cada viga analisada, para que seja possível observar o modo de ruptura e o panorama de fissuração ocorrido.

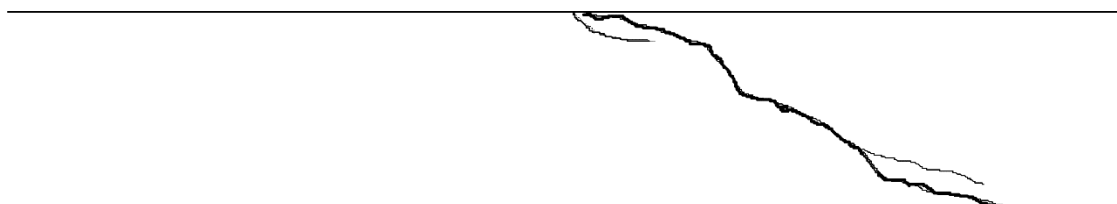
A viga de referência foi à ruptura após o desenvolvimento de fissura diagonal, iniciada no apoio até próximo ao ponto de aplicação da carga. Esta fissura se propagou no decorrer da aplicação da carga. A ruína da viga se deu com o esgotamento da capacidade resistente da armadura transversal.

As Figuras 80 e 81 apresentam o modo de ruptura e o panorama de fissuração da viga VCR após o colapso.

Figura 80 – Modo de ruptura – Viga VCR



Figura 81 – Panorama de fissuração – Viga VCR



Para a viga reforçada ao cisalhamento, porém sem a inserção do sistema de ancoragem, verificou-se uma ruptura prematura, ocasionada pelo descolamento do reforço. Tal descolamento se iniciou da tira mais distante do ponto de aplicação da carga, e se difundiu para as demais tiras com o acréscimo de carga ao longo do ensaio. A Figura 82 demonstra o descolamento do reforço no colapso da viga.

Figura 82 – Descolamento do reforço – Viga VC0-90



Pode-se verificar que houve o surgimento de uma fissura diagonal com dimensões consideráveis, iniciada do apoio da viga e terminada no ponto de aplicação da carga. Esta fissura cruzou as tiras de PRFC que, em seu descolamento, destacou pedaços de concreto da viga próximo à fissura.

Além da diagonal, algumas fissuras de flexão surgiram desde as cargas mais baixas, porém de dimensões pequenas e concentradas próximo ao ponto de aplicação da carga. As Figuras 83 e 84 apresentam o panorama de fissuração da viga VC0-90.

Figura 83 – Fissuras – Viga VC0-90



Figura 84 – Panorama de fissuração– Viga VC0-90



As vigas reforçadas com PRFC e compostas pelo mecanismo de ancoragem estudado tiveram comportamentos iniciais semelhantes, porém com modo de ruptura distintos. As fissuras foram características de cisalhamento.

A viga VC1 apresentou colapso originado pelo arrancamento do cordão de ancoragem inserido no concreto, fazendo com que o reforço perdesse sua capacidade resistente. Cabe ressaltar que esse arrancamento foi facilitado pela formação de fissuras nas proximidades da ancoragem. A Figura 85 ilustra o reforço destacado após o colapso da viga.

Figura 85 – Panorama de fissuração– Viga VC1



Nota-se que houve, durante o carregamento, o desenvolvimento de muitas fissuras características de força cortante. Estas fissuras se desenvolveram de forma mais acentuada após a carga aplicada ultrapassar os 100 kN. As Figuras 86 e 87 ilustram o panorama de fissuração após seu colapso.

Figura 86 – Fissuras – Viga VC1



Figura 87 – Panorama de fissuração – Viga VC1

Verificou-se também o surgimento de fissuras de flexão na região tracionada do concreto, entretanto com pequenas espessuras.

O modo de ruína apresentado na viga VC2 foi de ruptura da armadura transversal no trecho não reforçado. No trecho composto pelas tiras de PRFC, desenvolveu-se poucas e pequenas fissuras provenientes de cisalhamento, algumas fissuras provocadas por flexão e não houve o descolamento ou deslocamento do reforço, conforme apresentado pelas Figuras 88 e 89.

Figura 88 – Fissuras – Viga VC2**Figura 89 – Panorama de Fissuração – Viga VC2**

Para a viga VC3, apesar da carga de ruptura ser semelhante, a viga apresentou fissuras por cisalhamento em maior número e mais acentuadas. Curiosamente o colapso se deu

simultaneamente pela ruptura do estribo no trecho não reforçado e pelo deslocamento do concreto na região de ancoragem do reforço. A Figura 90 apresenta a viga VC3 após a ruína e a Figura 91 ilustra o seu panorama de fissuração.

Figura 90 – Ruína da viga – Viga VC3



Figura 91 – Panorama de fissuração – Viga VC3



Outro fato importante ocorrido durante a execução dos ensaios é que, para todas as vigas equipadas com o mecanismo de ancoragem, quando a leitura da carga chegou a aproximadamente 100 kN, iniciou-se um início de descolamento do reforço na parte central das tiras. Comparando esse fato com a carga de ruína da viga VC0-90, pode-se concluir que, se não houvesse nenhum sistema de ancoragem, provavelmente o reforço iria descolar com um carregamento próximo a referida carga.

Tais fatos mostram que o mecanismo de ancoragem atuou impedindo o descolamento do reforço, cumprindo o objetivo de seu emprego.

5.2.4 Deslocamento vertical

A análise da rigidez das vigas reforçadas ao cisalhamento com tiras perpendiculares ao eixo se fez de maneira análoga às vigas reforçadas à flexão. Tentou-se analisar, através de

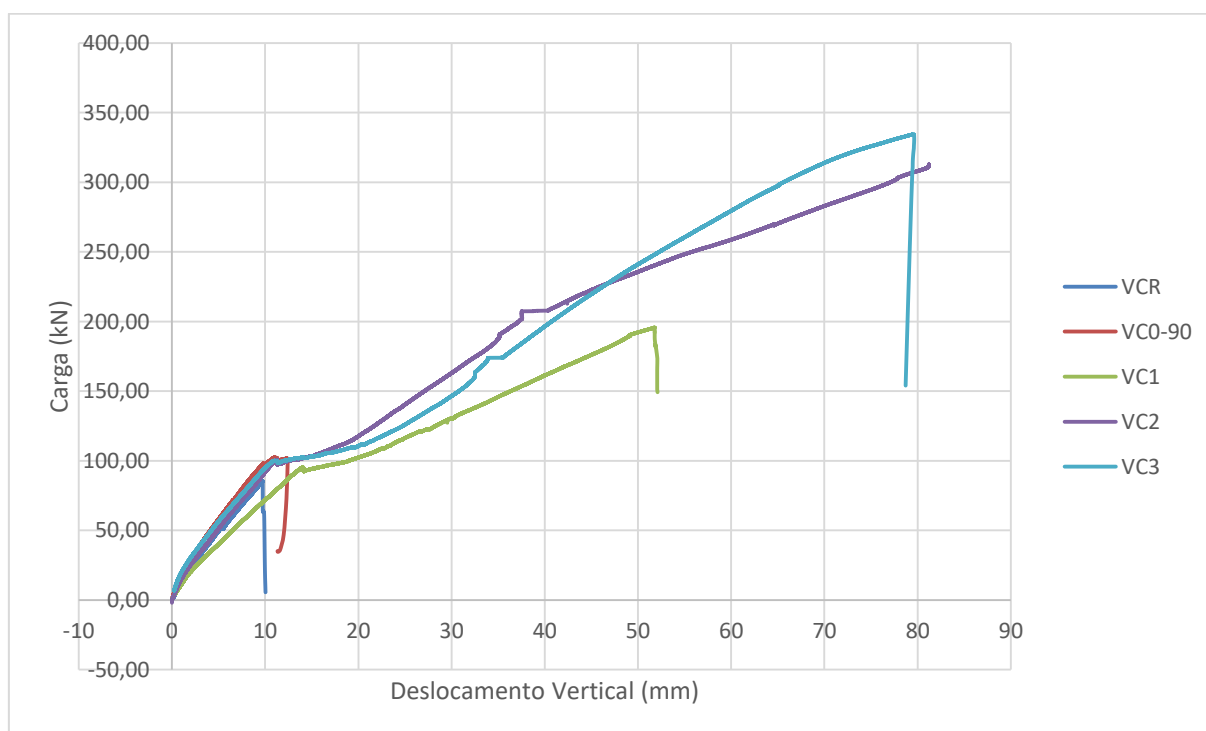
gráficos de carga e deslocamento, o incremento de rigidez das vigas reforçadas composta por o mecanismo de ancoragem estudado.

É possível avaliar que o reforço utilizado aumente significativamente a ductilidade das vigas. Com a utilização do mecanismo de ancoragem, e consequentemente o incremento de resistência, pôde-se observar deslocamentos consideravelmente maiores no ponto de colapso, comparando com a viga de referência.

Entretanto, verificou-se que as vigas tiveram comportamento semelhante quanto à sua rigidez, até aproximadamente 100 kN de carga. Nesse sentido, semelhante à conclusão obtida por Beber (2003), é impossível qualquer consideração quanto à uma possível elevação da rigidez das vigas ocasionadas pela aplicação do reforço.

A Figura 92 apresenta, através dos dados obtidos durante o ensaio, o comparativo de deslocamentos verticais entre as vigas estudadas.

Figura 92 – Deslocamento vertical das vigas reforçadas à 90° – Grupo 2



5.2.5 Deformação específica do aço

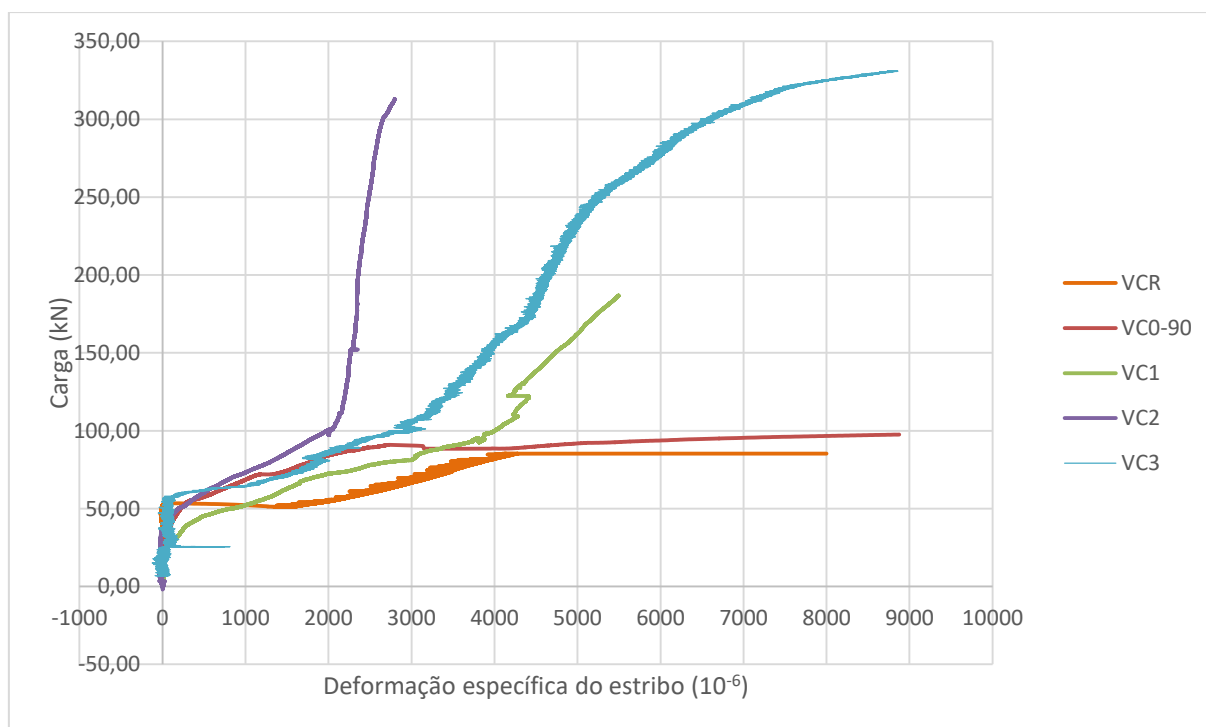
Através da verificação das deformações específicas dos estribos, foi possível observar a contribuição do sistema de reforço utilizado para minimizar as tensões na armadura transversal.

Menon (2008) explica que, em sua pesquisa, a nenhuma contribuição dos estribos foi observada antes da fissuração diagonal. Entretanto, após o início da fissura, a qual aconteceu com carregamento de aproximadamente 40 kN, os estribos começam a se deformar até o escoamento ou a ruptura.

Verifica-se, através dos resultados, que a contribuição dos estribos nas primeiras cargas é praticamente nula. Após o surgimento das primeiras fissuras de cisalhamento, que ocorreram com cargas entre 40 kN e 50 kN, o aço iniciou sua deformação até o escoamento ou ruptura.

A Figura 93 apresenta o comparativo das deformações específicas do aço durante a aplicação do carregamento.

Figura 93 – Deformação específica do estribo nas vigas reforçadas à 90° – Grupo 2



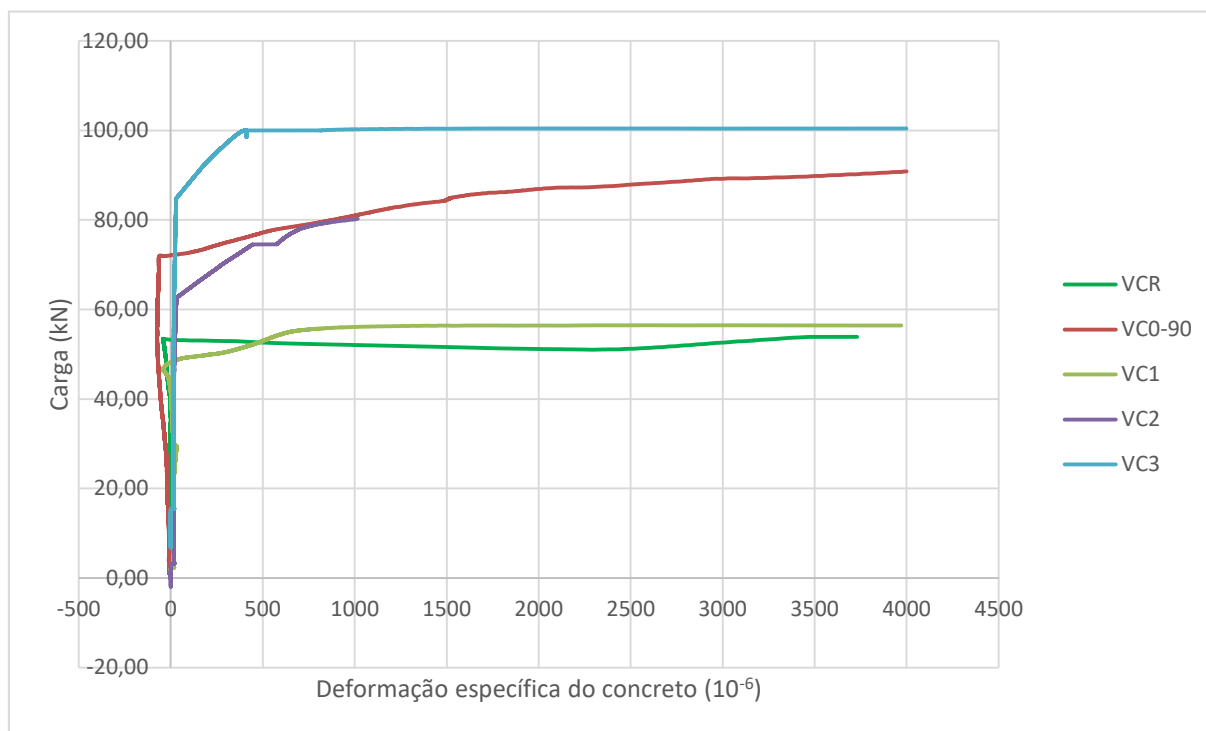
5.2.6 Deformação específica do concreto

Assim como nos resultados apresentados nas vigas do grupo 1, as deformações específicas do concreto se mostraram variabilidade considerável nas cargas referentes ao início da deformação.

Nota-se que as vigas que dispunham do sistema de ancoragem tiveram deformações iniciais no concreto com valores maiores que as demais. Presume-se que o sistema de reforço inicia sua atuação com cargas inferiores, retardando a contribuição do concreto.

A Figura 94 apresenta o comparativo entre as deformações do concreto das vigas estudadas.

Figura 94 – Deformação específica do concreto nas vigas reforçadas à 90° – Grupo 2



5.2.7 Deformação específica do reforço

As deformações específicas do reforço foram observadas para analisar a contribuição do compósito na resistência das vigas quanto aos esforços de cisalhamento. A Figura 95 demonstra o comparativo das deformações específicas das fibras durante a aplicação do carregamento.

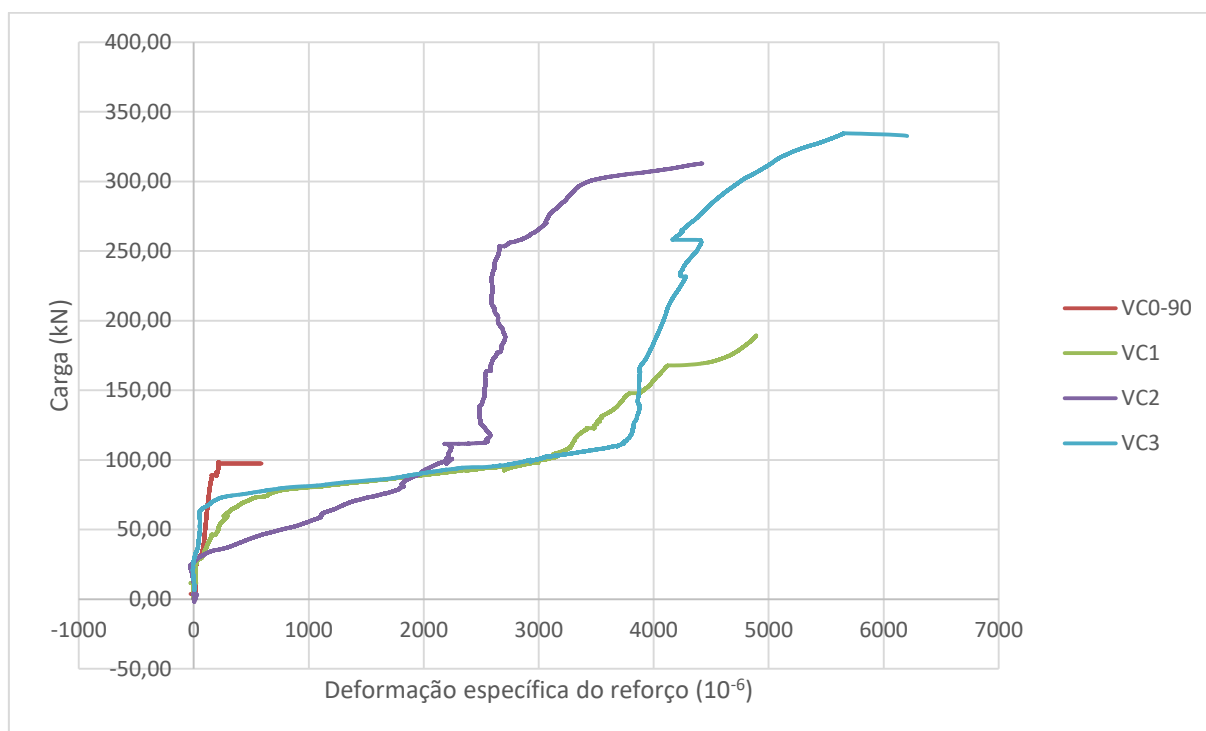
Verificou-se que as deformações dos reforços se iniciaram logo nas primeiras cargas, a partir de 30 kN, porém foram mais expressivos após o carregamento referente ao surgimento da primeira fissura de cisalhamento.

É possível observar que logo após o início da contribuição do reforço na viga VC0-90, houve o descolamento do compósito, impossibilitando o aproveitamento de sua capacidade resistente.

Para as vigas VC1, VC2 e VC3, constatou-se dois estágios de deformação. O primeiro aconteceu após a carga do surgimento da primeira fissura diagonal, e se estendeu até uma possível carga de descolamento do compósito, com aproximadamente 100 kN (baseada no

descolamento ocorrido na viga VC0-90). Já no segundo estágio, verificou-se uma atuação maior do reforço, caracterizado pela minoração do crescimento da deformação, combinado com o acréscimo de carga repentino.

Figura 95 – Deformação específica do reforço nas vigas reforçadas à 90° – Grupo 2



Após os dois estágios, o desenvolvimento das deformações se estendeu até o colapso da viga, que tem como modos de ruptura os apresentados no item 5.2.1.3.

5.2.8 Comparação entre os resultados teóricos e experimentais

Para a realização do comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente com os valores determinados através das expressões analíticas, foram utilizados critérios das normas vigentes.

Nos modelos analíticos, a determinação da contribuição do concreto e da armadura transversal foi realizada utilizando-se os fundamentos da NBR 6118 (2014), no modelo 1. A contribuição do reforço foi obtida pelos critérios na ACI 440.2R (2008) e pela Fib-Bulletin 14 (2004).

Como o objetivo desta análise é prever a carga de ruptura do elemento estrutural através do modelo analítico, optou-se por não utilizar qualquer coeficiente de segurança proposto pelos códigos normativos.

O comparativo entre os valores obtidos através do modelo analítico para a contribuição do concreto e do aço da armadura transversal com o resultado experimental, é mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparativo dos valores teóricos e experimentais da viga VCR – Grupo 2

Viga	Teórico				Experimental		Exp. / Teór.
	V _c (kN)	V _{sw} (kN)	V _u (kN)	P _u (kN)	V _u (kN)	P _u (kN)	
VC0	37,77	20,22	57,99	79,44	62,28	85,31	1,07

Considerando que o objetivo da pesquisa é analisar o sistema de ancoragem do reforço, utilizaram-se as prescrições normativas como se houvesse o envolvimento completo do compósito. Para o caso da ACI 440.2R (2008), e deformação específica do reforço utilizada foi limitada em 0,4%.

A Tabela 16 apresenta a comparação dos resultados experimentais e os obtidos nos modelos analíticos. Para tal comparativo, foi utilizada a NBR 6118 (2014) para a contribuição do concreto e do aço, e a ACI 440.2R (2008) e Fib-Bulletin 14 (2004) para avaliar a contribuição do reforço.

Tabela 16 – Comparativo dos valores teóricos e experimentais da viga VCR – Grupo 2

Vigas	Experimental				Teórico							
					ACI 440 2.R (2008)				Fib-Bulletin 14 (2004)			
	V _f (kN)	V _c +V _{sw} (kN)	V _u (kN)	P _u (kN)	V _f (kN)	V _u (kN)	P _u (kN)	Exp./ Teór.	V _f (kN)	V _u (kN)	P _u (kN)	Exp./ Teór.
VC0-90	12,55		74,83	102,51				0,97				1,18
VC1	80,51	62,28	142,79	195,60	19,02	77,01	105,49	1,85	5,39	63,38	86,82	2,25
VC2	166,14		228,42	312,91				2,97				3,60
VC3	181,97		244,25	334,59				3,17				3,85

Beber (2003) verificou uma relação média entre os valores experimentais e teóricos de 1,52 para reforços em tecidos aplicados em “U”, com tiras orientadas a 90° e de 1,85 para tiras com envolvimento completo.

Menon (2008), observou uma relação de 1,41 em média, utilizando as prescrições da ACI 440 (2002), e de 1,63 considerando a Fib-Bulletin (2004). Para ambos os casos o reforço foi aplicado através de faixas orientadas a 90° com envolvimento completo.

Na análise do mecanismo de ancoragem por cordão de fibras de carbono, objeto de estudo deste trabalho, verificaram-se resultados satisfatórios quanto à comparação carga de ruptura dos modelos teóricos com os valores experimentais.

Pode-se observar resultado acima de 300% de incremento de carga sobre o valor teórico recomendado pela ACI 440.2R (2008), nas vigas em que foi utilizado o sistema de ancoragem. A média da relação entre os resultados experimentais e teóricos para este caso foi de 266%.

Comparando com as prescrições da Fib-Bulletin 14 (2004), essa diferença é ainda maior. A diferença entre o resultado obtido no ensaio e o previsto pela norma foi de 385% para uma das vigas.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa sobre a utilização de mecanismo de ancoragem por cordão de fibras de carbono em vigas reforçadas com tecido em PRFC. Para as análises foram ensaiadas 10 vigas de concreto armado com seção retangular de 12 x 25mm, divididas em dois grupos: o grupo 1 é composto por cinco vigas que foram reforçadas aos esforços de flexão; o grupo 2 possui cinco vigas compostas por reforços de cisalhamento. Através dos resultados obtidos experimentalmente, chegou-se às conclusões citadas a seguir.

6.1.1 Vigas reforçadas à flexão – Grupo 1

Conforme já apresentado em outras bibliografias, constatou-se um excelente desempenho das vigas reforçadas com fibra de carbono quanto ao incremento de capacidade de carga e ductilidade das vigas.

A viga reforçada sem o mecanismo de ancoragem proposto apresentou modo de ruptura frágil, caracterizado pelo desprendimento do tecido em fibra de carbono do substrato de concreto. Porém, com a inserção do sistema de ancoragem composto por cordão de fibra de carbono, as vigas estudadas apresentaram colapso caracterizado pela ruptura do reforço.

Com a utilização do sistema de ancoragem, foi possível atingir acréscimo de capacidade de carga de 67,44%, em média. Considerando que as extremidades (nas ancoragens) não sofreram nenhum dano, e que o reforço foi composto por uma camada somente, esse percentual de incremento de carga pode ser maior com a adição de um número de camadas maior no reforço.

O comportamento das vigas reforçadas quanto aos deslocamentos verticais foi semelhante entre as vigas com e sem o mecanismo de ancoragem. As vigas que dispunham do mecanismo tiveram pequena vantagem do aumento de rigidez.

A leitura das deformações específicas mostrou que o reforço nas vigas acaba retardando o início do escoamento do aço e também diminui a deformação no concreto.

O método analítico para a determinação da carga de desprendimento do reforço proposto por Chen e Teng (2001) não apresentou valor semelhante ao obtido experimentalmente. Com

isso, após realizada a análise teórica, a escolha pela utilização de somente uma camada de reforço resultou em um incremento de carga pouco significativo das vigas com o mecanismo de ancoragem em relação a viga VF0.

Na comparação da previsão teórica através do processo iterativo momento – curvatura com os resultados experimentais, verificou-se proximidades entre os valores das vigas compostas pelo mecanismo de ancoragem. Esse efeito se deve ao fato de a carga de ruptura teórica levar em consideração a deformação limite do compósito, combinando com o modo de ruptura apresentado pelas vigas.

Por fim, verifica-se que o sistema estudado pode possibilitar o aproveitamento da capacidade máxima de tração do reforço, sem o descolamento ou desprendimento do compósito.

6.1.2 Vigas reforçadas ao cisalhamento – Grupo 2

Para as vigas reforçadas com tiras de manta de fibra de carbono sem a utilização do mecanismo de ancoragem, observou-se um modo de ruptura prematuro, caracterizado pelo descolamento do reforço.

As vigas compostas por reforços em tiras orientadas à 90° em relação ao seu eixo utilizando o sistema de ancoragem em suas extremidades, com envolvimento em “U”, apresentaram colapso caracterizado pelo arrancamento do cordão de fibras de carbono, ou por cisalhamento no trecho não reforçado.

Como em nenhum dos casos das vigas reforçadas ao cisalhamento foi observada a ruptura do reforço, e em todas constatou-se o arrancamento do mecanismo de ancoragem, conclui-se que se tal mecanismo for instalado ligando as duas extremidades laterais da viga em um só cordão, essa ruptura deve ser retardada até a ruína de um dos elementos.

Observou-se incremento de capacidade resistente das vigas compostas pelo sistema de ancoragem de até 292 %. Também foi verificado aumento de ductilidade das vigas.

As vigas que utilizaram o mecanismo de ancoragem apresentaram panorama de fissuração mais evidente, com grande densidade de fissuras.

Na análise comparativa dos resultados teóricos e experimental, as prescrições propostas Fib-Bulletin 14 (2004) se mostraram mais conservadoras. Mesmo assim, os valores obtidos pela ACI 440.2R (2008) foram muito distantes dos resultados experimentais das vigas com o mecanismo de ancoragem.

6.1.3 Considerações finais

Com base no estudo apresentado observou-se que o sistema de ancoragem de reforço em PRFC composto por cordão de fibras de carbono é uma alternativa viável para a utilização em vigas de concreto armado.

Por meio das análises, verificou-se uma contribuição considerável em relação ao aumento da capacidade de carga e da ductilidade dos elementos estruturais.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através das análises realizadas na presente pesquisa, pode-se elencar algumas possibilidades de linhas de estudo para complementar as avaliações sobre o mecanismo de ancoragem proposto:

- a) estudo do comportamento de vigas reforçadas à flexão com várias camadas de manta de fibra de carbono, utilizando o mecanismo de ancoragem, induzindo que a ruptura aconteça na ancoragem, avaliando sua capacidade resistente total;
- b) avaliação da distribuição de tensões de aderência na ligação entre o reforço e o substrato de concreto, utilizando o mecanismo de ancoragem;
- c) análise da influência da profundidade da aplicação do mecanismo de ancoragem para a capacidade resistente do sistema;
- d) análise da influência da posição da inserção do sistema de ancoragem em elementos reforçados;
- e) avaliação da capacidade resistente do mecanismo de ancoragem, com a utilização de diversas camadas de reforços, orientando a ruptura no sistema de cordão por fibras, através de ensaios de tração.

7 REFERÊNCIAS

A.S.FORTES et al. Eficiência do reforço de CFRP em estruturas de concreto sob efeito térmico. In: V SIMÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, [s.l.], 2003.

ALMEIDA, Sandra Penha de Souza. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro.** 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **318:** Building Code Requirements for Structural Concrete. Detroit: Aci Committee 318, 2005.

_____. **ACI 440.2R:** Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete st. Farmington Hills, 2008.

ARAÚJO, Caroline Maia. **Reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto com tecidos de fibra de carbono.** 2002. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ARQUEZ, Ana Paula. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado.** 2010. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT NBR 6118:** Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 1978.

_____. **ABNT NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **ABNT NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ABNT NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **ABNT NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ABNT NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

AZEVEDO, Diogo Manuel Marques. **Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP - Recomendações para dimensionamento.** 2008. 238 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto, Porto, 2008.

BARROS, Joaquim A. O.; FORTES, Adriano S.. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. **Cement & Concrete Composites**, Guimarães, p.471-480, 2004.

BEBER, Andrei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.** 2003. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russel. **Resistência dos Materiais.** 3. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar.** 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BORBA, Maria Isabel Santos. **Comportamento da ligação CFRP/betão em estruturas de betão armado.** 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

BREÑA, Sergio F.; MCGUIRK, Geoffrey N.. Advances on the Behavior Characterization of FRP-Anchored Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) She. **International Journal Of Concrete Structures And Materials.** [s.l.], p. 3-16. mar. 2013.

CARVALHO, João Dirceu Nogueira de. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, [s.l.], v. 17, p.19-28, 2008.

CHAHROUR, Ali; SOUDKI, Khaled. Flexural response of reinforced concrete beams strengthened with end-anchored partially bonded carbo. **Journal Of Composites For Construction.** [S.l.], p. 170-177. abr. 2005.

CHEN, G. M.; TENG, J. G.; CHEN, J. F.. Shear Strength Model for FRP-Strengthened RC Beams with Adverse FRP-Steel Interaction. **Journal Of Composites For Construction**. [S.l.], p. 50-66. fev. 2013.

CHEN, G.m.; TENG, J.g.; CHEN, J.f.. Process of debonding in RC beams shear-strengthened with FRP U-strips or side strips. **International Journal Of Solids And Structures**. [S.l.], p. 1266-1282. fev. 2012.

CHEN, J. F.; TENG, J. G.. Anchorage strenght models for FRP and steel plates bonded to concrete. **Journal Of Structural Engineering**. [S.l.], p. 784-791, 2001.

CHEN, J. F.; TENG, J. G.. Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture. **Journal Of Structural Engineering**. [S.l.], p. 615-625. maio 2003.

COLOMBI, Pierluigi; FAVA, Giulia; POGGI, Carlo. End debonding of CFRP wraps and strips for the strengthening of concrete structures. **Composite Structures**. [s.l.], p. 510-521, 2014.

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE. **CNR-DT 200**: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento static. Roma, 2004.

COSTA, Natasha Cristina da Silva; OLIVEIRA, Dênio Ramam Carvalho de. Avaliação experimental de sistemas de ancoragem para CFRP. **Estudos Tecnológicos**, [s. L.], v. 5, n. 2, p.130-146, 2009.

DIAS, Salvador J. E.; JUVANDES, Luís F. P.; FIGUEIRAS, Joaquim A.. Efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistem, Guimarães, v. 19, p.41-54, 2004.

ESCOBAR, Celcio José. **Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de CFRP tensionadas**. 2003. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **BULLETIN 14**: Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. Patras, 2004.

FERRARI, Vladimir José. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem**. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FERRARI, Vladimir José; PADARATZ, Ivo José. **Modos de preparação da superfície de concreto de vigas para execução de reforço à flexão com fibras de carbono**. 2004. Cesumar, Maringá, 2004.

FONSECA, Tatiana de Cássia Coutinho Silva da. **Reforço e incremento de rigidez à flexão de ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldad.** 2007. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FORTES, Adriano S.; BARROS, Joaquim A. O.; PADARATZ, Ivo J.. **Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento.** Guimarães: Universidade do Minho, 2002.

FORTES, Adriano Silva. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono.** 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GALLARDO, Sílvia Maria Ascensão Guedes. **Reforço à flexão em vigas de concreto utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono.** 2002. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GAMINO, André Luís. **Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP.** 2007. 285 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GARCEZ, Mônica Regina et al. A comparative study of reinforced concrete beams strengthened with glass, carbon and aramid fibers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 2005.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras.** 2007. 267 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GRELLE, Stephen V.; SNEED, Lesley H.. Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates. **International Journal Of Concrete Structures And Materials.** [s.l.], p. 17-33. mar. 2013.

JUVANDES, Luís Filipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de "CFRP".** 1999. 396 f. Tese (Doutorado) - Universidade do Porto, Porto, 1999.

KANG, Thomas H.-k. et al. A State-of-the-Art Review on Debonding Failures of FRP Laminates Externally Adhered to Concrete. **International Journal Of Concrete Structures And Materials.** [s.l.], p. 123-134. jun. 2012.

KHALIFA, A. et al. Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement. **Concrete International: Design And Construction,** [s.l.], v. 21, n. 10, p.49-54, out. 1999.

KHALIFA, A. et al. Anchorage of surface mounted FRP reinforcement. **Design And Construction**. [S.l.], p. 49-54. out. 1999.

KIM, Sung; JIRSA, James O.; BAYRAK, Oguzhan. Anchorage of Carbon Fiber-Reinforced Polymer on Side Faces of Reinforced Concrete Beams to Provide Continuity. **Aci Structural Journal**. [S.l.], p. 1089-1098. dez. 2013.

LUCA, Luis César Siqueira de. **Cisalhamento em vigas de concreto armado reforçadas com compostos de fibras de carbono: avaliação de critérios de projeto**. 2006. 265 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MAADDAWY, Tamer El; SOUDKI, Khaled. Strengthening of reinforced concrete slabs with mechanically-anchored unbonded FRP system. **Construction And Building Materials**, [S.l.], p.444-455, set. 2007.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Pini, 2002.

MARINI, Marcio Vinicius. **Avaliação da aderência entre o concreto e o sistema de reforço com fibra de carbono**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MENDES, Rui Veloso; SILVACOSTA, António da. Sistemas de Ancoragem para Laminados CFRP em elementos de Betão Armado. **Encontro Nacional Betão Estrutural**, Lisboa, out. 2010.

MENEGHEL, Juliana Martinelli. **Análise experimental da aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono**. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MENEGHETTI, Leila Cristina. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida**. 2007. 277 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MENON, Nara Villanova. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. 2008. 332 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MENON, Nara Villanova; PADARATZ, Ivo José. Desempenho de duas técnicas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado através de inserção de laminados de CFRP. **Revista Tecnológica**, [S.l.], v. 17, p.19-28, 2008.

MOLINA, Maritzabel et al. Comportamiento de la interfaz concreto-epoxi-FRP utilizando la FRP utilizando la teoría de mezclas serie/paralelo. **Ingeniería e Investigación**. [S.l.], p. 26-39. dez. 2011.

SANTIAGO, Pedro Miguel da Costa. **Estudo experimental da resistência de aderência entre CFRP e betão em elementos sujeitos a cargas de.** 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

SARTURI, Francis Diego Moretto. **Simulação computacional de estruturas de concreto reforçadas com aço e compósitos de fibra de carbono.** 2014. 234 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SILVA, Augusto Ottoni Bueno da. **Reforço à Flexão de Vigas de Concreto de Elevada Resistência por Meio da Colagem de Manta Polimérica Reforçada com Fibras de Carbono.** 2001. 405 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SILVA, Augusto Ottoni Bueno da; MORENO JÚNIOR, Armando Lopes; FERREIRA, Gisleiva Cristina dos Santos. Capacidade resistente e modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com fibras de carbono. **Engenharia Civil.** [S.l.], p. 297-303. set. 2012.

SILVA, Juliano Rodrigues da. **Reforço híbrido à flexão de vigas “T” de concreto armado com compósitos de fibras de carbono e fibra.** 2014. 245 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SOUZA, Rafael Alves de; FERRARI, Vladimir José. Automatic design of flexural strenghtening of reinforced concrete beams using fiber reinforced polymers (FRP). **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 34, n. 2, p.157-165, jun. 2012.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço dc estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998.

VAZ, Nelson L. F.; AGUIAR, José L. B.; CAMÕES, Aires. Influência da Temperatura no Comportamento de Elementos de Betão Armado Reforçados à Flexão com Laminados de CFRP. **Engenharia Civil - Um**, Azurém, p.45-54, 2005.

VENTURA, Ana Mafalda F.m.. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, [s. L.], v. 21, n. 3/4, p.10-19, 2009.

YUAN, Hong; WU, Zhishen; YOSHIZAWA, Hiroyuki. Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminated. **Structural Eng. / Earthquake Eng.** [s.l.], p. 27-39. abr. 2001.

APÊNDICE A – Carga de ruína por desprendimento do reforço

Roteiro de cálculo:

- Coeficiente de largura do reforço $\rightarrow \beta_P = \sqrt{\frac{2 \frac{b_f}{b_w}}{1 + \frac{b_f}{b_w}}} \rightarrow \beta_P = 0,894$

Dados:	
$b_f = 80 \text{ mm}$	$b_w = 120 \text{ mm}$

- Comprimento de ancoragem $\rightarrow L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_{ck}}}} \rightarrow L_e = 79,43 \text{ mm}$

Dados:		
$E_f = 230.000 \text{ MPa}$	$t_f = 0,167 \text{ mm}$	$f_{ck} = 37,07 \text{ MPa}$

- Comprimento de ancoragem $\rightarrow \beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen}\left(\frac{\pi \cdot L}{2 \cdot L_e}\right) & \text{se } L < L_e \end{cases} \rightarrow \beta_L = 1$

- Força para desprendimento do reforço $\rightarrow P_f = 0,427 \cdot \beta_P \cdot \beta_L \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_f L_e$
 $P_f = 14.775,45 \text{ N}$

- Carga de ruína da viga por desprendimento do reforço (processo iterativo momento-curvatura) $\rightarrow P_r = 26.550 \text{ N}$

Viga: VF0

Seção transversal

b (mm)	120,00
h (mm)	250,00
cg (mm)	125,00

Armadura Inferior

d (mm)	221,85
A _s (mm ²)	62,34

Armadura Superior

d' (mm)	28,15
A _s ' (mm ²)	62,34

Manta de PRFC

d _f (mm)	251,99
A _f	13,36

Dados do Concreto

f _{ck} (MPa)	37,07
-----------------------	-------

Aço CA-50

E (MPa)	210.000,00
f _y (MPa)	557,10
R _y (N)	34.732,35

E (MPa)

E (MPa)	230.000,00
f _t (MPa)	4.000,00
R _t (N)	53.440,00
ε _{ti,lim} (‰)	17,00

					R _s (N)										
θ	ε _c (‰)	x (mm)	R _c (N)	ε _s (‰)	linear	patamar	R _s (N)	ε _s ' (‰)	R _s ' (N)	ε _f (‰)	R _f (N)	R=R _c +R _s +R _s '+R _f	Z (mm)	M (N.mm)	P _r (N)
0	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00	0,00
0,5	0,07355	36,78	5942,27	-0,37015	-4846,16	-34732,35	-4846,16	0,01725	225,84	-0,430437	-1322,65	-0,00069	12,30	1328907,19	3257,13
1	0,14790	36,98	11863,44	-0,7395	-9681,85	-34732,35	-9681,85	0,0353	462,16	-0,860074	-2642,84	0,00092	12,40	2653860,17	6504,56
1,5	0,22306	37,18	17758,76	-1,10804	-14506,94	-34732,35	-14506,94	0,05416	709,09	-1,288901	-3960,53	0,00037	12,51	3974283,90	9740,89
2	0,29908	37,39	23629,38	-1,47572	-19320,76	-34732,35	-19320,76	0,07388	967,27	-1,716868	-5275,59	0,00029	12,63	5290210,43	12966,20
2,5	0,37600	37,60	29474,31	-1,8425	-24122,80	-34732,35	-24122,80	0,0945	1237,23	-2,143935	-6587,88	0,00085	12,74	6601440,59	16180,00
3	0,45385	37,82	35290,49	-2,20835	-28912,67	-34732,35	-28912,67	0,11605	1519,38	-2,570072	-7897,32	-0,00012	12,86	7907555,17	19381,26
3,5	0,53269	38,05	41078,76	-2,57321	-33689,57	-34732,35	-33689,57	0,13859	1814,48	-2,995219	-9203,71	-0,00004	12,99	9208527,36	22569,92
4	0,58903	36,81	43496,32	-2,96057	-38761,06	-34732,35	-34732,35	0,13863	1815,00	-3,442866	-10579,24	-0,00026	12,61	9771856,52	23950,63
4,5	0,63828	35,46	44985,93	-3,35502	-43925,37	-34732,35	-34732,35	0,13158	1722,70	-3,897603	-11976,55	-0,00027	12,17	10127298,52	24821,81
5	0,68705	34,35	46484,16	-3,74995	-49095,96	-34732,35	-34732,35	0,12405	1624,12	-4,35282	-13375,35	0,00059	11,82	10480735,08	25688,08
5,5	0,73550	33,43	47986,87	-4,1452	-54270,74	-34732,35	-34732,35	0,1162	1521,34	-4,808357	-14775,12	0,00074	11,53	10832431,48	26550,08

APÊNDICE B – Processo iterativo momento – curvatura

Vigas: VFR

Seção transversal

b (mm)	120,00
h (mm)	250,00
cg (mm)	125,00

Armadura Inferior

d (mm)	221,85
A _s (mm ²)	62,34

Armadura Superior

d' (mm)	28,15
A _s ' (mm ²)	62,34

Dados do Concreto

f _{ck} (MPa)	37,06
-----------------------	-------

Aço CA-50

E (MPa)	210.000,00
f _y (MPa)	557,10
R _y (N)	34.732,35

					R _s (N)								
θ	ε _c (‰)	x (mm)	R _c (N)	ε _s (‰)	linear	patamar	R _s (N)	ε _s ' (‰)	R _s ' (N)	R=R _c +R _s +R _s '	Z (mm)	M (N.mm)	P _r (N)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,13297	33,24	9611,06	-0,75443	-9877,32	-34732,35	-9877,32	0,02037	266,69	0,000425778	11,14	2076727,83	5090,02
2	0,26858	33,57	19152,48	-1,50622	-19720,08	-34732,35	-19720,08	0,04338	567,95	0,000348562	11,32	4142112,46	10152,24
3	0,40705	33,92	28619,41	-2,25515	-29525,39	-34732,35	-29525,39	0,06925	906,65	0,000663142	11,51	6195283,54	15184,52
4	0,51638	32,27	33868,16	-3,03322	-39712,22	-34732,35	-34732,35	0,06598	863,84	-0,000348103	11,01	7308082,30	17911,97
5	0,58585	29,29	34433,29	-3,85115	-50420,91	-34732,35	-34732,35	0,02285	299,16	0,00010886	10,03	7351655,86	18018,76
6	0,65143	27,14	35048,33	-4,67297	-61180,53	-34732,35	-34732,35	-0,02417	-316,44	-0,000458215	9,32	7387461,74	18106,52
7	0,714335	25,51	35698,57	-5,497465	-71975,18	-34732,35	-34732,35	-0,073865	-967,07	-0,000844869	8,79	7418651,57	18182,97
8	0,77534	24,23	36374,57	-6,32386	-82794,70	-34732,35	-34732,35	-0,12546	-1642,58	-0,00035506	8,38	7446888,53	18252,18
9	0,83495	23,19	37067,93	-7,15165	-93632,48	-34732,35	-34732,35	-0,17845	-2336,34	-0,00075733	8,04	7472890,38	18315,91
10	0,89355	22,34	37774,80	-7,98045	-104483,49	-34732,35	-34732,35	-0,23245	-3043,34	-0,000878135	7,77	7497345,78	18375,85
11	0,95143	21,62	38492,38	-8,80997	-115343,92	-34732,35	-34732,35	-0,28717	-3759,75	0,000282972	7,55	7520726,62	18433,15
12	1,00877	21,02	39215,35	-9,64003	-126211,42	-34732,35	-34732,35	-0,34243	-4483,24	-0,00023983	7,36	7542946,69	18487,61
13	1,06576	20,50	39943,05	-10,47044	-137083,51	-34732,35	-34732,35	-0,39804	-5211,31	-0,000612841	7,20	7564375,17	18540,14
14	1,12255	20,05	40674,44	-11,30105	-147958,21	-34732,35	-34732,35	-0,45385	-5942,00	9,51369E-05	7,07	7585232,46	18591,26
15	1,17924	19,65	41407,03	-12,13176	-158834,22	-34732,35	-34732,35	-0,50976	-6674,00	0,000685345	6,95	7605469,28	18640,86
16	1,2359	19,31	42137,91	-12,9625	-169710,63	-34732,35	-34732,35	-0,5657	-7406,39	-0,000826708	6,85	7624925,59	18688,54
17	1,29267	19,01	42869,31	-13,79313	-180585,59	-34732,35	-34732,35	-0,62153	-8137,34	-0,000376088	6,77	7644094,81	18735,53
18	1,3496	18,74	43598,68	-14,6236	-191458,46	-34732,35	-34732,35	-0,6772	-8866,19	0,000141654	6,70	7662797,06	18781,37
18,5	1,3781	18,62	43959,80	-15,0388	-196894,44	-34732,35	-34732,35	-0,705	-9230,16	-0,002710857	6,67	7671632,56	18803,02

Viga: VF1, VF2 e VF3

Seção transversal		Armadura Inferior		Armadura Superior		Manta de PRFC	
b (mm)	120,00	d (mm)	221,85	d' (mm)	28,15	d _f (mm)	251,99
h (mm)	250,00	A _s (mm ²)	62,34	A _s ' (mm ²)	62,34	A _f	13,36
cg (mm)	125,00	Aço CA-50				E (MPa) 230.000,00	
Dados do Concreto		E (MPa) 210.000,00				f _t (MPa) 4.000,00	
f _{ck} (MPa) 37,07		f _y (MPa) 557,10				R _t (N) 53.440,00	
		R _y (N) 34.732,35				ε _{r, lim} (‰) 17,00	

					R _s (N)								Z	M (N.mm)	P _r (N)
θ	ε _c (‰)	x (mm)	R _c (N)	ε _s (‰)	linear	patamar	R _s (N)	ε _s ' (‰)	R _s ' (N)	ε _f (‰)	R _f (N)	R=R _c +R _s +R _s '+R _f	(mm)		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,14790	36,98	11863,44	-0,7395	-9681,85	-34732,35	-9681,85	0,0353	462,16	-0,860074	-2642,84	0,000916374	12,40	2653860,17	6504,56
2	0,29908	37,39	23629,38	-1,47572	-19320,76	-34732,35	-19320,76	0,07388	967,27	-1,716868	-5275,59	0,000293505	12,63	5290210,43	12966,20
3	0,45385	37,82	35290,49	-2,20835	-28912,67	-34732,35	-28912,67	0,11605	1519,38	-2,570072	-7897,32	-0,000123855	12,86	7907555,17	19381,26
4	0,58903	36,81	43496,32	-2,96057	-38761,06	-34732,35	-34732,35	0,13863	1815,00	-3,442866	-10579,24	-0,000257941	12,61	9771856,52	23950,63
5	0,68705	34,35	46484,16	-3,74995	-49095,96	-34732,35	-34732,35	0,12405	1624,12	-4,35282	-13375,35	0,000585541	11,82	10480735,08	25688,08
6	0,78376	32,66	49492,01	-4,54064	-59448,01	-34732,35	-34732,35	0,10816	1416,08	-5,264084	-16175,48	0,000263555	11,29	11182671,48	27408,51
7	0,88012	31,43	52505,90	-5,33168	-69804,65	-34732,35	-34732,35	0,09192	1203,46	-6,175698	-18976,68	0,00032532	10,93	11879756,54	29117,05
8	0,97674	30,52	55515,75	-6,12246	-80157,88	-34732,35	-34732,35	0,07594	994,24	-7,087052	-21777,09	0,00054864	10,67	12572842,64	30815,79
9	1,07405	29,83	58513,91	-6,91255	-90502,08	-34732,35	-34732,35	0,06065	794,06	-7,997716	-24575,38	0,000232081	10,49	13262248,58	32505,51
10	1,1724	29,31	61495,81	-7,7016	-100832,66	-34732,35	-34732,35	0,0464	607,49	-8,90734	-27370,47	0,000472435	10,36	13948219,63	34186,81
11	1,27207	28,91	64455,94	-8,48933	-111145,96	-34732,35	-34732,35	0,03347	438,20	-9,815644	-30161,51	0,000288791	10,29	14630640,39	35859,41
12	1,37333	28,61	67390,66	-9,27547	-121438,44	-34732,35	-34732,35	0,02213	289,74	-10,722358	-32947,66	0,000383099	10,24	15309460,60	37523,19
13	1,47643	28,39	70295,30	-10,05977	-131706,84	-34732,35	-34732,35	0,01263	165,36	-11,627232	-35728,16	0,000150232	10,24	15984417,70	39177,49
14	1,58163	28,24	73165,51	-10,84197	-141947,74	-34732,35	-34732,35	0,00523	68,47	-12,530006	-38502,20	-0,000562193	10,26	16655220,91	40821,62
15	1,68924	28,15	75999,00	-11,62176	-152157,08	-34732,35	-34732,35	0,00024	3,14	-13,43037	-41268,84	0,000956703	10,30	17321784,56	42455,35
16	1,79951	28,12	78786,37	-12,39889	-162331,60	-34732,35	-34732,35	-0,00209	-27,36	-14,328074	-44027,31	-0,000645363	10,38	17983148,78	44076,35
17	1,91285	28,13	81525,99	-13,17295	-172465,93	-34732,35	-34732,35	-0,00135	-17,67	-15,222708	-46776,34	-0,000369293	10,47	18639266,34	45684,48
18	2,02965	28,19	84209,52	-13,94355	-182554,96	-34732,35	-34732,35	0,00285	37,31	-16,113882	-49514,74	-0,000251026	10,60	19289278,61	47277,64
19	2,1504	28,29	86828,66	-14,7102	-192592,27	-34732,35	-34732,35	0,011	144,02	-17,001106	-52241,00	-0,000668351	10,75	19932329,83	48853,75

APÊNDICE C – Carga teórica de fissuração

Seção Transversal		Armadura Positiva		Armadura Positiva		Reforço	
b (mm)	120	A _s (mm ²)	62,34	A's (mm ²)	62,34	A _f (mm ²)	13,36
h (mm)	250	d (mm)	221,85	d' (mm)	221,85	d _f (mm)	251,99
cg (mm)	125	E _s (MPa)	210.000,00	E _s (MPa)	210.000,00	E _f (MPa)	230.000,00
						A _a (mm ²)	152,80
						d _a (mm)	250,96
						E _a (MPa)	3.800,00

Viga	f _{ck} (MPa)	f _{ct} (MPa)	E _c (MPa)	α _s	α _a	α _f	x (mm)	I (mm ⁴)	M _r (Nmm)	P _r (N)
VFR	37,07	1,63	36.200	5,80	0,10	6,35	127,28	162875120,7	3253597,02	7974,50
VF0	37,06	1,63	36.150	5,81	0,11	6,36	127,69	166505399,8	3336703,44	8178,19
VF1	37,55	1,65	37.100	5,66	0,10	6,20	127,62	166247167,3	3358986,68	8232,81
VF2	37,31	1,64	37.000	5,68	0,10	6,22	127,63	166273735,5	3345382,15	8199,47
VF3	38,61	1,68	37.600	5,59	0,10	6,12	127,59	166116411,4	3418265,79	8378,10

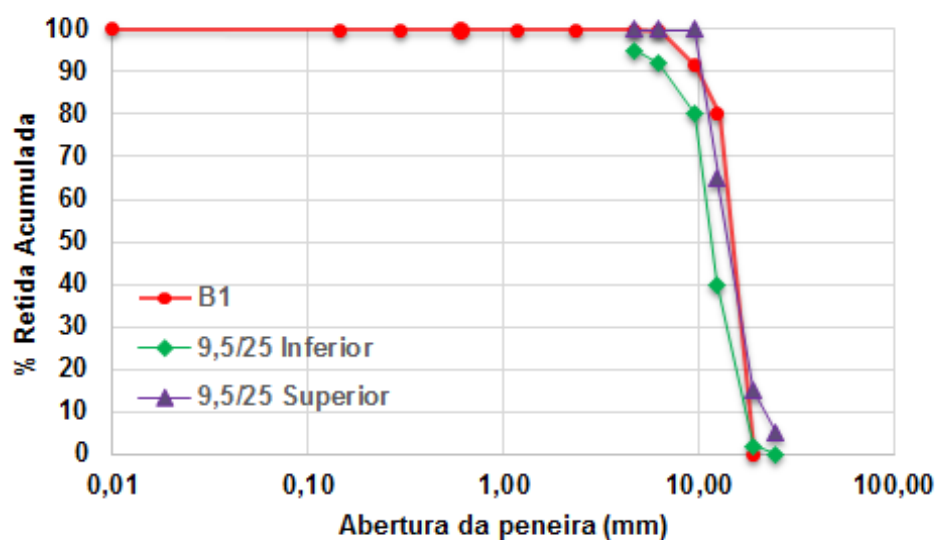
APÊNDICE D – Caracterização dos agregados

Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	(%) Retida Média*	% Retida Acumulada
37,5	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00
25	0,00	0,00
19	0,00	0,00
12,5	80,23	80,23
9,5	11,31	91,54
6,3	8,20	99,74
4,75	0,15	99,88
2,36	0,00	99,89
1,18	0,00	99,89
0,60	0,00	99,89
0,30	0,00	99,89
0,15	0,00	99,89
FUNDO	100,00	100,00
Módulo de finura:	6,91	
Dimensão máxima característica:	19 mm	

* Resultado médio de duas determinações.

Curva granulométrica do agregado graúdo



Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo

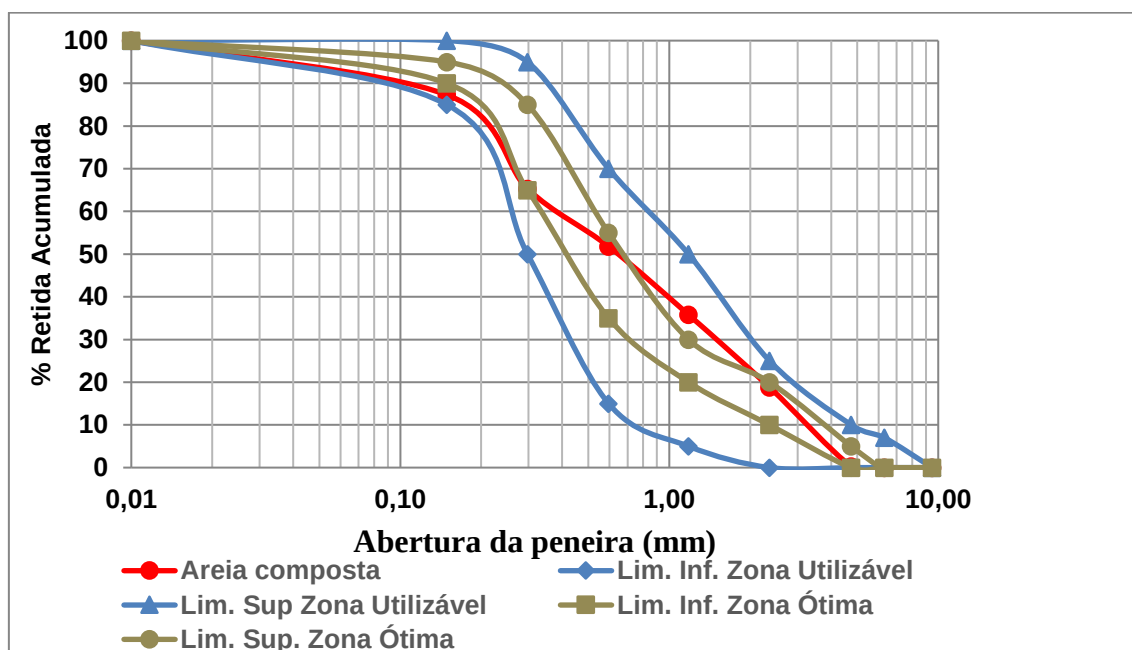
Massa específica (g/cm ³)	2,83
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,67
Material fino que passa através da peneira 75 µm (%)	1,45

Composição granulométrica do agregado miúdo composto

Abertura da peneira (mm)	(%) Retida Média*	% Retida Acumulada
9,5	0	0
6,3	0,00	0,00
4,75	0,30	0,30
2,36	18,50	18,80
1,18	17,00	35,80
0,60	16,00	51,80
0,30	13,50	65,30
0,15	22,00	87,30
FUNDO	12,70	100,00
Módulo de finura:	2,59	
Dimensão máxima característica:	4,75 mm	

* Resultado médio de duas determinações.

Curva granulométrica do agregado miúdo composto



Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo composto

Massa específica (g/cm ³)	2,81
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,89
Material fino que passa através da peneira 75 µm (%)	10,44